

ДАНИЕЛА БОРИСОВА

Уреди за ношно виждане

Моделиране
и оптимално проектиране



ИЗДАТЕЛСТВО НА БАН
„Проф. МАРИН ДРИНОВ“

Даниела Борисова

**УРЕДИ ЗА НОЩНО ВИЖДАНЕ
МОДЕЛИРАНЕ И ОПТИМАЛНО
ПРОЕКТИРАНЕ**



**BULGARIAN ACADEMIE OF SCIENCES
INSTITUTE OF INFORMATION AND COMMUNICATION
TECHNOLOGIES**

Daniela Borissova

**NIGHT VISION DEVICES
MODELING & OPTIMAL DESIGN**

Sofia • 2015

**“Prof. Marin Drinov” Publishing House of Bulgarian
Academy of Sciences**

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И
КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ

Даниела Борисова

**УРЕДИ ЗА НОЩНО ВИЖДАНЕ
МОДЕЛИРАНЕ И ОПТИМАЛНО
ПРОЕКТИРАНЕ**

София • 2015
ИЗДАТЕЛСТВО НА БАН „Проф. МАРИН ДРИНОВ“

Настоящата монография е изготвена с финансовата помощ на Договор № 316087 Съвременните пресмятания в полза на иновацията (Advanced Computing for Innovation), финансиран по Седма рамкова програма на ЕС за научни изследвания, технологично развитие и демонстрационни дейности.

© Институт по информационни и комуникационни технологии, 2015

© Даниела Иванова Борисова, автор, 2015

© Константин Атанасов Жеков, художник на корицата, 2015

© Издателство на БАН „Проф. Марин Дринов“, 2015

ISBN 978-954-322-821-8

СЪДЪРЖАНИЕ

Предговор.....	IX
Глава I Уреди за нощно виждане – принцип на действие, видове и приложение.....	1
1.1. Типове УНВ, в зависимост от използваната технология	2
1.2. Основни елементи на УНВ.....	4
1.3. Електронно-оптични преобразуватели (ЕОП)	6
1.3.1. Поколения ЕОП.....	8
1.3.2. Сравнителен анализ между поколенията ЕОП.....	14
1.4. Типове УНВ според предназначението, конструкцията и наличието на допълнителна ИЧ подсветка.....	19
1.4.1. Активни и пасивни УНВ.....	19
1.4.2. Монокуларни, биокуларни и бинокуларни УНВ	21
1.4.3. Очила за нощно виждане (ОНВ).....	23
1.4.4. Нощни прицели за стрелково оръжие	26
1.4.5. Нощни бинокли	27
1.5. Оптични системи, използвани в УНВ	28
1.6. Развитие на изследванията в областта на УНВ	31
1.6.1. Методи за тестване на параметрите на УНВ	32
1.6.2. Оптимизация и УНВ	39
1.6.3. Методи и средства за обучение на потребителите.....	42
Глава II Основни параметри на УНВ	43
2.1. Параметри на УНВ.....	44
2.1.1. Видимо увеличение.....	44
2.1.2. Зрително поле	45
2.1.3. Разделителна способност.....	46
2.1.4. Относителен отвор	50
2.1.5. Светлосила	50

2.1.6. Отдалеченост и диаметър на изходната зеница	51
2.1.7. Аберации на оптичната система и на ЕОП.....	52
2.1.8. Регулиране на обектива, окуляра и попилното разстояние на УНВ	58
2.1.9. Стереоскопичност	58
2.1.10. Ергономичност	59
2.1.11. Разстояние на действие.....	60
2.2. Определяне на разстоянието на действие на УНВ	61
2.2.1. Енергетичен разчет за определяне разстоянието на действие.....	62
2.2.2. Определяне на различни типове разстояния на действие чрез критерия на Johnson.....	69
2.3. Изисквания към параметрите на опто-електронния канал на УНВ и външни условия на наблюдение	71
2.3.1 Вътрешни параметри, използвани при моделирането на УНВ	72
2.3.2 Външни условия, необходими за моделирането на УНВ	73

Глава III Комбинаторни оптимизационни модели за оптимално проектиране на УНВ..... 75

3.1. Основни зависимости при УНВ	79
3.2. Определяне параметрите на УНВ.....	82
3.2.1. Разстояние на действие на УНВ	83
3.2.2. Зрително поле	85
3.2.3. Относителен отвор на обектива	86
3.2.4. Фокусировка на обектива	87
3.2.5. Аберации	87
3.2.6. Отдалеченост на изходната зеница.....	88
3.2.7. Продължителност на работа на УНВ с батерийно захранване.....	88
3.2.8. Тегло на опто-електронния канал на УНВ.....	89
3.2.9. Цена на опто-електронния канал на УНВ.....	90

3.3. Оптимизационни модели за избор на елементи на УНВ.....	91
3.3.1. Детерминиран оптимизационен модел за проектиране на опто-електронния канал на УНВ	92
3.3.2. Обобщен детерминиран оптимизационен модел за проектиране на УНВ	96
3.3.3. Стохастичен оптимизационен модел за проектиране на опто-електронния канал на УНВ	97
3.3.4. Обобщен стохастичен оптимизационен модел за проектиране на УНВ	101
3.4. Детерминиран оптимизационен избор на елементи на опто-електронния канал на УНВ	102
3.5. Стохастичен оптимизационен избор на елементи на опто-електронния канал на УНВ	104
Глава IV Методи за проектиране на УНВ.....	107
4.1. Метод за итеративен избор на елементи за УНВ.....	108
4.2. Метод за рационален избор на елементи за УНВ	109
4.2.1. Обобщен алгоритъм за оценка параметрите на проектираните УНВ, използвайки итеративен или рационален метод.....	112
4.3. Метод за оптимално проектиране на УНВ.....	120
4.3.1. Използване метода на „ε-ограничения“ за оптимален избор на елементи за УНВ.....	122
Глава V Модели за избор на УНВ.....	131
5.1. Многокритериален модел за избор на УНВ	131
5.1.1. Обобщен многокритериален модел за избор на УНВ... ..	131
5.1.2. Избор на УНВ чрез многокритериален оптимизационен модел за избор без допълнителни ограничения	134
5.1.3. Избор на УНВ чрез многокритериален оптимизационен модел за избор с допълнителни ограничения	141

5.2. Многокритериален модел за избор на УНВ с отчитане на външните условия на наблюдение	143
5.3. Оптимизационен модел за избор на k-най-добри УНВ.....	152
Глава VI Методи за определяне на различни комбинации на външни условия на наблюдение, съвместими с техническите спецификации на УНВ	162
6.1. Многокритериален модел за определяне на комбинации от външни условия на наблюдение, валидни за дадено разстояние на действие	162
6.2. Методология за определяне на граничните стойности на изменение на външните условията на наблюдение, съответстващи на зададено разстояние на действие на УНВ....	166
Заклучение	176
Използвани съкращения и означения	179
Библиография	182

Предговор

В тази монография са представени съвременни авторски изследвания в областта на уредите за нощно виждане (УНВ), работещи на принципа на усилване на светлината. Разгледани са различни типове УНВ, принципът им на действие и техните основни елементи. Направен е анализ на основните компоненти на тези уреди – електронно-оптичните преобразуватели и използваните оптични системи. Предложен е математически модел на уред за нощно виждане, който модел описва зависимостите между елементите на устройството. На база на изведените математически зависимости е описан подход за теоретично определяне на параметрите на УНВ. Този подход е използван за дефиниране на детерминирани и стохастични оптимизационни модели, водещи до формулиране на съответни оптимизационни задачи. Тези задачи са използвани в разработени методи за проектиране на УНВ, отчитащи външните условия на наблюдение и зададени изисквания към параметрите на уредите. Описани са оптимизационни модели за избор на отделен уред от множество уреди, вземащ предвид както параметрите на конкретното устройство, така и външните условия на наблюдение. Тези модели са разширени, като са взети предвид и предпочитанията на потребителя по отношение важността на параметрите на УНВ. Предложен е оптимизационен модел и съответна методология за определяне на комбинации от външни условия на наблюдение, съвместими с техническите спецификации на УНВ. Описаните оптимизационни модели и задачи са илюстрирани с числени примери, които могат да бъдат използвани за тестване.

Представените резултати в настоящата монография могат да се използват както от специалисти в областта на уредите за нощно виждане, така и от широк кръг читатели, проявяващи интерес към съвременните УНВ.

Глава I

Уреди за нощно виждане – принцип на действие, видове и приложение

В последните години се забелязва съществено увеличаване на производството и използването на разнообразни уреди за нощно виждане. Това е свързано с намаляване на цените, постоянно подобряване на техническите параметри на уредите и разширяване на областите на приложение не само за военни, но и за граждански цели. Във военните приложения УНВ масово се използват в почти всички дейности – управление на бойни машини, самолети, хеликоптери, танкове, морски съдове, транспортни машини (Волков 2001; Волков 2003; Добровольский и др. 1999; Журавлев и др. 2000), водене на бойни действия в нощни условия – стрелба, патрулиране, разузнаване (Антипова и др. 1998; Волков 2003; Волков и др. 2000; Добровольский и др. 1998; Night Vision Goggles in Civil Helicopter Operations, 2005, Car & Driver, 2012) и т.н. За граждански цели УНВ намират приложение при спасителни акции, навигация и управление на транспортни средства, при изпълнение задачите на правоохранителните органи, за охрана, за туризъм и развлечения, за научни изследвания и др. (Кошавцев и др. 2000, Martinelli & Seoane 1999, Winkel & Faber 2001).

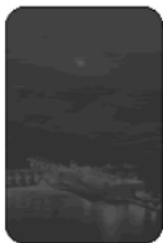
Различните приложения изискват и разработването на различни видове УНВ, удовлетворяващи специфични изисквания. В тази връзка едно актуално научно направление е разработване на методи за предварителна теоретична оценка на изпълнението на поставените изисквания към параметрите на УНВ още на етапа на проектирането им. Целта е намаляване на разходите за изработване и тестване на прототипи и намаляване необходимостта от

евентуални корекции на крайния проект. В процеса на разработване и производство на УНВ трябва да се има предвид наличието на разнообразни конструктивни елементи за УНВ, с различни характеристики и цени, които са произвеждани от специализирани фирми за оптика и за електроника. Това налага и подходящ избор на такива елементи. Качеството на произведените уреди, техническите им характеристики, надеждност, срок на годност и т.н. зависят от параметрите на избраните елементи. Поради това естествено е този избор да се свързва с оптимизация в смисъла на зададени критерии. Това е една основна задача, възникваща при проектирането на УНВ, а именно определянето на критерии за оптимално проектиране, които да осигурят изпълнението на поставените изисквания към параметрите на уредите. Най-често тези критерии се свързват с изисквания за максимално разстояние на действие, малко тегло – леките и компактни УНВ са много по-комфортни при продължително наблюдение, минимално разстояние на фокусиране на обектива, максимално зрително поле и отдалеченост на изходната зеница, попилно разстояние и възможност за диоптрийна настройка и др.

1.1. Типове УНВ, в зависимост от използваната технология

Уредите за нощно виждане се разделят на два основни типа в зависимост от използваната технология (Morovision Night Vision, 2014):

- 1) уреди за нощно виждане, работещи на принципа на усилване на светлината от видимия и близкия инфрачервен (ИЧ) диапазон на спектъра и използващи електронно-оптичен преобразувател (ЕОП), характеризиращи се с образ в зелен оттенък (фиг. 1.1);

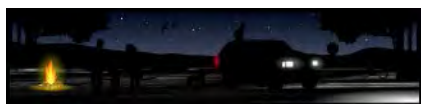


Фиг.1.1. а) реална картина



б) изображение с УНВ

- 2) уреди, използващи топлинното излъчване на наблюдаваните обекти (т.нар. термовизори), които работят в ИЧ диапазон на спектъра (3–30 μm) (фиг. 1.2).



Фиг. 1.2. а) реална картина



б) изображение чрез термовизия

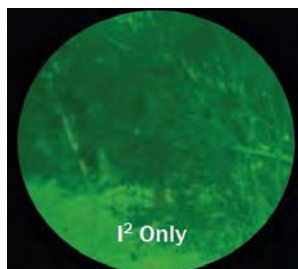
Предимствата на технологията на светлинното усилване на образа са: висока разделителна способност, възможност за идентификация на хора, сравнително ниска цена, приложимост към стандартни видео- и фотографски апарати (Electrophysics, 2014). Недостатъци на тази технология са: невъзможност за работа при отсъствие на светлина, влошаване на образа при наличие на мъгла и дъжд.

Предимствата на термовизията са сравнително висок контраст, ефективно откриване на хора и автомобили, работа при пълна тъмнина (Electrophysics, 2014). Недостатъци на този тип уреди са: необходимо е наличие на температурни разлики за работа на уреда, невъзможност за идентификация и сравнително висока цена.

Най-новото развитие в областта на нощното виждане е т.нар. комбинирана технология, при която технологията на топлинното

излъчване на телата се комбинира с технологията на светлинното усилване на образа, както е показано на фиг. 1.3.

<http://www.lahouxoptics.com/index2.html?show=clipir&sel=police&suffix=UK>



а) технология, усилваща изображението



б) комбинирана технология

Фиг. 1.3. Сравнение на изображенията от двете технологии

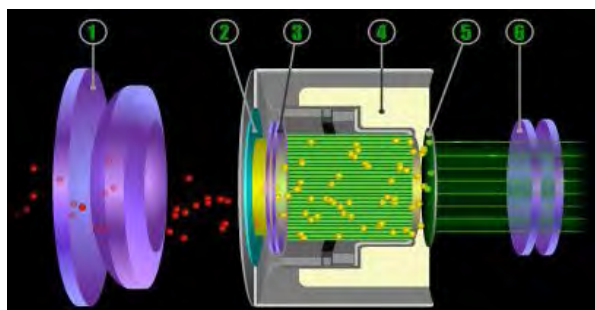
Комбинираната технология на нощното виждане е особено полезна при условия с ниски нива на осветеност. Тя дава значителни тактически предимства чрез комбиниране на възможностите на несравнимото качество на откриване на термовизията с превъзходните възможности за идентификация на технологията на светлинното усилване на образа.

Понастоящем масово използваните УНВ са базирани на технологията на усилване на светлината и този тип уреди ще бъдат предмет на по-нататъшното изложение.

1.2. Основни елементи на УНВ

Уредите за нощно виждане, използващи технологията на светлинното усилване, влизат в класа на т.нар. опто-електронни уреди. Принципът на действие на тези уреди се основава на усилването на отразената светлина, излъчвана от нощното небе (звезди, луна), отражението на различни светлинни източници от земната или водната повърхност и др. (Cobra Optics Ltd., 2001).

Най-общо основните конструктивни елементи на УНВ са: обектив, ЕОП, окуляр, захранващ блок и механична конструкция. За усилване на светлината се използва електронно-оптичен преобразувател (ЕОП), който създава на изхода образ с яркост, превишаваща входната яркост от 900 до 50 000 пъти. Отразената от наблюдавания обект светлина се фокусира посредством обектива върху фотокатода на ЕОП. Фотокатодът преобразува светлинния образ от видимата и близката ИЧ област в електронен образ, който от своя страна се усилва от микроканалната пластина (МКП) на ЕОП, а чрез фосфорния екран на ЕОП електронният образ се превръща отново в светлинен образ от видимата част на спектъра, който наблюдателят може да види (вж. фиг. 1.4) (АТН 2014).



Фиг. 1.4. Принцип на действие на УНВ: 1 – обектив; 2 – фотокатод; 3 – микроканална пластина; 4 – високоволтово захранване; 5 – фосфорен екран; (2-3-4-5 – ЕОП); 6 – окуляр.

Чрез подходящ окуляр се наблюдава полученият върху екрана на ЕОП изходен светлинен образ, който често е в жълто-зелен оттенък. Зеленият цвят се използва поради факта, че човешкото око има възможността да различава повече нюанси на зеления цвят, отколкото при другите цветове.

Техническите параметри на УНВ се определят от параметрите на опто-електронния канал (обектив, ЕОП и окуляр).

Оптичните системи – обектив и окуляр, са добре познати и използвани в различни оптични уреди. Това, което отличава УНВ от останалите оптични уреди, е наличието на ЕОП. Принципът на работа на ЕОП и развитието му са съществени за настоящето изследване и ще бъдат подробно разгледани.

1.3. Електронно-оптични преобразуватели (ЕОП)

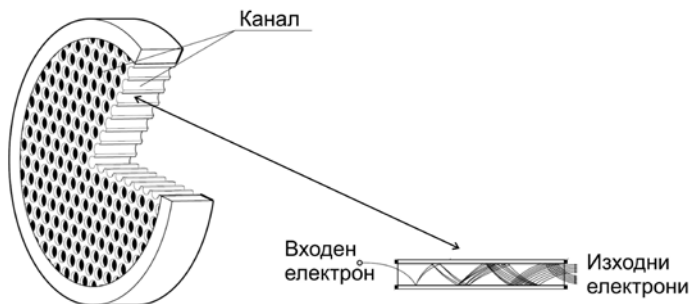
Основният принцип на работа на ЕОП е усилване на отразената светлина от наблюдаваните обекти. Превръщането на светлинния образ в електронен става посредством фотокатод, чувствителен в съответната спектрална област, а превръщането от електронен в светлинен, чрез електро-луминесцентен екран, облъчван от ускорени фотоелектрони (фиг. 1.5) (Hamamatsu 2009).

Отразените от наблюдавания обект светлинни лъчи се фокусират посредством обектив върху повърхността на фотокатода. Последният реагира непосредствено на попадналите върху него фотони чрез образуване на фотоелектрони във фоточувствителния слой на фотокатода.



Фиг. 1.5. Принцип на работа на ЕОП

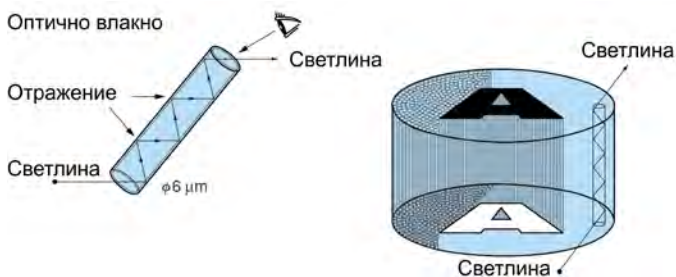
Така получените фотоелектрони преминават през микроканална пластина (МКП), както е показано на фиг. 1.6 (Hamamatsu 2009).



Фиг. 1.6. Микроканална пластина (МКП)

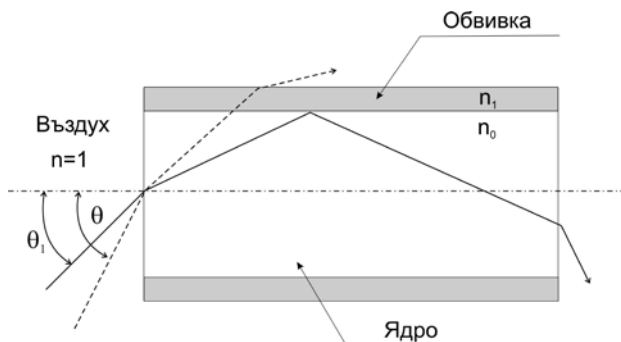
Вследствие на напрежението между фотокатода и МКП получените електрони попадат в отделните канали на МКП (около 10 милиона с диаметър от 6–12 μm). При преминаване на електроните през микроканалите в МКП те се удрят в стените й, като всеки електрон избива от стените вторични електрони. Началният брой електрони се увеличава многократно на изхода на микроканалите в МКП. Под действие на електричното поле между фотокатода и МКП електроните бомбардират електролюминесцентния екран, върху който вследствие на луминесценцията се получава оптичен образ. Така полученият образ на екрана по конфигурация съответства на електронния образ, т.е. на образа на предмета. Цветът на светене на екрана зависи от използвания луминофор, който най-често е в зелен оттенък.

Последен елемент от структурата на ЕОП е неговият изход, който може да бъде плоско стъкло или влакнесто-оптична пластина (ВОП). Влакнесто-оптичната пластина съдържа няколко милиона оптични влакна, подредени успоредно едно на друго (фиг. 1.7) (Hamamatsu 2009).



Фиг. 1.7. Структура на влакнесто-оптичната пластина

Всяко оптично влакно работи на принципа на пълното вътрешно отражение. Важно предимство на ВОП е, че тя предава образа без загуби и изкривявания (фиг. 1.8).



Фиг. 1.8. Структура на оптично влакно

1.3.1. Поколения ЕОП

Технологичното развитие през последните 40 години доведе до значително подобряване производителността на УНВ. Различните парадигми на технологията често се идентифицират от различни поколения ЕОП. Класификацията на УНВ в поколения (Gen) обяснява съответната стъпка в развитието на използваните ЕОП. ЕОП се класифицират според появата и техническите си характеристики на поколения: 0, I, II (с междинни степени I+, II+),

III и IV. Подобна класификация чрез „поколения“ на ЕОП показва хронологичното и технологичното им развитие. Няма обаче единна стандартизация за термина „поколение“. Така например „3-то поколение“ е термин, употребяван главно от американските производители, за да се отбележи, че използваното покритие на фотокатода на ЕОП е GaAs (Intas, 2014).

Нулево поколение (1950 г.)

Електронно-оптичните преобразуватели от нулево поколение имат много малко усилване и поради това е необходимо допълнително ИЧ осветяване. Поради тази причина уредите, използващи ЕОП от нулево поколение, са известни още като „активни УНВ“. Структурата на ЕОП от нулево поколение е показана на фиг. 1.9 (Intas, 2014).



Фиг. 1.9. Структура на ЕОП от нулево поколение

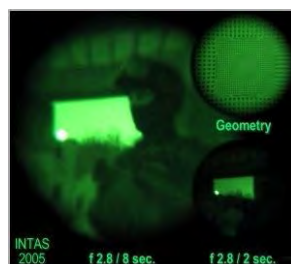
За разлика от другите поколения, работният им диапазон е между 750 и 950 nm, т.е. в близкия ИЧ диапазон. ЕОП от това поколение обикновено използват фотокатод (S-1) с пик на интегралната чувствителност в синьо-зеления диапазон 60 $\mu\text{A}/\text{lm}$ (Intas, 2014). Характеризират се с наличие на геометрични изкривявания на образа. ЕОП от нулево поколение представляват стъклени едно- и многокамерни уреди с неравномерно разпределение на разделителната способност по зрителното поле (Кошавцев и др. 1999).

Поколение I (1960 г.)

Тези ЕОП използват фотокатод (S-20) с интегрална чувствителност 180–300 μ A/lm (Intas, 2014). Усилването на отразената от обекта светлина при този вид ЕОП е 120–900 пъти, разделителната способност в центъра е 25–35 lp/mm. ЕОП от I поколение също се характеризират с геометрични изкривявания на получения образ (фиг. 1.10), и при по-ниска осветеност също е необходимо допълнително ИЧ осветяване (Intas, 2014).



Фиг. 1.10. а) структура на ЕОП от поколение I

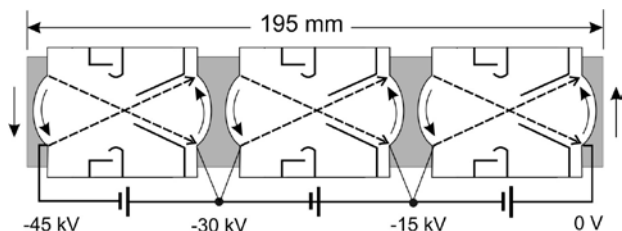


Фиг. 1.10. б) образ, получен с ЕОП от поколение I

Освен това, ако в зрителното поле попадне светлина от ярки светлинни източници (фарове, светлини от населено място и др.), те могат да осветят целия образ, при което се нарушава възможността за наблюдение. ЕОП от първо поколение са с метално-стъклена конструкция с влакнесто-оптична пластина на входа и/или изхода (Кошавцев и др. 1999). Теглото им варира в диапазона от 75 до 455 g, времето им на експлоатация е от 1000 до 2000 часа, а работният им диапазон е от 750 до 800 nm.

Многокаскадни ЕОП I поколение

За постигане на по-голям коефициент на усилване на ЕОП понякога се използват последователно два, три или повече ЕОП, поставени в един корпус (фиг. 1.11).



Фиг. 1.11. Трикаскаден ЕОП

Коефициентът на усилване на трикаскаден ЕОП е 20 000 – 50 000 пъти. При куплирането на подобни ЕОП изкривяванията нарастват, а разделителната способност по краищата на зрителното поле намалява. Уредите, използващи многокаскадните ЕОП, са доста големи и тежки и поради това постепенно са изместени от малобааритните ЕОП от I+ и II поколение, имащи по-добри характеристики и по-ниска цена.

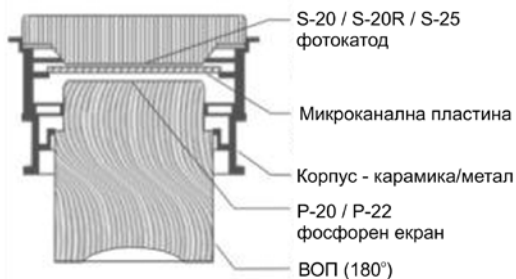
Поколение I+ (Super+)

Това е следващото развитие на ЕОП от първо поколение. За вход (понякога и за изход) на ЕОП вместо плоско стъкло се използва влакнесто-оптична пластина, което позволява да се увеличи разделителната способност на ЕОП, да се намалят изкривяванията и да се защити образът от странични източници на светлина. ЕОП от това поколение усилват светлината около 1000 пъти, чувствителността на фотокатода им е по-малка или равна на 280 $\mu\text{A}/\text{lm}$, при разделителна способност в центъра от 45 lp/mm . Уредите, използващи ЕОП от това поколение, са ефективни при осветеност, съответстваща на 1/4 луна. При по-ниски нива на осветеност е необходимо допълнително ИЧ осветяване.

Поколение II (1970 г.)

Основната разлика между I и II поколение ЕОП е наличието на микроканална пластина (МКП). При ЕОП от поколение II фотокатодът (S-25) е с пик на чувствителността 240–400 $\mu\text{A}/\text{lm}$.

Структурата на ЕОП от II поколение е показана на фиг. 1.12 (Intas, 2014).



Фиг. 1.12. а) структура на ЕОП от поколение II



Фиг. 1.12. б) образ, получен с ЕОП от поколение II

Характеристиките на това поколение ЕОП са: усилване на светлината 25 000–50 000 пъти, разделителна способност в центъра 30–35 lp/mm и отношение сигнал/шум 12–14.

Произвеждат се с различен диаметър на фотокатода – 12 mm, 25 mm, 18 mm, 40 mm и 75 mm. От гледна точка на наблюдателя по-големият размер осигурява по-голям комфорт при наблюдението, но води до по-големи габаритни размери на уреда. ЕОП от II поколение имат добри характеристики на образа и малки изкривявания при ниски нива на осветеност. Работният им диапазон е между 780 и 850 nm, а времето им на експлоатация варира от 2500 до 5000 часа.

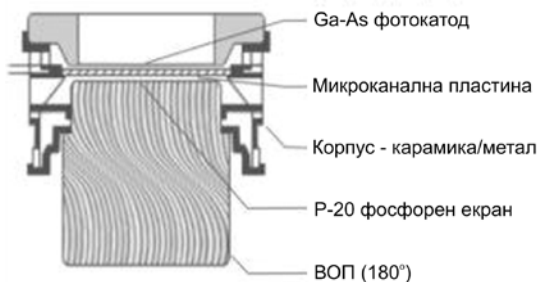
Поколение II+ и SuperGen (1970 г.)

Усилването на светлината при това поколение ЕОП е около 25 000–35 000 пъти, чувствителността на фотокатода достига 500–600 $\mu\text{A}/\text{lm}$ за II+ поколение, а за SuperGen до 600–700 $\mu\text{A}/\text{lm}$. Разделителната способност за II+ поколение е 35–45 lp/mm, а за SuperGen е 45–60 lp/mm (Intas, 2014). Работоспособността на тези ЕОП е около 10 000 часа. Уредите, използващи ЕОП от II+ и SuperGen поколение, имат автоматична регулировка на яркостта,

защита от превишаване нивото на яркост, защита от странични и насрещни светлинни източници и добро качество на образа.

Поколение III (1990 г.)

Следващата стъпка в развитието на ЕОП е повишението на чувствителността на фотокатода. При III поколение ЕОП, за разлика от ЕОП II+, материалът, от който се изготвя фотокатодът, е на основата на галиев арсенид (GaAs), с интегрална чувствителност 900–1800 μ A/lm и работен диапазон с още по-голямо изместване към ИЧ област 780–920 nm. Разделителната им способност достига 40–64 lp/mm, а времето им на работоспособност до 10 000 часа. Усилването на светлината е около 50 000 пъти. Уредите, използващи ЕОП от III поколение, работят много добре в условията на ниска осветеност, образът е наситен, рязък и с добър контраст (фиг. 1.13) (Intas, 2014). Основен недостатък на ЕОП от това поколение е чувствителността на фотокатода към удари и сътресения.



Фиг. 1.13. а) Структура на ЕОП от поколение III



Фиг. 1.13. б) Образ, получен с ЕОП от поколение III

Поколение IV (2000 г.)

Последните разработени европейски ЕОП (DEP – XR5, Photonis – ХН 72) и американски ЕОП (Litton – МХ-10160В) имат голямото предимство, че могат да работят без проблеми и при дневни

условия. В ЕОП от IV поколение се използват тънки МКП с намален диаметър на микроканала до 6 μm вместо традиционните 12 μm , което води до увеличаване на разделителната способност до 64–84 lp/mm. Отличителна особеност на ЕОП IV поколение е наличието на стробиран високоволтов източник на захранване, изменящ автоматично честотата на работа в импулсен режим, съобразно с външната осветеност (Волков 2001). Импулсният режим не само разширява диапазона на работа на ЕОП и съответно на УНВ, съобразно с изменението на външната осветеност, но и намалява шумовете. В сравнение с III поколение ореолът при IV поколение е значително по-малък (фиг. 1.14), а времето им на работоспособност е 10 000–15 000 часа (Chrzanowski 2013).



Фиг. 1.14. а) ЕОП от III поколение

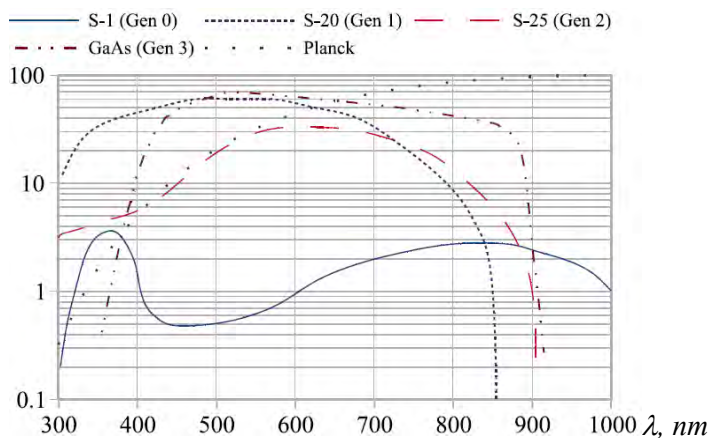


б) ЕОП от IV поколение

1.3.2. Сравнителен анализ между поколенията ЕОП

Изборът на ЕОП се извършва основно по чувствителността на фотокатода, разделителната способност и чистотата на зрителното поле. Чувствителността на фотокатода е определящ параметър за ЕОП. Поради малкото усилване уредите, използващи еднокаскадни ЕОП от първо поколение, са много критични към светлосилата на оптиката и параметрите на ЕОП. Само уредите с добре избрани ЕОП, в съчетание със светлосилна оптика, могат да осигурят приемливи параметри при вечерно наблюдение и нощно време, при наличие на 1/4 луна. Всяко следващо поколение ЕОП се отличава от предходното с подобрените си параметри – разделителна способност, отношение сигнал/шум, чувствителност на фотокатода, изместена към близкия ИЧ диапазон. Графики на

различни спектрални чувствителности на фотокатодите от различни поколения ЕОП са показани на фиг. 1.15 (Chrzanowski 2013). Изместването на спектралната чувствителност на фотокатода с всяко следващо поколение към близкия ИЧ диапазон се дължи на факта, че прозрачността на атмосферата е по-голяма в този диапазон.



Фиг. 1.15. Графики на спектралната чувствителност за различни фотокатооди S1(Gen 0), S-20 (Gen 1), S-25 (Gen 2)

При всяко следващо поколение ЕОП изкривяванията на образа стават все по-малки, контрастът все по-добър, позволяват работа при все по-ниски осветености, удължава се времето на живот, а габаритните размери и теглото намаляват (фиг. 1.16).



Фиг. 1.16. а) външен вид на ЕОП



Фиг. 1.16. б) Образи, получени с помощта на съответните поколения ЕОП

В следващите таблици (табл. 1.1, табл. 1.2 и табл. 1.3) са показани основните характеристики на ЕОП, типични за различните поколения, които са произведени от три различни фирми производители – DEP, PHOTONIS и ИТТ:

Таблица 1.1. Характеристиките на ЕОП от фирмата DEP

Параметър	ЕОП					Единици
	Gen II	Super Gen	SHD-3™	XD-4™	XR5™	
Разделителна способност	45–50	45–50	45–54	58–64	64–70	lp/mm
Сигнал/шум (@108μlx)	14–16	17–19	18–20	20–24	25–28	
Интегрална чувствителност при 2850К	350–450	500–550	500–600	600–700	800–850	μA/lm
Време на живот (при S/N=12)	2 000	10 000	10 000	15 000	15 000	hrs
Тегло (18 mm)	85–98	85–98	80–95	80–95	80–95	grams

Таблица 1.2. Характеристиките на ЕОП от фирмата PHOTONIS

Параметър	ЕОП					Единици
	Gen II+ XX1410	SuperGen XX1610	HP SuperGen XX1660	HyperGen XX1860	XH72 XX3060	
Разделителна способност	32	40	45	57/50	72	lp/mm
Сигнал/шум (@108μlx)	12	15.5	18	20	22/24	
Интегрална чувствителност при 2850К	350	500	600	700	700/750	μA/lm
Време на живот (при S/N=12)	2 000	10 000	10 000	10 000	10 000	hrs
Тегло (18 mm)	100	100	100	100	100	grams

Таблица 1.3. Характеристиките на ЕОП от фирмата ITT

Параметър	ЕОП			Единици
	Gen II M884	Gen III FS9901	Gen IV MX10160B	
Разделителна способност	32	45–64	57–72	lp/mm
Сигнал/шум (@108μlx)	--	19–21	20.6–36.0	
Интегрална чувствителност при 2850К	240	1350–1800	1500–2100	μA/lm
Минимален диаметър на фотокаода	17.5	17.5	17.5	mm
Време на живот	2 000	10 000	10 000	hrs
Тегло (18 mm)	126		85	grams

За военно предназначение се използват ЕОП от II+, SuperGen, III и IV поколение. За граждански цели, в зависимост от потребностите, се използват I, II, II+, SuperGen, III и IV поколение ЕОП. С всяко

следващо поколение спектралната чувствителност на фотокатода на ЕОП е изместена към ИЧ спектър, където спектралната плътност на естествената нощна осветеност е по-голяма, отколкото във видимия диапазон. При прехода от видимия към близкия ИЧ диапазон се увеличава също така и прозрачността на атмосферата. Отношението сигнал/шум и разделителната способност нарастват с всяко следващо поколение, също както и времето им на работоспособност, като от 1000 часа при първо поколение достига до 15 000 часа при трето и четвърто поколение. Макар и от едно и също поколение, произведените от различни фирми ЕОП се различават по своите параметри – разделителна способност, интегрална чувствителност, отношение сигнал/шум, тегло, качество на образа и т.н.

Разлика между поколенията уреди за нощно виждане

Понякога УНВ могат да бъдат сравнявани чрез параметър за качеството (*Figure of Merit*). Този параметър за качеството се изчислява, като разделителната способност на системата се умножи по отношението сигнал – шум. Най-добрите устройства, налични на пазара, са от Gen 3 и имат стойности за параметър за качеството в интервала 1400–1600.

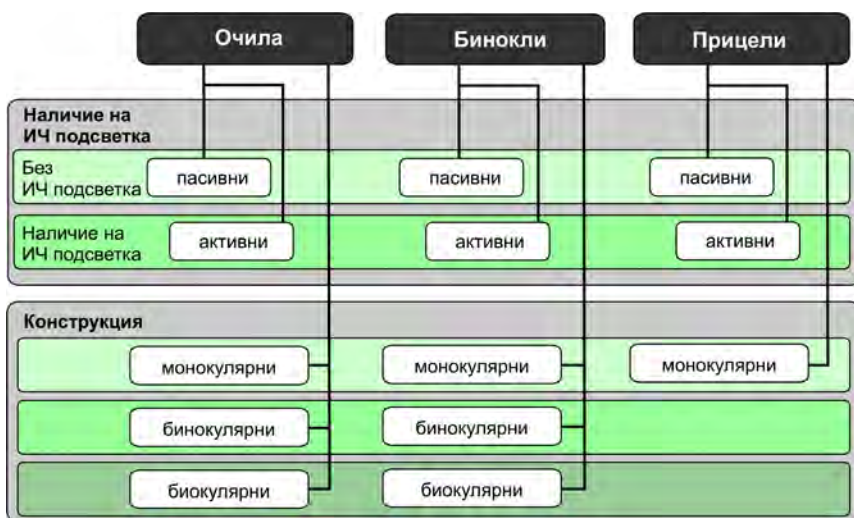
Таблица 1.4. Характеристиките на ЕОП

Спецификации	Gen I	Gen II	Gen II+	Gen III
Усилване на ЕОП	100–500	20 000 – 30 000	20 000 – 30 000	20 000 – 30 000
Отношение сигнал-шум	--	12–15	15–25	15–30
Разделителната способност, lp/mm	25–30	30–68	45–68	45–68
Параметър за качеството	--	<750	750–1200	800–1600

Източник: <http://www.newcon-optik.com/faq.html>

1.4. Типове УНВ според предназначението, конструкцията и наличието на допълнителна ИЧ подсветка

Съществуват няколко основни типа уреди за нощно виждане според тяхното предназначение – очила, прицели и бинокли, както е показано на фиг. 1.17.



Фиг. 1.17. Класификация на УНВ

В зависимост от типа на използваната конструкция УНВ могат да се разделят на монокулярни, бинокулярни и биокулярни УНВ, а в зависимост използването или не на допълнително ИЧ осветяване УНВ се разделят на активни и пасивни (фиг. 1.17).

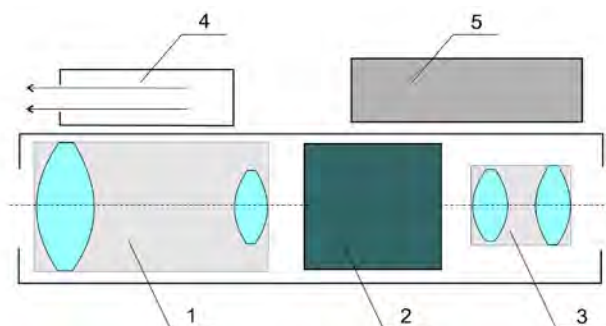
1.4.1. Активни и пасивни УНВ

Исторически най-рано са създадени очилата за нощно виждане (ОНВ). Обикновено се закрепват с помощта на механична конструкция на главата на наблюдателя, като ръцете остават свободни. Уредите от този клас имат увеличение единица (т.е.

предават реален образ) и зрително поле в диапазона 33–43 градуса. При УНВ с увеличение зрителното поле е намалено и е в интервала от 2 до 15 градуса, като зрителното поле е толкова по-малко, колкото по-голямо е увеличението. В зависимост от използването или неизползването на допълнително ИЧ осветяване УНВ се разделят на два основни класа: активни УНВ и пасивни УНВ.

Активни УНВ

За получаване на образ уредите от активния тип (фиг. 1.18) се нуждаят освен от естествената нощна осветеност и от допълнително ИЧ осветяване. Оптичните оси на допълнителното ИЧ осветяване и на уреда са паралелни.

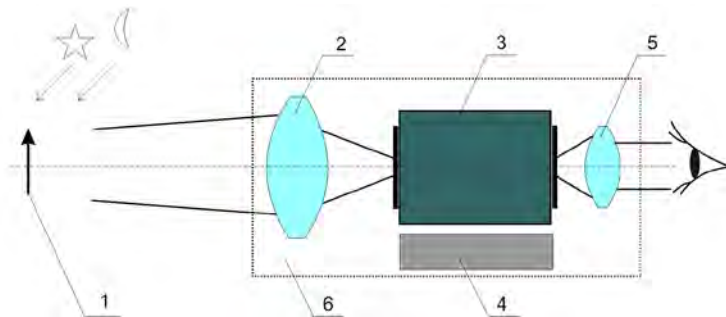


Фиг. 1.18. Структурна схема на активни УНВ: 1 – обектив, 2 – ЕОП, 3 – окуляр, 4 – допълнително ИЧ осветяване, 5 – захранващ блок.

Основен недостатък на този тип УНВ при военните приложения е нарушаване секретността на наблюдението, тъй като допълнителното ИЧ осветяване лесно може да бъде засечено от противников УНВ.

Пасивни УНВ

В уредите от пасивен тип (фиг. 1.19) се използва ЕОП със спектрална чувствителност във видимата и в близката ИЧ област на спектъра.



Фиг. 1.19. Структурна схема на пасивни УНВ: 1 – наблюдаван обект, 2 – обектив, 3 – ЕОП, 4 – захранване, 5 – окуляр, 6 – опто-електронен канал на УНВ

По конструкция пасивният тип уреди е подобен на тези от активния тип, но в него липсва допълнителното ИЧ осветяване.

1.4.2. Монокулярни, биокуларни и бинокулярни УНВ

В зависимост от конструкцията УНВ могат да се разделят на: бинокулярни, биокуларни (псевдо-бинокулярни или т.нар. циклоп) и монокулярни.

Монокулярни УНВ

Монокулярни УНВ използват най-простата конструкция, изградена от един обектив, един ЕОП и един окуляр, т.е. от един опто-електронен канал (фиг. 1.20а) (<http://www.atncorp.com/>). Този тип конструкция се разработва както без увеличение (1^x), така и с увеличение $2^x, 3^x, 4^x, 6^x$ и др. Чрез смяна на обектива тази конструктивна схема може лесно се модифицира до монокуляр с желаното увеличение – фиг. 1.20б (Патент 7826, 2013).

Монокулярната конструкция може лесно да се държи с една ръка, да се стикова с фото- или видеокамера, да се монтира на оръжие или да се закрепва върху каската на оператора.



Фиг. 1.20. Монокулярен тип УНВ

Поради факта, че тази конструкция използва само един ЕОП, тя е масово разпространена и все по-често се предлагат монокуляри с висококачествени и скъпи ЕОП от IV поколение.

Биокулярни УНВ

За да се намали теглото и цената на УНВ, е разработена конструкция, която съдържа един обектив, един ЕОП и два окуляра. Този тип конструкция на УНВ е познат като биокулярна, „циклоп“ или псевдо-бинокулярна (фиг. 1.21) (<http://www.atncorp.com/>).



Фиг. 1.21. Външен вид на биокулярни УНВ

При този тип конструкция, поради наличието на един обектив и ЕОП, теглото и цената на уреда значително се намаляват. Запазват се възможностите за префокусиране на обектива, за регулиране на диоптрийната настройка на окулярите и възможността за настройка на попълното разстояние. Тази конструктивна схема изисква допълнителна оптична система, която

да разклонява образа, получен на изхода на ЕОП към двата окуляра.

Недостатък на тази конструкция е липсата на стереоскопичност. Тя не се препоръчва при управлението на транспортни средства. Предимство е възможността за използване на по-скъп (по-качествен) ЕОП, тъй като се използва само един такъв. Същото важи и за обектива – може да се избере достатъчно светосилен обектив, с голямо пропускане и минимални aberации. Наличието на един обектив и ЕОП намалява теглото и цената на УНВ.

Бинокулярни УНВ

Бинокулярните УНВ се състоят от два идентични и независими опто-електронни канала. Всеки опто-електронен канал е изграден от един обектив, един ЕОП и един окуляр (фиг. 1.22).



Фиг. 1.22. Външен вид на бинокулярни УНВ

1.4.3. Очила за нощно виждане (ОНВ)

Характерно за ОНВ е че те нямат увеличение и могат да бъдат реализирани чрез монокулярна, бикулярна или бинокулярна конструкция. При тях се осигурява плавна регулировка на попилното разстояние (очната база) в границите 52–72 mm. В някои модели такава регулировка отсъства, а възможността за наблюдение от оператори с различно попилно разстояние се осигурява за сметка на по-големия диаметър на изходната зеница на окуляра 12–15 mm. Различните модели ОНВ осигуряват

диоптрийна настройка на окулярите в границите ± 5 dpt, или от (+2) до (-6) dpt и фокусировка на обективите от 0.2–0.41 m до безкрайност. Фокусировката е необходима, за да може да се наблюдават както отдалечени, така и близко разположени обекти (четене на карти, ремонтни дейности и др).

Най-често използваните ЕОП в ОНВ са от поколение II, II+, III, а в последните години и от IV поколение. Захранването на ОНВ се осигурява от стандартен постоянно-токов източник: обикновено две батерии тип AA с напрежение 2.5–3.0 V. Батериите, в зависимост от техния капацитет, осигуряват непрекъсната работа на ОНВ от 8 до 40 часа. ОНВ се монтират на лицева маска, която от своя страна се закрепва на главата на оператора с помощта на специални регулируеми ремъци. Бинокулярните ОНВ осигуряват стереоскопичен ефект, което ги прави удобни при управлението на транспортни средства. Във връзка с това следва да се отбележи и още една тяхна разновидност – ОНВ за пилотиране (фиг. 1.23).

<http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=36720>



Фиг. 1.23. Външен вид на бинокулярни УНВ, предназначени за управление на летателни апарати

Отличителна особеност на тази разновидност ОНВ е тяхното закрепване не към лицева маска, а към шлема на пилота. Тази конструкция на ОНВ осигурява регулировка на тяхното положение по отношение на лицето на оператора. Предвидена е възможност както за бързо сваляне, така и за преместване от работно в неработно положение.

За съществено увеличение на зрителното поле са разработени т. нар. панорамни очила за нощно виждане PNVG (Panoramic Night Vision Goggle). Външният вид на панорамните ОНВ е показан на фиг. 1.24 (<http://www.gpssignal.com/gpnavg.html>).



Фиг. 1.24. Панорамни УНВ

Панорамните УНВ са построени на базата на четири специално разработени ЕОП, с диаметър на фотокатада 16 mm, вместо типичния диаметър от 18 mm. Този тип ОНВ осигуряват зрително поле по хоризонтала в диапазона 95–100 градуса, а по вертикала 40 градуса.

Друга разновидност на ОНВ за пилотиране са т. нар. дисплеи, монтирани на шлем, показани на фиг. 1.25 (<http://theaviationist.com/2012/07/17/a400-hmsd/>).



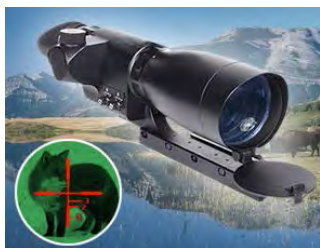
Фиг. 1.25. Дисплеи, монтирани на шлем

Този тип ОНВ осигуряват по-голямо зрително поле (по хоризонтала 80° , по вертикала 40°), по-голяма изходна зеница, цветен образ, използват по-леки оптични елементи, имат висока разделителна способност, позволяват дневно-нощни възможности за наблюдение, наблюдение през екрана и др.

Предимството на бинокулярната схема на ОНВ е, че осигурява стереоефект при наблюдение. Това ги прави предпочитани при управление на самолети, вертолетите и други транспортни средства, тъй като дават ясна представа за разстоянието до наблюдаваните обекти. Те използват два независими и идентични опто-електронни канала и дори да се повреди единият канал, вторият ще осигури работоспособността на уреда. Като недостатък на тази конструктивна схема може да се разглежда теглото и цената на уреда, като следствие от наличието на два опто-електронни канала.

1.4.4. Нощни прицели за стрелково оръжие

Прицелите за стрелково оръжие представляват монокулярни уреди за нощно виждане, в оптичната част на които се намира светеща скала (мерник), и имат устройство за закрепване към оръжието (фиг. 1.26) (<http://www.atncorp.com/>).



а) външен вид



б) изображение чрез прицела

Фиг. 1.26. Нощен прицел за стрелково оръжие

Уредите от този клас имат по-малко зрително поле 2–12 градуса и по-голямо увеличение от 1.5 до 16.5 пъти. Обикновено

имат възможност за диоптрийна настройка на окуляра ± 5 диоптъра, фокусировка на обектива по-голяма от тази при УНВ (от 3 m до безкрайност).

Предвид специфичността на приложението им и наличие на откат при изстрел, прицелите трябва да са механично устойчиви и да не губят настройка за точност при всеки изстрел. Отдалечеността на изходната зеница е по-голяма, отколкото при другите УНВ, за да се избегне нараняване, вследствие на отката.

1.4.5. Нощни бинокли

Този тип уреди могат да се срещнат в трите конструктивни разновидности – тип монокулар, тип биокулар и тип бинокулар. Отличителни параметри на биноклите са увеличението (2–6 пъти), зрително поле (от 13 до 5 градуса), по-големи габаритни размери и тегло. Обикновено към комплекта УНВ се предлагат обектив/и, осигуряващ/и допълнително увеличение (фиг. 1.27).



Фиг. 1.27. Нощни бинокли

а) външен вид, б) картина на съответното увеличение

Както и при останалите УНВ, така и при нощните бинокли има предвидена диоптрийна настройка на окулярите в границите на

± 5 dpt, настройка на попилното разстояние в границите на 54–70 mm, а така също и фокусировка на обектива от 3 m до безкрайност.

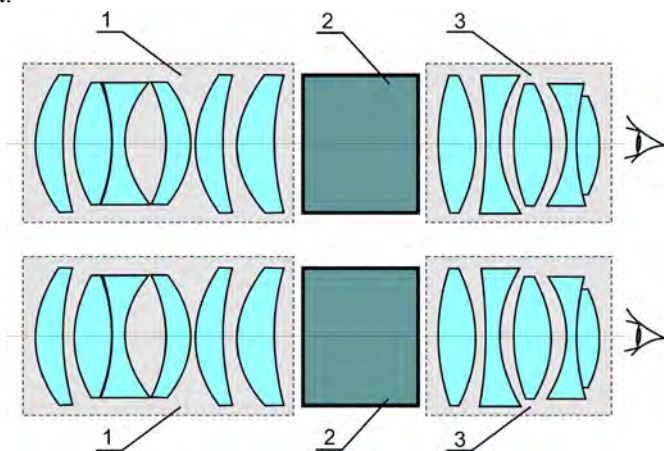
Най-често, с цел намаляване на цената, УНВ са от биокулярен тип – един обектив, един ЕОП и два окуляра. Тъй като основното им предназначение е за наблюдение, в този случай липсата на стереоскопичност не е съществена. Предлагат се и нощни бинокли от класически тип с два независими опто-електронни канала, както и монокли с един опто-електронен канал.

1.5. Оптични системи, използвани в УНВ

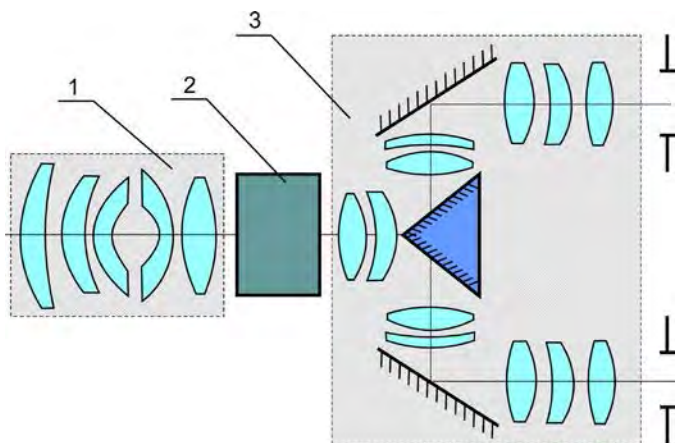
Оптичната система на УНВ е съставена от обектив и окуляр. Посредством обектива образът на обекта се проектира върху фотокатода на ЕОП, а чрез окуляра се наблюдава полученият образ върху екрана на ЕОП. Основните параметри на оптичната система (обектив, окуляр), определящи качеството и ефективността, са: *диаметър на входно/изходната зеница, фокусно разстояние, коефициент на пропускане, зрително поле, разделителна способност, устойчивост на оптичните свойства при различни климатични условия, вибрации, удари и др.* По тези параметри могат да се определят габаритните, енергетичните, аберационните, експлоатационните и технико-икономически характеристики на оптичните системи. Съществува голямо разнообразие от конструктивни решения, както по отношение на обектива, така и по отношение на окуляра. Една примерна схема на оптична система, използвана за бинокулярна конструкция на УНВ, е показана на фиг. 1.28.

Във връзка с намаляване на теглото и цената широко разпространение са получили и биокулярните (псевдо-бинокулярни) конструкции на УНВ (Саликов 2000; Волков 2002) (фиг. 1.29). Тази биокулярна конструкция включва един обектив,

един ЕОП и оптична система, която разклонява образа към двата окуляра.



Фиг. 1.28. Оптична схема на УНВ от бинокулярен тип
1 – обектив, 2 – ЕОП, 3 – окуляр



Фиг. 1.29. Оптична схема на биокулярни УНВ:
1 – обектив, 2 – ЕОП, 3 – окулярна система

Общ недостатък на най-широко разпространените традиционни УНВ е значителният им надлъжен размер. Този размер определя въртящ момент, създаващ натоварване на шията и лицевите мускули на оператора и предизвикващ умора. Поради това разработчиците на УНВ се насочват към създаването на нископрофилни УНВ с малки надлъжни размери. Типични представители на този тип УНВ са: “GN-2” на фирмата Simrad (Норвегия) (Волков 2002) и “Lucie” на фирмата Angenieux (Франция) (Angenieux, 1999). Схемата на ниско-профилните УНВ NV/G-14 Беломо (Република Беларус) (Беломо, 2002) е построена на същия принцип както и УНВ GN-2. Оптична система с призмена окулярна конструкция се използва при УНВ за управление на самолети или хеликоптери и позволява едновременно наблюдение на нощния образ извън кабината и наблюдение на уредите в кабината. Тези УНВ притежават малки надлъжни габаритни размери и могат да се отнесат към нископрофилните УНВ.

Един съвременен подход за намаляване на теглото, както на обектива, така и на окуляра, е използването на пластмасови лещи. Друг перспективен вариант за олекотяване на оптичните системи е използване на асферична оптика (*OpTaliX*, Rouke и др. 1998, *ZEMAX*). С цел отстраняване на сферичната aberация и комата лещите на някои съвременни обективи имат параболична или хиперболична или друга осево-симетрична форма.

За осигуряване на непрекъснато наблюдение както през нощта, така и през деня, в УНВ се включва както нощен, така и дневен канал. При наблюдението в нощни условия операторът вижда образа в нощния канал, съдържащ ЕОП. Едновременно е това, с помощта на призмена окулярна система, операторът може да наблюдава обекта и извън нощния канал. При рязко увеличаване нивото на осветеността или при въздействие на интензивни светлинни източници (пожари, светлини от фарове и др.) нощният канал се изключва и операторът наблюдава обекта през дневния

канал. Тази тенденция за дневно-нощните уреди се наблюдава и при трите вида – очила, бинокли, прицели (Волков и др. 2000).

Съществува голямо разнообразие от висококачествени оптични системи за обективи и окуляри, които могат да бъдат използвани при проектиране на опто-електронния канал на УНВ, чрез подходящ избор и вграждане на готови обективи и окуляри с известни параметри.

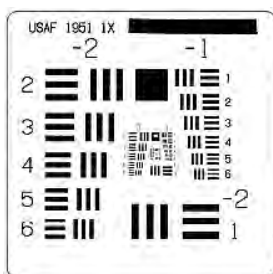
1.6. Развитие на изследванията в областта на УНВ

Научните изследвания в областта на УНВ могат да се класифицират най-общо в три основни групи. Първата група разглежда методите, свързани с тестването на параметрите на разработваните УНВ. Преди масовото им производство е важно да се гарантира съответствие между поставените проектни изисквания и реално получените параметри. В повечето случаи съответствието се установява след тестване на реално изработени прототипи. Когато има разминаване между проектните изисквания и реалните параметри, се налага ново проектиране, изработване на прототип и ново тестване, което води до допълнителни разходи. Предлаганите методи за тестване са подходящи и като средство за избор на подходящи уреди за конкретно приложение – например при възлагане на големи по обем поръчки. Втората група научни изследвания се фокусира върху разработването на методи за оптимизация на разработваните УНВ. Постигането на оптимални, в смисъла на някакви предварително зададени критерии, параметри на УНВ е основна цел на проектирането. Тя изисква постигане на най-добрите желани параметри, като се избегне или ограничи в известна степен процесът на многократно преработване и тестване. Поради това в последните години се появяват публикации, третиращи проблемите на оптимизацията при разработването на УНВ. Към третата група могат да се отнесат научните изследвания, свързани с разработването на методи и средства за обучение на

потребителите за използване на УНВ. Практическото използване на УНВ изисква наличие на определени умения и навици. В тази връзка са разработени методи и съответни средства, базиращи се на използване на съвременната компютърна техника.

1.6.1. Методи за тестване на параметрите на УНВ

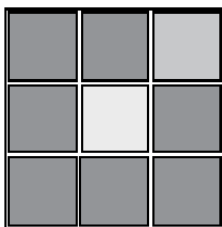
Разделителната способност на УНВ е един от основните параметри при сравняване качеството на различни уреди. Най-често прилаганият метод за определяне на разделителната способност на УНВ използва специално разработени комбинации от оптични обекти с периодична структура (мира) като например – USAF 1951, фиг. 1.30.



Фиг. 1.30. USAF 1951

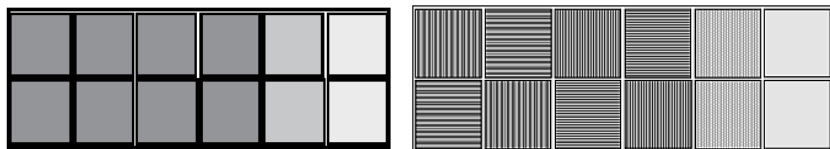
Този метод се е наложил като стандарт за тестване не само на опто-електронните уреди, но и на други оптични системи. Определянето на разделителната способност на УНВ се извършва от трениран наблюдател, наблюдаващ мирата при специфична осветеност. Въпреки масовото му използване и доказаната му полезност този метод не дава достатъчно добро съвпадение на резултатите. Възможна е разлика в определянето на разделителната способност от различни наблюдатели, до 60 % (Pinkus & Task 1998).

Друг метод за определяне на разделителната способност на УНВ използва диаграма, съдържаща 3x3 квадратни полета (“3x3 NVG Chart”). Тази диаграма е разработена като средство за оптимална предполетна настройка на УНВ (фиг. 1.31) (Pinkus & Task 1998). Тя е стандартизирана за наблюдение от разстояние 6.096 m (20 фута).



Фиг. 1.31. 3x3 NVG Chart

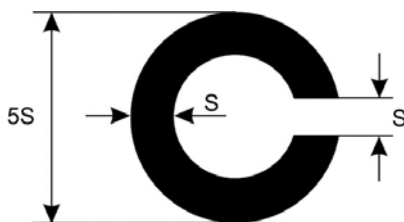
Всеки квадрат е оразмерен съответно на еквивалентните стойности на оптометричните таблици за измерване остротата на зрението (“Snellen Letter Charts”) от 20/20 до 20/60 единици за острота през 5 такива. Разположенията и ориентацията на квадратите в таблицата са случайни, което се постига чрез завъртане и чрез изработване на няколко таблици с различни нива на контраст. Тази диаграма не е подходяща за сравняване възможностите на различни УНВ. Недостатък на този метод е сравнително голямата стъпка между деветте полета, което го прави неизползваем при сравняване възможностите на различни УНВ с близки разделителни способности. За отстраняване недостатъка на горния метод е разработен друг метод, показан на фиг. 1.32 (Pinkus & Task 1998; Task 2001).



Фиг. 1.32. Диаграми при Step-Back метода

Диаграмата на този метод съдържа 6 двойки вертикално и хоризонтално ориентирани квадрати. Диаграмата се наблюдава през УНВ от разстояние 9.144 m или 30 фута. За определяне на разделителната способност чрез този метод, е необходимо измерванията да се повторят пет пъти от трима тренирани наблюдатели, а крайната стойност се получава като средно-аритметичен резултат.

Методът “Landolt C” е разработен от Националната академия на науките на САЩ през 1980 г. Използваната тестова диаграма е буквата “С” във формата на незатворена окръжност, с различна ориентация (фиг. 1.33) (Pinkus & Task 1998). Наблюдателят трябва да открие ориентацията на отвора при различни нива на осветеност.

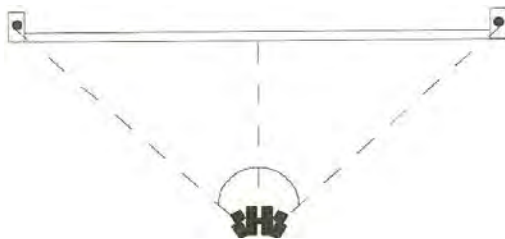


Фиг. 1.33. Кръг на Landolt

Тази разновидност на метода позволява относително ефективно и точно определяне на разделителната способност, като сходимост към действителната разделителна способност се постига с определен брой опити – между 10 и 35 опита. Въпреки задоволителните резултати повтарящи се тестове с един и същ

наблюдател в различни дни показват различни стойности на определената разделителна способност. Това се обяснява с факта, че се изследва праговото ниво на разделителна способност и незначителни промени в параметрите в УНВ, умора на наблюдателя и т.н., водят до разлики.

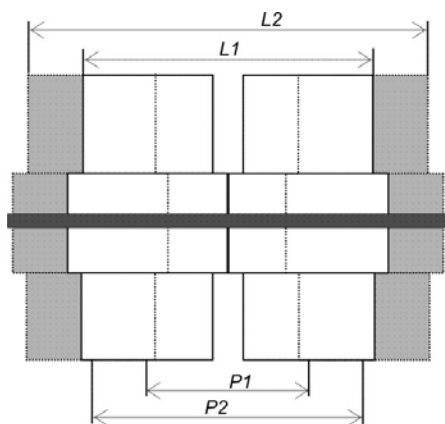
В (Marasco & Task 1999) е описана процедура за измерване на параметрите „зрително поле“ и „диоптрийна настройка“ на панорамни очила за нощно виждане (ПОНВ). Използвани са два метода за определяне на зрителното поле (фиг. 1.34) – тестване едновременно и на двата опто-електронни канала или последователно тестване на всеки от тях. Този метод има за цел да определи зрителното поле на УНВ, който в случая на ПУНВ е 100 градуса. Методът е достатъчно точен и обективен, тъй като изисква от наблюдателя да определи дали вижда или не съответните гранични маркери.



Фиг. 1.34. Измерване на „зрително поле“ и „диоптрийна настройка“

Определянето на увеличението, зрителното поле, отдалечеността и диаметъра на изходната зеница, диоптрийната настройка и попълното разстояние на произведените в България УНВ „Прилеп“ е описано в (Borissova & Dekov 2002). За определяне увеличението на УНВ се използва специализирана установка, съдържаща колиматор, опто-електронен канал на УНВ и диоптроскоп. Зрителното поле се определя по метода, описан в (Marasco & Task 1999). За определянето на

диоптрийната настройка са използвани диоптроскоп, опто-електронен канал на изследваните УНВ и светлинен източник, проектиращ образа на тест-обекта. Проверката се извършва за двата опто-електронни канала последователно. Диапазонът на попилното разстояние $P_2 - P_1$ се определя чрез измерване на разстоянията L_1, L_2 (фиг. 1.35) при най-близко и най-далечно разположение на електронно-оптичните канали и вземане предвид на диаметъра на опто-електронния канал.



Фиг. 1.35. Измерване диапазона на попилното разстояние

Един от най-важните параметри на УНВ е разстоянието им на действие. Определяне на разстоянието на действие на УНВ в реални условия е съпроводено с разходи на време и труд. Освен това всяко тестване се осъществява при конкретни условия на осветеност, състояние на атмосферата и на фоновата обстановка, като получените резултати са в сила само за тези условия. Това налага разработването на методи за теоретично или лабораторно определяне на разстоянието на действие на УНВ. В (Кривошапкин и Едельштейн 1998) е предложен метод, който се основава на намирането на регресивната зависимост за получаване на

разстоянието на действие на уреда, в зависимост от измерените в даден момент външни условия. Предполага се, че в определени граници тази зависимост може да има линеен вид. След намиране на коефициентите на регресията и въвеждане в уравнението на нормираните параметри на външните условия може да се определи разстоянието на действие на уреда при тези условия. Друг метод и компютъризирана система за определяне разстоянието на действие на УНВ в лабораторни условия е описана в (Григорьев и др. 2000). Ако се измерят разделителната способност и шумовете на УНВ е възможно, чрез предложен статистически модел на наблюдателя, да се определи разстоянието на действие при зададени условия.

В (Эдельштейн 1998) се предлага разглеждането на УНВ като детерминирано-стохастична система, състояща се от детерминирано звено – опто-електронния канал, и стохастично звено – зрителен анализатор. Практическо следствие от този подход е възможността за обосноваване отказа от определяне разстоянието на действие в полеви условия и определянето на това разстояние чрез проверка на обективните параметри на опто-електронния канал, като описващи напълно функционалните възможности на уреда. Съществен извод от подобен подход е възможността за използване на сравнително прости физически и математически модели за определяне разстоянието на действие на уреда, като функция от параметрите на УНВ и от външните условия на наблюдение. Чрез анализ на параметрите на елементите на опто-електронния канал на УНВ в (Кощавцев и др. 1999) е показано, че при ниски нива на осветеност увеличаването на разстоянието на действие на УНВ е за сметка на подобряване на енергийните параметри на елементите на системата, а при високи нива на осветеност – за сметка на повишаване на разделителната способност.

В (Гоев 2002) се предлага формула за определяне разстоянието на действие на УНВ, определена като функция от параметрите на обектива – пропускане на оптиката, диаметър на

входната зеница, интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП, разделителната способност на уреда и външни условия на наблюдение – пропускане на атмосферата, естествена нощна осветеност и контраст между наблюдавания обект и фона:

$$(1.1) \quad R = 3.10^5 \sqrt{\frac{\tau_o \tau_a D_{ex} S_{\Sigma} EK}{M \cdot \gamma}} \quad [m]$$

където: D_{ex} – диаметър на входната зеница на обектива в m, τ_o и τ_a – пропускане на оптиката и атмосферата съответно, S_{Σ} – интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП в A/lm, E – естествена нощна осветеност в lx, K – контраст, M – отношение сигнал/шум, γ – разделителната способност в rad.

Във формулата (1.1) участва разделителната способност на уреда и се отчита зависимостта на разстоянието на действие от интегралната чувствителност на фотокатода на ЕОП. Недостатък на (1.1) е, че при определяне на разстоянието на действие не се взема предвид площта на наблюдавания обект.

Един от най-разпространените методи за теоретично определяне на разстоянието на действие е използването на енергетичен разчет (Елизаренко и др. 1981). Чрез него е изведена формула, определяща разстоянието на действие като (Borissova и др. 2001):

$$(1.2) \quad R = \sqrt{\frac{A_{ex} A_{ob} \tau_o \tau_a EK}{\pi \cdot M \cdot \Phi_{np. \phi k}}} \quad [m]$$

където: A_{ex} – площ на входната зеница на обектива в m^2 , A_{ob} – площ на наблюдавания обект в m^2 , τ_o – пропускане на оптиката, τ_a – пропускане на атмосферата, E – естествена нощна осветеност в lx, K – коефициент на използване на потока от фотокатода, M – отношение сигнал/шум, $\Phi_{np. \phi k}$ – прагова чувствителност на фотокатода на ЕОП в lm.

Формула (1.2) взема под внимание площта на наблюдавания обект, но не отчита разделителната способност на уреда. Тук спектралната чувствителност на фотокатода на ЕОП участва

неявно чрез параметъра K (коефициент на използване на светлинния поток от фотокатода).

В (Малинин 2003) е направен изводът, че разстоянието на действие на УНВ зависи от много величини, включително и от фокусното разстояние на обектива и от диаметъра на входната зеница. Обосновава се идеята, че при проектирането е необходимо да се подбере такова съотношение на параметрите, при което разстоянието на действие на УНВ да е оптимално спрямо зададени изисквания.

Всеки от описаните методи за тестване на разделителната способност притежава определени предимства и недостатъци. Изборът на конкретен метод зависи от целта, за която ще се използва. Анализът на предлаганите методи за определяне разстоянието на действие на УНВ показва, че трябва да се вземат предвид както параметрите на уреда, така и външните условия на наблюдение. Разгледаните методи за определяне разстоянието на действие на УНВ показват, че съществува тенденция за заменяне на традиционните полеви изпитания с лабораторни изпитания и теоретични изчисления, чрез което се намаляват субективността на полевите изпитвания и разходите за тях, и има възможност за съпоставяне на параметрите на различни типове УНВ при еднакви условия.

1.6.2. Оптимизация и УНВ

Едно сравнително ново направление в проектирането на УНВ е използването на оптимизационни методи (Гоев 2002а). Процесът на модернизация (разширяване на функционалните възможности, подобряване на основните параметри, разширяване на приложимостта, осигуряване на по-добри ергономични показатели) на УНВ изисква решаване на проблеми, свързани с технико-икономическата им оптимизация. Формулира се задача за избор на комбинация от параметри, които ще осигурят максимално възможно качество при предварително зададени условия. Тъй като

от потребителска гледна точка един от най-важните параметри е разстоянието на действие, този параметър е избран като качествен критерий за оптимизацията, определено като функция от параметрите на уреда и външните условия на наблюдение (Гоев 2002а).

Друго направление на оптимизацията на УНВ е използването на унифицирани модули (Гоев, 2002b). Това е удобно от производствена гледна точка, тъй като позволява сравнително просто да се модернизират УНВ без сериозни конструктивни преработки. Тук също се съдържа идеята за оптимизация, тъй като се изисква избор на модули от зададено множество, при който избор трябва да се удовлетворяват определени критерии. Разширяване на функционалните възможности на уред за нощно виждане е описано в проспектите на фирма Litton. Разработени са унифицирани модули от окуляри, адаптери и различни приспособления, позволяващи сравнително просто да се приспособят УНВ към нови функционални приложения. Използвайки базов модул М944 (монокуляр) с ЕОП от III поколение и различни обективи, уредът се модифицира като монокуляр с увеличение 1^x , 3^x , 4^x , 6^x с възможност за монтиране към 35 mm фотоапарат и видеокамера. В (Рамм & Родионов 1977) е предложен метод за оценка качеството на уред за нощно виждане по отношение на разделителната му способност. Предложен е критерий за оптимален уред, който различава два произволни сигнала на фона на корелиращи смущения, като се вземат предвид реалното зрително поле на уреда и наличието на шумове в приемника на образа. Един подход за елиминиране на проблемите при механичната конструкция в краищата на лещите е описан в (Hall 2002). Оптимизирането на кривината и дебелината на лещите, като се взема предвид диаметърът на входната зеница, води до намаляване общото тегло на обектива с около 35%. В (Feng и др. 2000) е приложен генетичен алгоритъм за програмиране на оптоелектронното устройство като процесор с оптична логическа

матрица. Тази публикация също доказва засилване на интереса към използване на оптимизационни методи за опто-електронни приложения.

При проектирането на оптичните системи се използват специализирани компютърни програми (“Oslo”, “Code V”, “Zemax” и др.). Те включват в себе си всички необходими модули за проектиране на висококачествени оптични системи, в т.ч. и модули за оптимизация на тези системи по отношение на aberации, размери, тегло и т.н. (Mirzu 2000). В тази област напоследък се използват и програми, реализиращи сложни математически методи за проектиране на асферични лещи (OpTaliX, ZEMAX). Това е едно ново и перспективно направление за постигане на желаните оптични изисквания при намаляване броя на лещите и теглото на оптичната система (Rouke и др. 1998).

Въпреки че при всяка разработка на оптически системи се решават оптимизационни проблеми, оптимизацията на опто-електронните уреди като цяло е сравнително нова област. По-голямата част от разгледаните публикации третира проблемите на оптимизиране на отделните елементи на опто-електронния канал – обектив или ЕОП или окуляр. Съществуват обаче и публикации, които поставят началото на ново направление в теоретичните изследвания на УНВ – оптимизация на уредите като цяло по отношение на предварително зададени критерии за качеството на уреда. Разстоянието на действие е един от най-важните от потребителска гледна точка параметри и следва да бъде един от основните компоненти на критерий за оптимизация на УНВ. Използването на специализиран софтуер за проектиране на качествени оптични системи с известни параметри и наличието на множество ЕОП от различни поколения с определени параметри позволява те да бъдат използвани като готови елементи при разработването на УНВ. По този начин оптимизацията при разработването на УНВ включва и процес на оптимален избор на елементите им.

1.6.3. Методи и средства за обучение на потребителите

Използването на УНВ изисква определени знания и умения. В тази връзка са разработени технологии за обучение и тренировка при използването на УНВ. Те включват традиционно обучение в класна стая, практическо обучение, симулация, тренировка в реални условия. Тези традиционни технологии се допълват и с нови компютърни технологии, които включват компютърни симулации и обучение чрез Интернет, независимо от време и място (Ruffner и др. 1997). Предлага се обучение както с военна цел, така и за гражданско предназначение (поддържане и използване на УНВ, шофиране, пилотиране и др.). Например в (Ruffner и др. 1999) е разработена концепция за изграждане на компютърен симулатор за нощно виждане за тренировка за шофиране с УНВ. Описан е подход и постигнатите предварителни резултати за определяне и демонстриране на сравнително евтин симулатор за нощно шофиране с използване на УНВ. Подобна компютърна система за водачи на моторни превозни средства за самоподготовка и тренировка за разпознаване на образа, тестове и практични упражнения е описана в (Ruffner и др. 2000). Компютърно базиран Интернет-курс за текуща тренировка за използване на УНВ, е описан и в (Ruffner и др. 2001).

Използването на УНВ изисква предварително обучение и тренировка. Уменията за работа с УНВ са нетрайни и изискват постоянно практикуване и поддържане. Възможностите на съвременните компютърни технологии се използват за създаване на компютърни симулатори за обучение при използването на УНВ.

Глава II

Основни параметри на УНВ

Развитието на технологиите и намаляването на цените на УНВ доведоха до масовото им приложение в най-различни области. В тази връзка се забелязва засилен интерес към изследване на тези уреди и използване на получените резултати за моделирането им с цел проектиране и производство на УНВ с определени качествени показатели (Борисова и др. 2001). Качеството на УНВ се определя от различни параметри, като най-съществени от практическа гледна точка са: разстоянието на действие, зрителното поле, разделителната способност, наличието на минимални aberации, малки габаритни размери и тегло, цена.

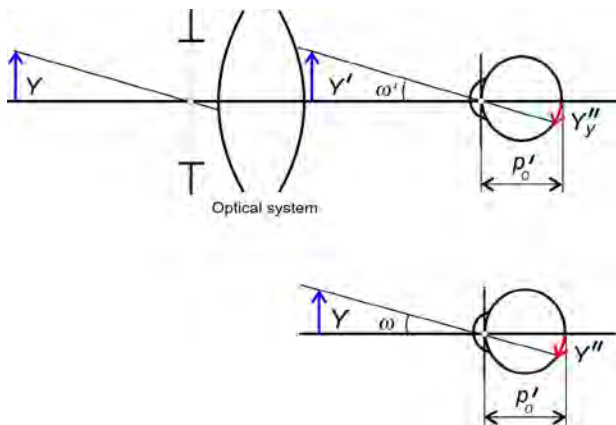
В настоящата глава са разгледани основните параметри на УНВ и връзката им с външните условия на наблюдение, с цел дефиниране на критерий за качество, подходящ за моделиране на опто-електронния канал на УНВ. Изведена е формула за теоретична оценка на разстоянието на действие на УНВ, като функция от параметрите на обектива (диаметър на входната зеница, фокусно разстояние, пропускане на оптиката), от параметрите ЕОП (разделителна способност, интегрална чувствителност, отношение сигнал/шум) и от външните условия на наблюдение (естествена нощна осветеност, контраст, пропускане на атмосферата, площ на наблюдавания обект). Използвайки критерия на Johnson, е въведен нов параметър „*приведена площ*“ на наблюдавания обект, използван при определяне на различните разновидности на разстоянието на действие на УНВ, а именно разстояние на откриване, на ориентация, на разпознаване и на идентификация.

2.1. Параметри на УНВ

Основните параметри на УНВ, които ще бъдат разгледани са: видимо увеличение, зрително поле, разделителна способност, относителен отвор, фокусировка на обектива, отдалеченост и диаметър на изходната зеница, диоптрийна настройка, попилно разстояние, стереоскопичност, ергономичност и разстояние на действие.

2.1.1. Видимо увеличение

Понятието видимо увеличение е въведено за оптичните уреди, предназначени за визуално наблюдение (Вълева 1993). Видимото увеличение Γ се изразява с отношението на тангенса на ъгъла, под който предметът се наблюдава чрез оптичната система, към тангенса на ъгъла, под който предметът се наблюдава с невъоръжено око, т.е. определя се от съотношението на големината на образите Y'_y и Y'' на предмета Y , получени върху ретината на окото, съответно при наблюдение през оптичен уред и с невъоръжено око (фиг. 2.1) (Вълева 1993):



Фиг. 2.1. а) наблюдение през оптичния уред; б) наблюдение с невъоръжено око

$$(2.1) \quad \Gamma = \frac{Y_y''}{Y''} = \frac{p'_o \operatorname{tg} \omega'}{p'_o \operatorname{tg} \omega} = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega}$$

където: ω е ъгълът, под който се наблюдава предметът с невъоръжено око, а ω' е ъгълът, под който се наблюдава образът на предмета след оптичния уред.

За сложни оптични системи, каквито са УНВ, видимото увеличението Γ се определя като (Вълева 1993)

$$(2.2) \quad \Gamma = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} \prod_{i=1}^m \beta_i$$

където: $f'_{об}$ – фокусно разстояние на обектива, mm, $f'_{ок}$ – фокусно разстояние на окуляра, mm, β_i – линейното увеличение на компонент от оптичната система, разположен между обектива и окуляра, m – брой на компонентите.

Типичното увеличение на УНВ е равно на $1 \pm 2\%$ (Turpin 2001).

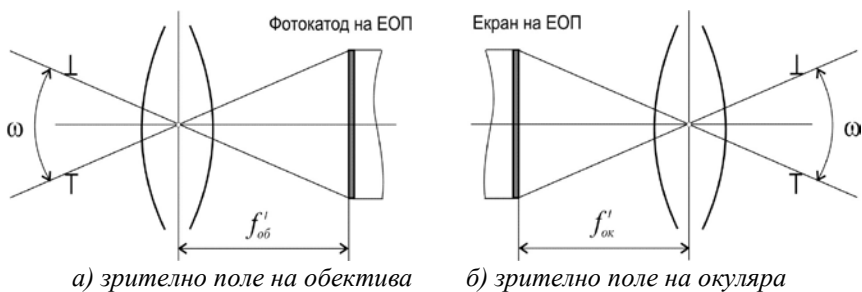
От (2.2) и $\Gamma = 1$ следва, че за да се осигури увеличение на УНВ, равно на 1, фокусните разстояния на обектива и окуляра трябва да са равни, а увеличението на ЕОП трябва да е (-1) , т.е. трябва да се използва инвертиращ тип ЕОП.

2.1.2. Зрително поле

Зрителното поле се измерва с ъгъла или размерите, които могат да се видят през УНВ, измерени хоризонтално и вертикално. Изразява се в ъглови единици (градуси, минути, секунди) или в линейни единици (видим размер в метри за определено разстояние). Колкото по-голямо е зрителното поле, толкова по-голяма визуална информация получава наблюдателят. Зрително поле на обектива може да се определи чрез отношението на диаметъра на фотокатода към фокусното разстояние на обектива (фиг. 2.2а):

$$(2.3a) \quad f'_{об} = \frac{D_{фк.ЕОП}}{2tg\left(\frac{\omega}{2}\right)} \text{ [mm]}$$

където: $f'_{об}$ – фокусно разстояние на обектива в mm, ω – зрително поле в градуси, $D_{фк.ЕОП}$ – диаметър на фотокаатода на ЕОП в mm.



Фиг. 2.2. Зрително поле

Аналогично на обектива, зрителното поле на окуляра (фиг. 2.2б) може да се определи чрез зависимостта:

$$(2.3б) \quad f'_{ок} = \frac{D_{ек.ЕОП}}{2tg\left(\frac{\omega}{2}\right)} \text{ [mm]}$$

където: $f'_{ок}$ – фокусно разстояние на окуляра в mm, ω – зрително поле в градуси, $D_{ек.ЕОП}$ – диаметър на екрана на ЕОП в mm;

Типичното зрително поле на УНВ е 40 градуса, като тенденцията е то да се увеличава. За целта се разработват панорамни УНВ със зрително поле 95–100 градуса по хоризонтала и 40 градуса по вертикала.

2.1.3. Разделителна способност

Разделителната способност на УНВ е съществен параметър за качество на уредите и се определя от разделителната способност на опто-електронния канал. В литературата могат да бъдат намерени

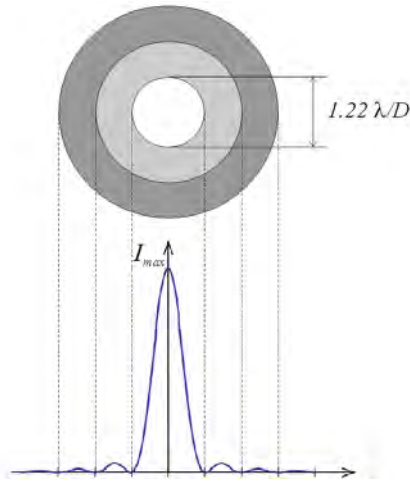
различни определения за разделителна способност на оптични системи и уреди. Граничната разделителна способност е минималното разстояние между две точки, при което техните образи се възприемат все още като отделни. Според критерия на Фуко, използван за оценка на качеството на образа на оптични системи, се наблюдават и оценяват обекти със сложна структура (Родионов 2000). Разделителната способност се определя като максималната пространствена честота на периодичен тест-обект, състоящ се от черно-бели ивици (т.нар. мира) при определен контраст (обикновено равен на 0.2). Във военните стандарти разделителната способност на опто-електронни уреди най-често се дефинира като максималната пространствена честота на стандартен тест-обект от групи от линии (“USAF 1951”), който може да бъде разпознат от наблюдател при определено ниво на осветеност и контраст (Bijl&Valetton 1994). Съществуват различни методи за определяне на разделителната способност на оптични уреди (Task 2001), но най-често се прилага методът, използващ “USAF 1951” (MIL-STD-150A). Той е разработен от американските военно-въздушни сили през 1951 г. и е най-често използваният тест за определяне на разделителната способност на оптични уреди както с военно, така и с гражданско предназначение.

Трябва да се отбележи, че образът на всеки точков източник не е точка, а представлява дифракционна картина (кръг на Айри), както е показано на фиг. 2.3.

Централният максимум съставлява 83.8 % от цялата енергия, първият вторичен максимум съдържа 7.2 %, вторият вторичен максимум 2.8 % и т.н. Диаметърът на петното на Айри (d) зависи от апертурата на оптичната система и дължината на дълната:

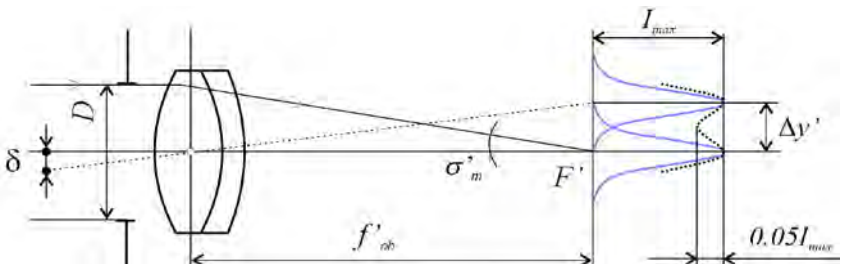
$$(2.4) \quad d_{\text{Айри}} = \frac{1.22\lambda}{D}$$

където: D – диаметър на апертурната бленда на оптичната система.



Фиг. 2.3. Дифракционна картина (кръг на Айри)

Дифракцията на светлината като всеобхватно физично явление определя размера на идеалното оптико-геометрично изображение и понижава реалната разделителна способност на кохерентната или некохерентна оптична система. Ъгълът на отклонението на първия дифракционен максимум зависи от много фактори и за кръгъл отвор се определя като $\sin \phi \approx (1.22\lambda)/D$. Според критерия на Рейли картината на оптичното изображение като разпределение на осветеността при изобразяване на две близко разположени точки има вида, показан на фиг. 2.4.



Фиг. 2.4. Разделителна способност според критерия на Рейли

Ако в оптичната система липсват aberации, то разделителната способност се ограничава от дифракцията на светлината и зависи от диаметъра на апертурната бленда D на обектива, като задният му апертурен ъгъл е

$$(2.5) \quad \sigma'_m = \frac{D}{2f'}$$

където D и λ са в еднакви дименсии.

Минималното разстояние между две разделени точки в изображението се определя като (Николов 1993):

$$(2.6) \quad \Delta y' = \frac{0.51\lambda}{\sigma'_m}$$

За предмет, безкрайно отдалечен от обектива, ъгловата величина на дифракционната разделителна способност се определя чрез следното представяне (Николов 1993):

$$(2.7) \quad \delta = \frac{\Delta y'}{f'} = \frac{120''}{D}$$

при дължина на вълната $\lambda = 546 \text{ nm}$.

Ъгловата величина на радиуса на първия минимум в петното на Айри се изчислява по формула (2.6) за изобразяване на светеща точка от идеална оптична система, а за реалните обективи разделителната способност е по-малка от $\delta = 140''/D$ (Николов 1993; Вълева 1993).

Следователно граничната разделителна способност за оптичните системи се определя от диаметъра на апертурната бленда, дължината на светлинната вълна и aberациите. За отдалечени обекти разделителната способност се измерва в брой линии на единица ъгъл (линии/rad), а за близко разположени обекти – в брой линии на единица дължина (линии/mm). Изискванията за минималната разделителна способност на УНВ с военно предназначение е 1.0 линии/mrad (Turpin 2001).

Разделителната способност на УНВ зависи от разделителната способност на оптико-електронния канал, т.е. от параметрите на използвания обектив, ЕОП и окуляр.

2.1.4. Относителен отвор

Относителният отвор на дадена оптична система се определя от абсолютната стойност на отношението на диаметъра на апертурната бленда D към фокусното разстояние f :

$$(2.8) \quad \left| \frac{D}{f} \right|$$

Реципрочната стойност на относителния отвор е прието да се нарича *диафрагмено число* k :

$$(2.9) \quad k = \left| \frac{f}{D} \right|.$$

Записът k 1:1.2 е еквивалентен на k /1.2 и показва, че фокусното разстояние е 1.2 пъти повече от диаметъра на входната зеница.

Обективи с голям относителен отвор имат предимства пред останалите обективи в условията на ниски осветености, но трябва да се има предвид че с увеличаване на относителния отвор на обектива се намалява качеството на образа, тъй като при големи входни зеници се увеличават aberациите.

Стойностите на диафрагменото число на обективите, които се използват при УНВ, са в диапазона от 1.05 до 1.4.

2.1.5. Светлосила

Светлосилата е характеристика, определяща ефективността на уреда при недостатъчна осветеност. Светлосилата се изразява като число, право пропорционално на квадрата на диаметъра на входната апертурна бленда D и обратно пропорционално на квадрата на фокусното разстояние f . Геометричната светлосила се дефинира като:

$$(2.10) \quad H = \left(\frac{D}{f}\right)^2,$$

а ефективната светлосила е:

$$(2.11) \quad H = \tau_o \left(\frac{D}{f}\right)^2,$$

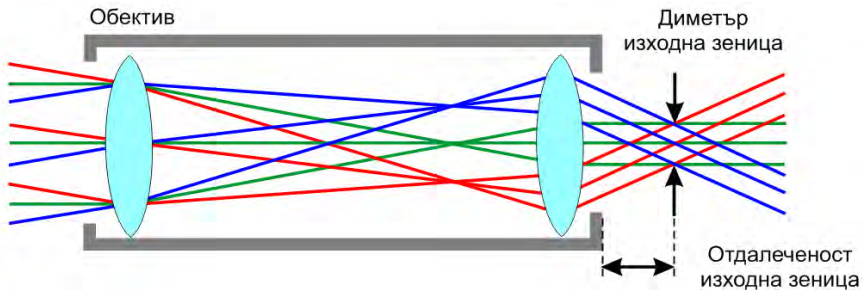
където: τ_o е пропускането на оптиката.

Прието е светлосилата да се оценява чрез съответното диафрагмено число. Даден обектив се нарича светлосилен, ако диафрагменото му число $k = 2.8 \dots 4.5$, свръхсветлосилен, ако $k < 2$ и слабосветлосилен, ако $k > 5.6$.

За да се увеличи светлосилата, е необходимо да се увеличи относителният отвор, но при това увеличаване нарастват и аберациите, т.е. влошава се качеството на образа.

2.1.6. Отдалеченост и диаметър на изходната зеница

Конструкцията на окуляра не влияе на разстоянието на действие на уреда, но се отразява на комфорта при наблюдение. За да се използва пълноценно екранът на ЕОП, той трябва да се вижда целият през зрителното поле на окуляра. Основната функция на окуляра е да фокусира образа на предмета, така че да се осигури необходимото зрително поле с достатъчен диаметър и отдалеченост на изходната зеница (фиг. 2.5).



Фиг. 2.5. Отдалеченост и диаметър на изходната зеница

За да се постигне тази цел, е необходима серия от изчисления за определяне на параметрите на окуляра като функция на обектива и зрителното поле.

Минималният диаметър на изходната зеница $D_{изх.з.min}$ може да бъде изчислен по следната формула (Rash 1998):

$$(2.12) \quad D_{изх.з.min} = 2(L_{изх.з.} + 3)tg\left(\frac{\omega}{2}\right) + D_{з.око}$$

където: $L_{изх.з.}$ – отдалеченост на изходната зеница в mm, ω – зрително поле в градуси, $D_{з.око}$ – диаметър на зеницата на човешкото око в mm.

Диаметърът на изходната зеница се определя като (Rash 1998):

$$(2.13) \quad D_{изх.з.} = \frac{f_{ок}}{k_{об}},$$

т.е. зависи както от фокусното разстояние на окуляра $f_{ок}$, така и от диафрагменото число на обектива $k_{об}$.

Диаметърът на зеницата на човешкото око се изменя от 2–3 mm на светло до 6–8 mm на тъмно (Berezovsky и др. 2001). Следователно отдалечеността на изходната зеница на окуляра може да се представи като:

$$(2.14) \quad L_{изх.з.} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{f_{ок}}{k_{об}} - 7 \right) \frac{1}{tg(\omega/2)} - 6 \right)$$

Тъй като зеницата на човешкото око на тъмно има диаметър 6–8 mm, то за УНВ диаметърът на изходната зеница на окуляра трябва да бъде по-голям от този диаметър. Практиката е показала, че за УНВ отдалечеността на изходната зеница на окуляра, т.е. разстоянието от последната повърхнина на окуляра до изходната зеница, трябва да е по-голямо от 12–15 mm.

2.1.7. Аберации на оптичната система и на ЕОП

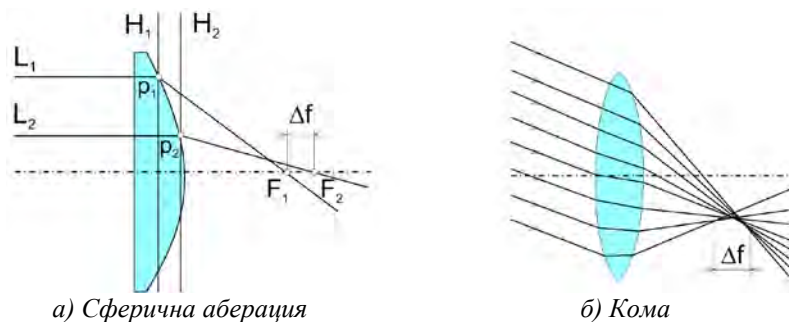
Аберациите (геометричните изкривявания) на оптичната система значително намаляват теоретичната ѝ разделителна способност. При оценка на качеството на образа за изходен модел на

аберационните свойства на оптичната система се взема вълновата аберация. Стойността ѝ определя качеството на оптичната система (Родионов 2000).

В съвременните оптични уреди се предявяват високи изисквания към качеството на образа, но трябва да се има предвид, че по-пълното коригиране на аберациите води до увеличаване броя на лещите, а оттам и увеличаване на общото тегло на обектива, респективно окуляра. Тъй като при УНВ наблюдаваният на екрана на ЕОП образ е в зелен цвят, то тук са съществени монохроматичните аберации – сферична аберация, астигматизъм, кривина на полето и дисторсия.

Сферична аберация и кома

При сферичната аберация, поради огънатите повърхности на лещата и различно дългия път, който лъчите изминават в нея, техните ъгли на пречупване леко се различават и се фокусират на различни разстояния зад лещата (фиг. 2.6).



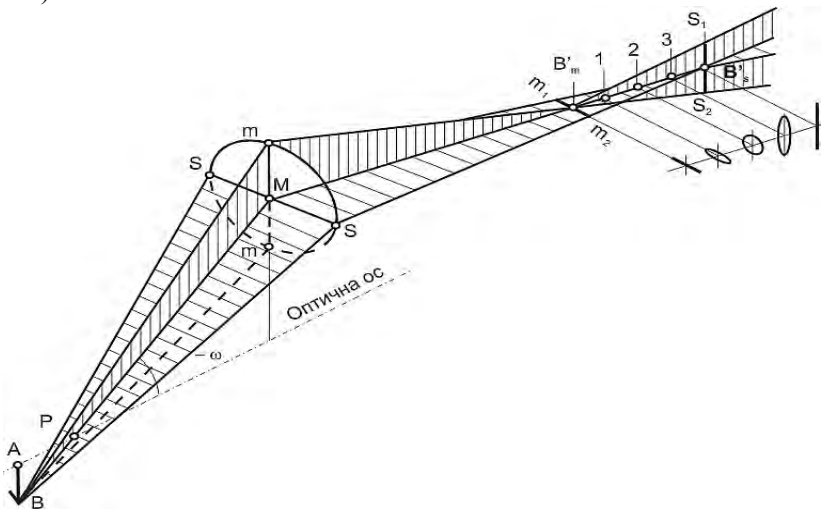
Фиг. 2.6. Сферична аберация и кома

Периферният лъч L_1 излиза от лещата от т. p_1 , а централният L_2 от т. p_2 . Разликата между фокусите за двата лъча Δf се дължи на разстоянието l между равнините H_1 и H_2 , определящо се от повърхностната кривина на лещата. Това води до понижаване на контраста на образа.

Сферичната aberация за лъчите, попадащи под ъгъл спрямо главната оптична ос, се нарича „кома“. Фокусът е размит в областта Δf , поради разликата в ъглите, под които отделните лъчи срещат повърхността на лещата.

Астигматизъм

Астигматизмът е монохроматична aberация, която се характеризира с това, че лъчите на безкрайно тесен наклонен сноп, минаващ безкрайно близко до главния лъч, след пречупването от оптичната система не се пресичат в една точка (фиг. 2.7) (Вълева 1993).



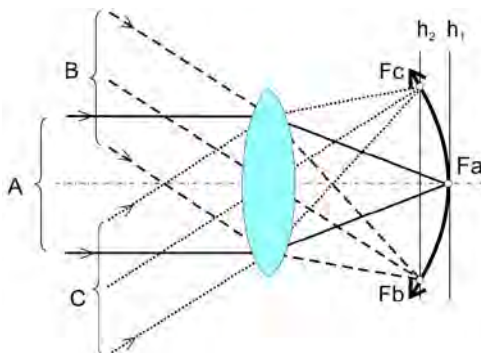
Фиг. 2.7. Астигматизъм

Астигматизмът се дължи на това, че лъчите от две взаимно перпендикулярни надлъжни сечения на снопа светлина (например във вертикална и хоризонтална равнина) не се фокусират в една точка. Астигматизмът се изразява в това, че образът на точка не е точка, а петно с формата на елипси или чертички. Тази aberация се получава и когато оптичната повърхност не е с еднаква форма в две

взаимно перпендикулярни равнини и има различни фокусни разстояния в тези равнини. Оптична система с изправен астигматизъм се нарича анастигмат.

Кривина на полето

В реалните оптични системи равнината не се изобразява като равнина, а като по-малко или повече изкривена повърхнина (фиг. 2.8). Този недостатък на оптичните системи се нарича „кривина на полето“.



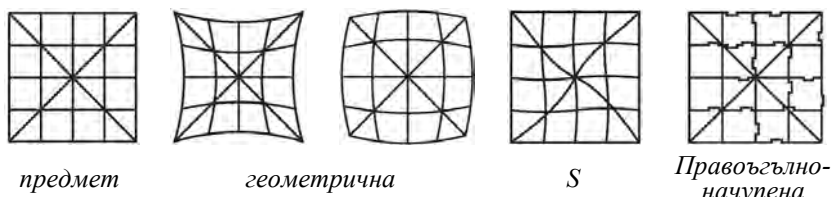
Фиг. 2.8. Кривина на полето

Докато сферичната аберация, комата и астигматизмът са недостатъци по отношение на остротата на образа и затова могат да бъдат коригирани, изкривяването на полето не може да бъде коригирано (Вълева 1993). Наклонените спрямо главната оптична ос снопове от успоредни лъчи В и С (фиг. 2.7) се фокусират във фокалната равнина h_2 , която се намира по-близо до лещата от фокалната равнина h_1 на перпендикулярно падащия сноп А.

Дисторсия

Дисторсията е аберация, която предизвиква нарушаване на подобие то между образа и предмета. При наличие на дисторсия образът е ясен, но деформиран. Дисторсията е следствие на факта, че напречното увеличение не е едно и също за различни точки от

равнината, разположена перпендикулярно на оптичната ос. Три типа дисторсия, причинени от използването на ЕОП, са от съществено значение за УНВ: геометрична дисторсия, S-дисторсия и правоъгълно-начупена дисторсия, показани на фиг. 2.9.



Фиг. 2.9. Видове дисторсии

Геометричната дисторсия е характерна за ЕОП от 0 и I поколение и за ЕОП от II поколение, които инвертират образа по електростатичен начин, но не се наблюдава при ЕОП, използващи микроканална и влакнесто-оптична пластина (ВОП). S-дисторсията е характерна за ЕОП с ВОП, тъй като е резултат от усукването на влакнесто-оптичната пластина, обръщаща образа на 180 градуса. На практика S-дисторсията е много малка и трудно може да се открие с невъоръжено око.

При правоъгълно-начупената дисторсия правата линия се изобразява като линия с насложени върху нея правоъгълни изменения. Тя се проявява, когато ЕОП използва ВОП за пренос на образа към фосфорния екран.

Неинвертиращите ЕОП, използващи микроканална пластина и плоско стъкло като изход към оптиката, нямат дисторсия. Допустимата относителна дисторсия, т.е. дисторсията, която при възприемане от човешкото око не предизвиква усещане, че образът е изкривен, е в границите на 5–10 % (Родионов 2000).

За случая на УНВ се допуска дисторсия, по-малка от 4 % през цялото зрително поле (Turpin 2001).

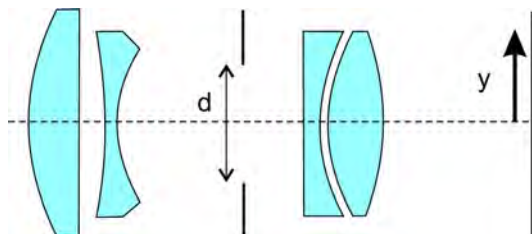
Общи изводи за разгледаните aberации на оптичната система

Увеличаването на диаметъра D на обектива, респективно на окуляра, води до нарастване на всички видове aberации. В таблица 2.1 е показана една сравнителна оценка на зависимостите на aberациите от трети ред от апертурния диаметър на оптична система (обектив-окуляр).

Таблица 2.1

Аберация	d	y
Сферична аберация	D^3	–
Кома	D^2	Y
Астигматизъм	D	Y^2
Кривина на полето	D	Y^2
Дисторсия (%)	--	Y^2

Това може да се разглежда като една апроксимация, която не включва по-високите редове на аберацията, но дава полезна информация за функционалната зависимост между диаметъра и съответната аберация на оптичната система (фиг. 2.10).



Фиг. 2.10. d – апертурен диаметър, y – разстояние от центъра на образа

Понастоящем съществува голямо разнообразие от висококачествени обективи и окуляри с известни стойности на аберациите. Поради това не е необходимо изчисляването им, а извършване на подходящ избор на обективи и окуляри с аберации, съответстващи на зададените изисквания.

2.1.8. Регулиране на обектива, окуляра и попилното разстояние на УНВ

Възможността за фокусиране на обектива е съществено удобство при използването на УНВ. Тя позволява да се наблюдават както отдалечени, така и близко разположени обекти (напр. при ориентиране по карта, при ремонтни дейности и др.). Диапазонът на фокусировка варира от 0.2–0.41 m до безкрайност. При конструирането на УНВ е желателно да се осигури регулиране на диоптрийната настройка, тъй като в най-общия случай потребителите могат да се нуждаят от различна корекция на зрението. За целта се осигурява различни диапазони на диоптрийната настройка на окулярите като: (-6, +2), (-2, +6), (-3, +3), (-4, +4), (-4.5, +4.5), (-5,+5) диоптъра.

За бинокулярните УНВ трябва да се предвиди и възможност за регулиране на попилното разстояние (очната база), тъй като различните потребители са с различно попилно разстояние. Границите на регулировка са различни, като долната е от 51 до 58 mm, а горната от 72 до 80 mm.

В най-общ случай: стойностите за минималното фокусиране на обектива при УНВ са в интервала 0.2–0.41 m до безкрайност; долната и горна граница на диоптрийната настройка е от -6 до +6 диоптъра; граничните стойности на изменение на диапазона на попилното разстояние са от 51 до 80 mm.

2.1.9. Стереоскопичност

Благодарение на факта, че гледаме с две очи, може да преценяваме отдалечеността на различните предмети, разстоянията между тях и да съдим за тяхната обемност. Стереоскопичният ефект се получава при бинокулярно зрение, благодарение на което може да се определя пространственото разположение на наблюдаваните обекти един спрямо друг. Запазването на този ефект при биноклите е въпрос на много прецизна настройка на оптичните оси на двата

зрителни канала. Този ефект се дължи на факта, че двете очи наблюдават една и съща картина през оптични системи с еднакви параметри. Стереоскопичността се запазва при наблюдението с бинокулярните уреди (уреди с два отделни канала за наблюдение за лявото и дясно око), но липсва при наблюдение с биокуляри уреди (т.нар. циклопи – уред с два окуляра, един ЕОП и един обектив).

Поради изискването за стереоскопичност на наблюдавания образ при управление на самолети, вертолетите и други транспортни средства, бинокулярните УНВ са задължителни за тези случаи.

2.1.10. Ергономичност

Удобството на ползване на УНВ е важно при практическото им приложение. Ергономичността зависи от механичната конструкция и теглото и определя комфорта или дискомфорта при употребата на уреда. Теглото зависи от използваните елементи и размерите им и е също съществен параметър, който трябва да се има предвид при проектирането на УНВ. Дължината на обектива, заедно с тази на ЕОП и на окуляра, определят дължината на опто-електронния канал. Дължината на този канал е определяща за големината на въртящия момент, който трябва да се поеме от механичната конструкция. В повечето случаи не може да се избегне наличието на определен въртящ момент, натоварващ потребителя и предизвикващ умора, но е важно при конструирането на УНВ да се обърне внимание на подбора на елементи, осигуряващи необходимите параметри, при минимизиране на теглото, размерите им и съответния въртящ момент.

Важността на ергономичността на УНВ е потвърдена в (Добровольский и др. 1998), където е предложен критерий за качество на УНВ K , използвайки отношението на зрителното поле към стойността на въртящия момент:

$$(2.15) \quad K = \frac{2\omega R}{aM}$$

където: ω – зрително поле на УНВ, R – разстояние на идентификация, a – разстоянието от опорната точка на лицето до центъра на тежестта на УНВ, M – тегло на УНВ.

УНВ с малко тегло, създаващи малък въртящ момент, намаляват умората на наблюдателя при продължителна работа. Практиката е показала, че при използването на УНВ е важен и ергономичният дизайн на уреда – функционалното разположение на съответните превключватели и схемата на закрепването му, лесното и интуитивно регулиране на попилното разстояние, диоптрийната настройка и фокусировката на обектива.

2.1.11. Разстояние на действие

Един от най-съществените потребителски параметри на УНВ е разстоянието на действие на уреда. В литературата са описани (Vijl & Valeton 1998) няколко разновидности на разстоянието на действие в зависимост от желаната специфика на наблюдението – разстояние на откриване, разстояние на ориентация, разстояние на разпознаване и разстояние на идентификация.

- Разстояние на откриване (R^O) – разстоянието до обекта, при което обектът се открива, т.е. на фона се забелязва образ на някакъв обект
- Разстояние на ориентация (R^{OP}) – разстоянието, при което е възможно определяне на пространствената ориентация на обекта (определяне посоката на по-големия размер в един минимален ограничаващ правоъгълник)
- Разстояние на разпознаване (R^P) – разстоянието, при което се виждат детайли на наблюдавания обект с определен размер. При това разстояние обектът може да се класифицира към определен тип – човек, танк, животно и т.н.
- Разстояние на идентификация (R^I) – разстоянието, при което може да се определи принадлежността на обекта към някаква класификационна група – например „свой“ или „чужд“.

В сила е следната зависимост между различните типове разстояния на действие:

$$R^H < R^P < R^{OP} < R^O$$

Разстоянието на действие на уреда зависи както от параметрите на уреда, така и от външните условия на наблюдение. Аналитичното определяне на разстоянието на действие в зависимост от параметрите на уреда и външните условия на наблюдение е описано подробно в следващата т. 2.2.

Разстоянието на действие на УНВ е обобщен параметър. При конкретни изчисления се има предвид една от разновидностите му – разстояние на откриване R^O , разстояние на ориентация R^{OP} , разстояние на разпознаване R^P , разстояние на идентификация R^H . Независимо от това коя разновидност на разстоянието на действие е търсена, то е задължителен компонент при дефинирането на критерий за качество на УНВ.

2.2. Определяне на разстоянието на действие на УНВ

Тъй като разстоянието на действие е един от най-важните параметри на УНВ, е необходимо то да се разгледа подробно и да се намери функционалната му зависимост от параметрите на оптоелектронния канал на уреда. Тази зависимост ще позволи теоретично определяне на стойностите за различните разновидности на разстоянието на действие в зависимост от избора на модулите. В повечето случаи получените чрез аналитични изчисления резултати се отличават от измерените реални резултати, но дават сравнително добра основа за параметрите на проектираното устройство. За теоретично определяне на разстоянието на действие на УНВ е необходимо да се формулира аналитична зависимост, която достатъчно добре да отразява както параметрите на отделните модули на устройството, така и параметрите на външните условия на наблюдение. Това ще позволи

още на етапа на проектиране да се получи оценка за този важен параметър на УНВ.

Различни физически величини влияят на разстоянието на действие на УНВ. Очевидно е, че по-големите обекти се виждат по-лесно, т.е. разстоянието на действие зависи от размера на наблюдавания обект. Условиата на наблюдение (осветеност, наблюдаван обект, контраст между обекта и фона, пропускане на атмосферата – мъгла, дъжд, сняг, прах и др., са от съществено значение. Повече осветеност и по-голямо пропускане на атмосферата ще осигури и по-голямо разстояние на действие на УНВ. Параметрите на елементите на опто-електронния канал на УНВ (ЕОП, обектив и окуляр) също влияят пряко върху разстоянието на действие.

Един от най-често използваните методи при проектирането на УНВ е т. нар. *енергетичен разчет* (Елизаренко 1981). Този разчет се свежда до изчисляване на разстоянието на действие при известни или избрани параметри на уреда (осветеност, контраст и др.) или до определяне на параметрите на уреда чрез предварително зададено разстояние на действие.

2.2.1. Енергетичен разчет за определяне разстоянието на действие

Под аналитично определяне на разстоянието на действие на УНВ ще се има предвид теоретично определяне на разстоянието на действие на УНВ, в зависимост от параметрите на елементите на опто-електронния канал и от външните условия на наблюдение. Методът на енергетичния разчет изисква да се формулират зависимости, определящи съотношението между полезния сигнал, постъпващ на входа на уреда (сигналят от наблюдавания обект) и прага на чувствителност на уреда – минималния сигнал, при който УНВ може да различи полезния сигнал от шума (Елизаренко 1981). Прагът на чувствителност на УНВ се определя от шумовете, чиито източници могат да бъдат както вътрешни, така и външни по

отношение на уреда. Получените зависимости могат да се използват, за да се определят разстоянието на действие, диаметърът на входната зеница на обектива, относителният отвор, зрителното поле и др.

Ще бъде разгледан обобщен метод, използващ енергетичен разчет за изчисляване разстоянието на действие на УНВ. Основните етапи на този метод (Елизаренко 1981; Borissova 2005) могат да се опишат като: съставяне на уравнение за потока Φ (или осветеността E), създаван от полезния сигнал на входа на уреда; определяне на прага на чувствителност на уреда Φ_{np} или праговата осветеност E_{np} на входа на уреда. За целта се избира необходимото съотношение сигнал/шум между Φ и Φ_{np} , (или между E и E_{np}) при което уредът е работоспособен, като

$$(2.16) \quad M \geq 1, \text{ където } M = \Phi / \Phi_{np} \text{ или } (M = E / E_{np})$$

Така полученото уравнение се решава спрямо един от участващите в него параметри. Уравнението на ефективния поток от фона, попадащ върху фотокатода на ЕОП, може да бъде представено чрез следната зависимост:

$$(2.17) \quad \Phi_{\phi.e\phi} = L_{\phi}(\lambda) A_{ex} \omega_{sp} K_{\phi} \text{ [W]}$$

където яркостта на фона $L_{\phi}(\lambda)$ се определя с:

$$(2.18) \quad L_{\phi}(\lambda) = \frac{E}{\pi} \int_{\Delta\lambda} \rho_{\phi}(\lambda) d\lambda \text{ [W/sr m}^2\text{]}$$

E – осветеност в lx, $\rho_{\phi}(\lambda)$ – спектрален коефициент на отражение на фона, A_{ex} – площ на входната зеница в m^2 , ω_{sp} – ъглово зрително поле на уреда в стерadianи, K_{ϕ} – коефициент на използване на потока от фотокатода:

$$(2.19) \quad K_{\phi} = \int_{\Delta\lambda} \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda$$

Участващите в (2.19) τ_a и τ_o са интегрални коефициенти на пропускане на атмосферата и на входната оптика, в диапазона на

работа на фотокатода на ЕОП, а $\varphi(\lambda)$ е спектралната му чувствителност.

Замествайки $L_{\phi}(\lambda)$ в (2.17) и вземайки предвид, че за определена дължина на вълната е в сила $\tau_a(\lambda) = \tau_a$, $\tau_o(\lambda) = \tau_o$, $\varphi(\lambda) = S_{\Sigma}$, се получава:

$$(2.20) \quad \Phi_{\phi.e\phi} = \frac{EA_{ex}\omega_{zp}\tau_o\tau_a S_{\Sigma}}{\pi} \int_{\Delta\lambda} \rho_{\phi}(\lambda) d\lambda.$$

Ако се обозначи с $K'_{\phi} = \int_{\Delta\lambda} \rho_{\phi}(\lambda) d\lambda$,

то окончателно се получава:

$$(2.21) \quad \Phi_{\phi.e\phi} = \frac{EA_{ex}\omega_{zp}\tau_o\tau_a S_{\Sigma} K'_{\phi}}{\pi}.$$

Аналогично за обект с ъглов размер ω_{ob} е в сила:

$$(2.22) \quad \Phi_{ob.e\phi} = \frac{EA_{ex}\omega_{ob}\tau_o\tau_a S_{\Sigma} K'_{o}}{\pi},$$

където: $K'_{o} = \int_{\Delta\lambda} \rho_o(\lambda) d\lambda$, а $\rho_o(\lambda)$ е спектрален коефициент на отражение на обекта.

При наличие на обект в зрителното поле ефективният поток от фона намалява до:

$$(2.23) \quad \Phi'_{\phi.e\phi} = \frac{EA_{ex}(\omega_{zp} - \omega_{ob})\tau_o\tau_a S_{\Sigma} K'_{\phi}}{\pi}.$$

За сумарния поток от обекта и фона се получава:

$$(2.24) \quad \Phi_{\Sigma e\phi} = \Phi_{ob.e\phi} + \Phi'_{\phi.e\phi}$$

Разликата в потоците, получавани от обекта и от фона, попадаща върху фотокатода, е:

$$(2.25) \quad \Delta\Phi_{e\phi} = \Phi_{\Sigma e\phi} - \Phi_{\phi.e\phi} = \Phi_{ob.e\phi} + \Phi'_{\phi.e\phi} - \Phi_{\phi.e\phi}$$

Пространствените ъгли на наблюдение на фона и обекта са ω_{zp} и ω_{ob} . Те могат да се определят, използвайки определението за пространствен ъгъл, където R е разстоянието до наблюдавания

обект/фон в метри, а A_ϕ и $A_{o\phi}$ са площите на фона и обекта в m^2 , като:

$$\omega_{sp} = A_\phi/R^2 [\text{sr}], \text{ а } \omega_{o\phi} = A_{o\phi}/R^2 [\text{sr}]$$

За разликата между потоците от фона и от обекта се получава:

$$(2.26) \quad \Delta\Phi_{ef} = \frac{A_{o\phi}A_{ex}\tau_o\tau_aES_\Sigma}{R^2\pi} |K'_o - K'_\phi|$$

Означавайки с $K = |K'_o - K'_\phi|$ контраста между наблюдавания обект и фона, се получава крайната формула за разликата в потоците:

$$(2.27) \quad \Delta\Phi_{ef} = \frac{A_{o\phi}A_{ex}\tau_o\tau_aES_\Sigma}{R^2\pi} K$$

За да сработи уредът, ефективният поток трябва да превишава праговия поток с величината M , характеризираща отношението сигнал/шум, т.е.

$$(2.28) \quad \Delta\Phi_{ef} \geq M\Phi_{np.\phi\kappa}$$

Замествайки (2.27) в (2.28) получаваме:

$$(2.29) \quad \frac{A_{o\phi}A_{ex}\tau_o\tau_aES_\Sigma K}{R^2\pi} \geq M\Phi_{np.\phi\kappa}$$

Така полученото енергетично уравнение (2.29) се решава относно избран параметър. Основната трудност тук се състои в това, че на този етап от проектирането на опто-електронния уред са неизвестни повече от един параметри. Поради това се задават стойности на част от неизвестните параметри и се решава спрямо един от тях. За целите на настоящото изследване е необходимо да се определи разстоянието на действие на уреда. Чрез (2.29) разстоянието на действие се определя като (Borissova и др. 2001):

$$(2.30) \quad R = \sqrt{\frac{A_{ex}A_{o\phi}\tau_o\tau_aES_\Sigma K}{\pi M\Phi_{np.\phi\kappa}}} \text{ [m]}$$

Недостатък на така получената формула за разстоянието на действие е, че тя не отчита влиянието на разделителната способност на уреда.

Този недостатък е преодолян в (Гоев 2002). Известно е, че за реалните оптични системи разделителната им способност се определя като (Вълева 1993; Николов 1993):

$$(2.31) \quad \gamma = 140/D_{ex} [']$$

където D_{ex} е диаметър на входната зеница в милиметри.

Площта на входната зеница може да се определи, като се използва нейният диаметър чрез:

$$(2.32) \quad A_{ex} = \frac{\pi D_{ex}^2}{4} [\text{m}^2].$$

Замествайки (2.29) в (2.26), получаваме следното представяне за разстоянието:

$$(2.33) \quad R = \sqrt{\frac{\pi D_{ex}^2}{4} \frac{A_{об} \tau_o \tau_a ES_{\Sigma} K}{\pi M \Phi_{np.фк}}}$$

Като се използва (2.32), за да се изрази D_{ex} чрез γ , и отчитайки, че A_{ex} в (2.32) е в метри (следователно и D_{ex} трябва да се изрази в метри, може да получим следната модификация на (2.30)

$$(2.34) \quad R = \sqrt{\frac{0.035 D_{ex} A_{об} \tau_o \tau_a ES_{\Sigma} K}{\gamma M \Phi_{np.фк}}} [\text{m}]$$

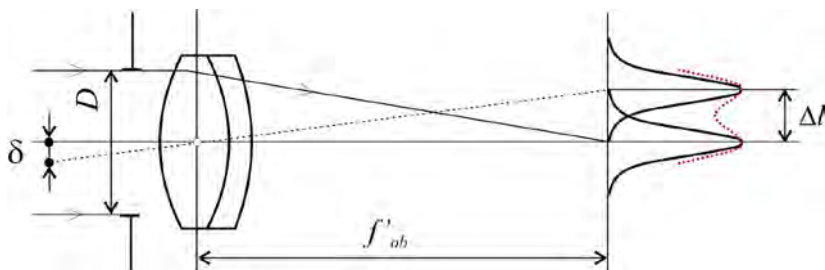
Недостатък на (2.34) е фактът, че се взема предвид разделителната способност на целия уред. Това предполага изработването на прототип и измерването стойността на разделителната му способност, която да се използва за определяне на разстоянието на действие. За да избегне изработването на прототипи и свързаните с това загуби на време и средства, представлява интерес намирането на формула, позволяваща теоретично определяне на разстоянието на действие чрез параметрите на отделните елементи на опто-електронния канал на УНВ. Взема се предвид, че разделителна способност на УНВ

зависи от разделителната способност на опто-електронния канал, т.е. от разделителната способност на използвания обектив, ЕОП и окуляр. От друга страна, разделителната способност на съвременните окуляри е достатъчно висока и не влияе съществено върху разделителната способност на уреда и при определянето на разделителната способност на опто-електронния канал е достатъчно да се вземат предвид само разделителните способности на обектива и ЕОП.

За безкрайно отдалечен от обектива предмет ъгловата величина на дифракционната разделителна способност на обектива е (Николов 1993):

$$(2.35) \quad \delta = \frac{\Delta l}{f'_{об}}$$

където: $f'_{об}$ е задното фокусно разстояние на използвания обектив в милиметри (фиг. 2.11).



Фиг. 2.11. Дифракционна разделителна способност

Минималният размер, който може да бъде различен от ЕОП, се определя чрез разделителната му способност $\delta_{ЕОП}$ в lp/mm като:

$$(2.36) \quad \Delta l = \frac{1}{2\delta_{ЕОП}}$$

На практика разделителната способност на предлаганите ЕОП е по-малка от тази на използваните обективи. Поради това,

вместо $\Delta y'$ в (2.35) се използва Δl от (2.36) и за разделителната способност на опто-електронния канал се получава:

$$(2.37) \quad \delta_{об-ЕОП} = \frac{\Delta l}{f'_{об}} = \frac{1}{2\delta_{ЕОП} f'_{об}}$$

Като се използва тази теоретична разделителна способност на опто-електронния канал в (2.37), се получава следната формула за изчисляване на разстоянието на действие на УНВ:

$$(2.38) \quad R = \sqrt{\frac{0.07 D_{ex} f'_{об} \tau_o \tau_a S_{\Sigma} \delta_{ЕОП} E A_{об} K}{M \Phi_{пр.фк}}} \quad [m]$$

където: D_{ex} – диаметър на входната зеница на обектива в m, $f'_{об}$ – фокусно разстояние на обектива в mm, τ_o – пропускане на оптиката, τ_a – пропускане на атмосферата, $\Phi_{пр.фк}$ – прагова чувствителност на фотокатода на ЕОП в lm, $\delta_{ЕОП}$ – разделителната способност на ЕОП в lp/mm, S_{Σ} – интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП в A/lm, M – отношение сигнал/шум, E – естествена нощна осветеност в lx, K – контраст между наблюдавания обект и фона, $A_{об}$ – площ на наблюдавания обект в m².

Получената по този начин формула (2.38) позволява да се определи разстоянието на действие на УНВ като функция на параметрите на елементите на опто-електронния канал – обектив (диаметър, фокусно разстояние и пропускане), ЕОП (интегрална чувствителност на фотокатода, отношението сигнал/шум и разделителна способност), външни условия на наблюдение (естествена нощна осветеност, контраст между наблюдавания обект и фона, пропускане на атмосферата и площ на наблюдавания обект). Трябва да се отбележи, че така изведената формула е приложима както за УНВ без увеличение (очила за нощно виждане), така и за УНВ с увеличение (бинокли и прицели), тъй като се взема предвид фокусното разстояние на обектива, а отношението на обектива и окуляра определя увеличението на УНВ.

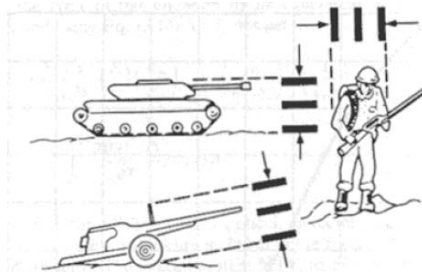
Изведената формула (2.38) позволява теоретично определяне разстоянието на действие на УНВ, като взема предвид както параметрите на отделните елементи на опто-електронния канал, така и външните условия на наблюдение. Чрез формулата могат да се формулират оптимизационни модели, включващи като критерий за качество разстоянието на действие на УНВ.

2.2.2. Определяне на различни типове разстояния на действие чрез критерия на Johnson

През 1958 г. Johnson (Johnson 1958) представя своите изследвания върху възможността наблюдатели да откриват двойки линии с помощта на оптичен уред, използващ ЕОП, и техните възможности за откриване, ориентация, разпознаване и идентифициране на военни цели. Той съпоставя двойки линии към различни обекти с цел разработване на пространствена зависимост при наблюдаване на различни цели. Johnson предлага критерий, който определя количествено броя на двойките линии, които са различни за определящия критичен размер на различни цели.

Според критерия на Johnson за надеждно откриване, ориентация, разпознаване и идентификация е необходимо да бъдат различени определен брой двойки линии от наблюдавания обект, както е показано в таблица 2.2 (Lombardo 1998).

На фиг. 2.12 е илюстрирано определянето на минималния размер за различни обекти според критерия на Johnson (Lombardo 1998).



Фиг. 2.12. Минимален размер на обекта съгласно критерия на Johnson

Таблица 2.2. Критерии на Johnson за надеждно откриване, ориентация, разпознаване и идентификация

Наблюдаван отстрани обект	Разделителна способност за минимален размер (двойка линии)			
	откриване	ориентация	разпознаване	идентификация
Танк М-48	0.7	1.2	3.5	7.0
Танк Т-34	0.75	1.2	3.3	6.0
Танк "Centurion"	0.75	1.2	3.5	6.0
Товарен автомобил	0.9	1.25	4.5	8.0
БТР с вериги	1.0	1.5	4.0	5.0
Джип	1.2	1.5	4.5	5.5
Командна кола	1.2	1.5	4.3	5.5
Стоящ войник	1.5	1.8	3.8	8.0
Гаубица 105 mm	1.0	1.5	4.8	6.0
Средно	1.0 ±0.25	1.4 ±0.35	4.0±0.35	6.4±1.5

Както следва и от таблица 2.2, в практиката се използват четири различни разновидности на разстоянието на действие: разстояние на откриване, разстояние на ориентация, разстояние на разпознаване и разстояние на идентификация.

Използвайки критерия на Johnson и определените от него стойности за необходимия минимален брой двойки линии при наблюдаване на различни обекти, могат да се дефинират съответните разновидности на разстоянието на действие. За целта се въвежда нов параметър, наречен „приведена площ“ на наблюдавания обект $A'_{об}$. Приведената площ на наблюдавания обект $A'_{об}$ се изчислява като отношение на площта на наблюдавания обект $A_{об}$ към минималния брой двойки линии (съгласно критерия на Johnson), необходим за откриване, ориентация, разпознаване и идентификация, при наблюдаване на различни обекти. В изведената формула за разстоянието на действие (2.38), вместо площ на наблюдавания обект $A_{об}$ ще

използваме приведената площ на наблюдавания обект $A'_{об}$ за определяне на различните типове разстояние на действие:

$$(2.39a) \quad R^O = \sqrt{\frac{0.07 D_{ex} f'_{об} \tau_o \tau_a S_{\Sigma} \delta_{ЕОП} EKA'_{об}{}^o}{M\Phi_{пр.фк}}} \text{ [m]}$$

$$(2.39б) \quad R^{OP} = \sqrt{\frac{0.07 D_{ex} f'_{об} \tau_o \tau_a S_{\Sigma} \delta_{ЕОП} EKA'_{об}{}{op}}{M\Phi_{пр.фк}}} \text{ [m]}$$

$$(2.39в) \quad R^P = \sqrt{\frac{0.07 D_{ex} f'_{об} \tau_o \tau_a S_{\Sigma} \delta_{ЕОП} EKA'_{об}{}{p}}{M\Phi_{пр.фк}}} \text{ [m]}$$

$$(2.39г) \quad R^H = \sqrt{\frac{0.07 D_{ex} f'_{об} \tau_o \tau_a S_{\Sigma} \delta_{ЕОП} EKA'_{об}{}{p}}{M\Phi_{пр.фк}}} \text{ [m]}$$

Конкретните стойности за приведените площи се определят от конкретния тип на наблюдавания обект (човек, джип, танк и т.н.) съгласно критерия на Johnson.

Използвайки критерия на Johnson, тук е дефиниран нов параметър – „*приведена площ*“ на наблюдавания обект, с чиято помощ могат да се изчисляват различните, използвани в практиката разновидности на разстоянието на действие на УНВ – на откриване, на ориентация, на разпознаване и на идентификация. Използвайки този параметър, са получени модификации на формула (2.38) за определяне на различните типове разстояния на действие на УНВ при различни наблюдавани обекти – формули (2.39 а, б, в, г).

2.3. Изисквания към параметрите на опто-електронния канал на УНВ и външни условия на наблюдение

За да бъде достатъчно обективно моделирането на УНВ, е необходимо да се вземат предвид както вътрешните параметри (параметрите на уреда), така и външните условия на наблюдение.

2.3.1 Вътрешни параметри, използвани при моделирането на УНВ

Към вътрешните параметри на уреда, съществени за моделирането на УНВ, могат да се причислят (Task 1992, Turpin 2001):

- увеличението,
- зрителното поле и зависимостта му от фокусното разстояние на обектива и от диаметъра на фотокатода на ЕОП,
- относителният отвор на обектива,
- пропускането на оптиката,
- отдалечеността и диаметърът на изходната зеница,
- разделителната способност, интегралната чувствителност и отношението сигнал/шум на ЕОП.

Видимото увеличение на УНВ трябва да е равно на 1, което може да се реализира чрез равенство на фокусните разстояния на обектива и окуляра, т.е.

$$(2.40) \quad f_{об} = f_{ок}$$

Видимото увеличение (γ) на УНВ от типа бинокли и прицели е винаги по-голямо от 1 и може да се изрази чрез фокусните разстояния на използвания обектив и окуляр чрез.

$$(2.41) \quad \gamma = \frac{f_{об}}{f'_{ок}}$$

Друг вътрешен параметър за УНВ е зрителното поле, определящо с (2.3а) или с неравенството:

$$(2.42) \quad f'_{об} \leq \frac{D_{фк.ЕОП}}{2tg(\omega/2)}$$

Както се вижда от (2.42), зрителното поле на уреда е свързано със задното фокусно разстояние на обектива $f'_{об}$ и диаметъра на фотокатода на ЕОП.

За да се осигури достатъчно светлина, попадаща върху фотокатода на ЕОП, е необходимо обективът да е светосилен. Това

се постига, като се използва обектив с достатъчно малко диафрагмено число, т.е.

$$(2.43) \quad k_{об} = \frac{f'_{об}}{A_{ex}} \leq 1.4$$

Комфорт при наблюдение с УНВ се осигурява при определена отдалеченост и диаметър на изходната зеница. Минималната отдалеченост на изходната зеница се определя с формула (2.14), а минималният диаметър на изходната зеница се определя от (2.12). Други вътрешни параметри, които трябва да се вземат предвид при моделирането на УНВ, са параметрите на използвания ЕОП. На пазара днес съществува голямо разнообразие от ЕОП от различни поколения и с различни параметри, описани в част 1, т.1.2.2, които могат да се избират в зависимост от областта на приложение. За УНВ се използват ЕОП с равни диаметри на фотокатода и екрана на ЕОП. За да се използва целият екран на ЕОП, е необходимо зрителното поле на окуляра $\omega_{ок}$ да е по-голямо или равно от това на обектива $\omega_{об}$, т.е.

$$(2.44) \quad \omega_{об} \leq \omega_{ок}$$

2.3.2 Външни условия, необходими за моделирането на УНВ

Външните условия на наблюдение, които трябва да се вземат предвид при математическото моделиране на УНВ, са:

- пропускане на атмосферата,
- естествената нощна осветеност,
- контраст между наблюдавания обект и фона,
- площ на наблюдавания обект.





Пропускането на атмосферата се определя от климатичните условия при наблюдение, от диапазона на спектралната чувствителност на фотокатода на използвания ЕОП и от разстоянието. Съгласно закона на Бугер – Ламберт пропускането на атмосферата може да се представи като (Petty 2002, Ryer 1997):

$$(2.45) \quad \tau_a = e^{-\alpha L}$$

където: α – коефициент на отслабване на лъчението за единица разстояние с размерност m^{-1} , равен на сумата от поглъщане и отслабване на лъчението.

В таблица 2.3 е показана зависимостта на разстоянието на откриване, в зависимост от използваното поколение ЕОП и от естествената нощна осветеност.

Таблица 2.3. Зависимост на разстоянието на откриване от естествената нощна осветеност и поколението на ЕОП

Поколение ЕОП	Обект на наблюдение	 Пълна луна 0.1 lux	 Четвърт луна 0.01 lux	 Звездно небе 0.001 lux	 Облачно небе 0.0001 lux	
I	човек	228,60	182,88	137,16	91,44	m
II	човек	457,20	411,48	274,32	137,16	m
III	човек	594,36	457,20	342,90	182,88	m
IV	човек	685,80	548,64	365,76	228,60	m

Вземането под внимание на изменението на естествената нощна осветеност е съществено условие за реалистично моделиране на УНВ. Основен източник на естествената нощна осветеност са звездите, луната, а при наблюдение в близост до населени места и отразената от тях светлина, наличието на облаци или тяхното отсъствие. Имайки предвид различните условия на наблюдение (при снежна покривка, зелена трева, суха гора и т.н.), е необходимо да се отчетат и различният контраст между наблюдавания обект и фона. Вместо реалната площ на наблюдавания обект $A_{об}$ може да се използва дефинираната в т. 2.3.3 „*приведена площ*“ на наблюдавания обект $A'_{об}$, която взема предвид критериите на Jonson, за да се определят разновидностите на разстоянието на действие. В най-общ случай, външните условия на наблюдение са случайни величини, но за целите на теоретичните оценки могат да се използват конкретни предполагаеми числени стойности.

Глава III

Комбинаторни оптимизационни модели за оптимално проектиране на УНВ

Процесът на проектиране може да се разглежда като процес на разработване на проект за нов обект, за което са необходими изследвания, моделиране, интерактивна настройка и ре-дизайн. Процесът на инженерния дизайн може да бъде представен чрез следните 10 стъпки (Gomez 2004; Garrett 1991):

- 1) Идентифициране на проблема – общо описание.
- 2) Определяне на критериите и целите.
- 3) Проучване на проблема – в повечето случаи е необходимо получаването на нови знания и информация.
- 4) Определяне на спецификациите – подробно описание на проблема и изясняване какво трябва да се постигне при проектирането и какви ограничения ще повлияят на крайното решение.
- 5) Определяне на възможни решения – комбиниране на идейните проекти с информацията, получена от т. 3 за определяне на възможни проектни решения.
- 6) Анализ на потенциалните решения – определяне кой вариант да се развива – в идеалния случай това е този вариант, който най-добре отговаря на спецификациите и на други ограничения, като например време, разходи или умения.
- 7) Подготовка на работна документация и планиране на всички подробности, които са важни за реализирането на избрания вариант.
- 8) Изработване на първоначален модел (прототип).
- 9) Тестване и оценка на дизайна.

10) Подготвяне на документация – планиране и проектиране за извършване на практическата реализация.

Проблемите на концептуалния дизайн са свързани с неясното естество на първоначалните концепции за дизайн и наличието на различни варианти, които инженерите трябва да тестват. Реалните проблеми на инженерния дизайн обикновено се характеризират с наличието на много често противоречащи си и несъвместими цели. По време на процеса на проектиране трябва да се направи компромис между различни инженерни характеристики. Дизайнерът може да използва набор от инструменти за моделиране и симулиране, за да се предскажат характеристиките на проектирания обект. При моделирането могат да се използват различни видове променливи (Anderson 2000).

- Независимите променливи са действителните характеристики, които дизайнерът използва директно, като геометрични размери, параметри, конфигурация на компоненти и др. Независимите променливи на дизайна обикновено се наричат просто *променливи* на дизайна или *параметри* на проекта.
- Зависимите променливи са променливи, за които дизайнерът не може директно да зададе стойност, но той работи с тях при определяне параметрите на модела. Зависимите променливи се наричат *характеристики* или *атрибути* на дизайна.
- Променливите на състоянието са междинен тип променливи на модела между зависими и независими променливи.
- Работните променливи са променливи, които могат да бъдат променени след направата на прототип.
- Променливите на околната среда или външните променливи са факторите на околната среда, които влияят на модела. При моделирането дизайнерът трябва да вземе предвид както външни променливи, така и вътрешните променливи.

При дефинирането на математически модели на реални системи е важно да се намали размерността на формулираните модели, така че да се осигури възможност за решаване на съответни оптимизационни задачи (Таха, 2010). При опростяването на реалните системи, следва да се идентифицират доминиращите параметри и ограничения, които определят основните характеристики на реалните системи. Построеният по такъв начин оптимизационен модел ще представя най-съществените съотношения във вид на целева функция и съвкупност от ограничения.

Проектирането на реални инженерни системи е по правило проектиране с наличие на множество критерии, които в общия случай са противоречиви един спрямо друг. В тези случаи е необходимо използването на многокритериалната оптимизация. Случаите на проектиране с използване на еднокритериална оптимизация могат да се разглеждат като частен случай на многокритериалното инженерно проектиране.

Общата формулировка на задачата на многокритериалната оптимизация има следния вид:

$$(3.1) \quad \max \mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})]^T$$

при ограничения:

$$(3.2) \quad \mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad \mathbf{X} \in S$$

$$(3.3) \quad g_i(\mathbf{X}) \leq b_i$$

където $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ е векторът на критериите (целевите функции), $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})$ са отделните k целеви функции, $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ е векторът на променливите, а $S \in R^n$ е пространството на решенията. Неравенства от вида (3.3) описват специфични физически, технически или потребителски ограничения.

Най-общо, методите за решаване на многокритериални оптимизационни задачи (3.1) – (3.3) могат да се групират в четири класа (фиг. 3.1), в зависимост от мястото и времето на задаване и

получаване на информация от лицето, вземащо решение (ЛВР) (Andersson 2000) като:

- алгоритми, не изискващи информация от ЛВР,
- априорни алгоритми (с предварително известна информация),
- интерактивни алгоритми,
- апостериорни алгоритми.



Фиг. 3.1. Методи на многокритериалната оптимизация

Информацията, която ЛВР задава, изразява неговите предпочитания към търсеното решение (важността на отделните критерии). При априорните алгоритми всички предпочитания са известни още в началото на процеса на избор на решение. Използваните алгоритмични техники целят намирането на цялото Парето-множество или подмножество от него, на базата на тези априори зададени предпочитания. При апостериорните алгоритми

се генерира множеството на всички Парето-оптимални решения за конкретната задача, след което това множество се анализира в съответствие с предпочитанията на ЛВР. Много приближени алгоритми са реализирани в съответствие с този подход.

Интерактивните алгоритми извеждат Парето-оптимални решения на базата на прогресивно задавани от ЛВР предпочитания по време на процеса на избор на решение. ЛВР може да изрази своите предпочитания между отделните Парето-оптимални решения чрез стойностите на параметрите на скаларизиращата задача. ЛВР трябва да направи избор на крайното най-предпочитано решение и е отговорен за този избор.

Доста често задачите на многокритериалната оптимизация се решават чрез *скаларизация*. Скаларизацията представлява трансформация на многокритериалната оптимизационна задача в съответна еднокритериална задача или в множество от еднокритериални оптимизационни задачи, наречени скаларизиращи задачи. Основно свойство на всяка скаларизираща задача е, че всяко нейно оптимално решение е Парето-оптимално (слабо Парето-оптимално) решение на съответстващата задача на многокритериалната оптимизация. Скаларизиращият подход към решаване на многокритериалните задачи позволява използването на добре изучената и развита теория на методите на еднокритериалната оптимизация. Известни са различни скаларизиращи техники, водещи до: задача на претеглената сума, задача на ε -ограниченията, задача на отпавната точка, класификационно-ориентираните задачи и т.н. (Miettinen & Makela 2002).

3.1. Основни зависимости при УНВ

Най-съществен конструктивен елемент на УНВ е неговият оптоелектронен канал (обектив, ЕОП, окуляр). вкл. и необходимото за нормална работа на ЕОП ел. захранване. Параметрите на опто-

електронния канал са определящи за параметрите на уреда като цяло. Голямото разнообразие от съществуващи основни модули за опто-електронния канал поставя въпроса какви елементи да бъдат избрани, така че опто-електронният канал да отговаря на определени параметри. За целта е необходимо да се направи подходящ избор на конструктивни модули за изграждането на опто-електронен канал, т.е. избор на обектив/и, ЕОП, окуляр/и, батерия/и, както е илюстрирано на фиг. 3.2.



Фиг. 3.2. Конструктивни модули за УНВ

Проектирането на техническа система е сложен процес, който зависи до голяма степен от спецификата на проектираната система. При проектирането на УНВ съществуват различни функционални зависимости между отделните модули, които трябва да бъдат взети предвид. Например отношението на фокусното разстояние на обектива и окуляра определя увеличението на УНВ, което за бинокли и прицели е по-голямо от единица, за разлика от очилата за нощно виждане, при които това увеличение е точно равно на единица. Диаметърът на екрана на ЕОП трябва да се вижда целият през окуляра, тъй като това осигурява пълноценното използване на ЕОП. Това от своя страна определя също зависим избор между ЕОП и окуляр. Зрителното поле на обектива зависи от диаметъра на ЕОП и фокусното разстояние на обектива. Батерийното електрическо захранване пряко определя продължителността на работата на уреда с избрания тип батерии и също така влияе върху теглото на уреда. Разстоянието на действие

на УНВ зависи от усилването на ЕОП и от параметрите на обектива. В крайна сметка, изборът на подходящи конструктивни елементи на УНВ, вземайки предвид изискванията на потребителя, може да се определи като дискретен комбинаторен проблем с ограничения. Математическият модел за проектиране на УНВ трябва да осигури като резултат оптимален избор на ЕОП, обектив, окуляр и електрическо батерийно захранване, като се вземат предвид всички тези зависимости и ограничения между модулите, графично илюстрирани на фиг. 3.3.



Фиг. 3.3. Зависимости между модулите на УНВ

Проектирането на инженерни системи обикновено трябва да удовлетворява много предварително зададени изисквания (някои от които са противоречиви) по отношение на експлоатационните характеристики на обекта. Традиционният подход към процеса на проектиране при УНВ се базира на опита на проектанта, който прави своя интуитивен избор на необходимите компоненти. На база на този избор се изработва прототип, който се тества, с цел установяване на параметрите на дизайна. Ако желаните параметри

не са постигнати, се прави нов избор на компоненти, изгражда се и се тества нов прототип и този процес се повтаря, докато е необходимо.

Подобен процес на проектиране на УНВ, базиращ се на *метода на пробите и грешките*, може да бъде формализиран като оптимален комбинаторен проблем, за решаването на който може да се използват подходящи математически оптимизационни методи. Това би позволило предварителна теоретична оценка на параметрите на проектирания уред и би довело до намаляване на времето и разходите за изграждането и тестването на прототипи. Математическата оптимизация може да се използва за създаване на САД системи, елиминиращи до известна степен нуждата от висока квалификация и опит на проектанта. В зависимост от модела на формулирания оптимизационен проблем могат да бъдат използвани различни оптимизационни техники – линейно програмиране, нелинейно програмиране, целочислено или смесено целочислено програмиране, дискретна оптимизация и т.н. Съществен е и изборът на броя и типа на критериите за оптималност на проектирането. Многокритериалната формулировка може да се разглежда като естествен избор, тъй като често към моделирания проблем се поставят повече от една и несъвместими характеристики за оптималност. Числените експерименти и сравняване на получените резултати между еднокритериалния и многокритериалния оптимизационен подход ще отговорят на въпроса какъв е подходящият оптимизационен модел към всеки конкретен практически проблем.

3.2. Определяне параметрите на УНВ

Направеното в Глава 2 изследване за влиянието на параметрите на опто-електронния канал върху качеството на УНВ като цяло, може да се използва за да се предложи комплексен критерий за качество на УНВ. Най-често поставяните изисквания към качеството на

УНВ могат да се обобщят чрез следните компоненти на критерий за качество на УНВ:

- разстояние на действие (в неговите разновидности)
- зрително поле
- относителен отвор на обектива
- фокусировка на обектива
- отдалеченост на изходната зеница
- аберации на обектива и окуляра
- тегло на опто-електронния канал
- цена на опто-електронния канал.

Дефинираният критерий за качество на УНВ, включващ тези компоненти, може да се използва за формулиране на оптимизационни модели на опто-електронния канал на УНВ.

3.2.1. Разстояние на действие на УНВ

Един от най-важните компоненти в предлагания критерий за качество на УНВ е разстоянието на действие. В част 2 е изведена формула (2.32) за разстоянието на действие на УНВ, вземаща предвид всички съществени параметри на опто-електронния канал, както и външните условия на наблюдение. Чрез въведен параметър „приведена площ“ на наблюдавания обект са получени формули за изчисляване на различните разновидности на разстоянието на действие (2.33 а, б, в, г), които могат да се обобщят като:

$$(3.4) \quad R = \sqrt{\frac{0.07 D_{ex} f_{об} \tau_o \tau_a S \delta_{ЕОП} E K A'_{об}}{M \Phi_{пр.фк}}} \quad [m]$$

където: D_{ex} – диаметър на входната зеница на обектива в m, $f_{об}$ – фокусно разстояние на обектива в mm, τ_o , τ_a – пропускане на оптиката, пропускане на атмосферата, $\Phi_{пр.фк}$ – прагова чувствителност на фотокатода на ЕОП в lm, δ – разделителната способност на ЕОП в lp/mm, S – интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП в A/lm, M – отношение сигнал/шум на ЕОП,

E – естествена нощна осветеност в lx, K – контраст, $A'_{об}$ – приведена площ на наблюдавания обект в m^2 .

От гледна точка на избор на ЕОП, горната формула може да се опрости, като се въведе един нов обобщен параметър „качество на ЕОП“ ($K_{ЕОП}$) като:

$$(3.5) \quad K_{ЕОП} = \frac{S\delta_{ЕОП}}{M\Phi_{пр.фк}}$$

Въвежда се обобщен параметър за „качество на обектива“ ($K_{об}$) като:

$$(3.6) \quad K_{об} = D_{эф} f_{об} \tau_0$$

Следователно формулата за разстоянието на действие добива вида:

$$(3.7) \quad R = \sqrt{0.07 \tau_a E K A'_{об} K_{ЕОП} K_{об}}$$

При търсене на максималното разстояние на действие на УНВ (в някоя от разновидностите му) се осъществява избор на един ЕОП от зададено множество такива с различно качество. Този избор се реализира чрез въвеждането на целочислени двоични променливи x_i :

$$(3.8) \quad K_{ЕОП} = \sum_{i=1}^m x_i K_i^{ЕОП}, x_i \in \{0, 1\}$$

където m – брой ЕОП-и, а променливите x_i определят избора на ЕОП и са свързани с условието:

$$(3.9) \quad \sum_{i=1}^m x_i = 1$$

Аналогично, изборът на обектив от множество обективи с известни параметри се реализира чрез използване на целочислени двоични променливи y_j :

$$(3.10) \quad K_{об} = \sum_{j=1}^n y_j K_j^{об}, y_j \in \{0, 1\}$$

където n е броят на обективите, а променливите y_j определят избора на единствен обектив чрез условието:

$$(3.11) \quad \sum_{j=1}^n y_j = 1$$

С така въведените променливи за избор на ЕОП и обектив, различните разновидности на разстоянието на действие на УНВ могат да се изразят като:

$$(3.12) \quad R = \sqrt{0.07\tau_a EKA'_{об} \sum_{i=1}^m x_i K_i^{EOП} \sum_{j=1}^n y_j K_j^{об}}$$

$$(3.12a) \quad R^d = \sqrt{0.07\tau_a EKA'_{об} \sum_{i=1}^m x_i K_i^{EOП} \sum_{j=1}^n y_j K_j^{об}}$$

$$(3.12b) \quad R^r = \sqrt{0.07\tau_a EKA'_{об} \sum_{i=1}^m x_i K_i^{EOП} \sum_{j=1}^n y_j K_j^{об}}$$

$$(3.12c) \quad R^i = \sqrt{0.07\tau_a EKA'_{об} \sum_{i=1}^m x_i K_i^{EOП} \sum_{j=1}^n y_j K_j^{об}}$$

където τ_a – пропускане на атмосферата, E – естествена нощна осветеност, K – контраст между наблюдавания обект и фона и $A^{об}$, $A^p_{об}$, $A^n_{об}$ – „приведена площ“ на наблюдаваните обекти, които се приемат за известни със съответни числени стойности.

В зависимост от търсения тип разстояние на действие една от горните формули може се използва като компонент на критерия за качество на опто-електронния канал, респективно на УНВ.

3.2.2. Зрително поле

Зрителните полета на обектива $W_{об}$ и окуляра $W_{ок}$ участват в критерия за качество, чрез следните зависимости:

$$(3.13) \quad W_{o\delta} = \sum_{j=1}^n y_j W_j^{o\delta}$$

$$(3.14) \quad W_{ок} = \sum_{k=1}^l z_k W_k^{ок}$$

$$(3.15) \quad W_{o\delta} = \theta W^{ок}$$

където l е броят на окулярите, а променливите z_k определят избора на окуляр и също са целочислени двоични променливи, свързани с условието:

$$(3.16) \quad \sum_{k=1}^l z_k = 1, \quad z_k \in \{0, 1\},$$

Равенство (3.15) определя вида на УНВ – уред с увеличение (бинокли, прицели) или уред без увеличение (очила за нощно виждане), като в случая на УНВ $\theta = 1$, а за уредите с увеличение $\theta > 1$.

3.2.3. Относителен отвор на обектива

За всеки обектив са известни неговите характеристики като пропускане, фокусно разстояние, диаметър на входната зеница, относителен отвор (диафрагменото число), диапазон за фокусировка, тегло и аберации (сферична, астигматизъм, кривина на полето, дисторсия). В тази връзка, друг важен от практическа гледна точка компонент на критерия за качество на УНВ е параметърът „относителен отвор на обектива“. Изборът на обектив с определен относителен отвор се осъществява чрез зависимостта:

$$(3.17) \quad \frac{1}{k} = \sum_{j=1}^n y_j \frac{1}{k_j}$$

където $(1/k)$ е относителният отвор на съответния обектив, а n е броят на обективите.

3.2.4. Фокусировка на обектива

Съществен компонент от критерия за качество на УНВ е и фокусировката на обектива. Изборът на обектив с определено фокусиращо разстояние F се осъществява чрез зависимостта:

$$(3.18) \quad F = \sum_{j=1}^n y_j F_j$$

3.2.5. Аберации

Неизбежните остатъчни аберации в оптичните системи, както и грешки при изработването, сглобяването и юстирането в значителна степен определят качеството на образа, формиран от оптичната система. Поради това в критерия за качество на УНВ трябва да се вземат предвид и аберациите на избраните обектив и окуляр. При оптимален избор на обектив трябва да се вземат предвид и следните аберации:

$$(3.19) \quad AC_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j AC_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.20) \quad AA_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j AA_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.21) \quad AD_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j AD_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.22) \quad AK_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j AK_j^{o\bar{o}}$$

където $AC_j^{o\bar{o}}$, $AA_j^{o\bar{o}}$, $AD_j^{o\bar{o}}$, $AK_j^{o\bar{o}}$ са сферичната аберация, астигматизъм, дисторсия и кривината на полето за обектив с индекс j .

Аналогично, изборът на окуляр с опимални параметри изисква да се вземат предвид неговите аберации:

$$(3.23) \quad AC_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k AC_k^{ok}$$

$$(3.24) \quad AA_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k AA_k^{ok}$$

$$(3.25) \quad AD_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k AD_k^{ok}$$

$$(3.26) \quad AK_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k AK_k^{ok}$$

където с AC_k^{ok} , AA_k^{ok} , AD_k^{ok} , AK_k^{ok} са сферичната аберация, астигматизмът, дисторсията и кривината на полето за всеки окуляр с индекс k .

3.2.6. Отдалеченост на изходната зеница

По-голямата отдалеченост на изходната зеница (ОИЗ) осигурява по-голям комфорт при наблюдение с УНВ и също може да бъде включена като компонент от критерия за качество. За целта изборът на окуляр, съобразен с изискванията за отдалеченост на изходната зеница, се осъществява чрез зависимостта:

$$(3.27) \quad ОИЗ = \sum_{k=1}^l z_k ОИЗ_k$$

3.2.7. Продължителност на работа на УНВ с батерийно хранване

От практическа гледна точка видът на използваните батерии (капацитет, тегло и цена) също се отразява на качеството на устройството като цяло. При всяко батерийно хранване животът му е важен елемент при проектирането на УНВ. Продължителността на работа на УНВ зависи както от капацитета на използваните батерии, така и от необходимия ток за хранване на използвания ЕОП:

$$(3.28) \quad L_B = \frac{C_B}{I_{III}} \text{ [часове]}$$

Съществува разнообразие от електрически батерии с различни параметри, които най-общо могат да бъдат разделени на две основни категории в зависимост от вида им и от захранващото напрежение: батерии тип АА с напрежение от 1.5 V и батерии тип монета (клетъчен тип) с напрежение от 3.0 V. За да работи УНВ е необходимо да се осигури захранващо напрежение от (2.7 – 3.0) V.

3.2.8. Тегло на опто-електронния канал на УНВ

Параметри като тегло, размери и ергономичност са от съществено значение при използването на УНВ. Колкото по-компактни и леки са УНВ, толкова са по-удобни. Оптимизационният компонент за тегло представлява сумата от теглата на ЕОП, обектива, на очуляра и електрическите батерии.

$$(3.29) \quad T = T_{EOП} + T_{об} + T_{ок} + T_{бам}$$

където

$$(3.30) \quad T_{EOП} = \sum_{i=1}^m x_i T_i^{EOП}$$

$$(3.31) \quad T_{об} = \sum_{j=1}^n y_j T_j^{об}$$

$$(3.32) \quad T_{ок} = \sum_{k=1}^l z_k T_k^{ок}$$

$$(3.33) \quad T_{бам} = N \left(\sum_{p=1}^t a_p \left(s_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p H_B^q + \sum_{p=1}^t t_p \right) \right)$$

където: N е броят на паралелно свързаните батерии, t е типът на батериите (с напрежение от 1.5 V или 3 V), като всеки t тип батерия може да има k_p разновидности с различен капацитет, $p \in \{1, 2, \dots, t\}$ е разновидност на батерии от определен тип, a_p – двоични

променливи за избор на тип батерии, b_q^p – двоични променливи за избор на батерия от определен тип, H_B^q – тегло на съответната разновидност батерия от даден тип, t_p – тегло на механичната конструкция за ел. батерия от тип p , параметърът s_p определя необходимия брой батерии, осигуряващи изискваното ел. напрежение за работа на ЕОП ($s_p = 1$ за ел. батерии от 3 V, и $s_p = 2$ за батерии от 1.5 V). Оптималният избор на вида на ел. батериите, без да се допуска смесване на батерии с различно напрежение, се реализира чрез следните зависимости:

$$(3.34) \quad \sum_{p=1}^t a_p = 1$$

$$(3.35) \quad \sum_{p=1}^t \left(a_p - \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p \right) = 0$$

3.2.9. Цена на опто-електронния канал на УНВ

Цената на УНВ е съществен параметър, който следва да бъде включен като компонент от критерия за качество чрез зависимостта:

$$(3.36) \quad C = C_{EOП} + C_{o\bar{o}} + C_{ok} + C_{\bar{o}am}$$

$$(3.37) \quad C_{EOП} = \sum_{i=1}^m x_i C_i^{EOП}$$

$$(3.38) \quad C_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j C_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.39) \quad C_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k C_k^{ok}$$

$$(3.40) \quad C_{\bar{o}am} = N \left(\sum_{p=1}^t a_p \left(s_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p C_B^q + \sum_{p=1}^t k_p \right) \right)$$

където: C_B^p – цена на съответната разновидност батерия от зададен тип, k_p – цена на механиката за батерия от тип p .

Всички описани до тук параметри на елементите на УНВ могат да участват като компоненти на критерия за качество на опто-електронния канал на УНВ (Q) чрез следната обобщена функционална зависимост:

$$(3.41) \quad Q = f(R, W_{об}, (I/k), F, AC_{об}, AA_{об}, AD_{об}, AK_{об}, AC_{ок}, AA_{ок}, AD_{ок}, AK_{ок}, ОИЗ, T, C)$$

3.3. Оптимизационни модели за избор на елементи на УНВ

Както бе изтъкнато досега, най-същественият конструктивен елемент на УНВ е опто-електронният канал, тъй като неговите параметри, цена и тегло са определящи за параметрите, цената и теглото на целия уред.

Предвид голямото разнообразие от съществуващи основни елементи за опто-електронния канал на УНВ, възниква въпросът за избор, който да оптимизира определени параметри на УНВ. В тази връзка е необходимо да се разработят съответни оптимизационни модели. Като обобщен и достатъчен за практически потребности оптимизационен критерий може да се разглежда т.нар. *качество* на УНВ. Качеството на УНВ може да бъде дефинирано по различни начини, в зависимост от областта на приложение и потребителските изисквания, но съществуват качествени показатели, които в една или друга степен са общовалидни за всички разновидности на УНВ. Един от тях, който трябва да се има предвид при определяне на качеството на УНВ, е *разстоянието на действие*. Други подобни качествени показатели включват параметри на УНВ, цената, теглото и други зададени от потребителя изисквания.

Тук е формулиран оптимизационен критерий за качество на УНВ, включващ следните параметри – зрително поле, относителен

отвор, фокусировка и аберации на обектива, отдалеченост на изходната зеница и аберации на окуляра, тегло и цена на опто-електронния канал, както и разстоянието на действие на УНВ. Формулирани са детерминиран и стохастичен еднокритериален и многокритериален оптимизационен модел, позволяващи формулиране на съответни оптимизационни задачи. В детерминирания модел външните условия на наблюдение и площта на наблюдавания обект се приемат за величини с известни стойности. В стохастичния модел тези параметри участват като вероятностни величини, представени с тяхното математическото очакване.

3.3.1. Детерминиран оптимизационен модел за проектиране на опто-електронния канал на УНВ

При построяване на математически модели на реални системи, трябва да се идентифицират доминиращите параметри и ограничения, които определят основните характеристики на реалните системи. Построеният по такъв начин оптимизационен модел ще представя най-съществените съотношения във вид на целева функция и съвкупност от ограничения. В този смисъл, при построяването на оптимизационни модели за проектиране на УНВ ще се разглежда основно опто-електронния канал, който определя съществените параметри и качеството на УНВ от гледна точка на най-разпространените практически изисквания. Тъй като е необходимо да се осъществи избор от множества елементи на опто-електронния канал, удовлетворяващи зададен критерий за качество, то се въвеждат и използват двоични целочислени променливи (x , y , z , a_p , b_q^p) за избор на съответните елементи на опто-електронния канал на УНВ – ЕОП, обектив, окуляр и батерии.

Детерминираният оптимизационен модел се формулира, като част от критериите от функционалната зависимост (3.41) се максимизират, а останалата част се минимизират:

$$(3.42) \quad \begin{aligned} & \max\{R, BL, W_{o\delta}, (1/k), OI3\} \\ & \min\{F, AC_{o\delta}, AA_{o\delta}, AD_{o\delta}, AK_{o\delta}, AC_{ok}, AA_{ok}, AD_{ok}, AK_{ok}\} \end{aligned}$$

$$(3.43a) \quad R^O = \sqrt{0.07\tau_a EKA_{o\delta}^o K_{EO\Pi} K_{o\delta}}$$

$$(3.43b) \quad R^P = \sqrt{0.07\tau_a EKA_{o\delta}^p K_{EO\Pi} K_{o\delta}}$$

$$(3.43B) \quad R^H = \sqrt{0.07\tau_a EKA_{o\delta}^u K_{EO\Pi} K_{o\delta}}$$

$$(3.44) \quad K_{EO\Pi} = \sum_{i=1}^m x_i K_i^{EO\Pi}$$

$$(3.45) \quad K_{o\delta} = \sum_{j=1}^n y_j K_j^{o\delta}$$

$$(3.46) \quad \sum_{i=1}^m x_i = 1, x_i \in \{0, 1\}$$

$$(3.47) \quad \sum_{j=1}^n y_j = 1, y_j \in \{0, 1\}$$

$$(3.48) \quad L_B = \frac{n \sum_{p=1}^t a_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p C_B^q}{\sum_{i=1}^m x_i I_{HT}^i}$$

$$(3.49) \quad \sum_{p=1}^t a_p = 1$$

$$(3.50) \quad \sum_{p=1}^t \left(a_p - \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p \right) = 0$$

$$(3.51) \quad \sum_{j=1}^n y_j F_j^{o\delta} = \sum_{k=1}^l z_k F_k^{ok}$$

$$(3.52) \quad \sum_{j=1}^n y_j W_j^{o\bar{o}} \leq \sum_{k=1}^l z_k W_k^{o\bar{o}}$$

$$(3.53) \quad AC_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j AC_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.54) \quad AA_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j AA_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.55) \quad AD_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j AD_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.56) \quad AK_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j AK_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.57) \quad \frac{1}{k} = \sum_{j=1}^n y_j \frac{1}{k_j}$$

$$(3.58) \quad F = \sum_{j=1}^n y_j F_j$$

$$(3.59) \quad W_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j W_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.60) \quad OI\bar{3} = \sum_{k=1}^l z_k OI\bar{3}_k$$

$$(3.61) \quad AC_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k AC_k^{ok}$$

$$(3.62) \quad AA_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k AA_k^{ok}$$

$$(3.63) \quad AD_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k AD_k^{ok}$$

$$(3.64) \quad AK_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k AK_k^{ok}$$

$$(3.65) \quad W_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k W_k^{ok}$$

$$(3.66) \quad \sum_{k=1}^l z_k = 1, z_k \in \{0, 1\}$$

$$(3.67) \quad T_{EOП} = \sum_{i=1}^m x_i T_i^{EOП}$$

$$(3.68) \quad T_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j T_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.69) \quad T_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k T_k^{ok}$$

$$(2.70) \quad T_{\bar{o}am} = N \left(\sum_{p=1}^t a_p \left(s_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p H_B^q + \sum_{p=1}^t t_p \right) \right)$$

$$(3.71) \quad T = T_{EOП} + T_{o\bar{o}} + T_{ok} + T_{bat}$$

$$(3.72) \quad C_{EOП} = \sum_{i=1}^m x_i C_i^{EOП}$$

$$(3.73) \quad C_{o\bar{o}} = \sum_{j=1}^n y_j C_j^{o\bar{o}}$$

$$(3.74) \quad C_{ok} = \sum_{k=1}^l z_k C_k^{ok}$$

$$(3.75) \quad C_{bat} = n \left(\sum_{p=1}^t a_p \left(s_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p C_{bat}^q + \sum_{p=1}^t k_p \right) \right)$$

$$(3.76) \quad C = C_{EOП} + C_{o\bar{o}} + C_{ok} + C_{bat}$$

Параметрите на външните условия на наблюдение (τ_a – пропускане на атмосферата, E – естествена нощна осветеност,

K – контраст между наблюдавания обект и фона, $A'_{об}$ – приведена площ на наблюдавания обект) се приемат за детерминирани величини с известни стойности. Съществена роля в така формулирания оптимизационен модел играят двоичните целочислени променливи x_i , y_j , и z_k в зависимостите (3.46), (3.47), и (3.66). Те гарантират избор на единствен елемент (обектив, ЕОП, окуляр) от зададените множества елементи. Целочислените двоични променливи a_p и b_q^p , въведени чрез зависимостите (3.49) и (3.50), реализират избора на типа ел. батерии и избора на съответената разновидност на избрания тип ел. батерии.

Зависимостта (3.38) се използва, за да се осигури равенство на фокусните разстояния на обектива и окуляра, с което се постига стандартното за УНВ увеличение на системата обектив – окуляр, равно на единица.

Зависимостта (3.39) осигурява избор на окуляр със зрително поле, което е равно или по-голямо от зрителното поле на обектива и позволява пълноценно използване на екрана на ЕОП.

3.3.2. Обобщен детерминиран оптимизационен модел за проектиране на УНВ

Основната идея на обобщения оптимизационен модел за проектиране на УНВ е да се осъществи гъвкав интелигентен избор на необходимите модули на УНВ, т.е. да се определи коя комбинация от модули удовлетворява най-добре предварително зададените изисквания към проектирания УНВ. Тази идея може да се реализира с помощта на *комбинаторна оптимизация*. Обобщеният оптимизационен модел за проектиране на УНВ може да бъде представен като:

$$(3.74) \quad \max F(P) = (f_1(P), f_2(P), \dots, f_q(P))$$

при ограничения

$$(3.75) \quad P = \sum_{j_i=1}^{J_i} P_{j_i, k_i}^i x_{j_i}^i$$

$$(3.76) \quad g(P) = (g_1(P), g_2(P), \dots, g_m(P))$$

$$(3.77) \quad \sum_{j_i} x_{j_i}^i = 1, x \in \{0,1\}$$

$$(3.78) \quad P_{j_i, k_i}^{Li} \leq P_{j_i, k_i}^i \leq P_{j_i, k_i}^{Ui}, i = 1, n$$

Във формулировката $f_1(P), f_2(P), \dots, f_q(P)$ q описват целевите функции (критериите за качество) на вектора на променливите $P = \{P_{j_i, k_i}^i \mid i=1, \dots, n, j_i \in \{J_i\}, k_i \in \{K_i\}\} \in R^n$, представляващ съвкупността от всички разновидности на модулите, необходими за проектирането на УНВ. R^n е параметричното пространство от модулите за раелизиране на избор, j_i изразява разновидностите на модулите от i -ия тип, k_i са параметрите на i -ия модул от тип j_i и P_{j_i, k_i}^i е k_i -ият параметър на i -ия модул от тип j_i . $P' = \{P_{s,r}^t \mid t \in \{i\}, r \in \{k_i\}, s \in \{j_i\}\}$ е векторът на решението с избраните параметри на модулите в резултат на оптималния комбинаторен избор. Оптималният избор се реализира чрез използване на ограниченията (3.75), като се използват двоични целочислени променливи $X = \{x_{j_i}^i\}$, при ограничения (3.77). За реалистично оптимално проектиране са необходими не само целеви функции, но и ограничения, които определят граници в пространство на използваните променливи. Така например с P_{j_i, k_i}^{Li} и P_{j_i, k_i}^{Ui} са означени долната и горната граница на променливите и функциите на ограниченията $(g_1(P), g_2(P), \dots, g_m(P))$, описващи специфични зависимости, технически и потребителски изисквания на проектираната система. Външните условия на наблюдение се разглеждат като константи с предварително известни стойности.

3.3.3. Стохастичен оптимизационен модел за проектиране на опто-електронния канал на УНВ

При построяване на математически модел, който трябва да бъде в по-голяма степен адекватен на реалните условия на наблюдение, е

необходимо да се отчита вероятностният характер на външните условия на наблюдение – естествена нощна осветеност, пропускане на атмосферата, контраст между наблюдавания обект и фона, и площ на наблюдавания обект. Това изисква тези величини да се разглеждат като случайни величини и да се използват за дефиниране на съответна стохастична оптимизационна задача за проектиране на опто-електронния канал на УНВ.

Пропускане на атмосферата. Преминаването на оптично лъчение през въздушна среда е съпроводено от поглъщане и разсейване, при което лъчението отслабва. Разсейването на оптичното лъчение в атмосферата се дължи на време-пространствените нееднородности на нейното съдържание. За големите частици разсейването не зависи от дължината на вълната, докато за малки частици, съизмерими с дължината на вълната, отслабването на разсейването на лъчението е пропорционално на дължината на вълната λ^{-4} и е известно като *Релеевско разсейване*. На практика то слабо зависи от метеорологичните условия. Численото пресмятане на поглъщането в реална атмосфера изисква познаване на газовия състав на атмосферата (съотношения между газовите компоненти и големина на частиците), на съответната височина над земната повърхност, на конкретните метеорологични условия и на много други климатични фактори (Sospedra и др. 2004).

Пропускането на атмосферата в даден географски регион е случайна величина, която е непрекъсната в някакъв интервал. Установено е, че максимум на прозрачността на атмосферата се наблюдава през зимата, а минимум през лятото. За видимия оптичен диапазон (400 – 700 nm) измерените коефициенти на прозрачност на атмосферата са със стойности в диапазона от 0.68 до 0.93. С преминаване към ИЧ област от спектъра прозрачността на атмосферата се подобрява. При метеорологична видимост от 10 km пропускането на атмосферата до височина 1 km при дължина на вълната 600 nm е 0.72, а в центъра на областта на спектъра

(1400 – 1800 nm) то е 0.93 (Волков 2001). Тези изследвания показват, че диапазонът на пропускането на атмосферата τ_a варира от (0.712 – 0.804) (Indiso 1970; Ohkawara 2012). Случайният характер на пропускането на атмосферата може да се вземе предвид в стохастичния оптимизационен модел, чрез използване на съответното математическо очакване:

$$(3.79) \quad T_a^{cm} = \sum_{i=1}^p P_{\tau_a}^i \tau_a^i$$

където: $\sum_{i=1}^p P_{\tau_a}^i = 1$.

Контраст. Контрастът между наблюдавания обект и фона при наблюдение също е случайна величина. Практическите стойности за контраста между наблюдавания обект и фона са в диапазона (0.05 – 0.5) (Кошавцев и др. 1999). В стохастичния оптимизационен модел на опто-електронния канал на УНВ се отчита случайният характер на контраста между наблюдавания обект и фона чрез използване на математическото му очакване:

$$(3.80) \quad K^{cm} = \sum_{j=1}^t P_K^j K^j$$

където: $\sum_{j=1}^t P_K^j = 1$.

Естествена нощна осветеност. Стойностите на реалната естествена нощна осветеност E за някои характерни случаи могат да се опишат като наличие на: пълна луна (0.1 lx), половин луна (0.5 lx), четвърт луна (0.01 lx), звездно небе (0.001 lx) и облачно небе (0.0001 lx) (Ryer 1997). В стохастичния модел на опто-електронния канал на УНВ, случайната природа на естествената нощна осветеност се взема предвид чрез нейното математическо очакване:

$$(3.81) \quad E^{cm} = \sum_{k=1}^h P_E^k E^k$$

$$\text{където: } \sum_{k=1}^h P_E^k = 1.$$

Площ на наблюдавания обект. При детерминирания модел, площта на наблюдавания обект се приема за известна. С достатъчна за практиката точност, за случаите на наблюдение на танк, товарен автомобил, джип, БТР и т.н., това може да се приеме за достоверно в голяма степен. За случая на наблюдение на човешка фигура трябва да се вземе предвид, че размерите на обекта трудно могат да бъдат приети за детерминирани. В най-общия случай те зависят от расата и пола (Steckel & Prince 2001). Това се отразява в стохастичния модел като площта на наблюдавания обект участва с математическото си очакване:

$$(3.82) \quad A_{o\bar{o}}^{cm} = \sum_{m=1}^l P_{A_{o\bar{o}}}^m A_{o\bar{o}}^m$$

$$\text{където: } \sum_{m=1}^l P_{A_{o\bar{o}}}^m = 1.$$

От изложеното по-горе за стохастичната природа на параметрите *пропускане на атмосферата, естествена нощна осветеност, контраст и размери на наблюдавания обект*, то формулираният детерминиран оптимизационен модел може да се преобразува в стохастичен, като вместо детерминиранияте стойности на горните параметри се използват техните математически очаквания (3.64), (3.65), (3.66) и (3.67). И в този случай могат да се използват същите критериите за качество на опто-електронния канал на УНВ:

$$(3.83) \quad \begin{aligned} & \max \{R, BL, W_{o\bar{o}}, (1/k), OИЗ\} \\ & \min \{F, AC_{o\bar{o}}, AA_{o\bar{o}}, AD_{o\bar{o}}, AK_{o\bar{o}}, AC_{ок}, AA_{ок}, AD_{ок}, AK_{ок}\} \end{aligned}$$

В сила са и зависимости, описващи спецификата и параметрите на опто-електронния канал на УНВ (3.40) – (3.71).

3.3.4. Обобщен стохастичен оптимизационен модел за проектиране на УНВ

Съществена особеност при проектирането на УНВ е необходимостта от отчитане на външните условия на наблюдение. Естествената външна осветеност на околната среда, контрастът между фона и наблюдавания обект, пропускането на атмосферата и типа на наблюдавания обект пряко влияят върху най-важния за УНВ параметър – разстоянието на действие. На практика, тези външни параметри са случайни величини, които зависят от много взаимосвързани фактори като географско местоположение, метеорологични условия, параметри на околната среда и т.н. (Волков 2001; Волков и др. 2000). Законите на вероятностното разпределение на външните условия за наблюдение са резултат от многогодишни изследвания (Вълева 1993). Следователно при проектирането на УНВ трябва да се отчита стохастичността на външните условия на наблюдение и в частност техните специфични вероятностни закони на разпределение. Това се взема предвид в следната обобщена формулировка:

$$(3.84) \quad \max F(P) = (f_1(P), f_2(P), \dots, f_q(P))$$

при ограничения

$$(3.85) \quad P = \sum_{j_i=1}^{J_i} P_{j_i, k_i}^i x_{j_i}^i$$

$$(3.86) \quad g(P) = (g_1(P), g_2(P), \dots, g_m(P))$$

$$(3.87) \quad \sum_{j_i} x_{j_i}^i = 1, x \in [0,1]$$

$$(3.88) \quad P_{j_i, k_i}^{Li} \leq P_{j_i, k_i}^i \leq P_{j_i, k_i}^{Ui}, i = 1, n$$

$$(3.89) \quad E(L) = \sum_k E_L^k L^k ,$$

$$(3.90) \quad E(\tau_a) = \sum_l E_{\tau_a}^l \tau_a^l$$

$$(3.91) \quad E(K) = \sum_e E_K^e K^e$$

$$(3.92) \quad E(A'_{ob}) = \sum_t E_{A'_{ob}}^t A'^t_{ob}$$

където $\sum_k E_L^k = 1$, $\sum_l E_{\tau_a}^l = 1$, $\sum_e E_K^e = 1$, $\sum_t E_{A'_{ob}}^t = 1$ са съответните математически очаквания на външните условия на наблюдение.

3.4. Детерминиран оптимизационен избор на елементи на опто-електронния канал на УНВ

При проектирането на технически системи е желателно да се търси получаване на най-добри (в определен смисъл) параметри, чрез формулиране и решаване на съответни оптимизационни задачи. На базата на дефинираните по-горе детерминиран и стохастичен оптимизационен модел могат да бъдат формулирани и решавани съответни еднокритериални оптимизационни задачи. Спецификата на моделирането на опто-електронния канал на УНВ определя нелинейния характер на тези задачи, а необходимостта от осъществяване на оптимален избор изисква въвеждане и използване на двоични целочислени променливи. Това определя формулиране на еднокритериални нелинейни смесено-целочислени оптимизационни задачи, съответстващи на най-често поставяните в практиката изисквания към опто-електронния канал на УНВ. Тъй като най-съществена от аберациите е дисторсията, то в целевата функция ще бъде взета предвид само този вид аберация.

При детерминирани задачи величините, които определят външните условия на наблюдение (пропускане на атмосферата, естествена нощна осветеност, контраст, площ на наблюдавания обект), участват във формулирания модел (3.34) – (3.63), като се приемат за детерминирани величини с известни числени стойности.

Задача Д1. Това е базова задача на детерминирания модел на опто-електронния канал на УНВ, от която чрез добавяне на допълнителни ограничения и/или граници за някои от променливите се получават и останалите задачи. Целта на тази задача е да се намери такава комбинация на модулите на УНВ, която да максимизира разстоянието на действие, продължителността на работа с батерийно захранване, зрителното поле, относителния отвор на обектива и отдалечеността на изходната зеница, и да минимизира долната граница на разстоянието за фокусиране на обектива, дисторсията на обектива и теглото и цената на опто-електронния канал на УНВ.

$$(3.92) \quad \max\{R, LB, W_{об}, (1/k), ОИЗ\} \\ \min\{F, AD_{об}, T, C\}$$

при ограничения (3.40) – (3.71) и константи за външните условия на наблюдение $\tau_a, E, K, A'_{об}$.

Задача Д1а се получава чрез Д1, като от целевата функция се изключи компонентът за цена, за да се оцени влиянието на цената върху крайното решение, а именно

$$(3.94) \quad \max\{R, W_{об}, (1/k), ОИЗ\} \\ \min\{F, AD_{об}, T\}$$

при ограничения (3.104) – (3.125), същите както при задача Д1.

Ако трябва да се гарантира разстояние на действие по-голямо или равно на някаква предварително зададена стойност, то формулировката на задача Д1 се променя до задача Д2, като се добавя едно от допълнителните ограничения за разстоянието на действие R .

$$(3.75a) \quad \sqrt{0.07\tau_a EKA'_{об} K_{ЕОП} K_{об}} \geq R^O_{min}$$

$$(3.75b) \quad \sqrt{0.07\tau_a EKA''_{об} K_{ЕОП} K_{об}} \geq R^P_{min}$$

$$(3.75в) \quad \sqrt{0.07\tau_a EKA'''_{об} K_{ЕОП} K_{об}} \geq R^H_{min}$$

където R^O_{min} , R^P_{min} , R^H_{min} са предварително зададени минимални стойности за разстоянията на откриване, разпознаване и идентификация.

Задача Д3. Аналогично, ако се зададат граници за цената на опто-електронния канал, се формулира друга задача Д3, която се получава от Д1 чрез добавяне на съответни граници (долна и горна) за променливата цена C :

$$(3.96) \quad C_{min} \leq C \leq C_{max}$$

където C_{min} и C_{max} са предварително зададените стойности за цената на опто-електронния канал на УНВ.

Задача Д4. Ако теглото на опто-електронния канал не трябва да надхвърля определена стойност, чрез съответна граница се формулира друга задача Д4, получаваща се от Д1 чрез включване на допълнителната горна граница:

$$(3.97) \quad T \leq T_{max},$$

където T_{max} е предварително зададената най-голяма допустима стойност на теглото на опто-електронния канал.

Тези задачи отразяват типични практически изисквания при проектирането на опто-електронния канал на УНВ. Предложеният детерминиран математичен оптимизационен модел на опто-електронния канал на УНВ позволява при необходимост от удовлетворяване на други практически изисквания за опто-електронния канал и формулиране на задачи, включващи други допълнителни ограничения или комбинации от допълнителните ограничения, въведени в задачите Д2, Д3 и Д4.

3.5. Стохастичен оптимизационен избор на елементи на опто-електронния канал на УНВ

Стохастичен оптимизационен избор на елементите може да се осъществи чрез решаване на съответни стохастични оптимизационни задачи. Тези задачи са формулирани аналогично на детерминирани задачи, като се взема предвид, че

променливите, определящи външните условия на наблюдение – пропускане на атмосферата, естествена нощна осветеност, контраст между обекта и фона и площ на наблюдавания обект (човешка фигура в цял ръст) са стохастични величини, участващи със своите математически очаквания.

Задача С1. Аналогично на детерминирания случай, базовата задача С1 няма допълнителни ограничения и/или горни или долни граници за стойностите на параметрите на опто-електронния канал.

$$(3.98) \quad \begin{aligned} & \max\{R, BL, W_{об}, (1/k), ОИЗ\} \\ & \min\{F, AD_{об}, T, C\} \end{aligned}$$

при ограничения (3.40) – (3.71) и математически очаквания (3.99) – (3.102) за външните условия на наблюдение.

Задача С1а се определя чрез С1, като се елиминира влиянието на цената върху крайното решение, чрез изключването от целевата функция.

$$(3.99) \quad \begin{aligned} & \max\{R, BL, W_{об}, (1/k), ОИЗ\} \\ & \min\{F, AD_{об}, T\} \end{aligned}$$

при ограничения, същите както при задача С1.

Задача С2. Както и в детерминирания случай, ако се въведе ограничение за минимално разстояние на действие, то задачата С2 се получава от С1 чрез добавяне на едно от допълнителните ограничения, в зависимост от типа на разстоянието на действие:

$$(3.100a) \quad \sqrt{0.07T_a^{cm} E^{cm} K^{cm} A_{об}^{cm.o} K_{ЕОП} K_{об}} \geq R_{min}^O$$

$$(3.100б) \quad \sqrt{0.07T_a^p E^{cm} K^{cm} A_{об}^{cm.p} K_{ЕОП} K_{об}} \geq R_{min}^P$$

$$(3.100в) \quad \sqrt{0.07T_a^p E^{cm} K^{cm} A_{об}^{cm.u} K_{ЕОП} K_{об}} \geq R_{min}^H$$

където R_{min}^O , R_{min}^P и R_{min}^H са предварително зададените минимални стойности за разстоянията на откриване, разпознаване и идентификация.

Задача С3 се получава от С1 чрез задаване на граници за цената на опто-електронния канал С:

$$(3.101) \quad C_{min} \leq C \leq C_{max}$$

където C_{min} и C_{max} са предварително зададените граници (долна и горна) за цената на опто-електронния канал на УНВ.

Задача С4. При наличие на граница за теглото на опто-електронния канал се формулира задача С4 чрез добавяне на допълнителна горна граница:

$$(3.102) \quad T \leq T_{max}$$

където T_{max} е предварително зададената най-голяма допустима стойност на теглото на опто-електронния канал на УНВ.

Както и при детерминирания модел, така и тук при необходимост от удовлетворяване на други практически изисквания могат да се формулират други оптимизационни задачи, включващи допълнителни ограничения и граници за различни параметри на опто-електронния канал.

Формулираните детерминирани и стохастични оптимизационни задачи (Д1, Д1а, Д2, Д3, и Д4) и (С1, С1а, С2, С3, и С4) позволяват да се осъществи оптимален избор на елементите на опто-електронния канал на УНВ, при зададени различни изисквания спрямо разстоянието на действие, теглото и цената на опто-електронния канал на УНВ.

Описаните модели (детерминиран и стохастичен) и съответните оптимизационни задачи могат да се интегрират в подходящи методи за проектиране на опто-електронния канал на УНВ.

Глава IV

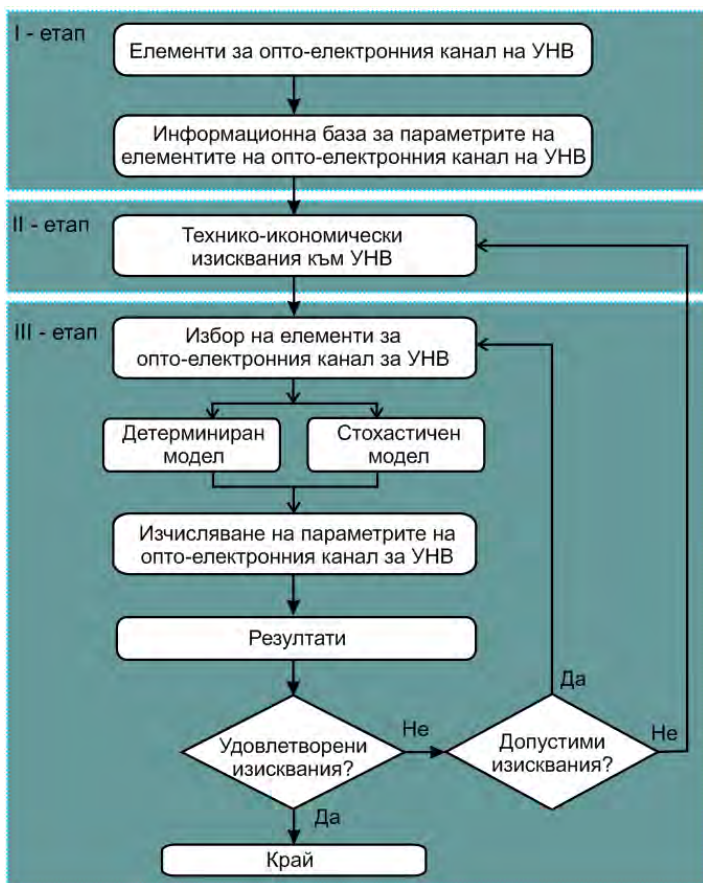
Методи за проектиране на УНВ

Съществуващата понастоящем практика при проектирането на УНВ изисква изработване на прототипи и тестването им, за да се определи дали удовлетворяват поставените при проектирането изисквания. Този процес е свързан с разходи на средства и време. В тази връзка, дефинирането на методи за проектиране на опто-електронния канал на УНВ, позволяващи предварителна теоретична оценка на изпълнението на поставените изисквания и намаляващ горните разходи, е от съществено значение.

Формулираните модели в трета глава (детерминиран и стохастичен) са включени в методи за проектиране на опто-електронния канал на УНВ чрез избор от множества елементи. Формулирани са три метода – метод на итеративен избор, метод на рационален избор и метод на оптимален избор на елементи на опто-електронния канал на УНВ. Концепцията на метода за рационален избор съвпада в голяма степен с използваната при многокритериалната оптимизация, рационална (удовлетворителна) оценка. Рационалното вземане на решения означава, че ЛВР не оптимизира някаква ценностна функция, а се старее да достигне определени удовлетворителни нива на критериите. В най-общ случай, получените решения не са оптимални, а са наречени рационални или удовлетворителни решения. Методът на оптималния избор използва формулираните оптимизационни задачи и изборът в резултат на решенията им е оптимален, в смисъла на дефинирания критерий за качество на опто-електронния канал на УНВ.

4.1. Метод за итеративен избор на елементи за УНВ

Методът на итеративния избор е реализиран в разработена програмна система “NVGpro” (Борисова и др. 2000). На фиг. 4.1 са показани графично етапите на итеративния метод за избор на елементи за опто-електронния канал на УНВ.

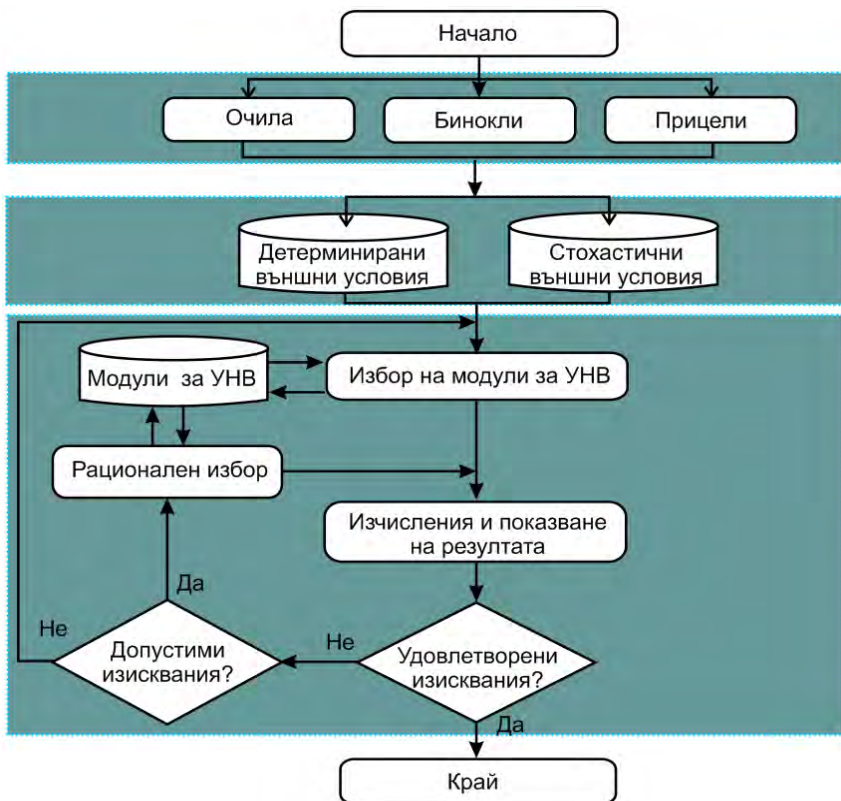


Фиг. 4.1. Етапи на итеративния избор

Първият основен етап на метода е определяне на необходимите конструктивни елементи за УНВ и изграждане на информационна база, включваща съответните параметри. Вторият основен етап се състои в определяне на технико-икономическите изисквания към разработваните уреди. На този етап се установяват потребителските изисквания към параметрите на УНВ – разстояние на действие, зрително поле, тегло, цена и т.н. На третия етап се реализира изборът на конструктивните елементи за опто-електронния канал – обектив, ЕОП, окуляр, ел. батерии. Този избор се осъществява с помощта на лицето, вземащо решение (ЛВР). При избрано конкретно устройство и стойности на параметрите на външните условия на наблюдение, параметрите на опто-електронния канал се изчисляват посредством детерминирания модел, а при използване на математическите очаквания на външните условия на наблюдение се реализира стохастичният модел. Следва оценяване на получените резултати от ЛВР. Ако те не съответстват на поставените изисквания, се извършва промяна в направения избор на някои от елементите и отново се сравняват получените резултати. По такъв начин, чрез последователно изпълнение на процеса на избор и изчисляване параметрите на опто-електронния канал на УНВ, се търси удовлетворяване на поставените изисквания.

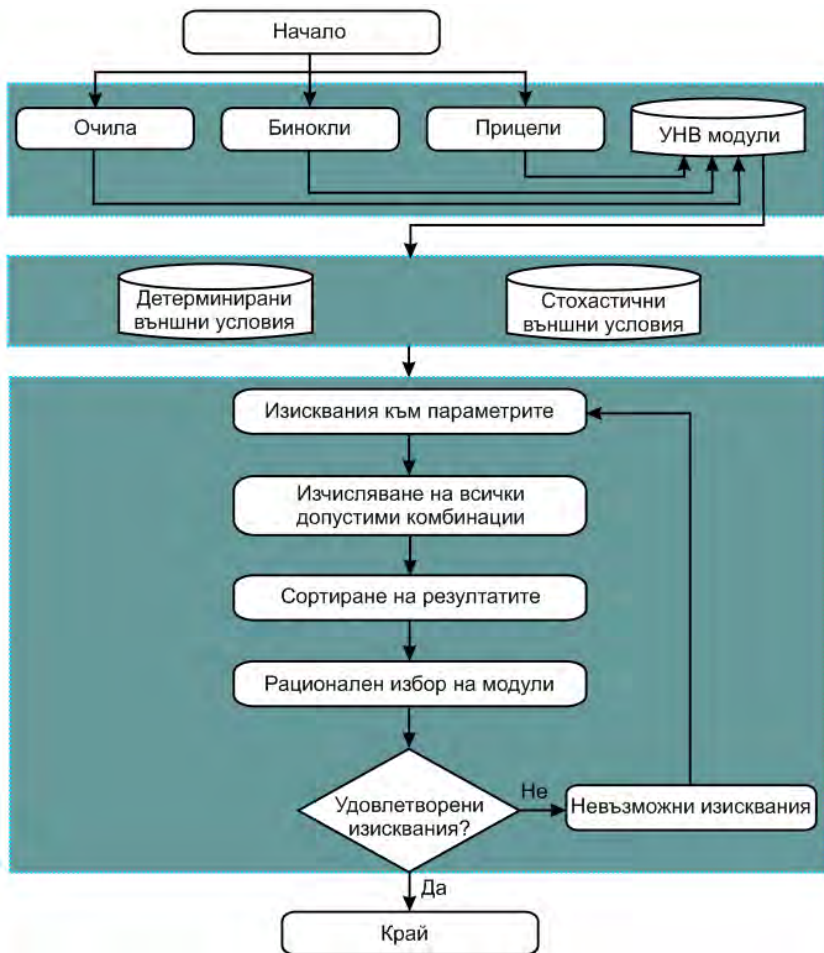
4.2. Метод за рационален избор на елементи за УНВ

Методът на рационалния избор не използва оптимизация, но позволява избор на основните елементи на опто-електронния канал и получаване в резултат на избора оценки за съответните параметри на УНВ. Схематичното представяне на процеса на проектиране на УНВ чрез използване на метода на рационалния избор е показано на фиг. 4.2 (Borissova и др. 2007).



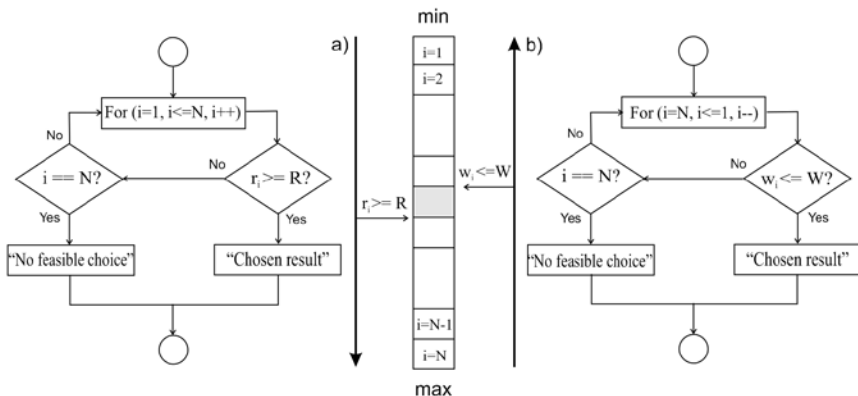
Фиг. 4.2. Проектиране на УНВ чрез метода на рационалния избор

Съществена особеност при този метод, е че ЛВР може да зададе допълнителни изисквания за някои от параметрите на проектираното устройство (горни или долни граници). Удовлетворяването на така зададените ограничения се реализира чрез следната обобщена схема за реализация на метода на рационалния избор, както е показано на фиг. 4.3 ((Borissova и др. 2006).



Фиг. 4.3. Алгоритмичната реализация на метода на рационалния избор

За определяне на долната, респективно горната граница от зададените стойности се използват сортирани масиви и терсене в тях, фиг. 4.4 (Mustakerov & Borissova 2007).



Фиг. 4.4. Реализация на търсенето в сортираните масиви на стойности за:
 а) разстоянието на действие и увеличението; б) теглото и цената

При задаване на ограничения за теглото и цената процесът на търсене започва от големите към малките стойности в съответните сортирани масиви, докато бъде достигната стойност по-малка или равна на зададена. Ако са въведени недопустими ограничения за проектираното устройство, които не могат да бъдат удовлетворени, то съответно съобщение се показва на екрана.

4.2.1. Обобщен алгоритъм за оценка параметрите на проектираните УНВ, използвайки итеративен или рационален метод

Основните модули на УНВ могат да бъдат редуцирани до следните основни компоненти: обективи, ЕОП, окуляри и ел. захранване, както е показано на фиг. 4.5.



Фиг. 4.5. Основни модули на УНВ

Предварителна теоретична оценка на проект на УНВ може да се осъществи, като се вземат предвид необходимите основни модули на УНВ. При това е необходимо да се спазват съответните специфични ограничения за съвместимост между модулите за различните разновидности на УНВ – очила, бинокли и прицели. Разглеждайки процеса на проектиране на УНВ като проблем на вземане на решение се предполага, че съществува лице, вземащо решение (потребител), и окончателното решение зависи от неговите предпочитания и изисквания към параметрите на уреда, най-съществените от които са изброени по-долу:

Най-важният от практическа гледна точка параметър на УНВ – разстоянието на действие в различните му разновидности (откриване, разпознаване и идентификация обхвати) могат да бъдат определени, използвайки критериите на Jonson (Borissova & Mustakerov 2006) и зависимостта (2.53).

Друг параметър на УНВ е увеличението (α). То може да се представи като отношение на фокусните разстояния на обектива и окуляра и увеличението β на използвания ЕОП:

$$(4.1) \quad \alpha = \beta \frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

В случая на очила за нощно виждане увеличението на уреда е $\alpha = 1$ (т.е. няма увеличение). Когато се проектират бинокли и прицели, увеличението е винаги по-голямо от единица, т.е. ($\alpha > 1$).

Зрително поле на УНВ е в пряка зависимост от фокусното разстояние на обектива и диаметъра на фотокатода на ЕОП:

$$(4.2) \quad f_{ob} = D_{ИТрph} \left(2 \operatorname{tg} \left(\frac{\omega}{2} \right) \right)^{-1}$$

където f_{ob} е фокусното разстояние на обектива в mm, ω е зрителното поле в градуси, $D_{ИТрph}$ е диаметър на фотокатода на ЕОП в mm.

Времето на работа с батерийното електрическо захранване L_B зависи от капацитета на използваните батерии C_B и тока I_{ITT} , който е необходим за работата на използвания ЕОП. Тази зависимост се въвежда чрез:

$$(4.3) \quad L_B = \frac{C_B}{I_{ITT}}$$

Типичното захранващо напрежение за ЕОП е 3.0 V. Съществуват две основни разновидности на батериите, които могат да бъдат използвани – батерии тип АА с напрежение 1.5 V и батерии от клетъчен тип с напрежение 3.0 V. Възможно е да бъдат използвани различен брой последователно и/или паралелно свързани батерии. Това може да бъде изразено чрез следната зависимост за общия капацитет на захранването C_B (Borissova, 2006):

$$(4.4) \quad C_B = n \sum_{p=1}^t a_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p C_B^q$$

където n – брой на паралелно свързаните батерии, a_p – двоични променливи за батериите от 3V или 1.5 V, b_q^p – двоични променливи за батерии разновидностите на батериите от 3V или 1.5 V, C_B^q – капацитет на различните типове батерии от 3 V или от 1.5 V.

Една достатъчна за практиката приблизителна оценка за теглото и цената на УНВ може да се получи, като се сумират съответно теглата/цените на съответните модули на УНВ (ЕОП, обектив, окуляр и електрическо захранване):

$$(4.5) \quad Weight_{NVD} = W_{ITT} + W_{ob} + W_{oc} + W_{battery}$$

$$(4.6) \quad Price_{NVD} = P_{ITT} + P_{ob} + P_{oc} + P_{battery}$$

Теглото на батериите се определя от избрания тип батерии (1.5V или 3V) и необходимия им брой и може да бъде определено чрез следната зависимост:

$$(4.7) \quad W_{battery} = n \left(\sum_{p=1}^t a_p \left(s_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p H_B^q + \sum_{p=1}^t t_p \right) \right)$$

където H_B^q – тегло на конкретния вид електрическа батерия, t_p – тегло на единичната батерия, $s_p = 1$ за 3V батерия и $s_p = 2$ за батерия от 1.5V.

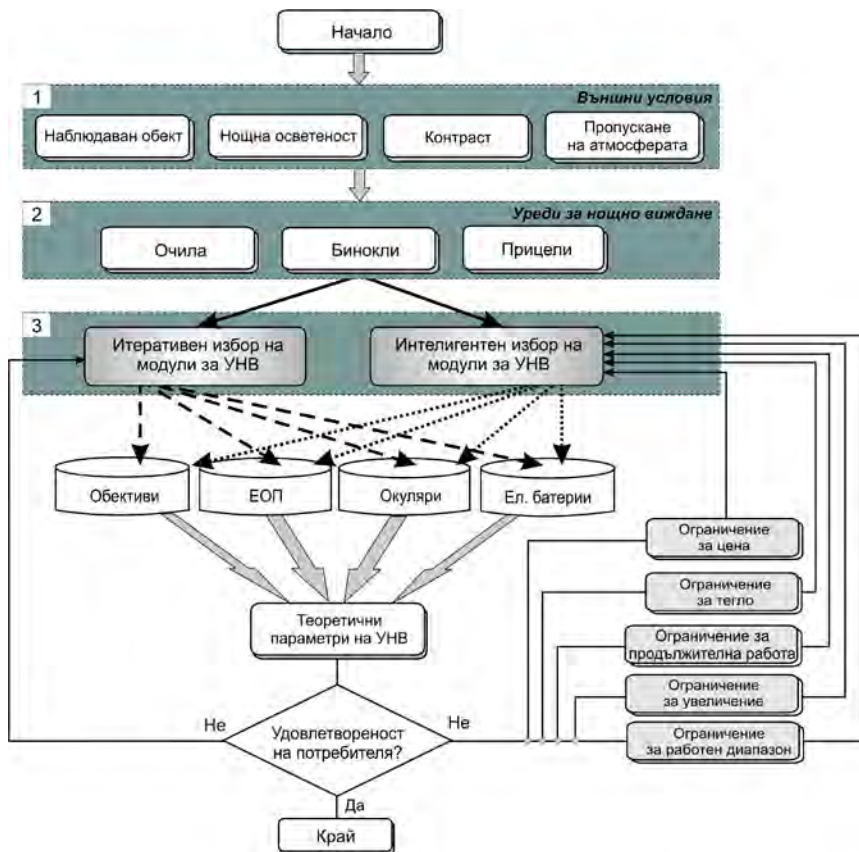
Аналогично, цената на захранването също зависи от използвания тип батерии и техния брой и може да бъде определена чрез зависимостта:

$$(4.8) \quad P_{battery} = n \left(\sum_{p=1}^t a_p \left(s_p \sum_{q=1}^{k_p} b_q^p P_B^q + \sum_{p=1}^t k_p \right) \right)$$

където P_B^p – цена на типа батерийно захранване, k_p – цена на отделната единична батерия.

Описаният по-горе математически модел може да бъде интегриран в подходящ алгоритъм, за определяне на предварителна теоретична оценка на параметрите на проектирания уред (Vorissova и др. 2013). Алгоритъмът за проектиране на различни типове УНВ взема предвид както зависимостите между отделните модули и спецификата на различните типове УНВ, но така също и конкретни изисквания на потребителя. Обобщената блокова схема на алгоритъма е показана на фиг. 4.6.

Алгоритъмът започва с определяне на външните условия за наблюдение. Поради спецификата на използването на УНВ е важно при процеса на проектиране да се вземат предвид различните условия на наблюдение. Най-важният параметър на УНВ, разстоянието на действие, се влияе както от параметрите на отделните модули на устройството, така и от външните условия за наблюдение. На втория етап се избира типът на уреда за нощно виждане (очила, прицел, бинокъл).



Фиг. 4.6. Блок-схема на алгоритъма за определяне на предварителна теоретична оценка на параметрите на проектираните УНВ

Третият етап на алгоритъма се разделя на два клона за реализиране на итеративен и рационален (интелигентен) избор на модули. Итеративният клон на алгоритъма позволява на потребителя да направи собствен избор от съвместими модули за избрания тип устройство и да определи параметрите на проектирания уред, отчитайки зададени външни условия на

наблюдение. Ако изчислените параметри на проектираното устройство не удовлетворяват потребителя, той може да избере други модули. Този интерактивен симулационен процес на проектиране, реализиран като избор на съвместими модули и оценка на параметрите на УНВ, приключва когато получените параметри на симулираното устройство са приемливи за потребителя.

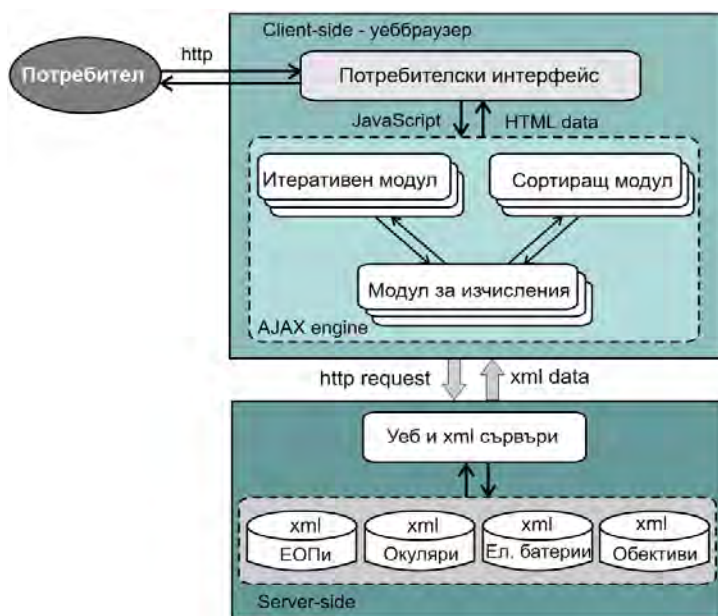
Вторият клон на алгоритъма позволява на потребителя да зададе някои предварителни изисквания относно параметрите на проектираното устройство. Основната идея на този интелигентен избор на модули е да се намери такава допустима комбинация от модули, която да отговаря на зададените изисквания на потребителя. Алгоритмичната реализация на интелигентния избор се основава на определяне на параметрите на УНВ за всички възможни комбинации от модули, и да избере такава комбинация, която отразява зададените предпочитания на потребителя. Ако такава комбинация не съществува, потребителят получава допълнителна информация за изискването към даден параметър, което не може да се изпълни. В такъв случай потребителят трябва да зададе друго изискване и да повтори процедурата.

Този клон на алгоритъма се реализира, като се изчисляват параметрите на УНВ за всички допустими комбинации на модулите и получените резултати се съхраняват в сортирани във възходящ ред масиви. Ако е зададено ограничение за стойността на разстоянието на действие или ограничение за стойността на увеличението, то процесът на търсене започва от малките към големите стойности в съответните сортирани масиви и завършва, когато бъде достигната стойност по-голяма или равна на зададената. При задаване на ограничения за теглото и цената процесът на търсене започва от големите към малките стойности в съответните сортирани масиви и спира, когато бъде достигната стойност по-малка или равна на зададената.

Чрез описания алгоритъм могат да бъдат симулирани

различни проектни решения за УНВ, като същевременно се вземат предвид и зададени комбинации на външните условия за наблюдение. Изпълнението на втория клон на алгоритъма дава възможност за задаване на предварителни изисквания към параметрите на проектирания уред.

Така описаният алгоритъм може да бъде реализиран в уеб приложение, чиято архитектура е показана на фиг. 4.7.



Фиг. 4.7. Архитектура на уеббазираното приложение за определяне на предварителна теоретична оценка на параметрите на проектираните УНВ

Описаната архитектура използва технологията AJAX (*Asynchronous JavaScript* и *XML*). Използването на AJAX води до динамично променяне на уебсъдържанието, когато това е необходимо, посредством заявки от типа *XMLHttpRequest*. Потребителският интерфейс на уебприложението, реализиращо

алгоритъма за оценка на параметрите на проектираните уреди за нощно виждане, е показан на фиг. 4.8.

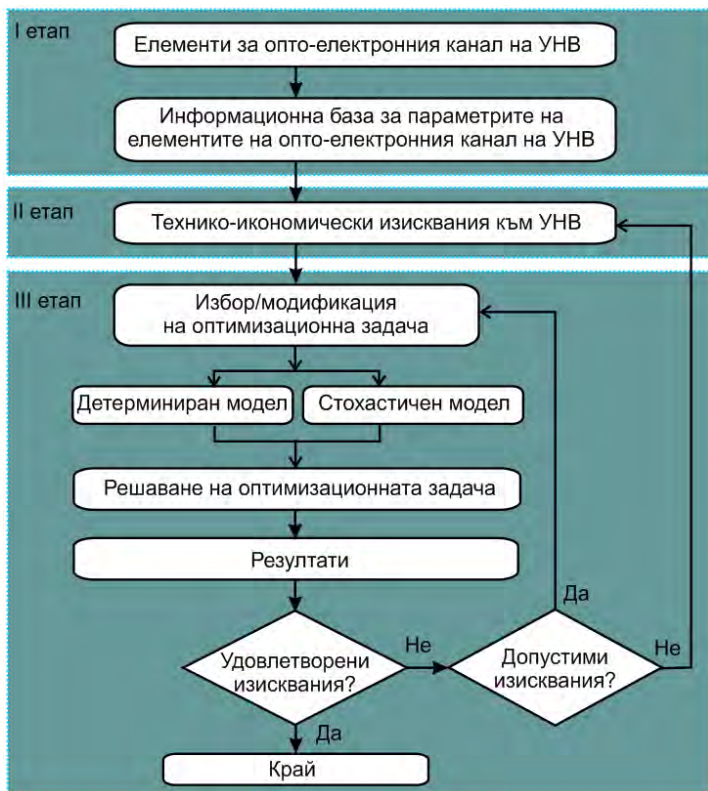


Фиг. 4.8. Потребителски интерфейс на приложението

Този интуитивен и дружелюбен интерфейс позволява задаване на данни и избор чрез съответни бутони. Чрез „радио“ бутони се избира типът на проектирания уред за нощно виждане – очила, бинокъл или прицел. Една част от менюта от типа „падащи“ списъци са предназначени за избор на основните модули за УНВ (ЕОП, обектив със съответен окуляр, ел. батерии), а друга част – за избор на различни външни условия за наблюдение (наблюдаван обект, естествена нощна осветеност, контраст и пропускане на атмосферата). Изборът на конкретен модул автоматично зарежда неговите параметри в предвидените за целта текстови полета. При изчисляването на разновидностите на разстоянието на действие на УНВ, на увеличението, теглото, цената и времето за непрекъсната работа се използват формулите (2.39) и (4.1) – (4.8).

4.3. Метод за оптимално проектиране на УНВ

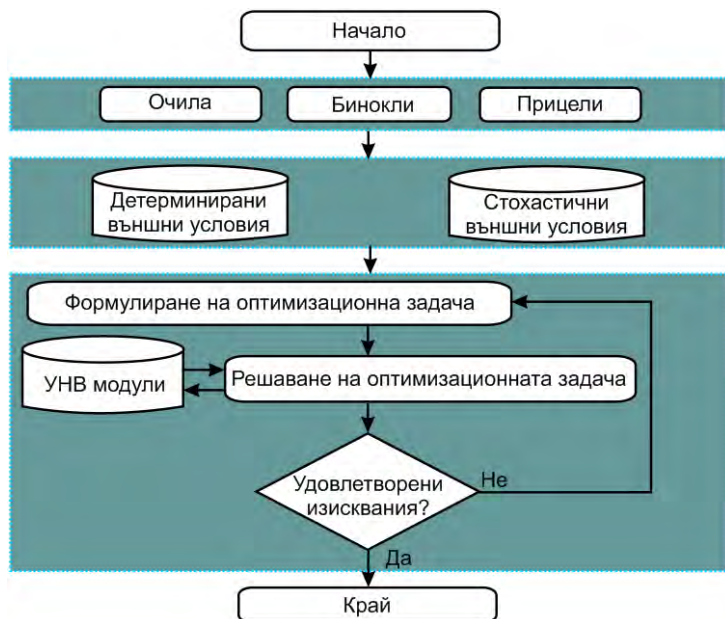
Този метод се отличава от описаните по-горе методи с формулиране и решаване на оптимизационни задачи. На фиг. 4.9 са показани етапите на метода за оптимално проектиране на УНВ.



Фиг. 4.9. Етапи на метода на оптимален избор

Първите два етапа съвпадат с етапите в итеративния и рационалния метод за избор на елементи за опто-електронния канал на УНВ. На третия етап ЛВР избира (или модифицира) една от формулираните в предишните точки оптимизационни задачи,

използвайки детерминирания или стохастичния модел на външните условия на наблюдение. Задачата се решава с помощта на избран софтуерен продукт. Полученото решение се анализира от ЛВР и ако резултатите не удовлетворяват изискванията, може да се избере друга оптимизационна задача или същата да се модифицира и да се реши отново. Този процес се повтаря до получаване на резултати, удовлетворяващи поставените изисквания. И тук ЛВР има възможност за предварително определяне на желаните граници на някои параметри, участващи в съответния модел. Изпълнението на отделните етапи може да се автоматизира чрез разработване на специализиран софтуер, улесняващ взаимодействието на ЛВР при реализацията на методите. Една обобщена алгоритмична реализация на метода на оптималния избор е показана на фиг. 4.10 (Borissova и др. 2007).



Фиг. 4.10. Алгоритмична реализация на метода на оптималния избор

Описаният метод, реализиращ оптимален избор на елементи за проектиране на опто-електронния канал на УНВ, също използва итеративни процедури за определяне на параметрите на УНВ, под контрола на ЛВР. Съществена характеристика на този метод е, че получените решения са оптимални (или Парето-оптимални за случая на многокритериални задачи), съгласно зададените от ЛВР изисквания и ограничения в оптимизационната задача.

4.3.1. Използване метода на „ ϵ -ограничения“ за оптимален избор на елементи за УНВ

Използването на многокритериални задачи съответства по-пълно на процеса на проектиране на реални системи. Това обаче изисква използване на специфични методи за решаване на оптимизационните задачи. Методите за решаване на задачите на многокритериалната оптимизация обикновено предлагат генерирането на Парето-оптимални решения чрез използване на добре изучената и ефективна еднокритериална оптимизация. За целта са разработени разнообразни методи за преобразуване на многокритериалната задача в една или няколко еднокритериални задачи. Най-често целевата функция на еднокритериалната задача е реална функция от целевите функции на многокритериалната задача с въведени допълнителни променливи и/или скаларни или векторни параметри. Могат да бъдат въведени и допълнителни ограничения или променливи, свързани с целевите функции на многокритериалната задача. Това е така нареченият скаларизационен подход (Miettinen 1999), който е един традиционен и масово използван подход за решаване на задачите на многокритериалната оптимизация. За да бъде една еднокритериална задача скаларизираща задача на изходната многокритериална задача, тя трябва да отговаря на две изисквания:

- чрез промяна на стойностите на параметрите на скаларизиращата задача трябва да може да се намери всяко Парето-оптимално решение на многокритериалната задача;

- за всяко Парето-оптимално решение на многокритериалната задача трябва да могат да се намерят подходящи стойности на параметрите на скаларизиращата задача, така че нейното оптимално решение да е точно това Парето-оптимално решение на многокритериалната задача.

Многокритериалната нелинейна смесено-целочислена оптимизационна задача за избор на елементи на опто-електронния канал на УНВ може да се представи като:

$$(4.9) \quad \begin{aligned} & \max \{R, W_{ob}, (1/k), OИЗ\} \\ & \min \{AD_{ob}, T, C, F\} \end{aligned}$$

при ограничения (3.40) – (3.71) за детерминирания случай и ограничения (3.40) – (3.71) и математически очаквания (3.99) – (3.102) за външните условия на наблюдение при стохастичния случай.

Един често използван метод за решаване на многокритериални оптимизационни задачи е т.нар. *метод на „ε-ограничения“*. Чрез този метод ЛВР задава своите предпочитания за важността на отделните критерии, като ги подрежда по важност и избира един критерий за максимизация и определя граници ε_k на изменение на останалите критерии. Като изходни данни за решаването на оптимизационните задачи са използвани параметрите на 5 броя ЕОП на различни фирми и от различни поколения (таблица 4.1), 5 броя обективи (таблица 4.2) и 5 броя окуляри (таблица 4.3), като използваните стойности за външните условия на наблюдение са показани в таблица 4.4.

Таблица 4.1 Параметри на ЕОП

№	ЕОП	S_{Σ} , A/lm	δ , lp/mm	М	Тегло, gr	Цена, \$
1	DEP Gen II	0.000450	50	16	85	660
2	DEP SHD-3	0.000600	54	20	80	1500
3	DEP XD-4	0.000700	58	24	80	2000
4	DEP XR-5	0.000800	70	28	80	5600
5	ITT MX - 10160B	0.002100	72	36	85	5900

Таблица 4.2 Параметри на обективи

№	Обектив	1/k	$f_{об}$, mm	τ_o	Зрително поле, deg	Дисторсия, %	Фокуси-ровка, cm	Тегло, gr	Цена, \$
1	УНВ Прилеп	1.20	25.17	0.80	43	7.0	25.0	82	340
2	AN/PVS-5C	1.05	26.80	0.86	40	4.5	25.0	95	380
3	AN/PVS-5A	1.40	25.00	0.81	40	8.0	25.5	83	300
4	NVG-500	1.09	26.60	0.77	40	5.0	25.0	92	290
5	D-2V	1.40	26.00	0.80	37	8.0	25.0	85	300

Таблица 4.3 Параметри на окуляри

№	Окуляр	$f_{ок}$, mm	$W_{ок}$, deg	ОИЗ, mm	Тегло, gr	Цена, \$
1	УНВ Прилеп	25.17	43.0	15	62	150
2	NVG-500	26.60	40.5	15	75	100
3	M-963	26.00	41.0	15	60	160
4	M-953	25.00	40.0	25	68	140
5	M-915	26.80	41.0	15	70	150

Таблица 4.4 Външни условия на наблюдение

Външни условия	Пропускане на атмосферата	Естествена нощна осветеност	Контраст	Приведена площ за		
				откриване	разпознаване	идентификация
детерминирани	0.700	0.010	0.200	0.700	0.276	0.131
стохастични	0.575	0.0135	0.275	0.642	0.253	0.120

Използвайки метода на ϵ -ограниченията и данните от таблици 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4 са формулирани следните скаларизиращи задачи (Borissova 2006):

Задача $D(R)$, реализираща критерия за максимално разстояние на откриване, се формулира чрез следната целева функция:

$$(4.10) \quad \max R^O$$

при **ограничения**, определени на база на стойностите от таблици 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4, формулите (3.40) – (3.71) и допълнителни ограничения за останалите критерии:

$$(4.11) \quad 35 \leq W_{ob}$$

$$(4.12) \quad 1 \leq (1/k)$$

$$(4.13) \quad F \leq 30$$

$$(4.14) \quad AD_{ob} \leq 9$$

$$(4.15) \quad 20 \leq OИЗ$$

$$(4.16) \quad T \leq 300$$

$$(4.17) \quad C \leq 7000$$

Решаването на така формулираната задача $D(R)$ определя стойност за разстоянието на откриване R^O , която се задава чрез съответно ограничение в останалите скаларизиращи задачи.

Задача $D(W_{ob})$ реализира критерия за максимално зрително поле на обектива, чрез следната целева функция:

$$(4.10) \quad \max W_{ob}$$

при **ограничения**, определени чрез стойностите от таблици 4.2, 4.3 и 4.7 и формулите (3.40) – (3.71), ограничения за критериите (4.12) – (4.17) и допълнителното ограничение:

$$(4.18) \quad 400 \leq R^O$$

Решаването на задача $D(W_{ob})$ определя стойност на зрителното поле на обектива W_{ob} , което се задава като ограничение в останалите скаларизиращи задачи.

Задача $D(1/k)$ реализира критерия за максимален относителен отвор на обектива чрез следната целева функция:

$$(4.19) \quad \max 1/k$$

при **ограничения**, определени чрез стойностите от таблици 4.2, 4.3 и 4.7 и формулите (3.40) – (3.71), ограничения за критериите (4.13) – (4.17), (4.18) и допълнителното ограничение:

$$(4.20) \quad 40 \leq W_{ob}$$

Решаването на задача $D(1/k)$ определя стойност на относителния отвор на обектива, което се задава като ограничение в останалите скаларизиращи задачи.

Задача Д(F) реализира критерия за минимална фокусировка на обектива чрез следната целева функция:

$$(4.21) \quad \max(-F)$$

при **ограничения**, определени чрез стойностите от таблици 4.2, 4.3 и 4.7 и формулите (3.40) – (3.71), ограничения за критериите (4.14) – (4.17), (4.18), (4.20) и допълнителното ограничение:

$$(4.22) \quad l \leq (l/k)$$

Решаването на задача Д(F) определя фокусировката на обектива, която се задава като ограничение в останалите скаларизиращи задачи.

Задача Д(AD_{об}) реализира критерия за минимална дисторсия на обектива чрез следната целева функция:

$$(4.23) \quad \max(-AD_{об})$$

при **ограничения**, определени чрез стойностите от таблици 4.2, 4.3 и 4.7 и формулите (3.40) – (3.71), ограничения за критериите (4.15) – (4.17), (4.18), (4.20), (4.22) и допълнителното ограничение:

$$(4.24) \quad F \leq 30$$

Решаването на задача Д(AD_{об}) определя стойност на дисторсия на обектива, която се задава като ограничение в останалите скаларизиращи задачи.

Задача Д(ОИЗ) реализира критерия за максимална отдалеченост на изходната зеница на окуляра, чрез следната целева функция:

$$(4.25) \quad \max ОИЗ$$

при **ограничения**, определени чрез стойностите от Таблицы 4.2, 4.3 и 4.7 и формулите (3.40) – (3.71), ограничения за критериите (4.16) – (4.17), (4.18), (4.20), (4.22), (4.24) и допълнителното ограничение:

$$(4.26) \quad AD_{об} \leq 7$$

Решаването на задача Д(ОИЗ) определя стойността на отдалечеността на изходната зеница на окуляра, която се задава като ограничение в останалите скаларизиращи задачи.

Задача Д(T) реализира критерия за минимално тегло на опто-електронния канал, чрез следната целева функция:

$$(4.27) \quad \max (-T)$$

при **ограничения**, определени чрез стойностите от таблици 4.1, 4.2 и 4.3 и формулите (3.40) – (3.71), ограничения за критериите (4.17), (4.18), (4.20), (4.22), (4.24), (4.26) и допълнителното ограничение:

$$(4.28) \quad 10 \leq ОИЗ$$

Решаването на задача Д(T) определя стойност на теглото на опто-електронния канал, което се задава като ограничение в останалите скаларизиращи задачи.

Задача Д(C) реализира критерия за минимална цена на опто-електронния канал чрез следната целева функция:

$$(4.29) \quad \max (-C)$$

при **ограничения**, определени чрез стойностите от таблици 4.1, 4.2 и 4.3 и формулите (3.40) – (3.71), при ограничения за критериите (4.18), (4.20), (4.22), (4.24), (4.26), (4.28) и допълнителното ограничение:

$$(4.30) \quad T \leq 250$$

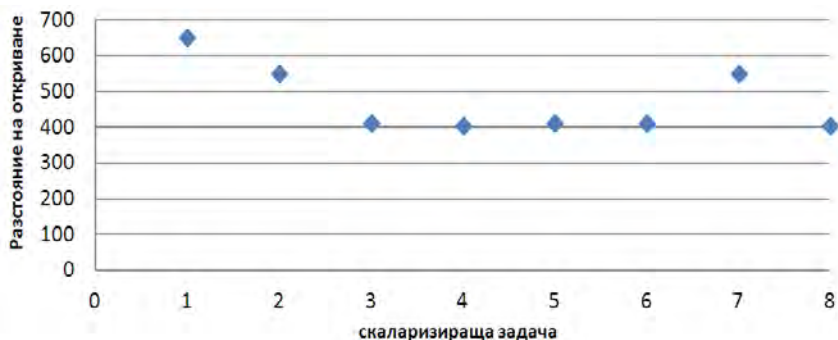
В резултат на решаването на задача Д(C) се получава и крайното решение на многокритериалната оптимизационна задача, чрез метода на ϵ -ограниченията. В таблица 4.5 са показани резултатите от решаването на скаларизиращите еднокритериални задачи Д(R), Д(W_{об}), Д(1/k), Д(F), Д(AD_{об}), Д(ОИЗ), Д(T), Д(C), реализиращи метода на ϵ -ограниченията.

На фиг. 4.11 и 4.12 са илюстрирани етапите от решаването на съответните скаларизиращи задачи в зависимост от изменението на *разстоянието на откриване* (фиг. 4.11) и *цената* на опто-електронния канал (фиг. 4.12) спрямо получените стойности при решаване на конкретната скаларизираща задача при наблюдаване на човешка фигура в цял ръст в детерминирани външни условия на наблюдение.

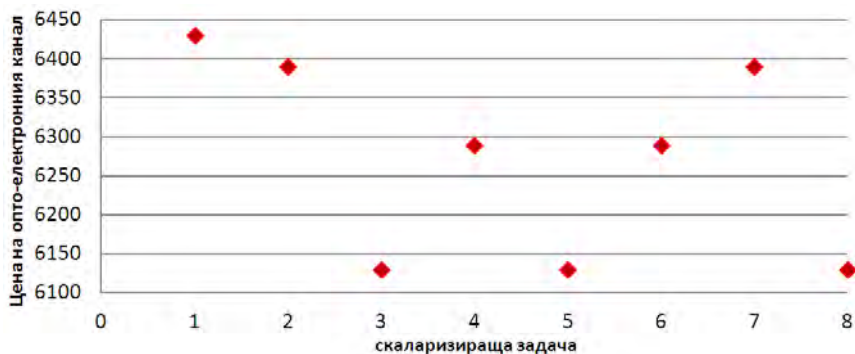
Таблица 4.5. Резултати от детерминираните скаларизиращи задачи, реализиращи метода на ε -ограниченията

	Задачи							
	R (1)	$W_{об}$ (2)	1/k (3)	F (4)	$AD_{об}$ (5)	ОИЗ (6)	T (7)	C (8)
Избран ЕОП	5	5	3	2	3	4	5	2
Избран обектив	2	1	2	2	2	4	1	2
Избран окуляр	5	1	5	5	5	2	1	5
Зрително поле	40	43	40	40	40	40	43	40
Диаф. число	1.05	1.2	1.05	1.05	1.05	1.09	1.2	1.05
Фокусировка	25	25	25	25	25	25	25	25
Дисторсия	4.5	7	4.5	4.5	4.5	5	7	4.5
ОИЗ	15	15	15	15	15	15	15	15
Разстояние, m	651	552	413	404	413	414	552	404
Тегло на УНВ	250	229	245	245	245	247	229	245
Цена на УНВ	6430	6390	2530	2030	2530	5990	6390	2030

Известно е, че използването на различните методи за решаване на многокритериалните задачи често води до различни Парето-оптимални решения. Изборът на определен метод зависи от спецификата на решаваните задачи и от начина на задаване на предпочитанията на ЛВР по отношение на търсеното решение.



Фиг. 4.11. Изменение на разстоянието на откриване в зависимост от решаването на съответната скаларизираща задача



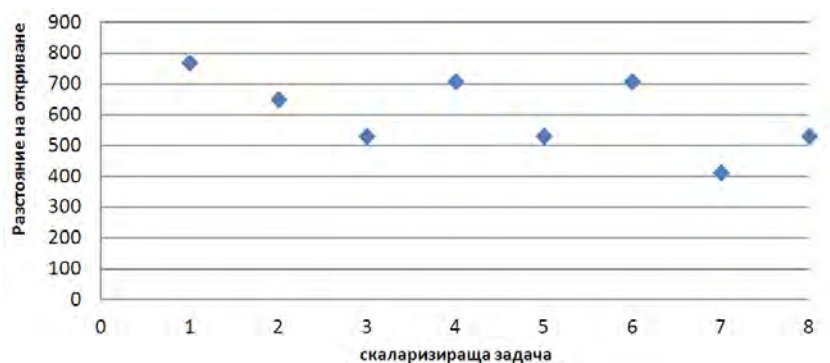
Фиг. 4.12. Изменение на цената на оптико-електронния канал на УНВ в зависимост от решаването на съответната скаларизираща задача

Резултатите от решаването на аналогично формулираните скаларизиращи еднокритериални задачи за стохастичния случай са показани в таблица 4.6.

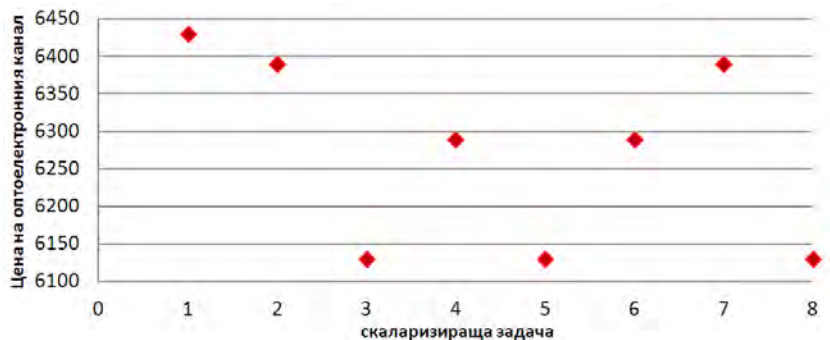
Таблица 4.6. Резултати от стохастичните скаларизиращи задачи, реализиращи метода на ε -ограниченията

	Задачи							
	R (1)	$W_{об}$ (2)	1/k (3)	F (4)	$AD_{об}$ (5)	ОИЗ (6)	T (7)	C (8)
Избран ЕОП	5	5	4	5	4	5	5	4
Избран обектив	2	1	2	4	2	4	1	2
Избран окуляр	5	1	5	2	5	2	1	5
Зрително поле	40	43	40	40	40	40	43	40
Диаф. число	1.05	1.2	1.05	1.09	1.05	1.09	1.2	1.05
Фокусировка	25	25	25	25	25	25	25	25
Дисторсия	4.5	7	4.5	5	4.5	5	7	4.5
ОИЗ	15	15	15	15	15	15	15	15
Разстояние [m]	768	651	530	708	530	708	413	530
Тегло [gr]	250	229	245	250	245	252	229	245
Цена [\$]	6430	6390	6130	6290	6130	6290	6390	6130

На фиг. 4.13 и 4.14 са илюстрирани резултатите от решаването на скаларизиращите задачи, показващи зависимостта на изменението на *разстоянието на откриване* (фиг. 4.13) и *цената на опто-електронния канал* (фиг. 4.14) спрямо получените стойности при решаване на конкретна скаларизираща задача при наблюдаване на човешка фигура в цял ръст и стохастични външни условия на наблюдение.



Фиг. 4.13. Изменение на разстоянието на откриване в зависимост от решаването на съответната скаларизираща задача



Фиг. 4.14. Изменение на цената на опто-електронния канал на УНВ в зависимост от решаването на съответната скаларизираща задача

Глава V

Модели за избор на УНВ

В резултат на развитието на технологиите на пазара се предлагат няколко вида УНВ в различни модификации и с различни параметри. Водеща роля при избора на УНВ са конкретните предпочитания на потребителя, който определя важността на отделните параметри на УНВ. Всяко устройство има специфични стойности за всеки от параметрите на УНВ и тази информация може да се използва, за да се направи интелигентен избор на УНВ. Необходим е гъвкав обективен подход, основаващ се на количествено оценяване на параметрите, за да се направи избор, който да взема предвид важността на отделните параметри на УНВ, определени чрез предпочитанията на потребителя.

5.1. Многокритериален модел за избор на УНВ

Ефективността на работа на УНВ зависи от различни параметри на самото устройство. Например потребителят може да има противоречиви изисквания като – голямо зрително поле и голямо увеличение, а тези два параметъра са обратнопропорционални един на друг. Това определя необходимостта от построяване на математически модел за избор на най-подходящия за даден потребител уред, като се вземат предвид изискванията на този потребител към параметрите на желаното устройство.

5.1.1. Обобщен многокритериален модел за избор на УНВ

Необходимо е формулировката на модела да се фокусира върху параметрите на УНВ и тяхното предназначение от гледна точка на

потребителя. Наличните стойности на параметрите на УНВ, показани в техническите каталози, могат да бъдат използвани като обективна база за сравнение, за да се направи правилният избор. При избора на УНВ потребителят действа като ЛВР и следва да определи предпочитанията си към важността на отделните параметри на УНВ. На практика е малко вероятно да съществува устройство, което да удовлетворява всички изисквания и може да бъде очевидно предпочетено. По-вероятно е да съществуват няколко устройства, част от параметрите на които да съвпадат с предпочитанията на ЛВР. Предпочитаното устройство ще е това, което се доближава най-близо до предпочитанията на ЛВР, които могат да са противоречиви. Намирането на баланс между изисквания и предпочитанията на ЛВР е сложен проблем. Изборът на УНВ, адаптиран към изискванията на ЛВР, е пример за сложен комбинаторен проблем, характеризиращ се с наличието на много и противоречиви предпочитания (критерии) към параметрите на УНВ. Например избор на УНВ, създаден с използване на най-съвременни технологични решения, се отразява в по-висока цена, а в повечето случаи цената е параметър, който следва да се минимизира. В този смисъл многокритериалните модели са подходящ инструмент за вземане на най-добро решение за избор, отчитащ предпочитанията на ЛВР. Тези модели дават възможност да се идентифицират предпочитанията и да се направят компромиси между всички алтернативи на УНВ. Гъвкавото адаптиране към предпочитанията на потребителя чрез многокритериална оптимизационна задача може да се реализира, като параметрите на различните УНВ се разглеждат като целеви функции. Някои от параметрите на УНВ са по-добри, когато имат по-високи стойности, докато други УНВ параметри са по-добри, когато стойностите им са по-малки. Следователно обобщеният многокритериален оптимизационен проблем за избор на УНВ може да се формулира по следния начин (Mustakerov & Borissova 2007):

$$(5.1) \quad \begin{aligned} & \text{maximize } P(x) = (P_1(x), P_2(x), \dots, P_J(x))^T, \\ & \text{minimize } N(x) = (N_1(x), N_2(x), \dots, N_K(x))^T, \end{aligned}$$

при ограничения

$$(5.2) \quad P_j(x) = \sum_{i=1}^I P_{ij} x_i, j = 1, 2, \dots, J,$$

$$(5.3) \quad N_k(x) = \sum_{i=1}^I N_{ik} x_i, k = 1, 2, \dots, K,$$

$$(5.4) \quad \sum_{i=1}^I x_i = 1, x_i \in \{0, 1\}$$

където $P_1(x), P_2(x), \dots, P_J(x)$ представляват J целеви функции (критерии), изразяващи параметрите на УНВ, които се максимизират, т.е. параметрите за чиито стойности се търси по-голяма стойност; $N_1(x), N_2(x), \dots, N_K(x)$ представляват K целеви функции, изразяващи параметрите на УНВ, които се минимизират, т.е. параметрите за чиито стойности се търси по-малка стойност; P_{ij} и N_{ik} изразяват j -ия респективно k -ия параметър на i -тото устройство и са известни; $x = (x_1, x_2, \dots, x_I)$ са двоични целочислени променливи, съответстващи на индексите $i = 1, 2, \dots, I$, присвоени на всяко конкретно устройство, участващо в избора.

Следва да се отбележи, че така описаната формулировка на многокритериалния оптимизационен проблем представлява линеен целочислен комбинаторен проблем за избор. Резултатът от решението ще е избор на един конкретен УНВ от зададено множество устройства, избран на базата на известните стойности за параметрите му. В горната формулировка няма допълнителни ограничения за стойностите на параметрите на УНВ и всяко устройство от множеството на уредите е допустимо. Оптималният Парето-избор ще зависи от предпочитанията на потребителя или ЛВР.

5.1.2. Избор на УНВ чрез многокритериален оптимизационен модел за избор без допълнителни ограничения

Очилата за нощно виждане (ОНВ) са най-широко използваният тип УНВ както за военни, така и за граждански приложения. За да се илюстрира приложимостта на предложения подход, са използвани най-значимите от практическа гледна точка параметри на 15 броя реални очила за нощно виждане, чиито каталожни данни са показани в таблица 5.1. Други параметри могат също да бъдат включени, но представената информация в таблица 5.1 може да се разглежда като достатъчно представителна за практически цели.

Разглеждайки параметрите на ОНВ от таблица 5.1 като критерии за избор на устройство, многокритериалната оптимизационна задача се формулира като: да се избере такова устройство, което има най-голяма разделителна способност, най-голямо зрително поле, най-голяма продължителност на работа и най-голямо разстояние на откриване и най-малко фокусно разстояние, както и най-малки тегло и цена.

Описаните по-горе изисквания са представени математически по следния начин (Borissova и др. 2008):

$$(5.5) \quad \begin{aligned} & \text{maximize } P(x) = (P_1(x), P_2(x), P_3(x), P_4(x),)^T, \\ & \text{minimize } N(x) = (N_1(x), N_2(x), N_3(x), N_4(x))^T, \end{aligned}$$

при ограничения

$$(5.6) \quad P_j(x) = \sum_{i=1}^{15} P_{ij} x_i, j = 1, 2, 3, 4,$$

$$(5.7) \quad N_k(x) = \sum_{i=1}^{15} N_{ik} x_i, k = 1, 2, 3, 4,$$

$$(5.8) \quad \sum_{i=1}^{15} x_i = 1, x_i \in \{0, 1\},$$

където с $P_1(x)$, $P_2(x)$, $P_3(x)$, $P_4(x)$ са означени параметрите – разделителна способност, зрително поле, време за продължителна работа с ел. батерии и разстояние на действие.

Таблица 5.1. Параметри за различни УНВ

№	УНВ	δ	FOV	Продължителна работа, hours	R°	FR	Надлъжен размер mm	Тегло	Цена
		lp/mm	deg		m	cm		gr	\$
		P1	P2	P3	P4	N1	N2	N3	N4
1	ATN Cougar Gen 1	40	30	15 (10-20)	150	100	137	800	629
2	NZT-22 Gen 1	40	36	15	120	25	180	740	1350
3	MV-221G Gen 2+	32	40	40	125	25	114	482	2699
4	ATN Night Cougar-2 Gen 2+	36 (32-40)	30	15 (10-20)	150	100	137	800	2695
5	ПН-9К Gen 2+	34 (30-38)	36	10	180	25	127	750	4943
6	ATN Night Cougar CGT Gen 2+	50 (45-54)	30	15 (10-20)	250	100	137	800	3696
7	ATN Night Cougar HPT Gen 2+	59 (54-64)	30	15 (10-20)	300	100	137	800	4519
8	Dipol 221H Gen 2+	59	40	30	300	25	117	650	6052
9	ATN Night Cougar-3 Gen 3	64	30	15 (10-20)	300	100	137	800	4889
10	ATN Night Cougar-3A Gen 3	68 (64-72)	30	10-20 (15)	325	100	137	800	5629
11	ATN Night Cougar-4 Gen 4	68 (64-72)	30	15 (10-20)	325	100	137	800	9299
12	ATN PS-23 Gen 2+	41 (36-45)	40	35	200	25	151	700	2420
13	ATN PS-23 Gen CGT	50 (45-54)	40	35	200	25	151	700	3995
14	ATN PS-23 Gen 3	64	40	35	300	25	151	700	5685
15	ATN PS-23 Gen 4	72	40	35	350	25	151	700	11149

За параметрите се търсят възможно най-големи стойности ($P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, P_{i4}$). С $N_1(x), N_2(x), N_3(x), N_4(x)$ са означени минималното фокусно разстояние на обектива, надлъжният размер на

устройството, теглото и цената, за които се търсят възможно най-малки стойности ($N_{i1}, N_{i2}, N_{i3}, N_{i4}$). С вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_{15})$ са означени двоичните целочислени променливи, присвоени на всяко от 15-те устройства от таблица 5.1.

Най-широко използваният подход за решаване проблемите на многокритериалната оптимизация е чрез трансформиране множеството критерии в една целева функция. Един от най-разпространените е *методът на претеглената сума*, чрез който се задават теглови коефициенти, изразяващи важността на всеки критерий (Marler & Arora 2010). Методът на претеглената сума превръща многокритериалната задача в обобщена скаларна целева функция. Чрез обобщаването на разнородната информация относно различните параметри на УНВ в една обобщена функция на полезност се цели да се използва добре развитата теория на еднокритериалната оптимизация, която да осигури рационална основа за класифициране и респективно за избор на конкретно устройство.

Параметрите на УНВ съгласно формулираната оптимизационна задача (5.5) – (5.8) са доста различни по своя характер и стойности и не могат да бъдат обобщени като сравними критерии. Поради това е необходимо нормализиране за критериите, така че различните мерни единици да бъдат сравними и определените теглови коефициенти правилно да отразяват относителната им важност (Marler & Arora 2005).

Използвана е следната схема за нормализиране на критериите:

$$(5.9) \quad P_j^* = \frac{P_j - P_{j\min}}{P_{j\max} - P_{j\min}} \text{ за максимизиращите критерии}$$

$$(5.10) \quad N_k^* = \frac{N_{k\max} - N_k}{N_{k\max} - N_{k\min}} \text{ за минимизиращите критерии}$$

Използвайки максималните и минималните стойности за съответните критерии, тази нормализираща схема осигурява

получаването на стойности на критериите в интервала между 0 и 1 (Marler & Arora 2004).

Изчислените максимални и минимални стойности за всички критерии от многокритериалната задача са показани в таблица 5.2.

Таблица 5.2. Максимални и минимални стойности за критериите

Критерий Стойност	P_1	P_2	P_3	P_4	N_1	N_2	N_3	N_4
max	72	40	40	350	100	180	800	11149
min	32	30	10	120	25	114	482	629
$(max-min)$	40	10	30	230	75	66	318	10520

Нормализирането не само осигурява сравними стойности на критериите, но също така трансформира оптимизационния проблем в проблем, за който се търси максимум (Marler & Arora 2004). Методът на претеглената сума изисква умножаване на всеки от нормализираните критерии със съответен теглови коефициент и сумиране в единствена целева функция. Следователно изследваният многокритериален проблем за избор на ОНВ се трансформира по следния начин:

$$(5.11) \quad \max (w_1P_1^*(x) + w_2P_2^*(x) + w_3P_3^*(x) + w_4P_4^*(x) + w_5N_1^*(x) + w_6N_2^*(x) + w_7N_3^*(x) + w_8N_4^*(x))$$

при ограничения

$$(5.12) \quad P_j^*(x) = \sum_{i=1}^{15} P_{ji}^* x_i, \quad j = 1, 2, 3, 4$$

$$(5.13) \quad N_k^*(x) = \sum_{i=1}^{15} N_{ki}^* x_i, \quad k = 1, 2, 3, 4$$

$$(5.14) \quad \sum_{i=1}^{15} x_i = 1, \quad x_i \in \{0, 1\}$$

$$(5.15) \quad \sum_{i=1} w_i = 1, \quad 0 \leq w_i \leq 1$$

където $w_i = (1, 2, \dots, 8)$ са неотрицателни числа в интервала $(0, 1)$, изразяващи тегловете коефициенти, присвоени към всеки критерий. Изисква се удовлетворяване на условието $\sum_{i=1}^8 w_i = 1$.

Решението на трансформирания многокритериален проблем определя единствено Парето-оптимално решение. Чрез промяна на тегловете коефициенти се променят предпочитанията на ЛВР, което може да доведе до друго Парето-оптимално решение. По този начин различни ЛВР могат да бъдат удовлетворени при избора на ОНВ. Например нека съществуват следните предпочитания за избор на конкретно устройство за различни потребители:

- Потребител 1 определя всички параметри на ОНВ като еднакво важни.
- Потребител 2 поставя по-голяма тежест върху цената и теглото в сравнение с другите параметри.
- Потребител 3 се концентрира върху разстоянието на действие, след това върху разделителната способност и след това върху цената и другите параметри.
- Потребител 4 се интересува от разделителната способност, разстоянието на действие, теглото и цената и не се интересува от другите параметри на ОНВ.

Тези предпочитания на различните потребители са обобщени в таблица 5.3.

Таблица 5.3. Теглови коефициенти за критериите на различни ЛВР

	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8
(1)	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
(2)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20
(3)	0.20	0.10	0.10	0.30	0.05	0.10	0.10	0.05
(4)	0.25	0.0	0.0	0.25	0.0	0.0	0.25	0.25

Горната информация може да се използва за формулиране на два типа оптимизационни задачи: задачи без зададени допълнителни ограничения и задачи със зададени допълнителни ограничения за избор. Задачите без допълнителни ограничения разчитат на определените теглови коефициенти, докато задачите с допълнителни ограничения задават в явен вид долни или горни граници за някои от критериите за избор.

На база на формулирания оптимизационен проблем (5.5) – (5.8) и зададените комбинации от тегловни коефициенти в таблица 5.3 се формулират оптимизационни задачи, съответстващи на различните потребителски изисквания, означени като Задача 1, Задача 2, Задача 3 и Задача 4. Общата формулировка на тези задачи има следния вид:

$$(5.16) \quad \max (w_1 \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{P_{i1}-32}{40}\right)x_i + w_2 \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{P_{i2}-30}{10}\right)x_i + w_3 \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{P_{i3}-10}{30}\right)x_i + \\ + w_4 \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{P_{i4}-120}{230}\right)x_i + w_5 \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{100-N_{i1}}{75}\right)x_i + w_6 \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{180-N_{i2}}{66}\right)x_i \\ + w_7 \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{800-N_{i3}}{318}\right)x_i + w_8 \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{11149-N_{i4}}{10520}\right)x_i)$$

при ограничения

$$(5.17) \quad \sum_{i=1}^{15} x_i = 1, \quad x_i \in \{0, 1\}$$

$$(5.18) \quad \sum_{i=1} w_i = 1, \quad 0 \leq w_i \leq 1$$

където $P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, P_{i4}$, са параметрите – разделителна способност, зрително поле, продължителна работа с ел. батерии и разстоянието на действие за i -тото устройство; $N_{i1}, N_{i2}, N_{i3}, N_{i4}$, са параметрите – минимално фокусно разстояние на обектива, надлъжен размер, тегло и цена на i -тото устройство, а $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7$ и w_8 са съответните теглови коефициенти.

Така формулираната еднокритериална оптимизационна задача може да бъде решена с помощта на различни съществуващи софтуерни системи за линейно и нелинейно програмиране. Получени Парето-оптимални избори за ОНВ като резултат от решаването на съответните оптимизационни задачи са показани в таблица 5.4.

Таблица 5.4. Парето-оптимални избори за ОНВ

Задача	δ lp/mm	FOWd eg	Продължителна работа, hours	R ^o m	FR cm	Надлъжен размер mm	Тегло gr	Цена \$	Избрано устрой-ство от табл. 5.1
Задача 1	59	40	30	300	25	117	650	6052	№ 8
Задача 2	32	40	40	125	25	114	482	2699	№ 3
Задача 3	72	40	35	350	25	151	700	11149	№ 15
Задача 4	64	40	35	300	25	151	700	5685	№ 14

Избраните устройства отразяват различните предпочитания на ЛВР по отношение важността на различните параметри, зададени чрез тегловите коефициенти от потребителя. Както се вижда, четири различни избора са определени в резултат на решаваните оптимизационни задачи. Ако даден потребител не е удовлетворен от резултата, той може да промени зададените от него теглови коефициенти и отново да реши съответната задача.

Поради факта, че изборът се прави от крайно множество от устройства, могат да се използват различни комбинации от стойности на тегловите коефициенти, удовлетворящи (5.18). По такъв начин различни потребителски изисквания могат да бъдат взети предвид за определяне на Парето-оптимален избор.

5.1.3. Избор на УНВ чрез многокритериален оптимизационен модел за избор с допълнителни ограничения

За да се определи по-прецизно най-подходящото за потребителя устройство, може да се формулира задача за избор с допълнителни ограничения. Проблемът за оптимален избор на ОНВ (5.5) – (5.8) може да бъде разширен чрез въвеждане на допълнителни ограничения за някои от параметрите. Например цената да не е по-голяма от определена горна граница $Price_{max}$ и/или разстоянието на откриване да е по-голямо от определена долна граница $Range_{min}$ и/или разделителната способност да е по-голяма от определена горна граница $Resolution_{min}$. Комбинирането на подобни ограничения водят до формулирането на различни оптимизационни задачи, както следва (Borissova и др. 2008):

Задача 1е. Тази задача е аналогична на задача 1 с допълнителни ограничения за долна граница за разделителната способност и горна граница за цената:

$$(5.19) \quad \sum_{i=1}^{15} P_{i1}x_i \geq Resolution_{min} = 50$$

$$(5.20) \quad \sum_{i=1}^{15} N_{i4}x_i \leq Price_{max} = 5500$$

Задача 2е. Тази задача е аналогична на задача 2, но с добавено едно ограничения за горната граница за цената:

$$(5.21) \quad \sum_{i=1}^{15} N_{i4}x_i \leq Price_{max} = 2500$$

Задача 3е. Тази задача е аналогична на задача 3, но с добавени три ограничения относно разделителната способност, разстоянието на действие и цената:

$$(5.22) \quad \sum_{i=1}^{15} P_{i1}x_i \geq Resolution_{min} = 50$$

$$(5.23) \quad \sum_{i=1}^{15} P_{i4}x_i \geq Range_{min} = 220$$

$$(5.24) \quad \sum_{i=1}^{15} N_{i4}x_i \leq Price_{max} = 4000$$

Задача 4е. Тази задача е аналогична на задача 4, но с добавени две ограничения за разстоянието на действие и цената:

$$(5.25) \quad \sum_{i=1}^{15} P_{i4}x_i \geq Range_{min} = 200$$

$$(5.26) \quad \sum_{i=1}^{15} N_{i4}x_i \leq Price_{max} = 5000$$

Решенията на така формулираните разширени оптимизационни задачи с ограничения, определят избори на уреди, както е показано в таблица 5.5.

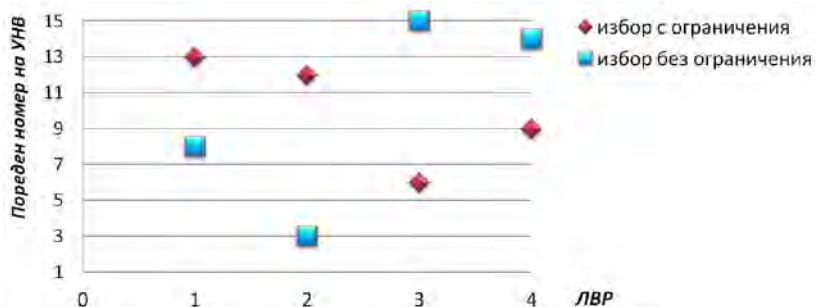
Таблица 5.5 Парето-оптимален избор на ОНВ с допълнителни ограничения

Задача	δ lp/mm	FOW deg	Продължителна работа, hours	R ^o m	FR cm	Надлъжен размер mm	Тегло gr	Цена \$	Избрано устройство от табл. 5.1
Задача 1е	50	40	35	200	25	151	700	3995	No 13
Задача 2е	41	40	35	200	25	151	700	2420	No 12
Задача 3е	50	30	15	250	100	137	800	3696	No 6
Задача 4е	64	30	15	300	100	137	800	4889	No 9

Формулираните задачи за избор на ОНВ с допълнителни ограничения за някои параметри позволяват много по-точно да се вземат предвид предпочитанията на различните потребители. Това се потвърждава и от получените решения от формулираните задачи с допълнителни ограничения (Задачи 1е, 2е, 3е и 4е). Разликите

между избраните устройства, показани в таблица 5.4 и 5.5, показват как добавянето на различни потребителски ограничения върху параметрите влияят на крайния избор на устройство.

На фиг. 5.1 е илюстрирано сравнението между избора без ограничения и избора с ограничения.



Фиг. 5.1. Сравнение между избора без ограничения и избора с ограничения

Възможно е при добавяне на допълнителните ограничения към параметрите на ОНВ да се достигне да несъвместима комбинация от ограничения, т.е. оптимизационната задача да няма решение. В този случай се налага ограниченията да бъдат променени, като се вземе предвид пост-оптимизационният анализ на използваната система.

5.2. Многокритериален модел за избор на УНВ с отчитане на външните условия на наблюдение

Технологичното развитие и наличието на множество проектни и технически решения определят голяма разнообразие на УНВ, с различни работни параметри. Проблемът за оценка и избор на уред, който е най-подходящ за дадени условия и за конкретен потребител може да се разглежда като нетривиален процес на вземане на решение. Поради комбинаторния характер на този избор,

включващ отчитане на множество параметри и условия на наблюдение, е обосновано той да се базира на математически количествен анализ. Необходимо е да се вземат предвид предпочитанията на потребителите за важността на отделните параметри на уреда, както и условията при които уредът ще бъде използван. Както е известно, каталожните данни на уредите са валидни за определени (лабораторни) условия на наблюдение. От друга страна реалните външни условия за наблюдение – естествена нощна осветеност, пропускане на атмосферата, контраст между фона и наблюдавания обект, и тип на самия наблюдаван обект, пряко влияят на работата на УНВ. В такива условия параметрите на уредите могат да се отличават съществено спрямо техните каталожни стойности.

Така например разстоянието на действие на УНВ силно зависи от нивото на осветеност (Borissova и др. 2006). УНВ се нуждаят от някаква осветеност, за да работят и осигуряват по-малък работен обхват при условия на много ниска осветеност. Развитието на технологията за усилване на светлината, на която са базирани УНВ, има значителни подобрения по отношение нивото на необходимата осветеност, необходими за работата на електронно-оптичните преобразуватели. Масово използваните пасивни УНВ използват естествената нощна осветеност от луната и звездите с типични стойности като 0.1 lx при пълнолуние, 0.05 lx при наличие на половин луна, 0.01 lx при четвърт луна, 0.001 lx при наличие на осветление само от звезди и 0.0001 lx при облачно небе.

Заедно с това атмосферните условия пряко влияят на атмосферната пропускливост, която от своя страна влияе на работния обхват на УНВ. По пътя на своето разпространение светлината се абсорбира, разпръсква или пречупва в зависимост от въздушната среда, което може да намали интензитета на светлината, достигаща до УНВ. Пропускането на атмосферата

варира в тесен интервал от 0.69 до 0.804 (Indiso 1970, Ohkawara 2012).

Контрастът между фона и наблюдавания обект също влияе в голяма степен на разстоянието на действие на УНВ. Контрастът се определя като разликата в яркостта между обекта и фона, като обект с 5 % контраст се определя като „нисък контраст“, при който е трудно да се провежда наблюдение, докато обект с 90 % контраст допринася за по-лесното нощно наблюдение. Диапазонът на изменение на контраста се променя в интервала от 0.05 до 0.50.

Площта на наблюдавания обект можа да се смята за известна, когато обект на наблюдението е конкретна цел. Колкото по-голям е обектът, т.е. с по-голяма площ, толкова по-лесно е той да бъде видян. За стандартни обекти като например обект от тип човешка фигура площта на наблюдавания обект може да се изчисли, разглеждайки типични стойности за човешката фигура. Дори и при стандартни наблюдавани обекти размерите са различни и следователно тяхната наблюдавана площ не може да се разглежда като константа. Различните разновидности на разстоянието на действие (откриване, разпознаване и идентификация) се увеличават с увеличаване стойността на този параметър (Borissova и др. 2006).

Като се вземат предвид горните съображения, възниква въпросът как да бъде направен обоснован избор на най-подходящия уред за определен потребител, при отчитане на различни условия на наблюдение. Най-общо казано, оценката на ефективността и оптималния избор на инженерна система се базира на множество функционални характеристики. Тази сложност може да бъде преодоляна чрез използване на многокритериалните методи за вземане на решения.

За целта се формулира математически модел, в който разстоянието на действие на УНВ се разглежда като функция на параметрите на избраното устройство и едновременно с това се отчитат стойностите на предполагаемите външни условия на наблюдение (Borissova 2008):

$$(5.27) \quad \begin{aligned} & \text{maximize } P(x) = (P_1(x), P_2(x), \dots, P_J(x))^T, \\ & \text{minimize } N(x) = (N_1(x), N_2(x), \dots, N_K(x))^T, \end{aligned}$$

при ограничения

$$(5.28) \quad R(x) = \sum_{i=1}^I x_i \sqrt{0.07 E \tau_a K A_i^* \frac{D_{in}^i f_{ob}^i \tau_{ob}^i \delta^i S^i}{\Phi_{min}^i M^i}}$$

$$(5.29) \quad P_j(x) = \sum_{i=1}^I P_{ij} x_i, j = 1, 2, \dots, J,$$

$$(5.30) \quad N_k(x) = \sum_{i=1}^I N_{ik} x_i, k = 1, 2, \dots, K,$$

$$(5.31) \quad \sum_{i=1}^I x_i = 1, x_i \in \{0, 1\}$$

където $R(x)$ е разстоянието на действие, E – естествена нощна осветеност в lx, τ_a – пропускане на атмосферата, K – контраст между наблюдавания обект и фона, A_i^* – редуцирана площ на наблюдавания обект в m^2 , D_{in} – диаметър на входната заница в m, f_{ob} – фокусно разстояние на обектива в mm, τ_{ob} – пропускане на обектива, S – интегрална чувствителност на ЕОП в A/lm, δ – разделителна способност на ЕОП в lp/mm, Φ_{min} – фотокатодна прагова чувствителност в lm, M – отношение сигнал-шум; $P_1(x), \dots, P_J(x)$ са параметрите на УНВ, които се максимизират; $N_1(x), N_2(x), \dots, N_K(x)$ са параметрите на УНВ, които се минимизират; P_{ij} и N_{ik} са стойности на параметрите на всяко едно устройство; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_I)$ е вектор от двоични целочислени променливи, присвоени към всяко устройство, участващо в избора.

В този модел могат да се добавят и други изисквания към параметрите на избраното устройство, както и други допълнителни критерии или параметри, за да се отразят по-точно специфичните изисквания на отделните потребители.

Така описаният многокритериален подход за избор на УНВ, с отчитане на външните условия на наблюдение, е тестван на базата на реални данни, показани в долните таблици. В таблица 5.6 са показани два варианта на външните условия на наблюдение за един и същи наблюдаван обект – човешка фигура в цял ръст, а в таблица 5.7 са показани параметрите на десет различни на УНВ, от които да се направи изборът.

Таблица 5.6. Външни условия на наблюдение

Външни условия на наблюдение	Естествена осветеност, lx	Пропускане на атмосферата	Контраст	Редуцирана площ на наблюдавания обект, в m ²
(1)	0.01 (¼ луна)	0.75	0.20	0.758
(2)	0.001 (звездно небе)	0.80	0.30	

Таблица 5.7. Параметри на УНВ

No	УНВ	Разделителна способност, lp/mm	Обектив	Фокусно разстояние на обектива, mm	Пропускане на обектива	Сигнал шум	Интегрална чувствителност, A/lm	Зрително поле, deg	Тегло, gr	Цена \$
1	Night Optics D-2MV	40	1:1.2	26	0.78	12	0.00024	40	482	650
2	Rigel 3250	30	1	35	0.78	12	0.00022	30	430	699
3	ATN Cougar-2	32-40	1:1.4	35	0.78	16	0.00031	30	800	3071
4	ATN Cougar CGTI	40-51	1:1.4	35	0.78	15	0.00035	30	800	3696
5	ATN Night Cougar-3	64	1:1.4	35	0.78	20	0.00087	30	800	4884
6	ATN Night Cougar-4	68	1:1.4	35	0.8	25	0.00115	30	800	9932
7	ATN PS-23-2	36-45	1:1.2	24	0.8	13	0.0007	40	700	3550
8	ATN PS-23-CGT	45-54	1:1.2	24	0.8	17	0.0011	40	700	4195
9	ATN PS-23-3	55-72	1:1.2	24	0.8	22	0.0016	40	700	5895
10	ATN PS-23-4	64-72	1:1.2	24	0.8	24	0.0019	40	700	12995

Описаният многокритериален модел (5.27) – (5.31) и данните от табл. 5.6 и 5.7 са използвани за формулиране на съответни многокритериални оптимизационни задачи. Както е в този случай, повечето многокритериални проблеми за вземане на решения разглеждат множество целеви функции, които не могат да бъдат оптимизирани едновременно поради несъизмеримостта и противоречивостта между тях. Осъществяването на компромиси между различните цели на избора се превръща в основен проблем за получаване на най-доброто компромисно решение. Разработени са различни подходи за решаване на многокритериални проблеми за вземане на решения. Няма по-добри или по-лоши техники, но някои от тях по-добре описват конкретни проблеми за вземане на решения (Mergias и др. 2007). Предимството на тези методи е, че те могат да вземат предвид различни представяния на предпочитанията на ЛВР. Най-популярните многокритериални методи за вземане на решения включват такива модели като *scoring models*, *AHP*, *ANP*, *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *utility models*, *TOPSIS* и *axiomatic design*. Тук като метод за решаване на многокритериалните задачи е избран *методът на претеглената сума* с използваните теглови коефициенти, изразяващи предпочитанията на ЛВР по отношение на параметрите на УНВ, показани в таблица 5.8. Методът на претеглената сума е избран поради широкото му разпространение и лесно възприемане от инженери и технически специалисти.

Таблица 5.8. Теглови коефициенти за предпочитанията на УНВ

Предпочитания на ЛВР	Разстояние на действие, w_1	Зрително поле, w_2	Цена w_3	Тегло w_4
(a)	0.50	0.10	0.30	0.10
(b)	0.25	0.20	0.50	0.05

Комбинацията от теглови коефициенти (a) изразява важността на критериите, подредени в следната последователност:

разстояние на действие; цена; зрително поле и тегло. Втората комбинация от теглови коефициенти (b) определя друга подредба по важност на параметрите на УНВ: цена, разстояние на действие, зрително поле и тегло. Конкретните предпочитания на различните потребители към важността на параметрите на УНВ, разглеждани като критерии, могат да бъдат взети предвид чрез други съответни стойности на тегловите коефициенти.

Формулираният многокритериален модел (5.27) – (5.31) се трансформира чрез метода на претеглената сума в следната задача (Borissova 2008):

$$(5.32) \quad \max (w_1 R^*(x) + w_2 FOV^*(x) + w_3 C^*(x) + w_4 W^*(x))$$

при ограничения

$$(5.33) \quad R^*(x) = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i \sqrt{0.07 E \tau_a K A_i^* \frac{D_{in}^i f_{ob}^i \tau_{ob}^i \delta^i S^i}{\Phi_{min}^i M^i}} - R_{min}}{R_{max} - R_{min}}$$

$$(5.34) \quad FOV^*(x) = \frac{\sum_{i=1}^{10} FOV_i x_i - FOV_{min}}{FOV_{max} - FOV_{min}}$$

$$(5.35) \quad C^*(x) = \frac{C_{max} - \sum_{i=1}^{10} C_i x_i}{C_{max} - C_{min}}$$

$$(5.36) \quad W^*(x) = \frac{W_{max} - \sum_{i=1}^{10} W_i x_i}{W_{max} - W_{min}}$$

$$(5.37) \quad \sum_{i=1}^{10} x_i = 1, \quad x_i \in \{0, 1\}$$

$$(5.38) \quad \sum_{i=1} w_i = 1, \quad 0 \leq w_i \leq 1,$$

където w_i са тегловите коефициенти за всеки критерий, $R^*(x)$, $FOV^*(x)$, $C^*(x)$ и $W^*(x)$ са нормализираните критерии.

Получени резултати след решението на тази задача са показани в таблица 5.9.

Таблица 5.9. Резултати от решението на оптимизационната задача

Външни условия на наблюдение	Теглови коефициенти	Разстояние, m	Зрително поле, degree	Цена, \$	Тегло, gr	Избран УНВ от табл. 4.12
(1)	(a)	748	40	5895	700	№ 9
	(b)	335	40	650	482	№ 1
(2)	(a)	187	40	5895	700	№ 9
	(b)	84	40	650	482	№ 1

В дадения случай различните комбинации от външни условия на наблюдение не влияят върху избора на устройство, но определят различни разстояния на действие. Ако потребителят не е удовлетворен от изчислената теоретична оценка на разстоянието на действие, може да въведе долна граница за разстоянието на действие и задачата да бъде решена отново.

Например при избрана долна граница, равна на 500 m, ще се добави ограничение от вида:

$$(5.39) \quad R(x) \geq 500$$

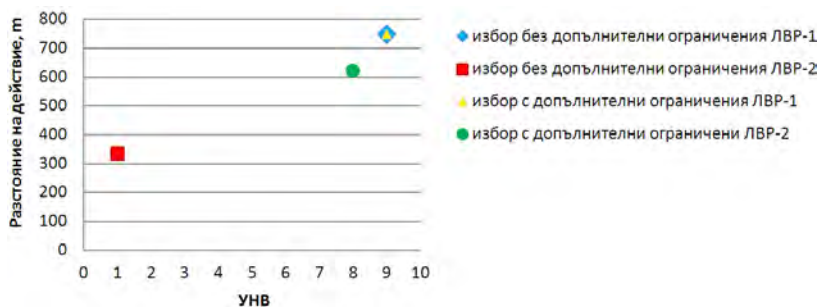
Резултатите от решението на задачата с така въведеното ограничение за долна граница на разстоянието на действие са показани в таблица 5.10.

Таблица 5.10. Резултати с добавено ограничение за разстоянието на действие

Външни условия на наблюдение	Теглови коефициенти	$R \geq 500$, m	Зрително поле, degree	Цена, \$	Тегло, gr	Избран УНВ от табл. 5.6
(1)	(a)	748	40	5895	700	№ 9
	(b)	623	40	4195	700	№ 8

Използваните теглови коефициенти (а) при съответната комбинация от външните условия на наблюдение (1) удовлетворяват ограничение (5.39) и решението е избор на устройство № 9. Използването на други теглови коефициенти, отразяващи различни предпочитания на ЛВР при същата комбинация от външните условия на наблюдение (1) и допълнителното ограничение (5.39), вече водят до различен избор на устройство (№ 8), удовлетворяващ зададените от ЛВР предпочитания посредством тегловите коефициенти (b).

Сравнението на избраните устройства от табл. 5.7 при използване на комбинацията (1) от външните условия на наблюдение за ЛВР-1 и ЛВР-2 са показани на фиг. 5.2.



Фиг. 5.2. Сравнение между избора без допълнителни ограничения и избора с допълнителни ограничения

Фиг. 5.2 показва как различните състояния на външните условия на наблюдение заедно с предпочитанията на ЛВР може да повлияе на избора на конкретното устройство. Например сравнявайки избраното устройство в случая на ЛВР-2 и без допълнителни ограничения решаването на съответната задача води до избор на устройство № 1, докато при модифициране на задачата с допълнителното ограничение за разстоянието на действие, по-голямо от 500 m при същите външни условия, води до избор на устройство № 8.

От формална гледна точка, всяко Парето-оптимално решение е еднакво приемливо, тъй като е решение на многокритериалната оптимизационна задача. На практика само едно решение се избира като крайно решение и това се извършва от ЛВР.

Поради естеството на задачата за дискретен комбинаторен избор на УНВ е възможно да има ситуация, при която да не е възможно удовлетворяването на някои ограничения. В тези случаи се налага да бъдат модифицирани съответните ограничения с такива стойности, които да позволяват да се получи решение на формулираните оптимизационни задачи. Подобни модификации могат да бъдат подпомогнати чрез използване на следоптимизационен анализ, предоставян от повечето софтуерни пакети за оптимизация. Накрая може да се отбележи, изчислителната трудност на подобни задачи позволява получаване на решения за времена от порядъка на секунди.

5.3. Оптимизационен модел за избор на k -най-добри УНВ

Често пъти в практиката се налага да се извърши обоснован избор на повече от един уред. Тук се предлага подход за определяне на k -най-добри устройства чрез решаване на една многокритериална оптимизационна задача. Идеята за k -най-добри устройства е да се редуцира броят на съществуващите УНВ до k такива, като се вземат предвид потребителските изисквания относно важността на параметрите (т.е. на критериите на многокритериалната задача) на УНВ. Предимство на така предложения оптимизационен модел е, че позволява да се определят k -добри решения (уреди) вместо определяне на едно Парето-оптимално решение (единствен уред).

При избора на УНВ потребителят действа като ЛВР и следва да разглежда всички аспекти на съществуващите алтернативи за избор на устройства. Предпочитаните устройства трябва най-добре да отразяват всички предпочитания на ЛВР. За да се илюстрира изборът на k -най-добри УНВ, се разглеждат следните важни за

практиката параметри на УНВ:

- *разстояние на действие* на УНВ, което от своя страна зависи от естествената нощна осветеност, пропускането на атмосферата, контраста между наблюдавания обект и фона, площта на наблюдавания обект, диаметъра на входната зеница на обектива, фокусното разстояние на обектива, пропускането на обектива, чувствителността на ЕОП, разделителната способност на ЕОП, праговата чувствителност на ЕОП и съотношението сигнал – шум;
- *зрително поле* – параметър, определящ размера на визуалната информация, предоставена чрез устройството. Колкото по-голямо е зрителното поле, толкова повече информация може да бъде получена;
- *диапазон на фокусировка на обектива* – определя минималното фокусно разстояние за фокусиране на близки обекти;
- *живот на батерията* – определя времето на работоспособност на уреда, в съответствие с капацитета на използваните батерии и необходимия ток на използвания ЕОП;
- *тегло* – теглото е важен параметър, който трябва да бъде сведен до минимум за преносими устройства, каквито са УНВ.
- *цена* – параметър, който зависи от използваните модули, и който е винаги важен при осъществяването на избор.

На базата на тези параметри на УНВ и техните зависимости е разработен могокритериален математически модел за определяне на k -най-добри алтернативи, отговарящи на предпочитанията на потребителя за параметрите на УНВ (Borissova и др. 2013):

$$(5.40) \quad \begin{aligned} & \text{maximize } \{R, FOV, BL\} \\ & \text{minimize } \{FR, Weight, Price\} \end{aligned}$$

при ограничения

$$(5.41) \quad R = \sum_{i=1}^n x_i \sqrt{0.07 E \tau_a K A_t^* \frac{D_{in}^i f_{ob}^i \tau_{ob}^i \delta^i S^i}{\Phi_{min}^i M^i}}$$

$$(5.42) \quad FOV = \sum_{i=1}^n FOV_i x_i$$

$$(5.43) \quad BL = \sum_{i=1}^n BL_i x_i$$

$$(5.44) \quad FR = \sum_{i=1}^n FR_i x_i$$

$$(5.45) \quad \text{Weight} = \sum_{i=1}^n \text{Weight}_i x_i$$

$$(5.46) \quad \text{Price} = \sum_{i=1}^n \text{Price}_i x_i$$

$$(5.47) \quad \sum_{i=1}^n x_i = k, \quad x_i \in \{0, 1\}$$

$$(5.48) \quad 1 < k < n$$

където: R – разстояние на действие в m, E – естествена нощна осветеност в lx, τ_a – пропускане на атмосферата, K – контраст, A_t^* – редуцирана площ на наблюдавания обект в m^2 , D_{in} – диаметър на входната зеница на обектива в m, f_{ob} – фокусно разстояние на обектива в mm, τ_{ob} – пропускане на обектива, S – интегрална чувствителност на ЕОП в A/lm, δ – разделителна способност на ЕОП в lp/mm, Φ_{min} – прагова чувствителност на ЕОП в lm, M – отношение сигнал – шум; FOV – зрително поле, FR – минимално фокусно разстояние на обектива в mm, BL – живот на батериите (времето на работоспособност на уреда), тегло и цена на УНВ. Към всяко от устройствата са асоциирани двоични целочислени променливи x_i , k е целочислена променлива, определяща до колко броя да се редуцират алтернативите, а n е броят на устройствата, от които се реализира изборът.

Към всяка алтернатива (уред) се присвоява съответна двоична целочислена променлива x_i . Уравнението (5.47) е обобщение на класическия комбинаторен проблем за намиране на едно-единствено решение при специалния случай на $k = 1$. Неравенството (5.48) се използва за определяне на броя на най-добрите решения, които могат да бъдат 2, 3 или най-много ($n - 1$).

Като входни данни за така формулираната оптимизационна задача (5.40) – (5.48) са използвани параметрите на 10 реални уреда (очила за нощно виждане), които са показани в таблица 5.11.

Таблица 5.11. Параметри на УНВ

#	УНВ	δ , lp/m m	f_{ob} mm	D_{in} , mm	τ_{ob}	M	S, A/lm	FOV degree	BL hours	FR cm	Тегло, gr	Цена \$
1	Night Optics D-2MV	40	26	21	0.78	12	0.00024	40	40	25	482	650
2	Rigel 3250	30	35	35	0.78	12	0.00022	30	30	25	430	699
3	ATN Cougar 2	32-40	35	25	0.78	16	0.00031	30	10-20	100	500	3071
4	ATN Cougar CGTI	45-54	35	25	0.78	15	0.00035	30	10-20	100	500	3696
5	ATN Night Cougar-3	64	35	25	0.78	20	0.00087	30	10-20	100	500	4884
6	ATN Night Cougar-4	64-72	35	25	0.80	25	0.00115	30	10-20	100	500	9932
7	ATN PS23-2	36-45	24	20	0.80	13	0.00070	40	60	25	700	3550
8	ATN PS23- CGT	45-54	24	20	0.80	17	0.00110	40	60	25	700	4195
9	ATN PS23-3	55-72	24	20	0.80	22	0.00160	40	35	25	700	5895
10	ATN PS23-4	64-72	24	20	0.80	24	0.00190	40	35	25	700	12995

За решаването на тази задача (5.40) – (5.48) е използвана нормализиращата схема (5.9) и (5.10), съответно за максимизиращите и за минимизиращите критерии. Тази

нормализация трансформира данните, така че да имат сравними стойности в интервала $[0, 1]$ и също така трансформира оптимизационния проблем като проблем, за който се търси максимизиране на целевата функция.

И в този случай може да се използва методът на претеглената сума, чрез който многокритериалният проблем се трансформира в еднокритериален. Целевата функция на тази еднокритериална задача се получава, като се сумират всички критерии, умножени със съответни теглови коефициенти, които отразяват относителната важност между критериите (предпочитанията на ЛВР). Така трансформираната оптимизационна задача, определяща k -най-добри устройства, има вида:

$$(5.49) \quad \max \left\{ \begin{aligned} &\omega_1 \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} x_1 + \omega_2 \frac{FOV - FOV_{\min}}{FOV_{\max} - FOV_{\min}} x_2 + \omega_3 \frac{BL - BL_{\min}}{BL_{\max} - BL_{\min}} x_3 + \\ &+ \omega_4 \frac{FR_{\max} - FR}{FR_{\max} - FR_{\min}} x_4 + \omega_5 \frac{Weight_{\max} - Weight}{Weight_{\max} - Weight_{\min}} x_5 + \\ &+ \omega_6 \frac{Price_{\max} - Price}{Price_{\max} - Price_{\min}} x_6 \end{aligned} \right\}$$

$$(5.50) \quad R = \sum_{i=1}^{10} x_i \sqrt{0.07 E \tau_a C A_i^* \frac{D_{in}^i f_{ob}^i \tau_{ob}^i \delta^i S^i}{\Phi_{\min}^i M^i}}$$

$$(5.51) \quad FOV = \sum_{i=1}^{10} FOV_i x_i$$

$$(5.52) \quad BL = \sum_{i=1}^{10} BL_i x_i$$

$$(5.53) \quad FR = \sum_{i=1}^{10} FR_i x_i$$

$$(5.54) \quad Weight = \sum_{i=1}^{10} Weight_i x_i$$

$$(5.55) \quad \text{Price} = \sum_{i=1}^{10} \text{Price}_i x_i$$

$$(5.56) \quad \sum_{i=1}^{10} x_i = k, \quad x_i \in \{0, 1\}$$

$$(5.57) \quad 1 < k < 10$$

$$(5.58) \quad \sum_{i=1}^6 w_i = 1, \quad 0 \leq w_i \leq 1$$

където w_i са тегловите коефициенти за всеки от нормализираните критерии.

Четири различни комбинации от теглови коефициенти, изразяващи различни предпочитания на ЛВР по отношение относителната важност между критериите, са показани в таблица 5.12.

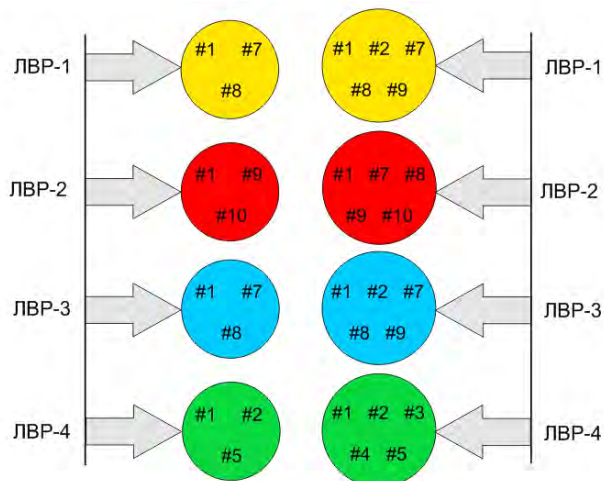
Таблица 5.12. Предпочитания на ЛВР

Предпочитания на ЛВР	Теглови коефициенти					
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
ЛВР-1	0.17	0.17	0.16	0.16	0.17	0.17
ЛВР-2	0.30	0.03	0.04	0.03	0.30	0.30
ЛВР-3	0.20	0.20	0.10	0.10	0.20	0.20
ЛВР-4	0.30	0.00	0.00	0.10	0.30	0.30

Първата комбинация от теглови коефициенти (ЛВР-1) изразява еднаква важност на всички критерии (разстояние на действие, зрително поле, продължителност на работа с батерии, фокусно разстояние, цена и тегло). Другите комбинации на коефициентите отразяват различни предпочитания на ЛВР по отношение важността на отделните параметри, разглеждани като критерии в оптимизационната задача.

Решенията на задачата (5.49) – (5.58) при различни

предпочитания на ЛВР (таблица 5.12) за 3 най-добри устройства и за 5 най-добри устройства са показани на фиг. 5.3.



Фиг. 5.3. k -най-добри избори за УНВ при различни предпочитания на ЛВР:
а) $k = 3$; б) $k = 5$

Тези групи от устройства отговарят на различни предпочитания на ЛВР, изразени чрез съответните коефициенти в табл. 5.12.

От така получените k -алтернативи потребителят (ЛВР) може да направи окончателния избор на един уред съгласно други субективни критерии. В разглеждания случай е предложена процедура за подпомагане на ЛВР при вземане на окончателното решение, чрез оценяване на всяка от k -най-добрите алтернативи на уреди спрямо един „идеален“ уред (Borissova и др. 2013):

- Стъпка 1: Определяне на „идеален“ уред с „идеални“ параметри, т.е. уред, чиито стойности на параметрите имат оптимални (максимални/минимални) стойности. Като се има предвид схемата за нормализация, то

стойността на целевата функция за оптимизационния проблем (5.49) – (5.58) за този „идеален“ уред е равна на 1.

- Стъпка 2: Изчисляване стойността на целевата функция за всяка от получените k -алтернативи на устройства. Тази стойност е винаги по-малка от идеалната, т.е. по-малка от 1.
- Стъпка 3: Определяне на разликата между „идеалния“ уред и изчислената стойност на целевата функция за всяка k -алтернатива и определяне на относителната близост на уреда от „идеалния“ в проценти.

Резултатите от изпълнението на описаната процедура за всяка от избраните k -най-добри алтернативи са показани в съответните таблици за различните набори от теглови коефициенти, изразяващи различни предпочитания на ЛВП към параметрите на търсения уред (таблица 5.13, таблица 5.14, таблица 5.15 и таблица 5.16).

Таблица 5.13. Близост на избраните уреди до идеалния уред за ЛВП-1

Избрани 5 най-добри УНВ	Стойност на целевата функция	Относителна близост в %
#1	0.629	37.02
#8	0.589	41.01
#7	0.584	41.56
#9	0.494	50.60
#2	0.457	54.27

Таблица 5.14. Близост на избраните уреди до идеалния уред за ЛВП-2

Избрани 5 най-добри УНВ	Стойност на целевата функция	Относителна близост в %
#1	0.4545	54.55
#9	0.3567	64.33
#10	0.3541	64.59
#8	0.3538	64.62
#7	0.3300	67.00

Таблица 5.15. Близост на избраните уреди до идеалния уред за ЛВР-3

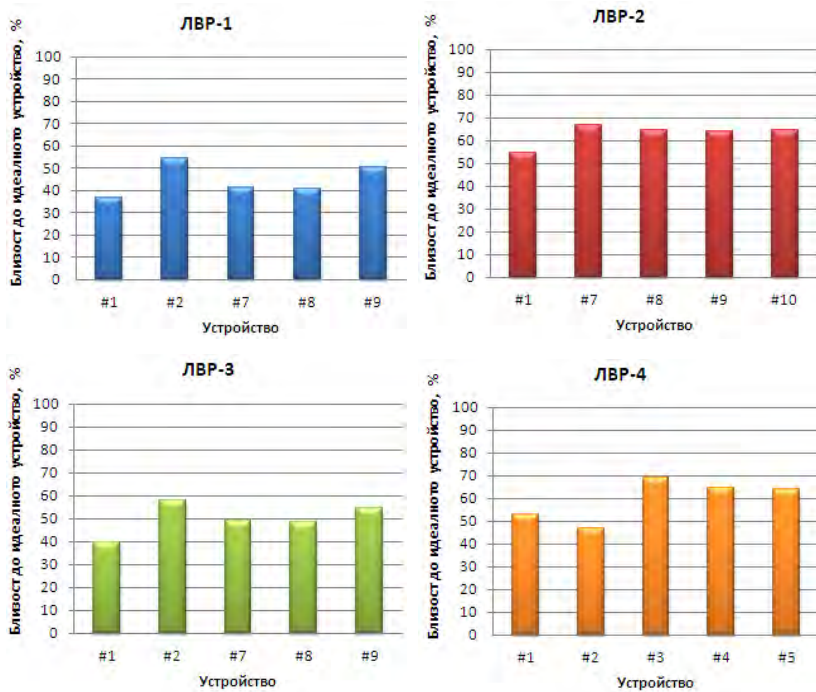
Избрани 5 най-добри УНВ	Стойност на целевата функция	Относителна близост в %
#1	0.6037	39.63
#8	0.5175	48.25
#7	0.5110	48.90
#9	0.4539	54.61
#2	0.4204	57.96

Таблица 5.16. Близост на избраните уреди до идеалния уред за ЛВР-4

Избрани 5 най-добри УНВ	Стойност на целевата функция	Относителна близост в %
#2	0.5306	46.94
#1	0.4723	52.77
#5	0.3578	64.22
#4	0.3550	64.50
#3	0.3116	68.84

На фиг. 5.4 са показани колко близко се намират до „идеалния“ уред определените 5 най-добри уреда при отчитане на съответните предпочитания на ЛВР.

Както се вижда от фиг. 5.3, близостта на уреда до „идеалния“ уред (чиито стойности удовлетворяват 100 % всички потребителски изисквания) силно зависи от предпочитанията на ЛВР. Тази информация може да се използва от ЛВР при окончателния избор на конкретно устройство, което може да се приеме като един добър и рационален избор на УНВ. Увеличаването на броя на устройствата, от които да се реализира изборът, води и до увеличаване размерността на задачите и тяхната изчислителна сложност. Въпреки това, за разгледаните числени примери, които са близки до реални практически проблеми, времената за решаване са от порядъка на минути за типичен персонален компютър.



Фиг. 5.4. Близост на определените 5 най-добри устройства при отчитане на различни предпочитания на ЛВР

Глава VI

Методи за определяне на различни комбинации на външни условия на наблюдение, съвместими с техническите спецификации на УНВ

Параметрите на УНВ се дават в неговите технически спецификации. Един от най-важните за практиката параметри е разстоянието на действие на УНВ. Той е комплексен параметър, зависещ не само от параметрите на отделните модули на УНВ, но и от външните условия на наблюдение. Поради това в техническите спецификации се указва при какви външни условия е определено това разстояние на действие на УНВ, но понякога такава информация може и да липсва. От потребителска гледна точка е важно да бъдат определени диапазоните на изменение на външните условия на наблюдение, при които уредът ще има същото разстояние на действие.

6.1. Многокритериален модел за определяне на комбинации от външни условия на наблюдение, валидни за дадено разстояние на действие

За да се определят различни комбинации от външни условия за наблюдение, удовлетворяващи зададено в техническите му спецификации разстояние на действие на УНВ, е формулиран следният многокритериален оптимизационен проблем (Borissova и др. 2009)

$$(6.1) \quad \begin{cases} \min E \\ \min K \\ \min \tau_a \end{cases}$$

при ограничения:

$$(6.2) \quad \sqrt{\frac{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_o S_{\Sigma} \delta E \tau_a K A'_{ob}}{M \Phi_{\min, ph}}} = R^*$$

$$(6.3) \quad E^l \leq E \leq E^u$$

$$(6.4) \quad \tau_a^l \leq \tau_a \leq \tau_a^u$$

$$(6.5) \quad K^l \leq K \leq K^u$$

където R^* е разстоянието на действие, дадено в каталога на уреда в метри, E^u , τ_a^u , K^u са горните и долните E^l , τ_a^l , K^l граници за осветеността, пропускането на атмосферата и контраста между наблюдавания обект и фона.

За да се илюстрира приложимостта на предложения модел, са използвани параметрите на очила за нощно виждане със следните данни:

- ЕОП от тип Gen 3 US с разделителна способност $\delta = 68 \text{ lp/mm}$, фотокатодна чувствителност $S = 0.0019 \text{ A/lm}$, отношение сигнал – шум $M = 25$ и прагова фотокатодна чувствителност $\Phi_{\min} = 4.10^{-13} \text{ lx}$
- обектив с диаметър на входната зеница $D_{in} = 0.018 \text{ m}$, фокусно разстояние $f_{ob} = 26 \text{ mm}$ и пропускане $\tau_o = 0.8$,
- зададено в каталога на устройството разстояние на откриване $R^* = 325 \text{ m}$.

Допустими граници на външните условия на наблюдение:

- естествена нощна осветеност $0.0001 \leq E \leq 0.01$,
- пропускане на атмосферата $0.65 \leq \tau_a \leq 0.80$,
- контраст между наблюдавания обект и фона $0.1 \leq K \leq 0.5$,
- редуцирана площ на човешка фигура в цял ръст за съответното разстояние $A_{man} = 0.72 \text{ m}^2$.

Така формулираната многокритериална оптимизационна задача (6.1) – (6.5) се трансформира до еднокритериална оптимизационна задача чрез метода на претеглената сума както следва (Marler и Arora 2005):

$$(6.6) \quad \min(w_1 * E' + w_2 * K' + w_3 * \tau'_a)$$

при ограничения:

$$(6.7) \quad 0.0001 \leq E \leq 0.01$$

$$(6.8) \quad 0.1 \leq K \leq 0.5$$

$$(6.9) \quad 0.65 \leq \tau_a \leq 0.80$$

$$(6.10) \quad \sum_i w_i = 1$$

където $E' = \frac{E - 0.01}{0.01 - 0.0001}$, $K' = \frac{K - 0.5}{0.5 - 0.1}$ и $\tau'_a = \frac{\tau_a - 0.80}{0.80 - 0.065}$ са

нормализираните критерии. Относителната важност на всеки критерий се взема предвид чрез тегловете коефициенти w_i .

Разгледани са три различни случая, при които пропускането на атмосферата е постоянна величина, а относителното тегло на естествената външна осветеност и контрастът между наблюдавания обект и неговия фон са отразени чрез различни теглови коефициенти w_i . В таблица 6.1 са показани използваните теглови коефициенти и съответните резултати за получените стойности на естествената нощна осветеност (E), контраста (K) и пропускането на атмосферата (τ_a).

Таблица 6.1. Теглови коефициенти и резултати за външните условия

No	w_1	w_2	w_3	E , lux	K	τ_a	R , m
1	0.34	0.33	0.33	0.00400	0.166	0.65	325
2	0.60	0.30	0.1	0.00287	0.232	0.65	
3	0.10	0.60	0.30	0.00666	0.100	0.65	
4	0.30	0.10	0.60	0.00261	0.237	0.70	
5	0.10	0.10	0.80	0.00413	0.150	0.70	
6	0.10	0.80	0.10	0.00413	0.150	0.70	
7	0.80	0.10	0.10	0.00159	0.387	0.70	

Всички получени комбинации от външни условия в таблица 6.1 удовлетворяват зададеното разстояние на действие, равно на 325 m. В таблица 6.2 са показани резултатите за получените стойности на естествената нощна осветеност (E) и контраста (K) при фиксирана стойност на пропускането на атмосферата ($\tau_a = 0.73$) и при 3 различни предпочитания на ЛВР по отношение относителната важност на естествената нощна осветеност и контраста.

Таблица 6.2. Теглови коефициенти и резултати за осветеността и контраста при пропускане на атмосферата $\tau_a = 0.73$

No	w_1	w_2	E , lux	K	τ_a	R , m
1	0.5	0.5	0.00383	0.153	0.73	325
2	0.7	0.3	0.00251	0.236		
3	0.3	0.7	0.00585	0.100		

И тези получени комбинации от външни условия (табл. 6.2) също удовлетворяват зададеното разстояние на действие, равно на 325 m. По подобен начин е възможно да се използват фиксирани стойности не само за пропускането на атмосферата, но и за другите параметри на външните условия на наблюдение и да се изследват възможните комбинации, отговарящи на зададеното разстояние на действие на УНВ.

Дискретният комбинаторен характер на формулираните по този начин оптимизационни задачи понякога може да доведе до недопустимо решение, но чрез модифициране на ограниченията и съответно числено експериментиране могат да се определят подходящи за практиката допустими резултати.

6.2. Методология за определяне на граничните стойности на изменение на външните условия на наблюдение, съответстващи на зададено разстояние на действие на УНВ

Параметрите, които влияят на разстоянието на действие, са както вътрешни, така и външни (Borissova и др. 2008; Borissova и др. 2009):

- разделителна способност на ЕОП – мярка за това колко линии с различна интензивност (светло до тъмно) могат да бъдат различени в рамките на милиметър площ на екрана,
- отношение сигнал/шум – мярка за светлинния сигнал (различен от шума), достигащ окото,
- фотокатодна чувствителност на ЕОП – способността на фотокатодния материал да излъчва електрони при облъчване с фотони,
- диафрагмено число (f -число) – изразява отношение от фокусното разстояние на обектива към диаметъра на входната зеница,
- естествена нощна осветеност – наличната околна светлина от звезди и луна и т.н.,
- пропускане на атмосферата – зависи от температурата на въздуха; атмосферно налягане; относителна влажност; брой, размер и разпределение на атмосферните аерозоли; концентрация на необичайни атмосферни съставки като дим, прах, изгорели газове, химически отпадни води, както и от коефициентите на пречупване на всички видове аерозоли в оптичния път,
- контраст между фона и наблюдавания обект – монохроматична разлика между наблюдавания обект и фоновия интензитет,
- тип на наблюдавания обект (човешка фигура, джип и т.н.).

Повечето от параметрите на УНВ се дават в неговите технически спецификации. Разстоянието на действие на УНВ, дадено в тези спецификации, се определя при конкретни външни условия на наблюдение, като в някои спецификации такива условия не са посочени. Поради това от потребителска гледна точка е интересно да се определят възможните комбинации на външните условия за наблюдение, които да съответстват на даденото в техническата спецификация разстояние на действие.

Функционалната зависимост на разстоянието на действие на УНВ от вътрешните параметри и външните условия за наблюдение се изразява аналитично чрез формулата (Borissova и др. 2006; Borissova и др. 2009):

$$(6.11) \quad R^2 = \left(\frac{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_{ob} \tau_a S \delta E K A_{target}}{M \Phi_{min,ph}} \right)$$

където: R – разстояние на действие в m, D_{in} – диаметър на входната зеница на обектива в m, f_{ob} – фокусно разстояние на обектива в mm, τ_a – пропускане на атмосферата, τ_{ob} – пропускане на обектива, S – прагова чувствителност на ЕОП в A/lm, δ – разделителна способност на ЕОП в lp/mm, E – естествена нощна осветеност lx, K – контраст, A_t^* – редуцирана площ на наблюдавания обект m², Φ_{min} – прагова чувствителност на ЕОП в lm, M – отношение сигнал/шум.

Пропускане на атмосферата варира в тесния интервал от 0.712 до 0.804 (Indiso 1970). От 1933 г. до края на 1940 г. коефициентът на пропускане е останал стабилен на ниво от около 0.74 до 0.75, в средата на 1980 г. е достигнато 0.69 и след това се е увеличил до 0.71 в началото на 2000 г. (Ohkawara 2012). Това позволява пропускането на атмосферата да се приема за постоянна величина.

Зависимостта (6.11) може да се използва за намиране на различни комбинации от външни условия за наблюдение, съответстващи на дадено разстояние на действие на уреда.

Минималната стойност на естествената нощна осветеност и максималната стойност на контраста между обекта и фона и обратното представляват две гранични условия за разглежданото разстояние на действие на уреда. Те не могат да бъдат определени от (4.92), тъй като се получава едно уравнение с две неизвестни.

Теоретичните минимални или максимални стойности на осветеност и контраст в (6.11) в общия случай може да не бъдат достигнати за конкретен уред. Тези две гранични стойности за осветеността и контраста при определен обект за наблюдение и зададено разстояние на действие, могат да бъдат определени с помощта на формулирането на многокритериални задачи.

Едно от граничните условия, съответстващо на *максимална естествена нощна осветеност и минимален контраст* между наблюдавания обект и фона, може да бъде изразено като Задача 1 (Borissova и др. 2014):

$$(6.12) \quad \begin{cases} \max E = \left(\frac{R^2 M \Phi_{min,ph}}{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_{ob} S_{\Sigma} \delta \tau_a K A_{target}} \right) \\ \min K = \left(\frac{R^2 M \Phi_{min,ph}}{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_{ob} S_{\Sigma} \delta \tau_a E A_{target}} \right) \end{cases}$$

при ограничения:

$$(6.13) \quad E^l \leq E \leq E^u$$

$$(6.14) \quad K^l \leq K \leq K^u$$

$$(6.15) \quad A^l \leq A_{target} \leq A^u$$

където с E^u , K^u , A^u и E^l , K^l , A^l са означени горните и долните граници на естествена нощна осветеност, контрастът и редуцираната площ на наблюдавания обект; R е зададеното разстояние на откриване в метри; M , $\Phi_{min,ph}$, D_{in} , f_{ob} , τ_{ob} , S , и δ са константи, зависещи от конкретния тип УНВ.

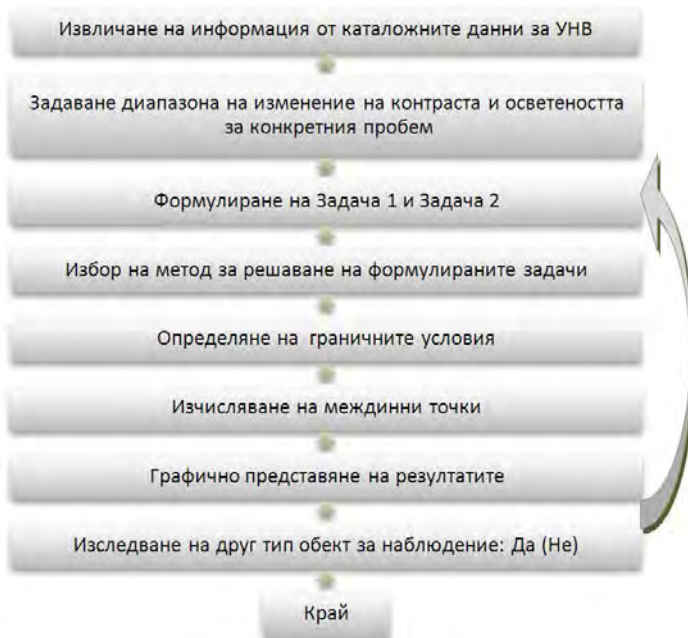
Другото гранично условие, съответстващо на *минимална естествена нощна осветеност и максимален контраст* между

наблюдавания обект и фона, е изразено като Задача 2 (Borissova и др. 2014):

$$(6.16) \quad \begin{cases} \max K = \left(\frac{R^2 M \Phi_{min,ph}}{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_{ob} S_{\Sigma} \delta \tau_a E A_{target}} \right) \\ \min E = \left(\frac{R^2 M \Phi_{min,ph}}{0.07 D_{in} f_{ob} \tau_{ob} S_{\Sigma} \delta \tau_a K A_{target}} \right) \end{cases}$$

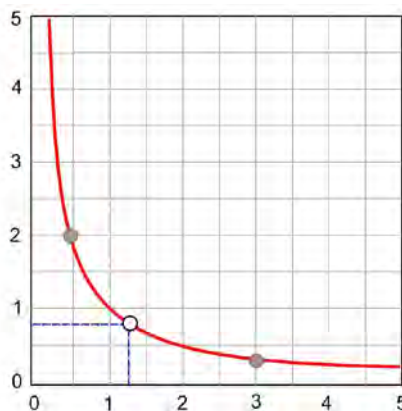
при същите ограничения (6.13) – (6.15).

Етапите на предложената методология за определяне диапазона на изменение на външните условия, при които УНВ постига едно и също разстояние на действие, са илюстрирани на фиг. 6.1 (Borissova и др. 2014).



Фиг. 6.1. Методология за определяне на условията на наблюдение при едно и също разстояние на действие на УНВ

Първият етап от методологията се състои в определяне на стойностите на вътрешните параметри на УНВ, на база на наличната техническа спецификация. На следващия етап се задават стойностите на горните и долните граници на нощната осветеност и контраста. След това се определя типът на обекта за наблюдение, например – стоящ човек, джип, танк и т.н. Използвайки определените по-горе данни се формулира Задача 1 (за максимум нощна осветеност и минимум на контраста между обекта и фона) и Задача 2 (за минимална нощна осветеност и максимален контраст) и се избира метод за решаване на формулираните многокритериални задачи. Задачите се решават с избрания метод и се определят граничните стойности на нощната осветеност и на контраста между обекта и фона. Задават се стойности за тези параметри в определените граници и се изчисляват една или повече междинни точки, необходими за построяване на графика на изменението на параметрите. Типът на кривите, съгласно уравнения (6.12) и (6.12), може да се опрости до $E \sim 1/K$ или $K \sim 1/E$, както е показано на фиг. 6.2



Фиг. 6.2. Графично представяне на зависимостта $E \sim 1/K$ ($K \sim 1/E$)

Така получената графика може да се използва за определяне и на други съвместими стойности на параметрите на външните условия на наблюдение, съответстващи на зададеното разстояние на действие на уреда. Процедурата се повтаря при необходимост от определяне на диапазон на изменение на външните условия за друг тип наблюдаван обект.

Описаната методология (фиг. 6.1) позволява да бъдат определени различни комбинации от външни условия на наблюдение, гарантиращи постигането на зададеното разстояние на действие на УНВ.

За числено илюстриране приложимостта на предложената методология са използвани каталожните данни на два типа УНВ – очила за нощно виждане и прицел, показани в таблица 6.3.

Таблица 6.3. Каталожни данни на УНВ

Разделителна способност lp/mm	Отношение сигнал-шум, dimensionless	Фотокатодна чувствителност A/lm	Диам. на входната зеница, m	Фокусно разстояние, mm	Разстояние на откриване, m
Очила за нощно виждане – MVP-MV14BGP*					
64	21	0.001350	0.018	25	300
Нощен прицел – MV-740**					
64	24	0.001800	0.018	100	425

* http://www.morovision.com/night_vision_goggles/MVP-MV-14BGP.htm

** http://morovision.com/weapons_sights/MVPA-MV-740-3P.htm

И за двете устройства е прието, че пропускането на обектива е равно на 0.80, минималната фотокатодна чувствителност е 3.4×10^{-12} A/lm, а атмосферното пропускане е 0.71. Границите на изменение на външните условия наблюдение са както следва: нощна осветеност E , променяща се в интервала $0.00013 \leq E \leq 0.013$ lx (от звездно небе до пълнолуние); контраст между наблюдавания обект и фона K , променящ се в интервала $0.1 \leq K \leq 0.5$ и редуцирана площ на наблюдавания обект, съгласно критериите

на Джонсън (Lombardo, 1998) за стоящ човек ($A_{\text{човек}} = 0.72 \text{ m}^2$), за джип ($A_{\text{джип}} = 2.47 \text{ m}^2$), за камион ($A_{\text{камион}} = 5.9 \text{ m}^2$) и за танк ($A_{\text{танк}} = 10 \text{ m}^2$).

Използван е *методът на претеглената сума* за решаване на формулираните многокритериални задачи 1 и 2. Приложението на метода на претеглената сума налага трансформация на изходната многокритериална задача в съответна еднокритериална задача за максимизация и нормализация на критериите. Оптимизационната задача 1 се трансформира до вида:

$$(6.17) \quad \max(w_1 E' + w_2 K')$$

при ограничения (6.13) – (6.15) и

$$(6.18) \quad \sum_i w_i = 1,$$

където $E' = \frac{E - E^{\min}}{E^{\max} - E^{\min}}$ и $K' = \frac{K^{\max} - K}{K^{\max} - K^{\min}}$ са определените съгласно изискванията на метода на претеглената сума, нормализирани критерии на изходната задача.

Задача 2 се трансформира до еднокритериална оптимизационна от вида:

$$(6.19) \quad \max(w_1 E' + w_2 K')$$

при ограничения (6.13) – (6.15) и

$$(6.20) \quad \sum_i w_i = 1,$$

където $K' = \frac{K - K^{\min}}{K^{\max} - K^{\min}}$ и $E' = \frac{E^{\max} - E}{E^{\max} - E^{\min}}$ са нормализираните критерии, съгласно изискванията на метода на претеглената сума.

Резултатите от решаването на трансформираните еднокритериални задачи, определящи граничните условия за стойностите на нощната осветеност и контраста между обекта и фона, за четири различни типа наблюдавани обекта – човек, джип, камион и танк, при зададени съответни стойности на разстоянието на откриване, са показани в таблица 6.4.

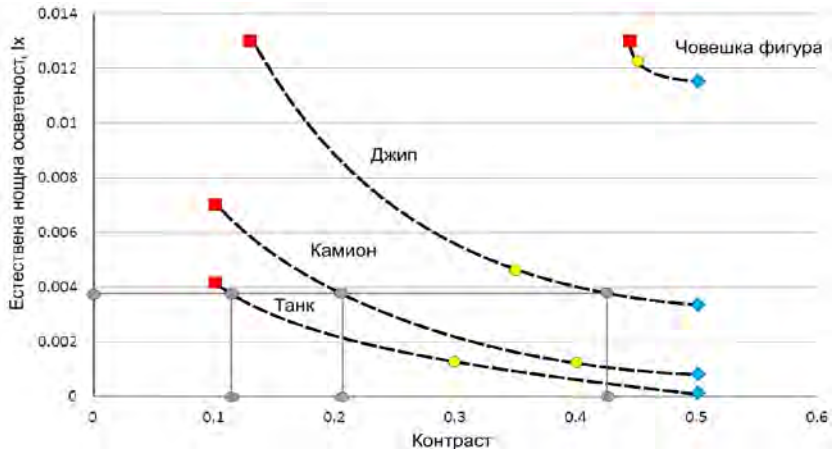
Таблица 6.4. Резултати за гранични точки на осветеността и контраста

УНВ	Наблюдаван обект	Осветеност, lx	Контраст	Разстояние на откриване, m
Очила за нощно виждане MVP-MV14BGP	Задача 1: (max E, min K, w₁=0.50, w₂=0.50)			
	(A _{човек} = 0.72)	0.0130000	0.44	300
	(A _{джип} = 2.47)	0.0130000	0.13	
	(A _{камион} = 5.9)	0.0007045	0.10	
	(A _{танк} = 10)	0.0041568	0.10	
	Задача 2: (min E, max K, w₁=0.50, w₂=0.50)			
	(A _{човек} = 0.72)	0.011547	0.50	300
	(A _{джип} = 2.47)	0.003365	0.50	
(A _{камион} = 5.9)	0.001409	0.50		
(A _{танк} = 10)	0.000831	0.50		
Ношен прицел MV-740	Задача 1: (max E, min K, w₁=0.50, w₂=0.50)			
	(A _{човек} = 0.72)	0.001000	0.25	425
	(A _{джип} = 2.47)	0.007237	0.10	
	(A _{камион} = 5.9)	0.003030	0.10	
	(A _{танк} = 10)	0.001787	0.10	
	Задача 2: (min E, max K, w₁=0.50, w₂=0.50)			
	(A _{човек} = 0.72)	0.004965	0.50	425
	(A _{джип} = 2.47)	0.001447	0.50	
(A _{камион} = 5.9)	0.000606	0.50		
(A _{танк} = 10)	0.000357	0.50		

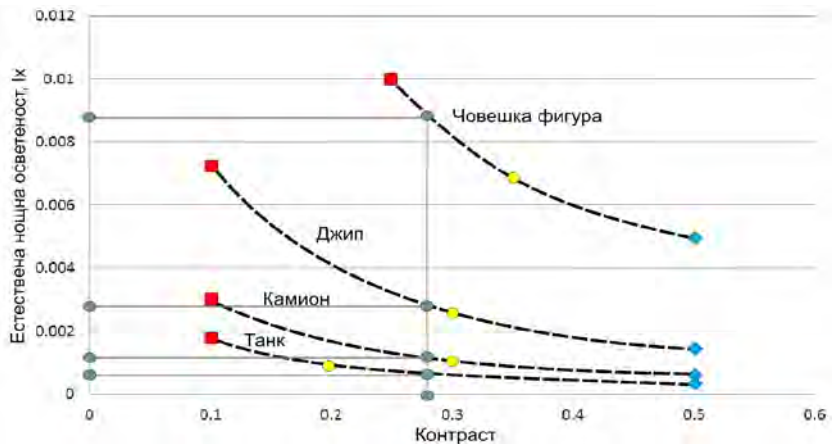
Диапазоните на изменение на естествената нощна осветеност и контраста за двата типа уреди за нощно виждане и за четирите различни типа наблюдавани обекта са показани графично на фиг. 6.3 и фиг. 6.4.

При нощна осветеност от 0.0038 lx (фиг. 6.3) разстоянието на откриване от 300 m при ОНВ може да бъде постигнато при контраст от 0.12 (за танк), при контраст от 0.21 (камион) и при контраст от 0.42 (джип), но човешка фигура на разстояние от 300 m при зададената осветеност не може да бъде открита. В случая на ношен прицел с разстояние на откриване от 425 m (фиг. 6.4), при стойност на контраста от 0.28, откриването на танк може да бъде постигнато при осветеност от 0.0005, за камион при осветеност от

0.001, за джип при осветеност от 0.0024, а за наблюдаване на човешка фигура в цял ръст е необходима осветеност от 0.0088 lx.



Фиг. 6.3. Диапазон на изменение на естествената нощна осветеност и контраста за ОНВ MVP-MV14BGP



Фиг. 6.4. Диапазон на изменение на естествената нощна осветеност и контраста за нощен прицел MV-740

Както се вижда от фиг. 6.3 и 6.34, съществува повече от една комбинация на стойности на параметрите *естествена нощна осветеност* и *контраста* за даден тип наблюдаван обект, съответстваща на зададено разстояние на откриване за конкретен тип уред за нощно виждане.

Приложението на описаната методология позволява да се определят теоретични оценки за диапазоните на изменение на параметрите *естествена нощна осветеност* и *контраст*, за даден тип наблюдаван обект и за определен уред. Построените с тяхна помощ графики позволяват бързо и нагледно да се оцени ефективността на УНВ, за който са известни само каталожните му спецификации. Подобни оценки са важни за практическото приложение на УНВ, тъй като каталожните данни са в сила за фиксирани външни условия, които в повечето случаи, не се цитират в спецификациите.

Заклучение

В монографията се разглеждат популярните пасивни уреди за нощно виждане, базирани на технологията на усилване на изображението. Описани са различните видове УНВ и техните основни елементи. Представени са математическите зависимости между параметрите на УНВ. Предложена е формула за определяне на теоретична оценка на разстоянието на действие на УНВ като функция на параметрите на отделните елементи на опто-електронния канал на УНВ и външните условия на наблюдение. Параметрите на модулите на опто-електронния канал заедно с външните условия за наблюдение са използвани за формулиране на детерминиран и стохастичен оптимизационен модел на УНВ. Тези модели са в основата на детерминирани и стохастичните формулировки на оптимизационните задачи за определяне на Парето-оптимални комбинации от модули за опто-електронния канал на УНВ. Някои от предложените модели са модифицирани така, че да вземат под внимание и предпочитанията на ЛВР към проектирано устройство.

Описани са предложените три метода за проектиране на УНВ – итеративен, рационален и оптимален. Итеративният метод позволява на ЛВР да избере модули за опто-електронния канал на УНВ и в резултат на избраните модули да се определят параметрите на проектираното устройство. Концепцията за метода на рационалния избор съвпада до голяма степен с тази, използвана в многокритериална оптимизация за рационално или удовлетворително решение. Рационалното вземане на решение означава, че ЛВР не оптимизира някаква целева функция, а се стреми да достигне до задоволителни нива на определени критерии. В най-общия случай получените решения не са оптимални, но могат да се разглеждат като рационални или

удовлетворителни. Методът на оптималния избор използва формулираните оптимизационни задачи и получените конфигурации на модулите за опто-електронния канал на УНВ са оптимални в смисъл на зададени критерии към параметрите на УНВ.

Предложени са многокритериални модели за избор на УНВ със и без допълнителни ограничения към параметрите на устройството. Описан е и разработеният многокритериален оптимизационен модел за избор на УНВ, вземащ предвид и параметрите на външните условия на наблюдение.

Формулиран е оптимизационен модел, определящ k -най-добри устройства чрез решаване на една многокритериална оптимизационна задача, за разлика от методите, базирани на сравнение и определяне на отклонението между оценките на две алтернативи по даден критерий. Предимство на предложения оптимизационен модел е, че позволява да се определят k -добри устройства вместо определяне на едно Парето-оптимално устройство.

Формулиран е математически модел, в който разстоянието на действие на УНВ се разглежда като функция на параметрите на избраното устройство и едновременно с това се отчитат външните условия на наблюдение. По този начин може да се направи оценка за разстоянието на действие на избраното устройство, което е най-важният параметър на устройството. Едновременно с това се отчитат и съответните потребителски предпочитания относно търсените параметри на устройството. В резултат на решаваните задачи е илюстрирано как различните външни условия на наблюдение заедно с потребителските предпочитания могат да повлияят върху избора на конкретното устройство.

Описаният итеративен и рационален метод за избор и оценка на параметрите на проектирано УНВ са реализирани в уеб приложение. Архитектурата на разработения прототип се основава на използването на AJAX технология.

Като бъдещи изследвания в областта на УНВ се предвиждат провеждане на изследвания с т.нар. комбинирана технология, при която технологията на топлинното излъчване на телата се комбинира с технологията на светлинното усилване на образа.

Използвани съкращения и означения

УНВ	– уреди за нощно виждане
ОНВ	– очила за нощно виждане
ЕОП	– електронно-оптичен преобразувател
МКП	– микроканална пластина,
ВОП	– влакнесто-оптична пластина
Γ	– видимо увеличение,
$f_{об}$	– фокусно разстояние на обектив
$f_{ок}$	– фокусно разстояние на окуляр
$D_{фк.ЕОП}$	– диаметър на фотокатода на ЕОП
ω	– зрително поле
k	– диафрагмено число
$1/k$	– относителен отвор
H	– светлосила
τ_o	– коефициент на пропускане на оптиката
τ_a	– коефициент на пропускане на атмосферата
$D_{з.око}$	– диаметър на зеницата на човешкото око
$D_{изх.з.min}$	– минимален диаметър на изходната зеница
R	– разстояние на действие
Φ	– светлинен поток
E	– естествена нощна осветеност
$L_{ф}$	– яркост на фона
$\Phi_{ф.еф}$	– ефективен поток от фона
$\Phi_{об.еф}$	– ефективен поток от обекта
$\Phi_{пр.фк}$	– прагова чувствителност на фотокатода на ЕОП
$\Phi_{\Sigma еф}$	– сумарен поток от обекта и фона
$A_{об}$	– площ на наблюдавания обект
$\rho_{ф}$	– спектрален коефициент на отражение на фона
$\rho_{об}$	– спектрален коефициент на отражение на обекта
$D_{вх}$	– диаметър на входната зеница
$A_{вх}$	– площ на входната зеница
$\omega_{зр}$	– ъглово зрително поле на уреда
$K_{ф}$	– коефициент на използване на потока от фотокатода
φ	– спектрална чувствителност на фотокатода
K	– контраст между наблюдавания обект и фона

M	– отношение сигнал/шум на ЕОП
S_{Σ}	– интегрална чувствителност на фотокатода на ЕОП
γ	– разделителната способност на уреда
$\delta_{ЕОП}$	– разделителната способност на ЕОП
R^O	– разстояние на откриване
R^{OP}	– разстояние на ориентация
R^P	– разстояние на разпознаване
R^H	– разстояние на идентификация
$A'_{об}$	– приведена площ на наблюдавания обект
$A''_{об}$	– приведена площ на наблюдавания обект при откриване
$A'''_{об}$	– приведена площ на наблюдавания обект при разпознаване
$A''''_{об}$	– приведена площ на наблюдавания обект при идентификация
$K_{ЕОП}$	– обобщен параметър за „качество на изобрания ЕОП“
$K_{об}$	– обобщен параметър за „качество на изобрания обектив“
$W_{об}$	– зрително поле на изобрания обектив
$W_{ок}$	– зрително поле на изобрания окуляр
F	– фокусировка на изобрания обектив
$F^{об}$	– фокусно разстояние на изобрания обектив
$F^{ок}$	– фокусно разстояние на изобрания окуляр
$AC_{об}$	– сферична аберация на изобрания обектив
$AA_{об}$	– астигматизъм на изобрания обектив
$AD_{об}$	– дисторсия на изобрания обектив
$AK_{об}$	– кривина на полето на изобрания обектив
$AC_{ок}$	– сферична аберация на изобрания окуляр
$AA_{ок}$	– астигматизъм на изобрания окуляр
$AD_{ок}$	– дисторсия на изобрания окуляр
$AK_{ок}$	– кривина на полето на изобрания окуляр
$OИЗ$	– отдалеченост на изходната зеница на изобрания окуляр
$T_{ЕОП}$	– тегло на изобрания ЕОП
$T_{об}$	– тегло на изобрания обектив
$T_{ок}$	– тегло на изобрания окуляр
T	– тегло на опто-електронния канал на УНВ
$C_{ЕОП}$	– цена на изобрания ЕОП
$C_{об}$	– цена на изобрания обектив
$C_{ок}$	– цена на изобрания окуляр
C	– цена на опто-електронния канал на УНВ
Q	– обобщен критерий за качество на УНВ
T_a^{cm}	– математическо очакване за пропускане на атмосферата

- K^{cm} – математическо очакване за контраст
- E^{cm} – математическо очакване за естествената нощна осветеност
- $A^{cm}_{об}$ – математическо очакване за площта на наблюдавания обект
- $A^{cm}_{об}$ – математическо очакване за приведената площ на наблюдавания обект,
- $D1, D1a, D2, D3, D4$ – детерминирани оптимизационни задачи
- $C1, C1a, C2, C3, C4$ – стохастични оптимизационни задачи
- ЛВР – лице, вземащо решения

Библиография

- Антипова и др. 1998*: Антипова, Л. Г., В. В. Крылов, Е. Ф. Новичкова, И. Н. Петров, С. А. Плахов, Р. М. Степанов. Малогабаритный высокочувствительный прибор ночного видения МН - 201. Межд. научно-техническая конференция по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям. Москва, 1998, с. 54 – 63.
- Бантутова и др. 2013*: Бантутова Б., Д. Борисова, Е. Бантутов, И. Мустакеров. Приспособление за ношно гледане. Патентенован промишлен дизайн # 7826/25 юни 2013.
- Борисова, Мустакеров, Църноречки 2005*: Борисова, Д., И. Мустакеров, О. Църноречки. Web базирана програмна система за итеративен избор на елементите на опто-електронния канал на УНВ, ИТ/УР-208В, 2005.
- Борисова, Райчев, Бантутов, Църноречки 2001*: Борисова, Д., Р. Райчев, Е. Бантутов, О. Църноречки. Оценка на основните параметри, даващи сведения за качеството на ношен уред за стрелково оръжие при изготвянето на тактико-техническо задание. 10-th Scientific and Applied Science Conference ELECTRONICS ET'2001, book 4, с. 195 – 200.
- Волков 2001*: Волков, В. Г. Вертолетные оптико-электронные системы наблюдения и разведки. – В: *Специальная техника*, 2001, № 3.
- Волков 2001а*: Волков, В. Г. Приборы ночного видения новых поколений. – В: *Специальная техника*, 2001, № 5.
- Волков 2002*: Волков, В. Г. Наголовные приборы ночного видения. – В: *Специальная техника*, 2002, № 5.
- Волков 2003*: Волков, В. Г. Приборы для вождения спецтехники в ухудшенных условиях видимости. – В: *Специальная техника*, 2003, № 2, с. 4 – 12.
- Волков и др. 2000*: Волков, В. Г., Ю. А. Добровольский, Н. Ф. Кошавцев, М. А. Кускова, Г. А. Леонова. Малогабаритные дневно-ночные приборы наблюдения. – В: *Прикладная физика*, 2000, № 5, с. 50 – 53.
- Вълева 1993*: Вълева, Е. Техническа оптика, част 1. Техника, 1993, 229 стр.
- Гоев 2002*: Гоев, А. И. Модернизация приборов ночного видения. – В: *Специальная техника*, 2002, № 2, с. 11 – 14.
- Гоев 2002а*: Гоев, А. И. Расширение функциональных возможностей приборов ночного видения на базе унифицированных модулей. – В: *Специальная техника*, 2002, № 3.
- Григорьев и др. 2000*: Григорьев, А. А., Н. Ф. Кошавцев, И. Б. Кривошапкин. Установка и метод определения дальности действия приборов ночного видения без полевых испытаний. XVI Межд. научно-техническая конференция

по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, Россия, 2000, с. 81 – 90.

Добровольский и др. 1998: Добровольский, Ю. А., Н. Ф. Кошавцев, С. А. Украинский, Н. М. Шустов, Ю. Г. Эдельштейн. Очки ночного видения для пилотирования вертолетов. Межд. научно-техническая конференция по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям. Москва, 1998, с. 48 – 53.

Добровольский и др., 1999: Добровольский, Ю. А., Н. Ф. Ковшавцев, Д. С. Соколов, С. Ф. Федотова, Н. М. Шустов. Малогабаритные очки ночного видения. – В: *Прикладная физика*, 1999, № 3.

Елизаренко и др. 1981: Елизаренко, А. С., Ю. Б. Парвулосов, В. П. Солдатов, Ю. Г. Якушенков. Проектирование оптико-электронных приборов. Машиностроение, 1981, 262 стр.

Журавлев и др. 2000: Журавлев, П. В., В. Ф. Кербс, Г. И. Косолапов, С. М. Чурилов. Оптико-электронные приборы для вождения транспортных средств. XVI Межд. научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, Россия, 2000, с. 54 – 61.

Кошавцев и др. 1999: Кошавцев, Н. Ф., А. Н. Кошавцев, С. Ф. Федотова. Анализ перспектив развития приборов ночного видения. – В: *Прикладная физика*, 1999, № 3, УДК 621.384.326.23.

Кошавцев и др. 1999а: Кошавцев, Н.Ф., А.Н. Кошавцев, С.Ф. Федотова. К вопросу о дальности опознавания в низкоуровневых системах визуализации изображений. – В: *Прикладная физика*, 1999, № 4, с. 46 – 52.

Кошавцев и др. 2000: Кошавцев, Н. Ф., С. Ф. Федотова, В. В. Горкин. Приборы ночного видения гражданского назначения. XVI Межд. научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, Россия, 2000, с. 73 – 80.

Кривошапкин, Эдельштейн 1998: Кривошапкин, И. Б., Ю. Г. Эдельштейн. Обработка результатов полевых испытаний методом множественной корреляции. Межд. научно-техническая конференция по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям. Москва, 1998, с. 72 – 77.

Малинин 2003: Малинин, В. В. Математическое моделирование процессов и систем на ЭВМ. Центр информационных технологий Сибирской государственной геодезической академии, Новосибирск, 2003.

Николов 1993: Николов, И. Оптични методи и системи. С.: Университетско издателство „Св. Кл. Охридски“, 1993, 272 стр.

Очки ночного видения NV/G-14. Оптические устройства и приборы. Каталог Белома. Република Беларусь, Минск, 2002.

Рамм, Родионов 1977: Рамм, А. Г., С. А. Родионов. Оптимизация разрешающей способности оптических приборов. Оптика и спектроскопия. Т. 42, 1977, с. 540 – 545.

Родионов 2000: Родионов, С. А. Основы оптики. Санкт-Петербург, 2000, 163 стр.

Эдельштейн 1998: Эдельштейн Ю. Г. О детерминированно-стохастической модели ПНВ. XV Межд. научно-техническая конференция по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям. Москва, 1998, с. 78 – 84.

A Basic Guide to Night Vision, Cobra Optics Ltd., 2001, pp. 10, http://www.thomasjacks.co.uk/pdf/12-27_basic_guide_to_nv_2011.pdf

Andersson J. A survey of multiobjective optimization in engineering design. Technical report LiTH-IKP-R-1097, 2000.

ATN – How starlight technology works, 2014,

<http://www.atncorp.com/hownightvisionworks>

Berezovskiy Salomão, Birch 2001: Berezovsky, A., S. R. Salomão, D. G. Birch. Pupil size following dark adaptation in patients with retinitis pigmentosa. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, Vol. 34, 2001, pp. 1037-1040.

Bijl, Valeton 1998: Bijl, P., J. M. Valeton. Validation of the new triangle orientation discrimination method and ACQUIRE model predictions using observer performance data for ship targets. Optical Engineering, July 1998, Vol. 37(07), Ed.: Donald C. O'Shea, 1998, pp. 1984-1994.

Borissova 2003: Borissova, D. Methods for NVG Visual Acuity Determination. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 3(2), 2003, pp. 25-33

Borissova 2005: Borissova, D. Analytical Calculation of Night Vision Goggles Working Range. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 5(2), 2005, pp. 142-155.

Borissova 2006: Borissova, D. Multicriteria choice of the NVG optoelectronic channel elements. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, Vol. 56, 2006, pp. 61-68.

Borissova 2008: Borissova, D. Night Vision Devices Choice Taking into Account the External Surveillance Conditions. – Int. Journal Advanced Modeling and Optimization, Vol.10, No 2, 2008, pp.213-220.

Borissova, Mustakerov 2006: Borissova, D., I. Mustakerov. Method of Rational Choice by Sorting in the Software System “NVGpro”. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 6, No 1, 2006, pp. 69-75.

Borissova, Mustakerov 2007: Borissova, D., I. Mustakerov. Night vision devices design process modeling. Proc. of Int. Conf. on Theory and Applications in Mathematics and Informatics, ICTAMI 2007, Alba Iulia, Romania (Eds. D. Breaz,

N. Breaz, D. Wainberg), 30 August - 02 September 2007, Alba Iulia, Romania, pp. 55-66 .

Borissova, Mustakerov 2008: Borissova, D., I. Mustakerov. Multicriteria Choice of Night Vision Devices Considering the Impact of Their Performance Parameters. – Int. Journal Advanced Modeling and Optimization, Vol. 10(1), 2008, pp.81-93.

Borissova, Mustakerov 2009: Borissova, D., I. Mustakerov. A Multicriteria Approach to Exploring Combinations of External Surveillance Conditions Defining a Given NVD Working Range Value. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 9, No 4, 2009, pp.102-109

Borissova, Mustakerov 2013: Borissova, D., I. Mustakerov. K-best night vision devices by multicriteria mixed-integer optimization modeling. – Int. Journal of Information Science and Engineering, pISSN 2010-376X, Vol. 7, No 10, 2013, pp. 205-210.

Borissova, Mustakerov, Bantutov 2013: Borissova, D., I. Mustakerov, E. Bantutov. Web-based architecture of a system for design assessment of night vision devices. – Int. Journal of Information Science and Engineering, Vol.7(7), 2013, pp. 62-67.

Borissova, Mustakerov, Bantutov 2014: Borissova, D., I. Mustakerov, E. Bantutov. Methodology for determining of surveillance conditions in relation to night vision devices performance. – Int. Journal Advanced Modeling and Optimization, ISSN: 1841-4311, Vol. 16, No 1, 2014, pp. 51-59.

Borissova et all 2001: Borissova, D., M. Dekov, D. Kozarev, E. Bantutov, I. Iliev. Optical- electronic Device - Night Vision Goggles - "Prilep". Cybernetics and Information Technologies, Vol. 1, No 1, 2001, pp. 108-115.

Borissova, Dekov 2002: Borissova, D., M. Dekov. Optical Characteristics of Night Vision Goggles “PRILEP”. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 2, No 1, 2002, pp. 110-115.

Car & Driver - Night Light: Night-Vision Systems Compared from BMW, Mercedes, and Audi. 2012, <http://www.caranddriver.com/comparisons/night-vision-systems-compared-bmw-vs-mercedes-benz-vs-audi-comparison-test>

Chrzanowski 2013: Chrzanowski, K. Review of night vision technology. Opto-electronics review, Vol. 21, No 2, 2013, pp. 153-18.

Electrophysics, Image Intensifier Tutorial, 2014, http://www.electrophysics.com/View/View_TechPrimer_NightVisionTutorial.asp

Ertas & Jones 1996: Ertas, A. & J. Jones. The Engineering Design Process. 2nd ed. New York, N.Y., John Wiley & Sons, Inc. (1996).

Feng, Li and L. Liu 2000: Feng Q., G. Li and L. Liu. Optoelectronic implementation of a genetic algorithm. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. Vol. 2, 2000, pp. 65-69.

Gomez, Oakes and Leone 2004: Gomez A., W. Oakes and L. Leone. Engineering Your Future. Great Lake Press, Inc. 2004. p.352-363.

- Garrett 1991*: Garrett, J. Design and Technology. 1991, Cambridge. University Press, England
- Hall 2002*: Hall, J. Trade of the tricks vignetting introduces a useful degree of freedom in the design of a night-vision goggle objective, Spie's OE Magazine, 2002, pp. 19-21.
- Hamamatsu - Image Intensifiers*, 2009,
http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/II_TII0004E02.pdf
- Hertel, M.* Aspects of AJAX, 2007,
<http://www.mathertel.de/AJAX/AJAXeBook.aspx>
- Indiso, S. B.* The transmittance of the atmosphere for solar radiation on individual clear days. J. of Applied Meteorology, Vol. 9, 1970, pp. 239-241.
- Intas*, Night Vision Devices (NVD) – Generations,
<http://www.intas.org/Nachtsicht/nightvision-gns.htm>
- Johnson 1958*: Johnson, J. Analysis of image forming systems. In Proc. Image Intensifier Symposium, AD 220160 (Warfare Electrical Engineering Department, U.S. Army Research and Development Laboratories, Ft. Belvoir, Va., 1958), pp. 244-273.
- Johnson, Owen 1995*: Johnson, C. B., L. D. Owen. Handbook of optics. Chapter 21: Image tube intensified electronics imaging. 1995.
- Li 2009*: Li, D-F. Relative ratio method for multiple attribute decision making problems. – Int. J. of Information Technology & Decision Making, 2009, Vol. 8, pp. 289-311.
- Lombardo 1998*: Lombardo, R. L. Jr. Target Acquisition: It's Not Just For Military Imaging. Photonics Spectra, July, 1998, pp. 123-126.
- Marasco, Task 1999*: Marasco, P. L., L. Task. Optical Characterization of Wide Field-Of-View Night Vision Devices. Air Force Research Laboratory, Human effectiveness Directorate, ASC99-2354, pp. 6, 1999.
- Marler, Arora 2004*: Marler, R.T, J. S. Arora. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Structural and Multidisciplinary Optimization. Vol. 26, 2004, pp. 369-395.
- Marler, Arora 2005*: Marler, R.T, J. S. Arora. Transformation methods for multi-objective optimization. Engineering Optimization, Vol. 37, 2005, pp. 551-569.
- Marler, Arora 2010*: Marler, R.T. and J.S. Arora. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 41, 2010, pp. 853-862.
- Martinelli, Seoane 1999*: Martinelli, N. S., R. Seoane. Automotive night vision system. Proc. SPIE Thermosense XXI; Dennis H. LeMieux, John R. Snell, Jr.; Eds., Vol. 3700, 1999, pp. 343-346.
- Mergias et al. 2007*: Mergias, I., K. Moustakas, A. Papadopoulos, M. Loizidou. Multicriteria decision aid approach for the selection of the best compromise

management scheme for ELVs: The case of Cyprus. – Journal of Hazardous Materials, vol. 147, 2007, pp. 706-717.

Miettinen 1999: Miettinen K. Nonlinear Multiobjective Optimization. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.

Miettinen, Makela 2002: Miettinen, K., M. M. Makela. On Scalarization izing Functions in Multiobjective Optimization. OR Spectrum, Vol. 24, 2002, pp. 193-213.

Mirzu 2000: Mirzu, M. Multiconfiguration optical system with applications in night vision devices. Sixth Symposium on Optoelectronics, T. Necsoiu, M.Robu, D. C. Dumitras, Eds., Proc. SPIE, Vol. 4068, 2000, pp. 627-632.

Morovision Night Vision. How Night Vision Works - General Overview, <http://www.nightquest.com/hownightvisionworks.htm>

Mustakerov, Borissova 2007a: Mustakerov, I., D. Borissova. Software system for night vision devices design by reasonable combinatorial choice. Proc. of Int. Conf. on Theory and Applications in Mathematics and Informatics, ICTAMI 2007, Alba Iulia, Romania (Eds. D. Breaz, N. Breaz, D. Wainberg), 30 August - 02 September 2007, Alba Iulia, Romania, pp. 43-53.

Mustakerov, Borissova 2007b: Mustakerov, I., D. Borissova. Technical systems design by combinatorial optimization choice of elements on the example of night vision devices design. Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, Tom 60, No 4, 2007, pp. 373-380.

Night Vision Goggles in Civil Helicopter Operations. Aviation Research Report B2004/0152, ISBN 1 877071 94 3, 2005.

Night Vision Goggles Lucie. ANGENIEUX S.A., France, 1999.

Ohkawara 2012: Ohkawara, N. Long-term variations of atmospheric transmittance from pyrhelimeter measurements. In Proc. 12th BSRN Science and review and workshop, Potsdam, Germany, 2012.

OpTaliX, Software for optical design and thin films. Tutorial, ver. 5.70, 2004.

Petty 2002: Petty, G.W. Area-average solar radiative transfer in three-dimensionally inhomogeneous clouds: The Independently Scattering Cloudlets model. J. Atmos. Sci., 2002, pp. 1-24.

Pinkus, Task 1997: Pinkus, A., H. Lee Task. The Effects of Aircraft transparencies on night vision goggle-mediated visual acuity. ASC00-2308, 14 Aug 1997.

Pinkus, Task 1998: Pinkus, A., H. Lee Task. Measuring Observers' Visual Acuity Through Night Vision Goggles. ASC98-1884, 25 Aug 1998.

Rash 1998: Rash, Cl. E. (Ed.). HelmetMounted Displays: Design Issues for RotaryWing Aircraft, SPIE Press Monograph Vol. PM93. 1998.

Resolving Power Target, MIL-STD-150A, Section 5.1.1.7.

Rouke et al. 1998: Rouke, J. L., M. K. Crawford, D. J. Ficher, C. J. Harkrider, D. T. Moore, T. H. Tomkinson. Design of tree-element night-vision goggle objectives. *Applied Optics*, Vol. 37 (4), 1998, pp. 622-626.

Ruffner et al. 1997: Ruffner, J. W., D. Piccione, K. Woodward. Development of a night-driving simulator concept for night vision image-intensification device training. *Proc. SPIE Vol. 3088, Enhanced and Synthetic Vision 1997*, Jacques G. Verly Ed., 1997, pp. 190-197.

Ruffner et al.1999: Ruffner, J. W., K. G. Woodward, D. Piccione. Development of a night vision device driving training aid. *Proc. SPIE Vol. 3691, Enhanced and Synthetic Vision 1999*, Jacques G. Verly Ed., 1999, pp. 184-194.

Ruffner et al.2000: Ruffner, J. W., K. G. Woodward. The Night Driving Training Aid (NDTA): Developmental Issues and Lessons Learned. *Proc. of . Enhanced and Synthetic Vision Conference, SPIE 14th Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls*, Vol. 4023, 2000, pp. 162-170.

Ruffner, Woodward 2001: Ruffner, J. W., K. G. Woodward. Computer-based and web-based applications for night vision goggle training. *Proc. SPIE Vol. 4361, Helmet and Head-Mounted Displays VI*, R.J. Lewandowski; L.A. Haworth; H. J. Girolamo; C. E. Rash, 2001, pp. 148-158.

Ruffner et al.2004: Ruffner, J. W., J. D., Antonio, D.Q. Joralmon and E. Martin. Night vision goggle training technologies and situational awareness. *Proc. of . Advanced Technology Electronic Defense System (ATEDS) Conference/Tactical Situational Awareness (SA) Symposium*, San Diego, CA. 2004.

Ryer 1997: Ryer, A. *The Light Measurement Handbook*. International Light, Newburyport, MA, ISBN 0-9658356-9-3, 1997, pp. 64.

Sawaragi et al. 1985: Sawaragi, Y., H. Nakayama and T. Tanino. Theory of multiobjective optimization. Academic Press, Orlando, 1985.

Sospedra et al. 2004: Sospedra F., V. Caselles, E. Valor, C. Di Bella, C. Coll, E. Rubio. Night-time cloud cover estimation. *Int. Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No 11, 2004, pp. 2193-2205.

Steckel, Prince 2001: Steckel, R. H., J. M. Prince. Tallest in the World: Native Americans of the Great Plains in the Nineteenth Century. *American Economic Review*, Vol. 91, No 1, 2001, pp. 287-294.

Taha 2010: Taha, H. A. *Operations Research: An Introduction: International Edition*. Prentice Hall, 2010, 832 pages.

Task 1992: Task, H. L. Night Vision Devices and Characteristics. AGARD Lecture Series 187: Visual Problems in Night Operations, 1992, pp. 7-1 - 7-8.

Task 2001: Task, H. L. Night-vision goggle visual acuity assessment: results of an interagency test. *Proc. SPIE Helmet and Head-Mounted Displays VI*, Vol. 4361, 2001, pp. 130-137.

Turpin 2001: Turpin, T. Night Vision Goggles (NVGs) and NVG Equipment with Market Potential. Turpin Technologies, 2001, pp. 58.
ZEMAX - Optical Design Program. User's Guide, 2012.

Даниела Борисова

**УРЕДИ ЗА НОЩНО ВИЖДАНЕ
МОДЕЛИРАНЕ И ОПТИМАЛНО ПРОЕКТИРАНЕ**

Българска
Първо издание

Рецензенти:
академик *Иван Попчев*
академик *Васил Сгурев*

Редактор *Катя Пеева*
Художник на корицата *Константин Жеков*

Формат 142x197
Печатни коли 12,50

Печатница на Издателство на БАН „Проф. Марин Дринов“
1113 София, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 5

www.baspress.com

ISBN 978-954-322-821-8



Даниела Борисова е завършила Физическия факултет на Софийския университет „Св. Кл. Охридски“, специалност „Квантова електроника и лазерна техника“. През 2007 г. придобива образователната и научна степен „доктор“ по специалност „Приложение на принципите и

методите на кибернетиката в различни области на науката (техническа)“ в Института по информационни и комуникационни технологии на БАН. Има специализации в Канада, Норвегия, Албания и Чехия. Основните ѝ научни интереси са свързани с уреди за нощно виждане, моделиране, оптимизация, информационни системи, електронно обучение, уебдизайн и разработване на уеббазирани приложения.

В монографията са представени авторски изследвания в областта на уредите за нощно виждане (УНВ), работещи на принципа на усилване на светлината. Разгледани са различни типове УНВ, принципът им на действие и техните основни елементи. Направен е анализ на компонентите на тези уреди – електронно-оптичните преобразуватели и използваните оптични системи. Предложен е математически модел на уред за нощно виждане, който описва зависимостите между елементите на устройството. На базата на изведените математически зависимости е описан подход за теоретична оценка на параметрите на УНВ. Разгледаните оптимизационни модели и задачи са тествани с числени примери, основаващи се на реални данни. Монографията може да бъде полезна както за специалисти, така и за широк кръг читатели, проявяващи интерес към съвременните УНВ.

