

Abstracts of Dissertations

Institute of Information and
Communication Technologies

BULGARIAN ACADEMY OF
SCIENCES



5 / 2017



DATA INTEGRATION
FROM INTELLIGENT
SENSOR SYSTEMS

Alexander Alexandrov

ИНТЕГРИРАНЕ НА ДАННИ
ОТ ИНТЕЛИГЕНТНИ
СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ

Александър Александров

Автореферати на дисертации

Институт по информационни и
комуникационни технологии

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ISSN: 1314-6351

Поредицата „Автореферати на дисертации на Института по информационни и комуникационни технологии при Българската академия на науките“ представя в електронен формат автореферати на дисертации за получаване на научната степен „Доктор на науките“ или на образователната и научната степен „Доктор“, защитени в Института по информационни и комуникационни технологии при Българската академия на науките. Представените трудове отразяват нови научни и научно-приложни приноси в редица области на информационните и комуникационните технологии като Компютърни мрежи и архитектури, Паралелни алгоритми, Научни пресмятания, Лингвистично моделиране, Математически методи за обработка на сензорна информация, Информационни технологии в сигурността, Технологии за управление и обработка на знания, Грид-технологии и приложения, Оптимизация и вземане на решения, Обработка на сигнали и разпознаване на образи, Интелигентни системи, Информационни процеси и системи, Вградени интелигентни технологии, Йерархични системи, Комуникационни системи и услуги и др.

Редактори

Генадий Агре

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките
E-mail: agre@iinf.bas.bg

Райна Георгиева

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките
E-mail: rayna@parallel.bas.bg

Даниела Борисова

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките
E-mail: dborissova@iit.bas.bg

Настоящото издание е обект на авторско право. Всички права са запазени при превод, разпечатване, използване на илюстрации, цитирания, разпространение, възпроизвеждане на микрофилми или по други начини, както и съхранение в бази от данни на всички или част от материалите в настоящето издание. Копирането на изданието или на част от съдържанието му е разрешено само със съгласието на авторите и/или редакторите

*The series **Abstracts of Dissertations of the Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences** presents in an electronic format the abstracts of Doctor of Sciences and PhD dissertations defended in the Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences. The studies provide new original results in such areas of Information and Communication Technologies as Computer Networks and Architectures, Parallel Algorithms, Scientific Computations, Linguistic Modelling, Mathematical Methods for Sensor Data Processing, Information Technologies for Security, Technologies for Knowledge management and processing, Grid Technologies and Applications, Optimization and Decision Making, Signal Processing and Pattern Recognition, Information Processing and Systems, Intelligent Systems, Embedded Intelligent Technologies, Hierarchical Systems, Communication Systems and Services, etc.*

Editors

Gennady Agre

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences
E-mail: agre@iinf.bas.bg

Rayna Georgieva

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences
E-mail: rayna@parallel.bas.bg

Daniela Borissova

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences
E-mail: dborissova@iit.bas.bg

This work is subjected to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the materials is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, re-use of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilms or in other ways, and storage in data banks. Duplication of this work or part thereof is only permitted under the provisions of the authors and/or editor.



Abstract of PhD Thesis

DATA INTEGRATION FROM INTELLIGENT SENSOR SYSTEMS

Alexander Kirilov Alexandrov

Supervisor: Assoc. Prof. Vladimir Monov

Approved by Supervising Committee:

Prof. Dimitar Karastoyanov
Prof. Todor Stoilov
Prof. Plamen Mateev
Assoc. Prof. Rumen Trifonov
Assoc. Prof. Vladimir Monov



The PhD thesis was discussed and allowed to be defended during an extended session of the Department of Modeling and optimization at IICT-BAS, which had been held on 23th of February 2017

The defense of the PhD thesis had been held on 09th of May 2017 at 11.00 in Room 507, Block 2, IICT-BAS.

The full volume of the dissertation is 165 pages. It consists of an introduction and three chapters (p. 1-150). The list of references contains 151 titles (p. 151-165). The text of the dissertation includes 14 tables, 32 formulas and 65 figures. These lists are given at the beginning of the dissertation.

Keywords: wireless sensor system, WSN, sensor, Kalman filter, Extended Kalman filter, Central Limit Theorem, Fraser-Potter, optimization, sensor module, IEEE 802.15.4, 6LowPan, ZigBee, cluster network, WCA.

Introduction

In this thesis, the subject of research is the sensor data integration in intelligent wireless sensor networks and systems. The study is in the field of sensor data integration, based on the Kalman filtering and Fraser-Potter equation in wireless sensor networks. The aim of the research work is to develop a new methods and software algorithms for sensor data integration in intelligent sensor systems.

The above formulated goal is achieved by fulfilling the following tasks:

- development of new generation wireless sensor module (hardware and software) for local sensor data integration;
- development of method and algorithm for sensor module energy optimization;
- development of architecture and method for wireless sensor network generation;
- development of method and algorithm for decentralized sensor data integration;
- development of architecture of software platform for sensor data integration from intelligent sensor networks and systems.

1. Methodology

The research methodology uses the following fundamental scientific methods and applied developments:

Sensor data integration

- Extended Kalman filter
- Central Limit Theorem
- Fraser-Potter equation

Algorithms and communication protocols for wireless sensor networks - generation and management

- Weighted Clustering Algorithm (WCA)
- Unicast, Anycast and Broadcast Duty cycling algorithms
- 6LoWPAN protocol
- IEEE 802.15.4 ZigBee protocol

Program languages and frameworks

- Program language C
- High level program language WSDL
- Framework WSO2 Carbon SOA

1. Sensors and sensor networks

A wide variety of sensors, sensor modules (wired and wireless) and sensor networks are described in the literature.

The concept of IoT (Internet of Things), so-called “Smart sensors” are becoming more and more popular in the industry and in the lifestyle of people.

There are prerequisites for the development of next-generation sensors, sensor modules and sensor networks based on the increasingly rapid penetration of high technology and miniaturization of electronic devices.

The term "smart" sensor is now shifted by the term “intelligent” sensor defining the emergence of a new generation of sensor modules.

The “intelligent sensor” concept incorporates the structure of a smart sensor and complements it with new adaptive algorithms and functionalities inherent in expert systems. The Intelligent Sensor is able to analyze, control and adaptively manage its blocks for more efficient performance and greater productivity.

In addition to self-test and self-calibration mechanisms, intelligent sensors have enough computational power to analyze and process real-time data from their sensor blocks. These sensors have self-decision capabilities for reliability and accuracy of measured data, as well as built-in capabilities to communicate with other intelligent sensor modules to collectively solve optimization problems associated with data routing, optimization of group energy consumption sensors and more.

More and more important is the question of quantity and quality of measured data. For that reason, the intelligent algorithms for decentralized data integration are becoming more and more popular, allowing for a substantial reduction of traffic within a sensor network or system, and hence energy savings when transmitting this data.

2. Development of new generation wireless sensor module (hardware and software) for local sensor data integration.

A functional block diagram of the developed sensor module for monitoring meteorological information is shown in Figure 1.

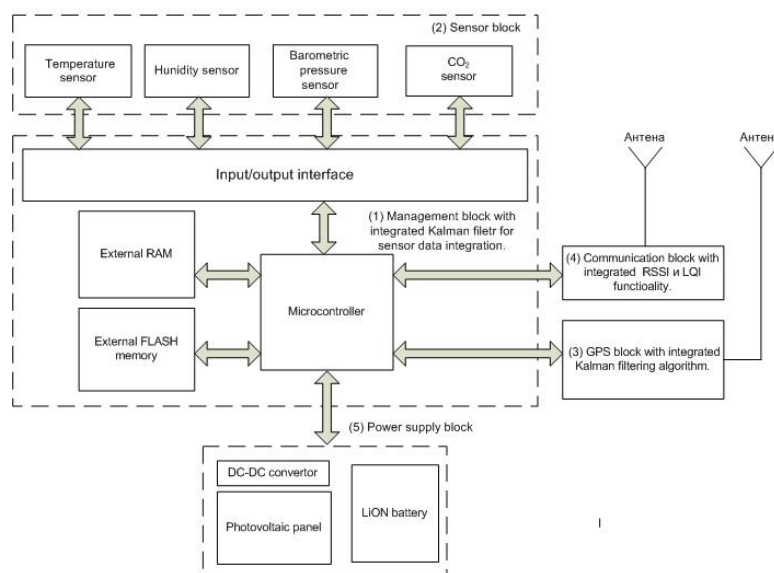


Fig.1 Block diagram of sensor module for monitoring of meteorological data.

The developed sensor module has the following features that distinguish it from other existing developments:

- control unit capable of hardware-switching on and off from the supply bus functional blocks and separate nodes such as external memory modules, the communication block, selectively one or more sensors, a GPS unit and/or a photovoltaic panel with a DC-DC controller energy saving.
- custom design developed innovative intelligent software algorithm that controls the energy consumption of blocks and nodes of the sensor unit with the possibility of anticipating the future energy consumption and making a standalone solution on this basis for the way the power, communication, sensor and GPS units are controlled.
- ability to locally integrate sensor data by using implemented in the firmware Kalman filtering methods..

3. Methods and software algorithms for wireless sensors data integration.

The third chapter of the dissertation describes the creation of an improved method and algorithm for the integration of sensor data, a method and algorithm for the formation of ad hoc data integration clusters, a method and algorithm for optimization of energy consumption during measurement and a method and algorithm for optimization of consumption during transmission of integrated data in wireless sensor networks.

The work described in Chapter 3 is based on Kalman filters, Fraser-Potter equations, the Central Limit Theorem, and other integrative and optimization methods and algorithms.

3.1 Method and software algorithm based on Kalman filter for wireless sensor network data integration.

The developed algorithm is designed to manage a set of sensors that are part of a smart cluster topology based on the 802.15.4 standard. Each sensor node is equipped with battery based power source with battery capacity control and GPS coordinates, temperature, humidity and atmospheric pressure sensors. For the development and testing of the algorithm, the solar module of the sensor module is turned off to obtain reliable data about the net power consumption of the module in different modes of operation.

The communication between the nodes and the cluster coordinator is performed by the communication block with an integrated ZigBee protocol. The primary processing of the sensor data is done by the microcontroller built into the sensor module.

Each cluster consists of sensor nodes and a cluster head (CH-cluster head) as shown in Fig. 2:

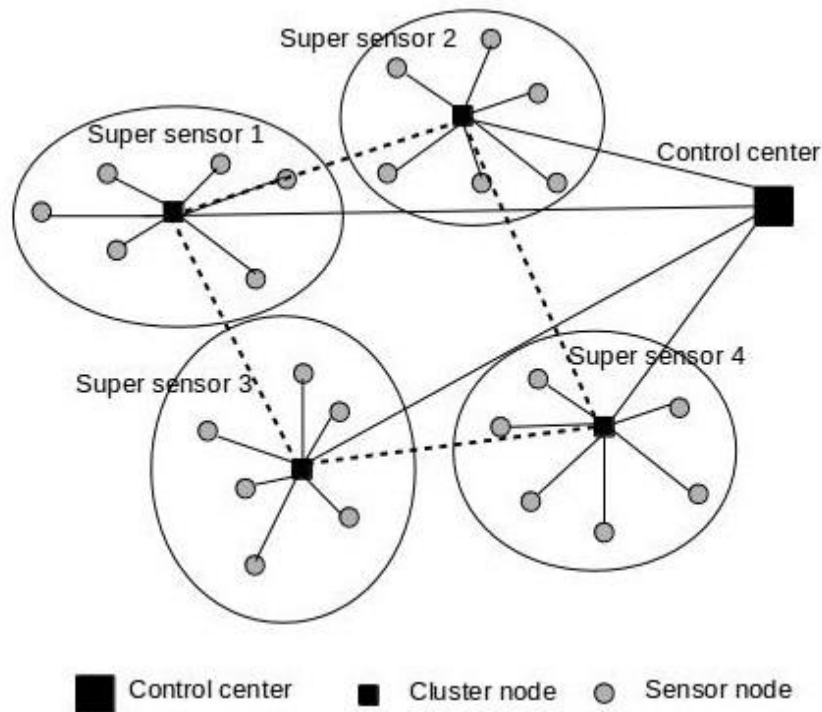


Fig. 2 Cluster network topology for sensor data integration.

The developed method and algorithm for sensor data integration, groups the sensor nodes from a network cluster into a group called a super-sensor. The energy of the super-sensor is the sum of the energy of all the sensor nodes in it.

The distance between two super sensors is the maximum distance between two sensor nodes belonging to different clusters of the network.

The process of decentralized integration of sensor data is realized within a "super-sensor".

The first step of the sensor data integration process is realized in the sensing modules by the Extended Kalman filter method.

Figure 3 illustrates the prediction and correction process using the Kalman filter method.

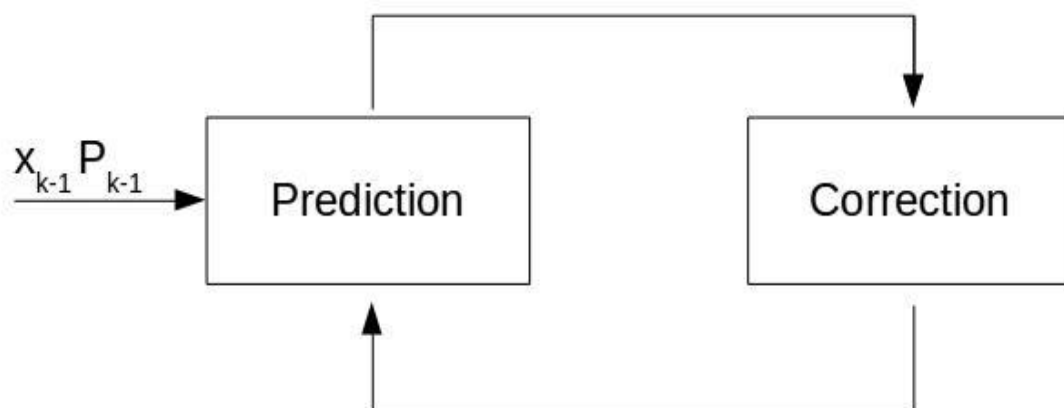


Fig. 3 Kalman filtering prediction and correction process

The prediction phase starts with the initializing assumption \hat{x}_{k-1} and the covariant vector P_{k-1} and is realized with the equations:

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k + Cw_k \quad (1)$$

$$z_k = H_k x_k + D_k v_k \quad (2)$$

where \hat{x}_k is the predicted value, A is a matrix of process transition, B is an input matrix, C is transient matrix of noise, u_k is a defined input value, w_k defines the level of noise, z_k is the observation vector, v_k is a variable describing the measured noise, H_k is a matrix of the observation vector z_k and D_k is a matrix describing the influence of measurement noise.

The measurement correction adjusts the predicted value by the actual measurement for that time interval.

During the development of the software algorithm in this dissertation, the focus is on the measurement update process.

For this purpose, we apply a modification of the Kalman filter known in the literature [32] as Extended Kalman filter.

The equations describing the prediction and correction process in the Extended Kalman Filter are shown below:

$$G_k = \frac{P_k H_k}{H_k P_k H_k^t + R_k} \quad (3)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + G_k (z_k - H_k \hat{x}_{k-1}) \quad (4)$$

$$P_k = (1 - G_k H_k) \cdot P_{k-1} \quad (5)$$

In these expressions G_k is so called Kalman coefficient, P_k is the covariance vector of the error, H_k is a matrix of the observation vector z_k and R_k is a covariate matrix.

The initialization phase of Kalman's extended filter begins with Kalman's calculation G_k formula (3). The next step is getting the real measurement value and based on the value that this measurement is generated by the prediction for the next state by adding a correction (formula 4).

The final step is to calculate the future error of the next measurement by formula (5).

This recursive principle is one of the most important features of the Kalman filter, requiring minimal computational resources for the software implementation of the algorithm. In practice, the integration of Kalman filter method data is realized by recursively generating a correction for a future measurement based on a previous measurement.

The sensing module of which is implemented and tested the developed algorithm is described in Chapter 2 of the dissertation.

Immediately upon completing the processing cycle of the measurements made, the data integrated at the first level in the sensor module is sent to the cluster coordinator, where is realized the second level integration of the sensor data with input parameters \hat{x}_1 to \hat{x}_6 .

The second step of the integration process, realized in the cluster coordinator is illustrated on fig. 4

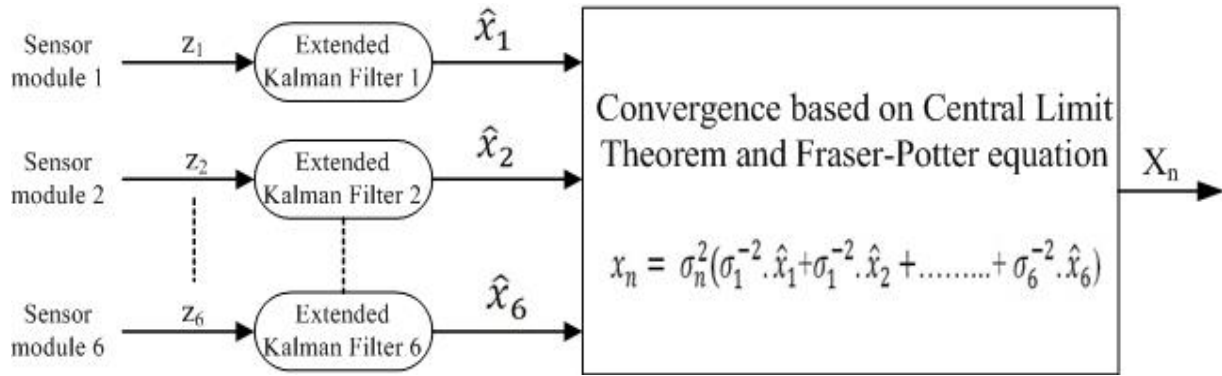


Fig. 4 Sensor data integration process in the cluster coordinator

Based on these input parameters, a criterion based on the Central Limit Theorem and the Fraser-Potter equation for flattening smoothing is formed.

$$x_n = \sigma_n^2 (\sigma_1^{-2} \cdot \hat{x}_1 + \sigma_1^{-2} \cdot \hat{x}_2 + \dots + \sigma_6^{-2} \cdot \hat{x}_6) \quad (6)$$

where

$$\sigma_n^2 = (\sigma_1^{-2} + \sigma_1^{-2} + \dots + \sigma_6^{-2}) \quad (7)$$

is a variation of the combined prediction of the measured value.

The software solution of the data integration algorithm is implemented on C++ for sensors of the sensor module described in chapter 2 of the dissertation:

- Texas Instruments HDC1080 sensor for temperature and humidity measurement
- BOSH BMP280 barometric pressure sensor

Developed software libraries implement data integration using the Kalman filter method. Integrated data is sent as a measurement vector, including GPS data from the current location of the sensor module.

By default, all sensors are in low-state (sleep) mode and are activated only at the time of measurement.

Also in the sensor module the firmware realize power supply analysis algorithm, enabling the sensor block to shut down for a certain amount of time to maintain the communication capabilities of the sensor module as a whole.

The developed software libraries allow the unification of the sensing data measurement and the integration algorithm to implement them in various sensor modules.

3.2 Method and software algorithm for ad hoc cluster generation in wireless sensor networks.

The current development is based on the so-called WCA (Weighted Clustering Algorithm) and builds on it in the phase of analysis of the neighboring of the sensor module communication devices and other sensors and the formation of this base an ad hoc cluster base.

The algorithm starts in 3 successive phases: the discovery phase, the assigning phase, and the status monitoring phase.

Discovery phase

In the detection phase, a process is initiated to detect neighboring nodes by sending broadcast messages. Based on the received responses with GPS coordinates information and the received signal strength of the Received Strength Signal Indicator (RSSI) module, the corresponding sensor node is analyzed and the so-called weight factor for each sensor module [6] is calculated. The weight factor for each module is calculated based on the number of adjacent modules that can be reached with one hop and the strength of the signal received by the sensor module.

Unlike the original WCA algorithm, a new, key to the scientific input parameter that characterizes the Link Quality Indicator (LQI) link between two adjacent nodes is introduced. In the research of a real wireless sensor network it turned out that, not always the distance between two nodes is proportional to the quality of the communication between them. In a number of cases, the communication quality level between two sensor nodes located at relatively large distance is more reliable and consumes less energy in data exchange than the connection between nodes located in close proximity to each other but separated by radio shield or falling into a high-noise area.

The parameters on the basis of which the weight coefficient K_{weight} of each N_i node is calculated are as follows:

- C_i characterizes the number of neighboring nodes within the N_i range

$$C_i = |N(i)| = \sum_{j \in N(i), i \neq j} \{ \text{dist}(i, j) < S_{range} \} \quad (8)$$

The expression $\text{dist}(i, j)$ characterizes the distance between two nodes within range of communication.

S_{range} is a coefficient that characterizes the maximum distance at which a communications node can exchange data with another node of the network and depends on the particular hardware implementation of the network node. D_i characterizes the average sum of the distances between the node N_i and the neighboring nodes j .

For each node D_i is calculated according to [1]. [2]

$$D_i = \frac{1}{C_i} \sum_{j \in N(i)} \{ \text{dist}(i, j) \} \quad (9)$$

- M_i is a coefficient characterizing the mobility of a network node, i.e. the probability that a network node will change its location over time.

$$M_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{(X_t - X_{t-1})^2 + (Y_t - Y_{t-1})^2} \quad (10)$$

where (X_t, Y_t) и (X_{t-1}, Y_{t-1}) are the GPS coordinates of the node t and $t-1$.

- $E_{current}$ which characterizes the instantaneous amount of energy available on the N_i node.

Generally

$$E_{current} = E_i - (E_{rx} \cdot t_1 + E_{tx} \cdot t_2 + E_{comp} \cdot t_3 + E_{sensor} \cdot t_4) \quad (11)$$

where:

E_i - is the initial amount of energy the node has;

E_{rx} - the amount of energy that is consumed in the node receiving mode;
 E_{tx} - the amount of energy that is consumed in the node transmission mode;
 E_{comp} - the amount of energy consumed by the microcontroller cluster management unit;
 E_{sensor} - the amount of energy that is consumed by the node location sensors;
 t_1 - t_4 - are the time intervals through which each unit of a node consumes energy (E_{rx} , E_{tx} , E_{comp} и E_{sensor}) ;

- K_{i_link} - Characterizing the quality of the connection between two nodes. This coefficient is calculated by the formula:

$$K_{i_link} = K_{tx_j} + \frac{1}{C_i} \sum_{i=0}^j K_{i_RSSI} \quad (12)$$

where K_{tx} is a coefficient reporting the power of the radiation emitted by the node N_i , a K_{RSSI} is a coefficient reporting the the received signal strength, emitted from an adjacent node N_j .

The coefficient K_{i_link} value, report the quality of the communication environment between two nodes and allows optimization of the cluster creation process.

The weight coefficient of the N_i node is calculated according to the formula:

$$P_i = \omega_1 C_i + \omega_2 D_i + \omega_3 M_i + \omega_4 E_{i_current} + \omega_5 K_{i_link} \quad (13)$$

where $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 = 1$.

The correction coefficients $\omega_1 \div \omega_5$ are selected in accordance with the specific requirements of forming an ad hoc cluster. For example, for cluster sensor networks where no mobility of nodes is envisaged, it is selected $\omega_3 = 0$ и correction coefficient ω_5 value between 0.5 and 0.7 .

The discovery phase ends with calculating the weighting coefficients of all nodes.

Phase of assigning roles

In this phase, a process of selecting cluster network coordinators is carried out. On the basis of calculated weighting coefficients for each node, the node with the **highest** weighting coefficient is selected for a cluster coordinator and the associated nodes are excluded from the selection procedure of other cluster coordinators. (In the original WCA algorithm, it is acceptable to choose the cluster coordinator based on the smallest weighting factor).

Monitoring phase

The monitoring of wireless sensing networks with ad hoc functionality is an important phase of the operation of these networks. On the basis of monitoring results of a sensor network, if necessary, adaptive reconfiguration of the sensor network and redistribution of the roles of the communication nodes is performed. [116]

The monitoring phase mainly analyzes 5 situations leading to adaptive reconfiguration:

- exhaustion of the battery at a node near a critical minimum;
- adding a new sensor module to the network
- moving a sensor module (a typical situation for mobile networks);
- sensor module failure;
- critical link quality change (LQ - Link quality) between an existing cluster coordinator and

cluster nodes;

Monitoring is carried out at two levels - at local and global (global monitoring) level. A similar approach is used by Da Silva et al. [38] and Benahmed et al. [56].

Each cluster coordinator CH_i will periodically run a monitoring procedure on the nodes belonging to its cluster by sending a special START_MON broadcasting message consisting of 3 packages (START_MON1 and START_MON2

Each node i ($i \in j$) of the cluster i upon receiving the first packet START_MON starts its procedure for calculating the connection parameters as follows:

- the number of packets sent from CH_i to n_i and the time interval between them

$$\Delta t = [t_0, t_1]: N_{bp_Send}(n_i, \Delta t);$$

- the delay between two successive packages:

$$Delay(n_i, t) = Arrival_{p_{Ti}} - Arrival_{p_{Ti-1}} \quad (14);$$

Δt is a time interval $[t_0, t_1]$;

$Er(n_i, t_0)$ - the power level of the node n_i in time t_0 ;

$Er(n_i, t_1)$ - the power level of the node n_i in time t_1 ;

$Ec(n_i, \Delta t)$ - The energy consumed by the node n_i for time Δt ;

After each calculation of the communication and energy node parameters n_i sends its status to the cluster coordinator CH_i.

The status of each node contains the following information:

$$I_d, N_{bp_send}(n_i, \Delta t); N_{bp_received}(n_i, \Delta t); Delay(n_i, t); E_c(n_i, \Delta t)$$

The energy E_c consumed by the node n_i to accept the packages and send a confirmation is

$$E_c(n_i, \Delta t) = E_r(n_i, t_0) - E_r(n_i, t_1) \quad (15);$$

Messages received as a response from START_MON are stored in the CHI cluster coordinator memory for subsequent analysis.

If a node n_i did not respond to three consecutive START_MON cycles he is considered to be missing.

After 3 consecutive START_MON cycles, each cluster coordinator CH_i sends the results of the local monitoring of the PAN coordinator of the network or to the control server, depending on the specific implementation of the sensor network.

Contribution summary

The contribution of the thesis can be summarized as follows.

1. An innovative sensor module (hardware and system software) with wireless communication capability is being developed for monitoring and intelligent meteorological data processing. The module is in process of patenting. A key advantage of the developed sensor module is its ability to self-regenerate by the energy generated by a built-in solar panel and specialized hardware and software solutions with developed adaptive algorithms. These algorithms with the characteristics of a mini expert system allow the module to independently decide when and how to change its the communication parameters and/or change the operating mode of different hardware blocks based on locally integrated sensor data and communication traffic analysis to minimize the energy costs and improving the reliability of integrated data.

2. An innovative concept, architecture and a new software algorithm have been developed to

form an ad hoc intelligent wireless sensor network with cluster topology. Based on the so-called WCA (Weighted Clustering Algorithm) defined in previous publications has developed a new improved algorithm, characterized by functionality leading to clusters with priority for the quality of interconnection between nodes, and not by the distance basis between nodes, which significantly reduces the risk of a network breakdown when one of the formed cluster coordinators fails.

In recognition of the classic WCA algorithm, a new K_{i_link} parameter has been introduced to measure the distance between two neighboring nodes and the quality of the communication between them. An additional feature of the new algorithm is the criterion for selecting a cluster coordinator. As opposed to the WCA, the most weighting node is chosen here as a cluster coordinator to reduce the number of CH nodes and increase the number of cluster members. These innovations significantly improve the performance of the cluster coordinator selection and clustering algorithm on ad hoc wireless sensing networks, and subsequently enable the packet routing process to be substantially optimized between the cluster coordinators and the PAN coordinator.

The new software algorithm has been successfully tested in a real experimental wireless sensor network based on the wireless sensor module described in Chapter 2.

3. A SOA (Service Oriented Architecture) software platform is developed to integrate intelligent sensor networks and systems. The platform provides software services to manage heterogeneous sensor networks or a group of intelligent sensor modules in a sensor system that provides the necessary interoperability. The advantage of the developed services is that they enable easy integration of heterogeneous sensor networks and creation of data views for application developers.

The platform is hardware-independent, and service-based developers can easily access data from any smart sensor or network sensor network without needing information about the type and topology of the sensor network or the type of the used communication protocols.

The process of data integration is transparent and geographically independent. Through the open architecture architecture of the SOA based software platform, it is possible to build virtualization services and virtual sensor networks.

Bibliography

- 1 A. Dahane, N. Berrached, and B. Kechar, "Energy Efficient and Safe Weighted Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks," *Procedia Computer Science*, vol. 34, pp. 63-70, 2014.
- 2 A. Duda, G. Harniss, Y. Haddad and G. Bernard, "Estimating Global Time in Distributed Systems," *Proceedings of the 7th International Conference on Distributed Computing Systems*, Berlin, Vol. 18, 1987.
- 3 A. Zabian, A. Ibrahim, and F. Al-Kalani, "Dynamic head cluster election algorithm for clustered Ad-Hoc networks," *Journal of Computer Science*, vol. 4, no. 1, pp. 42-50, 2008.
- 4 A. Zabian, A. Ibrahim, and F. Al-Kalani, "Head clustering election algorithm for Ad-Hoc networks," *Journal of Computer Science*, vol. 5, no. 1, pp. 42-50, 2009.
- 5 B. Poirier, R. Roy and M. Dagenais, "Accurate Offline Synchronization of Distributed Traces Using Kernel-Level Events," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, Vol. 44, No. 3, July 2010, pp. 75-87.
- 6 Bacchanalian, H., Toggle, 2003. Migrating to a service oriented architecture, IBM Developer Works, pp. 117-121
- 7 Blasch, E., Steinberg, A., Das, S., Llinas, J., Chong, C.-Y., Kessler, O., Waltz, E., White, F. (2013) "Revisiting the JDL model for information Exploitation," *International Conference on Information Fusion*.
- 8 C. Brown, H. Durrant-Whyte, J. Leonard, B. Rao, and B. Steer, "Distributed data fusion using Kalman filtering: a robotics application," in *Data, Fusion in Robotics and Machine Intelligence*, M. A. Abidi and R. C. Gonzalez, Eds., pp. 267–309, 1992.
- 9 D. L. Hall and J. Llinas, "An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 1, pp. 6–23, 1997. *An Introduction to the Kalman Filter*, Greg Welch and Gary Bishop, Department of Computer Science University of North Carolina, UNC-Chapel Hill, TR 95-041, July 24, 2006
- 10 Delicato, F., Pires, P., Pinnez, L., Fernando, L., L. da Costa, L., 2003. A flexible web service based architecture for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 23rd International Conference on, Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 730–735.
- 11 E. P. Blasch and S. Plano, "JDL level 5 fusion model "user refinement" issues and applications in group tracking," in *Proceedings of the Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XI*, pp. 270–279, April 2002.
- 12 EN. Huh, and TH. Hai, in *Lightweight Intrusion Detection for Wireless Sensor Networks*, Rijeka, Croatia: INTECH Open Access Publisher, 2011.
- 13 G. Mulligan, "The 6LoWPAN architecture", in *Proc. 4Th workshop on Embedded networked sensors, EmNets '07,2007*, p. 78–82, USA. ACM.
- 14 Gil-Martinez-Abarca, J., Macia-Perez, J.F., Marcos- Jorquera, D., Gilart-Iglesias, V., 2006. Wake on lan over internet as web service, In *Proceedings of the ETFA '06 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 1261 – 1268.

- 15 Grosky, W., Kansal, A., Nath, S., Liu, J., Zhao, F., 2007. Senseweb: An infrastructure for shared sensing. *Multimedia, IEEE*, 14(4), pp. 8–13
- 16 H. F. Durrant-Whyte and M. Stevens, “Data fusion in decentralized sensing networks,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Information Fusion*, pp. 302–307, Montreal, Canada, 2001.
- 17 I. Samaras, G. Hassapis, and J. Gialelis, “A modified DPWS protocol stack for 6LoWPAN-based wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 209–217, Feb. 2013.
- 18 J. L. Crowley and Y. Demazeau *Principles and Techniques for Sensor Data Fusion Signal Processing*, Volume 32, Issues 1–2, May 1993, Pages 5–27
- 19 J. Llinas, C. Bowman, G. Rogova, A. Steinberg, E. Waltz, and F. White, “Revisiting the JDL data fusion model II,” *Technical Report*, DTIC Document, 2004.
- 20 J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks”, in *Proc. 2nd intl conf. on embedded networked sensor systems, SenSys’04*, 2004, p. 95–107, USA. ACM.
- 21 Kushalnagar, N., Montenegro, G., Schumacher, C.: IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs): Overview, assumptions, problem statement, and goals. RFC4919, Internet Engineering Task Force (2007)
- 22 L. Chen, M. J. Wainwright, M. Cetin, and A. S. Willsky, “Data association based on optimization in graphical models with application to sensor networks,” *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 43, no. 9-10, pp. 1114–1113, 2006
- 23 M. Chatterjee, SK. Das, and D. Turgut, "A weight based distributed clustering algorithm for mobile ad hoc networks," in *Proceedings of the 7th International Conference on High Performance Computing (HiPC2000)*, Bangalore, India, 2000; pp. 511-521.
- 24 M. Lehsaini, H. Guyennet, and M. Feham, "An efficient cluster-based self-organisation algorithm for wireless sensor networks," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 7, no. 1, pp. 85-94, 2010.
- 25 Madden, S.R., Franklin, M.J. , Hellerstein, J.M., Hong, W., 2011. TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Trans. Database Syst.*, 30(1), pp. 122–173.
- 26 Moeller, R., Sleman, A., 2008. Wireless networking services for implementation of ambient intelligence at home. In *Proceedings of the 7-th International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems, ICCDCS*, pp. 1–5.
- 27 Mulligan, G., 2007. The 6LoWPAN architecture, In *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors, EmNets '07*, ACM.
- 28 OASIS Standard, 2009. Devices profile for web services (DPWS) version 1.1.
- 29 Priyantha, N.B., Kansal, A., Goraczko, M., Zhao, F., 2008. Tiny web services: design and implementation of interoperable and evaluable sensor networks. In *SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, pp. 253–266, ACM, New York.

- 30 R. C. Luo, C.-C. Yih, and K. L. Su, "Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions," *IEEE Sensors Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 107–119, 2002.
- 31 R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960.
- 32 S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems," in *Proceedings of the International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls*, vol. 3, 1997.
- 33 S. Sasidharan, F. Pianegiani, and D. Macii, "A protocol performance comparison in modular WSNs for data center server monitoring," in *Intl Symp. on Industrial Embedded Systems (SIES)*, July 2010, pp. 213–216. IEEE.
- 34 Samaras, I.K., Gialelis, J.V., Hassapis, G.D., 2009. Integrating wireless sensor networks into enterprise information systems by using web services. In *SENSORCOMM '09: Proceedings of the Third International Conference*, pp. 785-791
- 35 Shelby, Z., Bormann, C., 2011. 6LoWPAN: The wireless embedded Internet - Part 1: Why 6LoWPAN?, *EE Times*.
- 36 Shelby, Z., Bormann, C.: *6LoWPAN—The Wireless Embedded Internet*. Wiley, New York (2009) Wang, R.C., Chang, R.S., Chao, H.C.: *Internetworking between ZigBee/802.15.4 and IPv6/802.3*
- 37 SOAP Specifications -World Wide Web Consortium:
<http://www.w3.org/TR/2001/WD-soap12-20010709/>.
- 38 Svelte, A. T., 2010. *Cloud Computing: A Practical Approach*. McGraw Hill.
- 39 TH. Hai, EN. Huh, and M. Jo, "A lightweight intrusion detection framework for wireless sensor networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 10, no. 4, pp. 559-572, 2010.
- 40 Z. A. Akhand and M. A. Bauer, *Managing Quality-of-Service in Internet Applications Using Differentiated Services*, *Journal of Network and Systems Management*, Vol. 10, No. 1, 2002.



АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователна и научна степен “доктор” по
научна специалност “Информатика“

ИНТЕГРИРАНЕ НА ДАННИ ОТ ИНТЕЛИГЕНТНИ СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ

Александър Кирилов Александров

Ръководител: Доц. Владимир Монов

Научно жури:

Проф. Димитър Карастоянов

Проф. Пламен Матеев

Проф. Тодор Нешков

Доц. Румен Трифонов

Доц. Владимир Монов



Институт по информационни и
комуникационни технологии

Секция „Моделиране и оптимизация“

Обща характеристика на дисертационния труд

Актуалност на темата и обзор на основните резултати в областта

IT технологиите са навсякъде в нашето съвремие и именно те определят очертанията на нашето бъдеще. Сензорите и сензорните мрежи са неотделима част от живота на човечеството. В много области без сензори човешкият живот е подложен на опасност а в други без тях е невъзможно съществуването на цели индустрии и научни изследвания.

През последните няколко години безжичните сензорни мрежи провокират интереса на специалистите с големия брой теоретични и практически предизвикателства, свързани с приложните им възможности. Безжичната им архитектура позволява лесно измерване на физични величини като температура, влажност, налягане и др., както и интеграция към вече съществуващи измервателни системи. Тяхната гъвкавост, възможностите за математически анализ и обработка на данните, както и лесният подход за програмиране предоставят възможност за изграждане на цялостни решения за мониторинг на технологични процеси. Така например, безжичните сензори могат да служат за дистанционни измерване на величини в случаи, когато стандартните способности за комуникация по кабели или директно измерване са неефективни и скъпи. В случаите на измерване на параметри на физични и химични величини на големи площи, е по-надеждно и икономически изгодно използването на безжични сензорни мрежи вместо класическа проводникова мрежа. Всяка област на приложение на сензорите е неизбежно свързана с огромни потоци от информация генерирана от сензори. Обработката на тази информация съхранявана в огромни хранилища за данни, т.н. big data е една от първостепенните задачи, чието решаване е на дневен ред.

Интегрирането на данни от сензори и сензорни мрежи е проблем, решаването на който е актуално в много области на живота като се започне от рутинните медицински изследвания на човешкото тяло и се стигне до данните свързани с климатичните промени на планетата.

Състояние на изследвания проблем

В литературата е описано голямо многообразие от сензори, сензорни модули (жични и безжични) и сензорни мрежи.

Концепцията на IoT (Internet of things) и т.н. умни (smart) сензори добива все по-голяма популярност и навлиза все повече в промишлеността и бита на хората.

Налице са предпоставки за разработка на следващо поколение сензори, сензорни модули и сензорни мрежи базирани на все по-бързото навлизане на високите технологии и миниатюризацията на електронните устройства.

Терминът умен (smart) сензор вече се измества от термина интелигентен (intelligent) сензор дефиниращ появата на ново поколение сензорни модули.

Концепцията за интелигентният сензор включва в себе си структурата на умен (smart) сензор и я допълва с нови адаптивни алгоритми и функционалности присъщи на експертните системи. Интелигентният сензор е в състояние да анализира, контролира и адаптивно да управлява своите блокове с цел по-ефективна работа и по-голяма производителност. Освен с механизми за self-test и self-calibration интелигентните сензори разполагат с достатъчна изчислителна мощ да анализират и обработват в реално време данните от сензорните си блокове. Тези сензори разполагат с функционалност за самостоятелно вземане на решения свързани с надеждността и точността на измерените данни, както и вградени възможности да комуникират с други интелигентни сензорни модули с цел колективно решаване на оптимизационни проблеми свързани с маршрутизацията на данните, оптимизация на консумацията на енергия на група сензори и др.

Все по-основен е въпроса касаещ не количеството а качеството на измерените данни. Поради тази причина все по-голяма популярност добива вграждането в интелигентните сензори на алгоритми за децентрализирано интегриране на данни позволяващо съществено редуциране на трафика в рамките на една сензорна мрежа или система, а от там и икономия на енергия при предаване на тези данни.

Интегрирането на данните получени от обединени в сензорна система сензорни мрежи позволяват решение на широк кръг задачи, като глобален анализ на климатичните промени в краткосрочен и дългосрочен план, анализ на пътния трафик в големи мегаполиси като Ню Йорк, Москва, Мексико и др.

Цел и задачи на дисертационния труд

Цел на изследването е разработка на хардуер, методи, алгоритми и софтуерни средства за интегриране на данни от интелигентни сензорни системи от мрежи.

Поставените задачи на база дефинираната цел на изследването са:

1. Разработка на безжичен сензорен модул за мониторинг и локално интегриране на данни за околната среда.
2. Разработка на алгоритъм за децентрализирано интегриране на сензорни данни.
3. Разработка на метод и алгоритъм за оптимизация на консумация на енергия от безжичен сензорен модул на база анализ на трафика от интегрирани данни в мрежата.
4. Разработка на архитектура и подход за генериране на интелигентна безжична сензорна мрежа на база модули за локално интегриране на сензорни данни.
5. Разработка на архитектура на софтуерна платформа за интегриране на данни от интелигентни сензорни мрежи и системи.

Методология на изследването

Методологията на настоящите изследвания се основава на фундаментални и приложни разработки от следните области:

Интегриране на данни

- Разширен филтър на Калман (Extended Kalman filter)
- Централна Гранична Теорема (Central Limit Theorem)
- Уравнения на Fraser-Potter

Алгоритми и протоколи за формиране и управление на безжични сензорни мрежи

- Weighted Clustering Algorithm (WCA)
- Unicast, Anycast and Broadcast Duty cycling algorithms
- 6LoWPAN протокол
- IEEE 802.15.4 ZigBee протокол

Програмни езици и платформи

- Програмен език C
- Език от високо ниво WSDL
- Framework WSO2 Carbon SOA

Апробация на резултатите

Резултати, включени в дисертацията са докладвани на:

- Third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing – ICTRS'14, 26-27 June 2014, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg
- 7-th IEEE Conference Intelligent Systems, Warsaw Poland, September 24-28, 2014
- Международна конференция “Автоматика и информатика”, 1-3 Октомври 2014, София
- International conference “Robotics, Automation and Mechatronics” RAM 2014, November 5-7 2014, Sofia
- Eleventh International Conference Flexible Querying Answering Systems 2015 October 26-28 2015, Warsaw, Poland

Списък на публикациите по дисертацията

1. Alexandrov, A., V. Monov, Implementation of a service oriented architecture in smart sensor systems integration platform, Proc. of the Third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing – ICTRS'14, 26-27 June 2014, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg, DOI 10.5220/0005422101140120, ISBN 978-989-758-033-8, pp. 114-118, 2014.
2. Alexandrov, A., V. Monov, ZigBee smart sensor system with distributed data processing, Proc. of the 7-th IEEE Conference Intelligent Systems, Warsaw Poland, Vol. 2, pp. 259-268, September 24-28, 2014., In: Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer Vol. 323, ISBN 978-3-319-11309-8, DOI: 10.1007/978-3-319-11310-4_23.
3. Alexander Alexandrov " POWER OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR PERIMETER DEFENCE WIRELESS SEISMIC SENSORS" Institute of Defence, Proc. 7th International Scientific Conference HEMUS 2014 May 29-30, Plovdiv. Съдържанието на статията е класифицирана информация.
4. Alexander Alexandrov, "Comparative analysis of IEEE 802.15.4 based communication protocols used in wireless intelligent sensor systems" Proc. of International conference RAM 2014 November 5-7 Sofia p.51-54
5. Alexander Alexandrov. "AD HOC Kalman filter based fusion algorithm for real-time Wireless Sensor Data Integration", Proc. of the Eleventh International Conference Flexible Querying Answering Systems 2015 October 26-28 2015, Warsaw, Poland Springer Vol.400, ISBN 978-3-319-26153-9, DOI: 10.100/978-3-319-26154-6, pp.151-160
6. Заявка за патент за изобретение No. 112400/17.10.2016 „Метод и устройство за интегриране на данни от метеорологични сензори“, А. Александров, В. Монон
ПАТЕНТНО ВЕДОМСТВО НА РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

Забелязани цитирания на трудове по дисертацията

1. Публикация No. 1 от списъка с публикации по темата на дисертацията

Alexandrov, A., V. Monov, Implementation of a service oriented architecture in smart sensor systems integration platform, Proc. of the Third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing – ICTRS'14, 26-27 June 2014, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg, DOI 10.5220/0005422101140120, ISBN 978-989-758-033-8, pp. 114-118, 2014.

е цитирана в:

Atanasova, T. “Smart buildings, fog computing”, IoT, Proc. of the Int. Conference „Telecommunications, Informatics, Energy and Management TIEM'15“, Bitola, Republic of Macedonia, University of Telecommunication and posts, Vol. II, 2015 pp. 110-114, ISSN 2367-8437.

2. Публикация No. 2 от списъка с публикации по темата на дисертацията

Alexandrov, A., V. Monov, ZigBee smart sensor system with distributed data processing, Proc. of the 7-th IEEE Conference Intelligent Systems, Warsaw Poland, Vol. 2, pp. 259-268, September 24-28, 2014., In: Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer Vol. 323, ISBN 978-3-319-11309-8, DOI: 10.1007/978-3-319-11310-4_23.

е цитирана в:

Doukovska, L., S. Koynov. Possibilities for applications of the model-based predictive control in thermal power plants, Proceedings of the International Conference Robotics, Automation and Mechatronics RAM 2014, 5-7 November 2014, Sofia, Bulgaria, pp.5-11, ISSN 1314-4634.

Основно съдържание на дисертационния труд

По същество дисертационният труд се състои от увод, 3 глави описващи етапите на решаване на проблеми свързани с интегриране на данни от хетерогенни безжични сензорни мрежи и системи, заключение и списък на използваната литература.

Дисертационният труд се състои от 165 страници и съдържа 14 таблици, 32 формули и 65 фигури. Списъкът на използваната литература включва 151 литературни източника.

В увода е обоснована актуалността от проблема за интегриране на данни от сензорни мрежи и системи от мрежи.

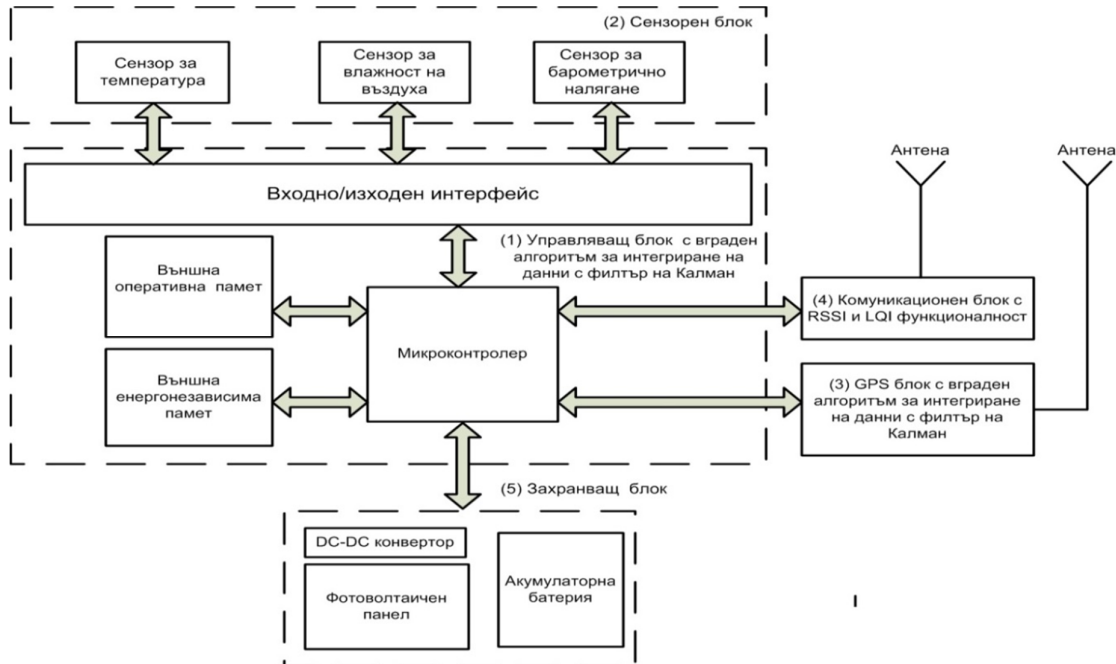
Увод Сензори и сензорни мрежи

В увода е включен и литературен обзор върху съществуващото състояние на сензорните мрежови технологии и интегрирането на данни. Направен е опит за класификация на основните видове сензори използвани в сензорните мрежи и тяхната специфика при интегриране на данни от тях. Специално внимание е обърнато на съществуващите методи за интегриране на сензорни данни (Sensor Data Fusion) при безжичните сензорни мрежи и по-специално на сензорни мрежи изградени по стандарт IEEE 802.15.4

Глава 1 Разработка на сензорен модул за мониторинг и интелигентна обработка на метеорологични данни и възможност за безжична комуникация.

Първа глава е посветена на създаването (хардуерна и софтуерна архитектура) на иновативен безжичен интелигентен сензорен модул с относително голяма процесорна мощност за изпълнение на задачи свързани с локално интегриране на сензорни данни и вграждане на адаптивни алгоритми за управление.

Функционална блок схема на разработения сензорен модул за мониторинг на метеорологична информация е показана на фиг.1



Фиг. 1 Блок схема на сензорен модул за мониторинг на метеорологична информация

Хардуерната част на сензорния модул е реализирана на база едночипов микроконтролер на Texas Instruments USA MSP430F449 с добавена външна оперативна и флаш памет, сензорен блок състоящ се от сензори за температура, влажност на въздуха и барометрично налягане, безжичен комуникационен блок работещ по стандарт IEEE802.15.4 и поддържащ протоколи ZigBee RF4CE и 6LowPAN, GPS блок изграден на база SIRFStarIV GSD4e и интегрирани в корпуса мини соларен панел и LiON акумулаторна батерия.

Системната архитектура на база на която е изграден фърмуера на сензорния модул включва специално разработени софтуерни модули за управление на хранващия блок, софтуерен модул превключващ работата на сензорния модул в режим FFD (Full Functional device) и RFD (Reduced Functional Device) съгласно стандарт IEEE 802.15.4, софтуерен модул за управление на работата на комуникационния блок и софтуерен модул за управление на сензорния блок.

В резултат на направения избор на електронни компоненти, хардуерна и системна архитектура е създаден експериментален сензорен модул за мониторинг и локално интегриране на метеорологични данни.

Разработеният сензорен модул притежава следните характеристики, отличаващи го от други съществуващи разработки:

1. Управляващ блок с възможност хардуерно да включва и изключва от хранващата шина функционални блокове и отделни възли, като външни за

микроконтролера памети, комуникационния блок, избирателно един или няколко сензора, GPS блока и/или фотоволтаичния панел с DC-DC контролера с цел икономия на консумирана енергия.

2. Специално разработен иновативен интелигентен софтуерен алгоритъм управляващ консумацията на енергия от блоковете и възлите на сензорния блок с възможност за предвиждане на консумацията на енергия за бъдещ период и вземаш самостоятелно решение на тази база за начина на управление на захранващия, комуникационния, сензорния и GPS блокове.

3. Възможност за локално интегриране на сензорни данни чрез използване на имплементирани във фърмуера филтри на Калман.

На базата на реализираната разработка на безжичен сензорен модул за локално интегриране на сензорни данни е направена заявка за патент No.112400/17.10.2016.

На снимки 1 и 2 са показани модификации на разработения сензорен модул



Сн.1 и 2 Експериментални безжични сензорни модули на база разработка от глава 2

Глава 2 Методи и алгоритми за интегриране на данни от интелигентни безжични сензорни мрежи и системи.

Втора глава на дисертационният труд описва създаването на подобрени метод и алгоритъм за интегриране на сензорни данни, метод и алгоритъм за формиране на ad hoc клъстери за интегриране на данни, метод и алгоритъм за оптимизация на консумацията на енергия по време на измерване и метод и алгоритъм за оптимизация на консумацията по време на предаване на интегрирани данни в безжични сензорни мрежи.

Описаните в Глава 2 разработки са реализирани на база филтри на Калман, уравнения на Fraser-Potter, Централната Гранична Теорема и други методи и алгоритми за интегриране и оптимизация.

3.1 Метод и софтуерен алгоритъм базиран на филтър на Калман за интегриране на данни от интелигентни безжични сензорни мрежи.

За целите на разработката и тестването на метода и алгоритъма е използван сензорния модул, описан в глава 2 на настоящия дисертационен труд.

Разделът описва нов софтуерен алгоритъм, базиран на филтри на Калман за интегриране на сензорни данни, предназначен за имплементиране интелигентни безжични сензорни мрежи (IWSN).

Основните резултати, представени в настоящия раздел са отразени в публикация 6 – „Alexander Alexandrov. "AD HOC Kalman filter based fusion algorithm for real-time Wireless Sensor Data Integration", Proc. of the Eleventh International Conference Flexible Querying Answering Systems 2015“ **SPRINGER Vol.400**, ISBN 978-3-319-26153-9

Предложеният алгоритъм е предназначен за интегриране в интелигентни безжични сензорни системи за мониторинг на данни.

Интегрирането на данни от няколко източника се дефинира като *data fusion* като в настоящият дисертационен труд се използва българският термин *интегриране на данни*. В литературата Holl и J.Linas [19][7] дефинират процеса на интегриране на данни като: "техники комбиниращи данни от няколко сензора и свързана с тях информация от бази данни за да се постигне по-голяма точност и достоверност в сравнение с данните получени от един сензор". Интегрирането на сензорни данни е „процес чрез който данните от няколко различни сензора се синтезират за да се изчисли и генерират повече данни, отколкото един сензор може да измери"[8]. В общност интегрирането на сензорни данни е софтуерен процес комбиниращ и интегриращ по специален алгоритъм данните от група сензори за да се подобри надеждността и достоверността на измерените данни.

Интегрирането на данни от няколко сензори коригира отклоненията и колебанията на измерените данни и редуцира съществено потока от данни, който се трансферира през мрежовите възли към приложението за съхранение и последваща обработка и анализ.

Това е важен процес в много приложения, например при анализа на загубите на енергия в различни области [3], [5]. Основното предизвикателство в интегрирането на сензорни данни е ефективно разделяне на полезния сигнал от шума придружаващ измерването.

В практиката са разпространени няколко техники за интегриране и агрегиране на данни от сензори. В зависимост от местоположението на процеса на интегриране на сензорни данни обработката на сензорни данни може да бъде централизирана, децентрализирана и смесена.

Терминът централизиран срещу децентрализиран процес се отнася до мястото, където се извършва интегрирането на данни.

При централизираното интегриране на сензорни данни, сензорните модули препращат всички измерени данни до централен център за обработка, общ за цялата мрежа или група от мрежи, където данните се анализират и обработват с алгоритми за интегриране и анализ.

При децентрализираното интегриране на сензорни данни, сензорните модули или група от сензорни модули поемат пълната отговорност за процеса на интегриране на данни. "В този случай, всеки сензор или платформа може да се разглежда като един интелигентен актив разполагащ в някаква степен със самостоятелност при вземането на решения." [8] В реалните сензорни мрежи съществуват множество комбинации от централизирани и децентрализирани системи.

Настоящата разработка се фокусира върху създаване на архитектура на йерархична децентрализирана система за интегриране на данни базирана на поетапно интегриране на данните чрез филтър на Калман. Интегрирането на данни се извършва локално в сензорни модули, състоящи се от сензори за температура, влажност и атмосферното налягане и микропроцесорен блок за обработка на данни. Сензорните модули са обединени във формата на клъстери и на базата на всеки клъстер се формира т.н. „супер сензор“. В клъстерния координатор на този „супер-сензор“ се извършва втори процес на интегриране на сензорни данни. Крайният етап на интегриране на данни е в изнесена извън сензорната мрежа, SOA базирана софтуерна платформа с функционалност за интегриране на данни на ниво сензорни мрежи и системи.

Преходни модели

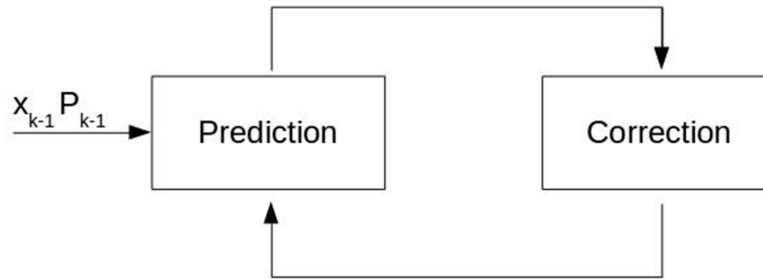
По принцип уравненията при филтъра на Калман се делят на две основни категории:

- уравнения за актуализация по време
- уравнения за актуализиране на измерване.

Уравненията за актуализация по време са отговорни за предсказване (във времето) на текущото състояние и за оценка на грешката за следващия интервал от време.

Уравненията за актуализиране на измерване са отговорни за т.н. обратна връзка т.е. за включване на данните от ново измерване в априорната оценка за корекция на данните от следващото измерване [9].

Уравненията за актуализация по време могат да се разглеждат като уравнения за предсказване на състоянието, докато уравненията за актуализация на измерване могат да се разглеждат като уравнения за корекция на измерването. Фигура 2 илюстрира процеса на предсказване и корекция по метода на филтъра на Калман.



Фиг.2 Процес на предсказване и корекция по метода на филтъра на Калман

Фазата на предсказване стартира с инициализиращото предположение \hat{x}_{k-1} и ковариантният вектор P_{k-1} и се реализира с уравненията:

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k + Cw_k \quad (1)$$

$$z_k = H_k x_k + D_k v_k \quad (2)$$

където \hat{x}_k предсказаната стойност, A е матрица на преходното състояние на процеса, B е входна матрица, C е преходна матрица на шума, u_k е дефинирана входна стойност, w_k дефинира нивото на шум, z_k е т.н. вектор на наблюдение (observation vector), v_k е променлива описваща измервания шум, H_k е матрица на вектора на наблюдение z_k и D_k е матрица описваща влиянието на шума при измерването.

Корекцията на измерването коригира предсказаната стойност чрез актуалното измерване за този времеви интервал.

Математическият апарат на филтъра на Калман е описан подробно в литературата [30][31][32].

При разработката на софтуерния алгоритъм в настоящия дисертационен труд фокусът е основно към процеса на актуализация на измерването.

За целта прилагаме модификация на филтъра на Калман познат в литературата [32] като разширен филтър на Калман (Extended Kalman filter). Уравненията описващи процеса на предсказване и корекция при разширения филтър на Калман са показани по-долу:

$$G_k = \frac{P_k H_k}{H_k P_k H_k^T + R_k} \quad (3)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + G_k (z_k - H_k \hat{x}_{k-1}) \quad (4)$$

$$P_k = (1 - G_k H_k) \cdot P_k \quad (5)$$

При тези изрази G_k е т.н. коефициент на Калман, P_k е ковариантния вектор на грешката, H_k е матрица на вектора на наблюдение z_k и R_k е ковариационна матрица.

Инициализиращата фаза при разширения филтър на Калман започва с изчисляване на коефициента на Калман G_k (формула 3). Следващата стъпка е получаване на стойността на реално измерване и на база на стойността това измерване да се генерира предсказание за следващото състояние чрез добавяне на корекция (формула 4). Последната стъпка е изчисляване на бъдещата грешката на следващото измерване чрез формула (5).

Този рекурсивен принцип е една от най-съществените особености на филтъра на Калман, изискващ минимални изчислителни ресурси за софтуерната реализация на алгоритъма. На практика интегрирането на данни по метода на филтъра на Калман се реализира чрез рекурсивно генериране на корекция на бъдещо измерване на база на предходно измерване.

В разглежданите уравнения всяка измерените грешки в ковариантната матрица R_k може да се измери преди стартиране на процеса на интегриране на данни по метода на филтъра на Калман. На практика в настоящата разработка софтуерният алгоритъм предвижда няколко off-line измервания преди стартиране на процеса с цел да се дефинира вариацията на измерената грешка.

Във всички случаи разработеният софтуерен алгоритъм предвижда модификация на параметъра R_k . Може да се отбележи че в случаите където R_k е константа и двете вариращи стойности - ковариантната грешка P_k и коефициента на Kalman G_k се стабилизират относително бързо около някаква стойност. При този случай е предвидено параметъра R_k да се прекомпилира чрез стартиране на филтъра преди започване на реалното измерване.

При разработката на софтуерният алгоритъм, базиран на разширения филтър на Калман са взети предвид редица съществуващи разработки подобряващи производителността на работа на алгоритъма.

Последните изследвания касаещи интегрирането на данни по метода на филтъра на Калман са концентрирани основно на специфичните особености на пространствено разпределените безжични сензори [9][31][32] и относително ограничената им способност за измерване и комуникация[30]. Поради редица причини тези изследвания са фокусирани основно на анализ на оптимални стратегии на интегриране на данни и алгоритми, увеличаващи производителността на дадена сензорна мрежа без да се вземат в пред вид ограничения капацитет на захранване на тези модули

Предишните изследвания могат да се разделят основно в две групи:

- алгоритми за интегриране на данни с цел увеличаване на обхвата на измерване
- алгоритми за интегриране на данни с цел повишаване на производителността.

Тези две групи разработки са описани по-долу.

Редица изследвания [16][8][22] увеличават покритието на сензорите чрез разработка на алгоритми за апроксимиране на резултатите на пространствено разпределени сензори [31][32]. Друга група алгоритми [9] са проектирани с цел оптимизиране на обхванатата от сензорите площ - т.е. покриване на максимална площ с минимален брой сензори. Други изследвания [8][31] за разработка на алгоритми за увеличаване на покритието са основани на вероятностни сензорни модели. Експерименталните резултати на [7] показват, как може да се разшири обхвата на група пространствено разпределени сензори чрез групирането им и интегриране на измерените от тях данни.

Теоретични разработки изследващи покритието на големи безжични мрежи са публикувани в [8][9][31][32]. Оптимизацията базирана на интегриране на данни на ad-hoc безжични мрежи е разгледана в [11].

Текущата разработка разглежда основно оптимизирането на процеса на интегриране на данни от сензори с ограничен енергиен ресурс.

В контраст от публикациите по-горе, основната цел на настоящата разработка е да подобри надеждността на измерените от сензорите данни, да оптимизира на тази база обхванатата от сензорите площ и в същото време да минимизира консумацията на енергия от сензорните модули. Реализацията на тези цели може да се постигне на база оптимизиране на интервала на измерване чрез анализ на матрицата H_k на вектора на наблюдение z_k , при процеса на интегриране на данни чрез разширения филтър на Калман.

Описание на алгоритъма

Една от основните задачи на този алгоритъм е подобряване на съотношението на сигнал / шум на измерваните величини и подобряване на надеждността на измерените данни.

Паралелно с процеса на интегриране на данни се анализира матрицата на вектора на наблюдение и по определени критерии, базирани на стойността на предвижданията от

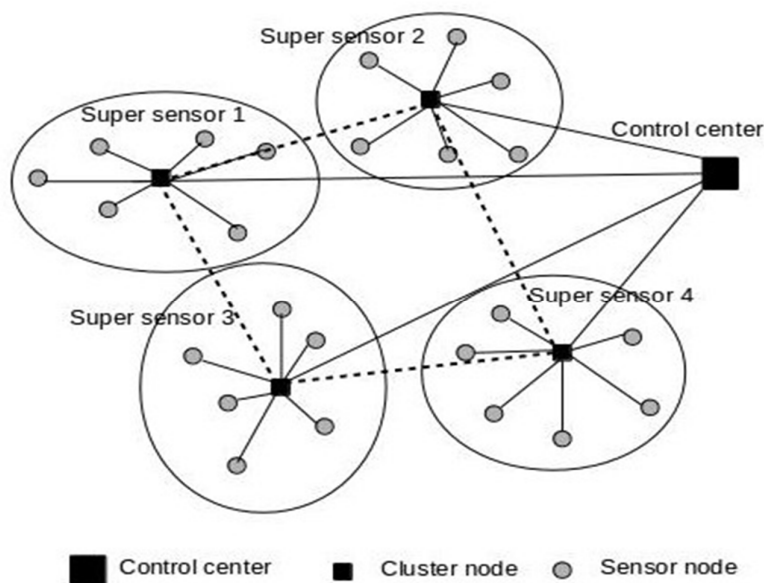
филтъра на Калман стойности и реално измерените стойности от сензорите се управлява интервала от време между две измервания на сензори. Целта е оптимизиране на консумацията на енергия при запазване на относително ниско ниво на грешката при измерване.

Сензорният модул на който се имплементира и тества разработения алгоритъм е описан в глава 2 на дисертацията. Това е интелигентна безжичен сензорен модул базиран на комуникационният протокол 802.15.4 ZigBee, разполагащ със сензори за измерване на температура, влажност на въздуха и барометрично налягане, както и с GPS сензор за определяне на местоположението на сензорния модул. Разглежданият сензорен модул е базиран на микроконтролер с достатъчно памет и изчислителна мощ, позволяващи интелигентно управление на всички вградени в сензорния блок сензори.

Разработеният алгоритъм е проектиран да управлява група от сензори, които са част от интелигентна сензорна мрежа с кълстерна топология изградена на база на стандарта 802.15.4. Всеки сензорен възел е оборудван с батерийно захранване с контрол на капацитета на батерията и сензори за GPS координати, температура, влажност и атмосферното налягане. За нуждите на разработката и тестването на алгоритъма соларния блок на сензорния модул е изключен за получаване на достоверни данни относно нетната консумация на енергия от модула в различни режими на работа.

Комуникацията между възлите и кълстерния координатор се извършва от комуникационния блок с интегриран ZigBee протокол. Първичната обработка на сензорните данни се извършва от вградените в сензорния модул микроконтролер.

Всеки кълстер се състои от сензорни възли и кълстерен координатор (CH-cluster head) както е показано на фиг. 3



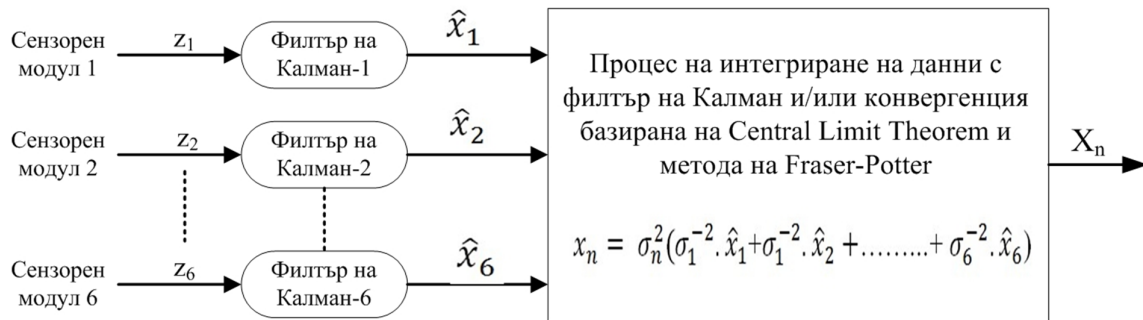
Фиг. 3 Интелигентна сензорна мрежа за интегриране на данни с кълстерна топология

Разработеният алгоритъм за интегриране на сензорни данни групира сензорните възли от един клъстер на мрежата в група наречена "супер-сензор". Енергията на супер-сензора е сумата от енергията на всички сензорни възли в нея.

Разстоянието между два супер сензора е максималното разстояние между два сензорни възела, принадлежащи към различни клъстери на мрежата .

Процесът на децентрализираното интегриране на сензорни данни се реализира в рамките на един "супер-сензор".

Както е показано на фиг. 4, първата степен на процеса на интегриране на сензорни данни се реализира в сензорните модули по метода на разширения филтър на Калман. Непосредствено след завършване на цикъла на обработка на направените измервания, интегрираните на първо ниво данни се изпращат на клъстерния координатор, където се извършва второ ниво интегриране на сензорни данни с входни параметри \hat{x}_1 до \hat{x}_6



Фиг.4 Процес на интегриране на сензорни данни в клъстерния координатор

На базата на тези входни параметри се формира критерий x_n базиран на Централната Гранична Теорема (Central Limit Theorem) и метода на Fraser-Potter за изглаждане с фиксирани интервали.

$$x_n = \sigma_n^2 (\sigma_1^{-2} \cdot \hat{x}_1 + \sigma_1^{-2} \cdot \hat{x}_2 + \dots + \sigma_6^{-2} \cdot \hat{x}_6) \quad (6)$$

където

$$\sigma_n^2 = (\sigma_1^{-2} + \sigma_1^{-2} + \dots + \sigma_6^{-2}) \quad (7)$$

е вариация на комбинираното предвиждане на измерената стойност.

Софтуерното решение на алгоритъма за интегриране на данни е реализирано на C++ за сензорите на сензорния модул описан в глава 3 на дисертацията:

- сензор за измерване на температура и влажност HDC1080 на Texas Instruments

- сензор за барометрично налягане BMP280 на BOSH

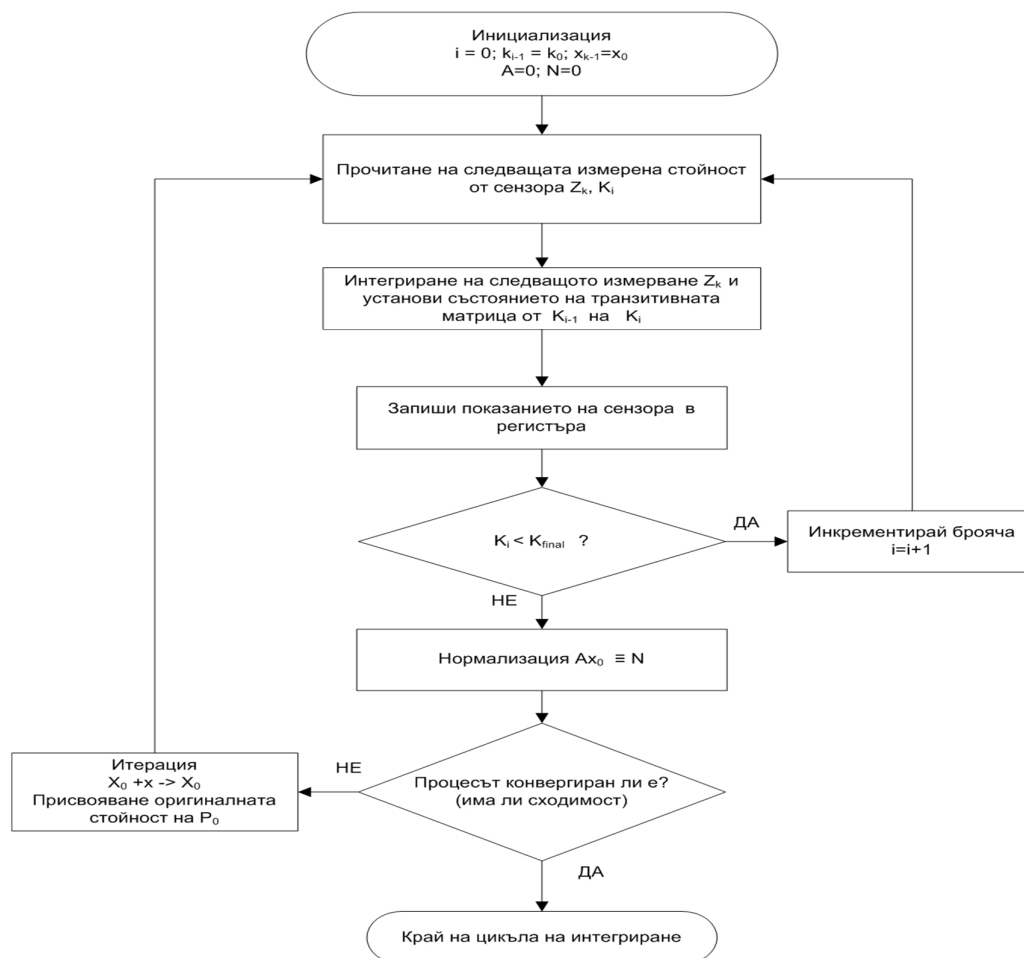
Разработените софтуерни библиотеки реализират интегриране на данни по метода на филтъра на Калман. Интегрираните данни се изпращат във вид на вектор на измерването, включващ GPS данни от текущото местоположение на сензорния модул.

По подразбиране всички сензори се намират в low-state (sleep) режим и се активират само в момента на извършване на измерването.

Във фърмуера на сензорния модул е предвиден и алгоритъм на анализ на капацитета на хранящия блок, позволяващ сензорният блок да се изключи за определен интервал от време с цел запазване на комуникационните възможности на сензорния модул като цяло.

Разработените софтуерни библиотеки позволяват унифициране на алгоритъма за измерване и интегриране на сензорни данни с цел имплементирането му в различни сензорни модули.

Блок-схемата на алгоритъма е показана на фиг.5



Фиг.5 Блок схема на алгоритъма за интегриране на сензорни данни.

3.2 Метод и алгоритъм за формиране на ad hoc клъстер за интегриране на данни в безжична сензорна мрежа

За целите на разработката и тестването на метода и алгоритъма е използван сензорния модул, описан в глава 2 на настоящия дисертационен труд.

Текущата разработка е базирана на т.н. WCA алгоритъм (Weighted Clustering Algorithm) и го надгражда във фазата на анализ на съседните за сензорния модул комуникационни устройства и други сензори и формиране на тази база ad hoc cluster.

Алгоритъмът WCA е базиран на идеи предложени от M.Chatterjee et al. [23] A.Zabian et al. [3] и M. Lehsaini et al[24].

В настоящият дисертационен труд оригиналната версия на алгоритъма е променена и подобрена с въвеждане на нови параметри и уравнения, отразяващи качеството на връзката при комуникация между съседни възли.

Основната идея на предлаганият подобрен метод и алгоритъм е ad hoc формиране на клъстери с висока степен на надеждност, като данните от сензорните модули формиращи тези клъстери да се интегрират обособено на следващо, по-високо ниво.

При стартиране на алгоритъма за създаване на ad hoc клъстер в процесорния блок са заложили следните предварителни условия:

- всички сензорни модули комуникират един с друг на един и същ честотен канал. В режим ad hoc клъстеринг не се допуска сензорния модул да превключва на други честотни канали освен основния, предварително дефиниран във фърмуера на сензорния модул.
- всеки сензорен модул предварително е определил своите GPS координати чрез активиране на GPS сензора си.
- всеки сензорен модул предварително е определил моментното си енергийно ниво чрез вградения датчик за нивото на батерията.
- при формирането на клъстера се допуска да има само един клъстерен координатор СН (Cluster Head)
- в процеса на избор на клъстерен координатор на мрежата се допуска всеки сензор да система комуникира със своите съседи директно.

Алгоритъмът стартира в 3 последователни фази: фаза на откриване (discovery phase), фаза на присвояване на роли и фаза на мониторинг на състоянието.

Фаза на откриване

Във фазата на откриване се стартира процес на откриване на съседни възли чрез изпращане на broadcast съобщения. На база получените отговори с информация за GPS

координатите и силата на измерения от модула RSSI (Received Strength Signal Indicator) приет радиосигнал, на отговарящия сензорен възел се прави анализ и се калкулира т.н коефициент на тегло за всеки сензорен модул [6]. Коефициентът на тегло за всеки модул се изчислява на база брой съседни модули, които могат да се достигнат с един хоп и силата на приетия от сензорния модул сигнал.

За разлика от оригиналният WCA алгоритъм се въвежда нов, ключов за научния принос параметър, характеризиращ качеството на връзката LQI (Link Quality Indicator) между два съседни възела. При направените изследвания на реална безжична сензорна мрежа се оказва че, не винаги разстоянието между два възела е пропорционално на качеството на комуникацията между тях. В редица случаи връзката между два сензорни възела намиращи се на относително голямо разстояние един от друг е по-надеждна и изразходва по-малко енергия при обмен на данни в сравнение с връзката между възли намиращи се в непосредствена близост един от друг, но разделени от радио екранираща преграда или попадащи в зона с голям радиощум.

Параметрите въз основа на които се изчислява коефициентът на тегло K_{weight} на всеки сензорен възел N_i са следните:

- C_i характеризира броя на съседните възли намиращи се в обсега на възел N_i

$$C_i = |N(i)| = \sum_{j \in N(i), i \neq j} \{ \text{dist}(i, j) < S_{range} \} \quad (8)$$

изразът $\text{dist}(i, j)$ характеризира дистанцията между два възела намиращи се в обсега на комуникация.

S_{range} е коефициент характеризиращ максималното разстояние на което комуникационен възел може да обменя данни с друг възел от мрежата и зависи от конкретната хардуерна имплементация на мрежовия възел.

- D_i характеризиращ средната сума от дистанциите между възел N_i и съседните възли j .

За всеки възел D_i се изчислява съгласно [1]. [2]

$$D_i = \frac{1}{C_i} \sum_{j \in N(i)} \{ \text{dist}(i, j) \} \quad (9)$$

- M_i е коефициент характеризиращ мобилността на даден мрежов възел т.е. вероятността даден мрежов възел да променя своето местоположение във времето T .

$$M_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{(X_t - X_{t-1})^2 + (Y_t - Y_{t-1})^2} \quad (10)$$

където е (X_t, Y_t) и (X_{t-1}, Y_{t-1}) са GPS координатите на възела в момент t и $t-1$.

- $E_{current}$ характеризиращ моментното количество енергия с което разполага възел N_i

В общия случай

$$E_{\text{current}} = E_i - (E_{\text{rx}} \cdot t_1 + E_{\text{tx}} \cdot t_2 + E_{\text{comp}} \cdot t_3 + E_{\text{sensor}} \cdot t_4) \quad (11)$$

където:

E_i е първоначалното количество енергия с което разполага възелът;

E_{rx} - количеството енергия което се изразходва в режим на приемане на възела;

E_{tx} - количеството енергия което се изразходва в режим на предаване на възела;

E_{comp} - количеството енергия което се изразходва от микроконтролерният блок за управление на дейностите по формиране на клъстер;

E_{sensor} - количеството енергия което се изразходва в от сензорите за изчисляване на местоположение на възела;

t_1 - t_4 са интервалите от време през които всеки един блоковете на възел консумира енергия (E_{rx} , E_{tx} , E_{comp} и E_{sensor});

- K_{i_link} характеризиращ качеството на връзката между два възела. Този коефициент е се изчислява по формулата:

$$K_{i_link} = K_{tx_j} + \frac{1}{C_i} \sum_{i=0}^j K_{i_RSSI} \quad (12)$$

където K_{tx} е коефициент отчитащ мощността на излъчвания от възела N_i сигнал, а K_{RSSI} е коефициент отчитащ силата на приетия сигнал излъчен от съседен възел N_j

Коефициентът K_{i_link} отчита качеството на комуникационната среда между два възела и позволява оптимизиране на процеса на създаване на клъстер.

Тегловният коефициент на възел N_i се изчислява съгласно формулата:

$$P_i = \omega_1 C_i + \omega_2 D_i + \omega_3 M_i + \omega_4 E_{i_current} + \omega_5 K_{i_link} \quad (13)$$

Където $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 = 1$. Коригиращите коефициенти $\omega_1 \div \omega_5$ се избират в съответствие конкретните изисквания на формиране на ad-hoc cluster. Например при клъстерни сензорни мрежи, където не се предвижда мобилност на възлите се избира $\omega_3 = 0$ и стойност на коригиращ коефициент ω_5 между 0.5 и 0.7

Фазата на откриване (discovery phase) завършва с изчисляване на тегловните коефициенти на всички възли.

Фаза на присвояване на роли

В тази фаза се извършва процес на избор на клъстерни координатори на мрежата. На база изчислени тегловни коефициенти на всеки възел, възелът с **най-голям** тегловен

коэффициент се избира за клъстерен координатор а свързаните с него възли се изключват от процедурата за избор на други клъстерни координатори. (В оригиналния WCA алгоритъм е прието клъстерния координатор да се избира на база най-малък тегловен коэффициент.)

След процеса на изчисляване на първия клъстерен координатор процедурата се повтаря с останалите възли, които все още не са част от вече избран клъстер до пълно изграждане на мрежата.

Фаза мониторинг

Мониторингът в безжичните сензорни мрежи с ad hoc функционалност е важна фаза от работата на тези мрежите. На база резултати от мониторинга на една сензорна мрежа при нужда се извършва адаптивно преконфигуриране на сензорната мрежа и преразпределение на ролите на комуникационните възли. [116]

Във фазата на мониторинг се анализират основно 5 ситуации водещи до адаптивно преконфигуриране:

- изчерпване на батерията на възел близо до критичен минимум;
- добавяне на нов сензорен модул в мрежата;
- преместване на сензорен модул (типична ситуация при мобилните мрежи);
- отказ на сензорен модул;
- критична промяна на качеството на връзката (LQ - Link quality) между съществуващ клъстерен координатор и възли от клъстера;

Мониторингът се извършва на две нива - на ниво клъстер (local monitoring) и на ниво мрежа (global monitoring). Подобен подход се използва от Da Silva и др. [38] и Venahmed и др. [56].

Всеки клъстерен координатор CH_i стартира периодично процедура на мониторинг към възлите принадлежащи на неговия клъстер чрез изпращане на специална поредица broadcasting съобщения START_MON състояща се от 3 пакета (START_MON1 и START_MON2

Всеки възел n_i ($i <> j$) от клъстера i при получаване на първия пакет START_MON стартира своя процедура по изчисляване на параметрите на връзката както следва:

- брой пакети изпратени от CH_i до n_i и времевия интервал между тях $\Delta t = [t_0, t]: Nbp_Send(n_i, \Delta t)$;
- закъснението между два последователни пакета:

$$Delay(n_i, t) = Arrival_{p_{Ti}} - Arrival_{p_{Ti-1}} \quad (14);$$

- енергията консумирана от възел n_i за приемане на пакетите и изпращане на потвърждение

$$E_c(n_i, \Delta t) = E_r(n_i, t_0) - E_r(n_i, t_1) \quad (15);$$

Δt е времеви интервал $[t_0, t_1]$;

$E_r(n_i, t_0)$ енергийното ниво на възел n_i във време t_0 ;

$E_r(n_i, t_1)$ енергийното ниво на възел n_i във време t_1 ;

$E_c(n_i, \Delta t)$ енергията консумирана от възела n_i за време Δt ;

След всяко изчисление на комуникационните и енергийни параметри възел n_i изпраща своя статус до клъстерния координатор CH_i .

Статусът на всеки възел съдържа следната информация:

$$I_d, N_{bp_{send}}(n_i, \Delta t); N_{bp_{received}}(n_i, \Delta t); Delay(n_i, t); E_c(n_i, \Delta t) \quad (16)$$

Съобщенията получени като отговор от $START_MON$ се записват в паметта на клъстерния координатор CH_i за последващ анализ.

- Ако даден възел n_i не отговори на три последователни цикъла на $START_MON$ той се счита за изчезнал.

След приключване на 3 последователни $START_MON$ цикъла, всеки клъстерен координатор CH_i изпраща резултатите от локалния мониторинг на PAN координатора на мрежата или до контролния сървър в зависимост от конкретната имплементация на сензорната мрежа.

3.3 Метод и алгоритъм за оптимизация на консумацията на енергия от сензорен модул по време на процеса на измерване и предаване на данни в сензорна мрежа

За целите на разработката и тестването на този метод е използван експерименталния сензорен модул описан в глава 2 на настоящия дисертационен труд.

В зависимост от целите на изследването сензорният модул може да работи в няколко режима на работа:

- периодично събиране, обработка, анализ и предаване на данни от датчиците в сензорния блок по команда от клъстерния координатор;

- събиране, обработка, анализ и предаване на данни от сензорният модул при промяна на измерените данни от някой от над предварително дефиниран праг;

- събиране, обработка, анализ и предаване на данни от сензорният модул при промяна на местоположението на сензора или при излизане на същия от предварително дефиниран район;

- комбинация от два или повече по-горе описани критерии за обработка и анализ на данни;

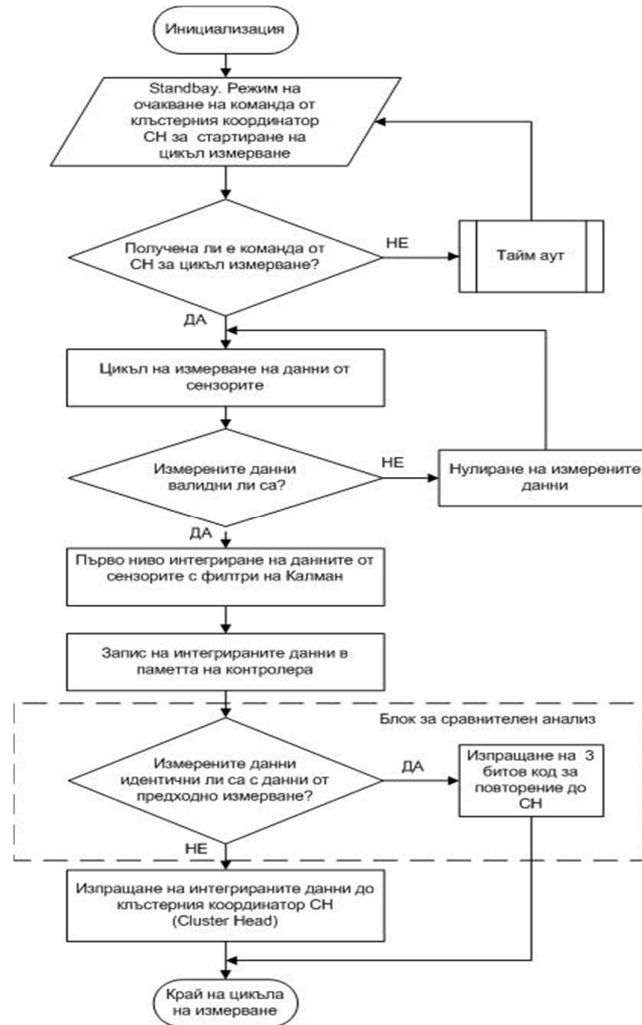
Описаните по-горе режими на работа се активират в зависимост от задачите, които са поставени на сензорния модул и позволяват гъвкаво адаптиране при промяна на околната среда в обсега на измерване на сензорите.

Предлаганият метод и алгоритъм за оптимизация на консумацията на енергия може да работи при всички режими на работа на сензорния модул, описани по-горе.

Съществена новост на разработения алгоритъм е блокът за сравнителен анализ на интегрираните данни. Въз основа на решение на този блок, сензорният модул самостоятелно решава дали да изпрати вече измерените и интегрирани данни от сензорите или да изпрати код с който да информира клъстерния координатор или контролния център, че текущо измерените данни от сензорите са идентични в рамките на инструменталната грешка с предходни изпратени до него данни от тези сензори.

Това позволява съществено редуциране на енергията, необходима на комуникационния блок на сензорния модул, подобрява автономността му и води до намаляване на комуникационния трафик и икономия на енергия от клъстерния координатор, необходима за второ ниво интегриране на данни.

Алгоритъмът на работа на интелигентния сензорен модул в режим на измерване е показан на блок диаграмата на фиг. 6



Фиг. 6 Алгоритъм на работа на интелигентния сензорен модул в режим на измерване

При стартиране (режим инициализация) модулът измерва еднократно текущите си GPS координати, калибрира датчиците от сензорния блок спрямо параметрите на околната среда и влиза в режим очакване на команда от кълъстерния координатор.

Показаният на фиг. 6 работен алгоритъм на сензорния модул стартира по подразбиране и включва следните основни етапа циклично повтарящи се след приключване на режима на инициализация:

- влизане в режим standby включващ режим циклично прослушване на радиоканала за команди от кълъстерния координатор;
- стартиране на цикъл измерване при наличие на команда от кълъстерния координатор CH (Cluster Head);

- валидиране на данните от сензорите. При наличие на грешка при измерването нулира данните от сензора и повтаря измерването;
- първи етап (ниво) на интегриране на измерените от сензорите данни с филтър на Калман;
- запис на интегрираните данни в енергонезависимата памет на сензорния модул;
- стартиране на процес на сравнителен анализ на текущо измерените и интегрирани данни с данни записани в паметта на модула от предходния цикъл измерване;

Ако направеният анализ покажи че новите данни са идентични (отклонението е в рамките на допустимата грешка) се генерира 3 битов код за идентичност на данните, който се изпраща вместо стандартния пакет с данни до клъстерния координатор.

Ако данните не са идентични, те се изпращат до клъстерния координатор за второ ниво интегриране и/или конвергенция базирана на Central Limit Theorem и уравненията на Fraser-Potter.

След приключване на цикъла по измерване, валидиране, интегриране, сравнителен анализ и изпращане на данните, сензорния модул влиза в режим standby с изключение на случаите, когато по команда от контролния център е стартирал режим за циклично измерване на данни.

3.4 Метод за оптимизация на консумацията на енергия от безжичен сензорен модул за интегриране на данни в сензорна мрежа с клъстерна топология.

За целите на разработката и тестването на метода и алгоритъма е използван сензорния модул, описан в глава 2 на настоящия дисертационен труд.

Основните резултати, представени в настоящия раздел са отразени в публикация 2 Alexandrov, A., V. Monov, ZigBee smart sensor system with distributed data processing, Proc. of the 7-th IEEE Conference Intelligent Systems, Warsaw Poland, Vol. 2, pp. 259-268, September 24-28, 2014., In: Advances in Intelligent Systems and Computing, **SPRINGER Vol. 323**, ISBN 978-3-319-11309-8, DOI: 10.1007/978-3-319-11310-4_23.

В конкретната разработка, за осигуряване на псевдо непрекъснатост на безжичните IP базирани линкове се използва т.н. duty-cycling техника [20], чрез която се постига илюзията за горните слоеве (мрежов и апликационен слой), че приемника винаги е активен и линка е в т.н. up state mode докато на практика устройството е изключено от мрежата през по-голямата част от времето.

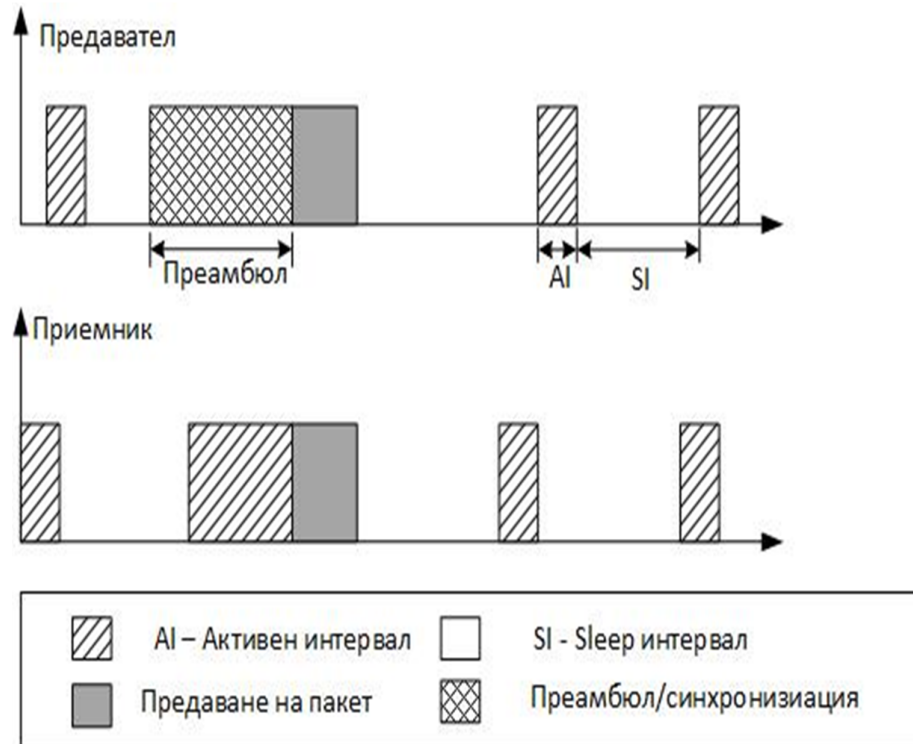
Терминът Duty cycle (Dc) дефинира съотношението в проценти между периода на активност на един електрически сигнал спрямо целият период на сигнала и математически DC се изразява чрез формулата:

$$Dc = \frac{T}{P} \cdot 100 \quad (17)$$

където DC е duty cycle в проценти, T е времето през което сигнала е активен а P е целият период на сигнала.

Освен duty-cycling техника в предлаганата разработка, експерименталната 6LoWPAN базирана сензорна система използва и т.н. Low Power Listening (LPL) технология[9], която позволява на мрежовите устройства да достъпват радио канала в напълно разпределен и асинхронен режим.

Графично представяне на LPL е показано на фиг. 7



Фиг.7 Графично представяне на технология LPL

Алгоритъмът на работа на LPL е следният: всеки сензор периодично се събужда, включва си приемника и проверява ефира за активност. Ако няма активност приемника се изключва и сензора влиза отново в спящ режим. В противен случай устройството остава активно, докато приеме пакета от данни или в случай на конфликт до края на timing цикъла.

Тъй като конфликтите между пакетите при радио комуникацията влошават енергийната ефективност на устройството, изборът на подходящ честотен канал е от

съществено значение. Въпреки това този начин на работа е успешно адаптиран и при устройствата работещи в среда с високо ниво на радио шум.

За избягване на загуба на пакети докато устройството се намира в спящ режим размерът на синхронизиращата поредица преди предаване на пакет т.н. преамбюл трябва да е толкова дълъг, колкото интервала между два последователни LPL цикъла.

Анализ и оптимизация на работата на сензорния модул с протокол 6LoWPAN в зависимост от мрежовите параметри

Съгласно описания в раздел 3.3 алгоритъм на работа сензорния модул се намира основно в sleeping mode с цел намаляване на консумацията на енергия.

При конкретната разработка основно внимание е обърнато на оптимизация на LPL параметрите на модула.

Основните LPL параметри дефиниращи един цикъл на предаване на данни са Sleep Interval (SI) и Activity Interval (AI). Както се вижда от фиг. 7 един LPL цикъл е съставен от AI следван от SI. В конкретната хардуерна имплементация параметъра SI се дефинира от програмируем таймер и поради това се приема като конфигурируем параметър подлежащ на анализ и оптимизация [20]. В същото време AI е базиран на заявките на предаващите устройства и няма възможност да се променя в големи граници. В момента, в който се излъчи пакет по време на AI, приемната страна се активира до приемане на целия пакет. Поради тази причина целият трафик в сензорната мрежа зависи от цикъла (Duty Cycle – DC) на предаващите възли в мрежата [21].

За един 6LoWPAN възел изпращащ периодично информация с определена скорост DC може да се контролира чрез оптимизация на продължителността на SI и на скоростта на предаване на пакетите [27]. При средно натоварена мрежа средният интервал между пакетите трябва да е по-голям от един LPL цикъл.

Вследствие на това един DC на една LPL мрежа може да се изчисли като:

$$Dc = \frac{AI + Tp \cdot Nppc}{AI + SI} \quad (18)$$

където AI и SI са продължителността на активния интервал (интервал на излъчване) и sleepng интервала съответно. В същата формула Tp е времето за предаване на пакета и Nppc е средният номер на пакетите в един LPL цикъл.

При средно натоварване би трябвало $Nppc \ll 1$

Съответно

$$Tps = Tpre + Tpkt + Dtx \quad (19),$$

където T_{preamble} е продължителността на преамбюла, който е еквивалентен на SI , T_{pkt} е времето за предаване на пакета а D_{tx} е хардуерно закъснение, което е около 20ms за конкретния безжичен модул описан в глава 2.

Параметърът N_{ppc} може да се получи от израза:

$$N_{\text{ppc}} = \frac{AI + SI}{T_{\text{send}}} \quad (20)$$

където T_{send} е периода на изпращания пакет.

Като заместим T_{r} и N_{ppc} във формула (18) за DC се получава израз на DC на един 6LoWPAN възел като функция на параметрите на мрежата:

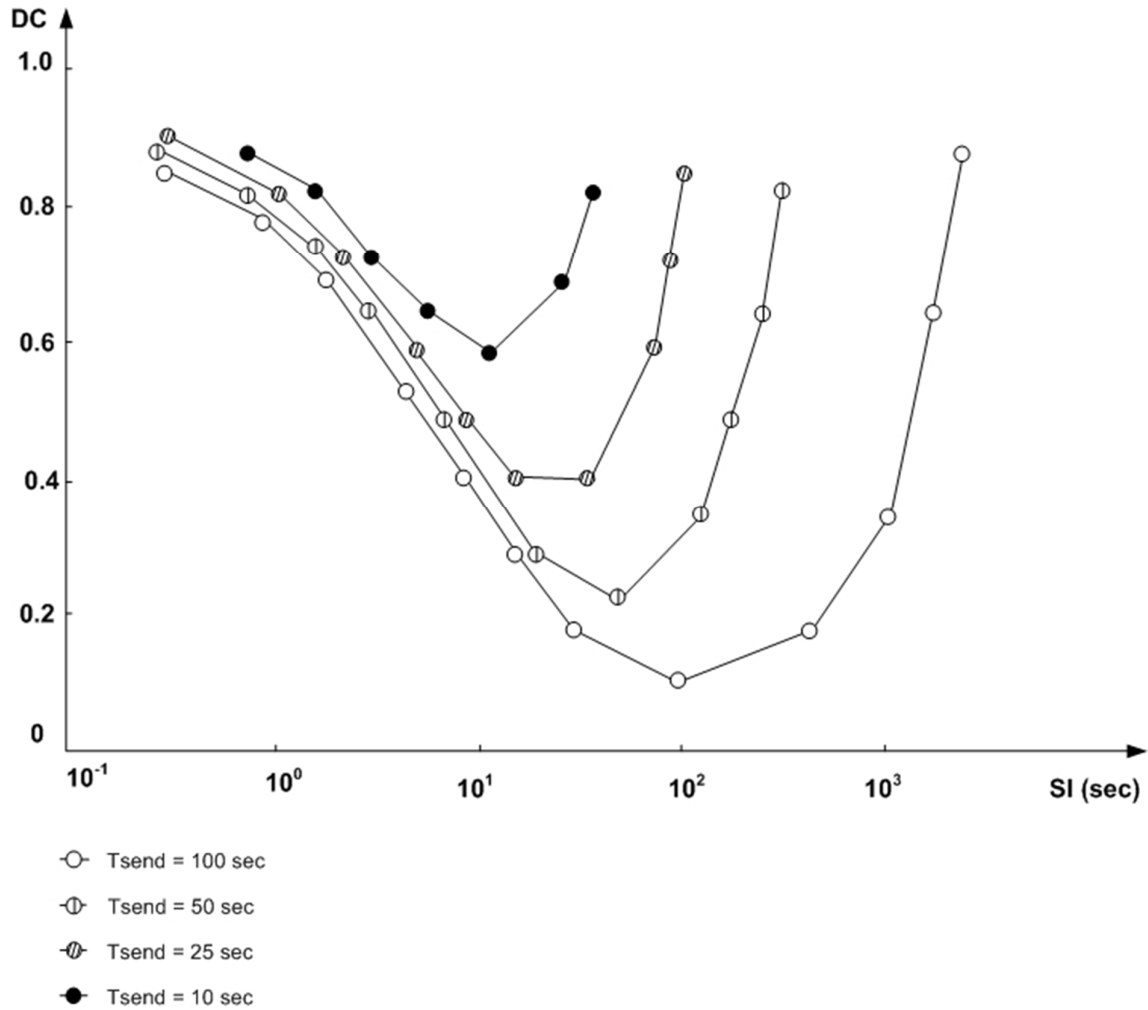
$$D_c = \frac{AI}{SI + AI} + \frac{SI + T_{\text{pkt}} + D_{\text{tx}}}{T_{\text{send}}} \quad (21)$$

След изследване на уравнение (21) се оказва се, че DC се изменя нелинейно и има глобален минимум и има възможност за оптимизация на консумираната енергия за даден сензорен модул чрез промяна на SI . Оптималният SI може да минимизира DC и може да се изчисли чрез намиране на първата производна на ф-ла 22. :

$$SI = \sqrt{AI \cdot T_{\text{send}}} - AI \quad (22)$$

Виждаме че оптимизацията на SI оказва влияние на DC , който става относително по-малък при намаляване на периода на предаване на пакети. Това показва че при LPL, когато скоростта на пакетите е голяма може да се постигне по-голяма ефективност на предаване на данни при едно и също натоварване на мрежата.

Експериментите са направени с реална сензорна мрежа с кълстерна топология, изградена от сензорните модули, описани в глава 2 . Резултатите от експеримента на описания по-горе метод за оптимизация са показани на фиг. 8



Фиг. 8 Експериментални резултати от работата на алгоритъма

Както се вижда от фиг.60 оптимизацията на SI (Sleeping Interval) оказва влияние на DC (Duty Cycle). Например при Tsend = 50sec. и SI = 82 sec. DC е от порядъка на 0.21 което представлява глобален минимум за това ниво на натоварване на мрежата. Всяка промяна на стойността на SI различна от посочената по-горе при константен Tsend води до увеличаване на DC и от там повишен разход на енергия за предаване на единица информация.

Това означава, че при всяко ниво на натоварването на мрежата в определени граници може да се намери оптимален SI при който се изразходва най-малко енергия за предаване на единица информация.

Глава 3 SOA базирана софтуерна платформа за интегриране на данни от сензорни системи.

Трета глава е разглежда архитектурата и имплементацията на софтуерна платформа за анализ и последващо интегриране на данни от сензорни мрежи и системи от мрежи.

По същество съдържанието на глава 4 е отразено в публикация No.1 „Alexandrov, A., V. Monov, Implementation of a service oriented architecture in smart sensor systems integration platform, Proc. of the Third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing – ICTRS'14, 26-27 June 2014, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg, DOI 10.5220/0005422101140120, ISBN 978-989-758-033-8, pp. 114-118, 2014.

Комбинирането на данни от различни сензорни системи дава възможност да се коригира девиацията и флукуациите на измерените данни.

Това е важен процес в много приложения, например в управлението на енергийни ресурси [6], [15]. Основното предизвикателство при интегрирането на сензорни данни е ефективно разделяне на сигнала от сензора от флукуациите и шума придружаващи измерването. В съвременните сензорни мрежи и системи интегрирането на данните играе значителна роля в процеса на обработката на данните от тях. Процесът на интегриране на данни може да включва съчетаване на сензорни данни от различни източници с цел увеличаване на надеждността и точността на получената информация.[39][40]

Основната цел на предложената платформа е ефективно интегриране на данни от хетерогенни сензорни мрежи и системи. Този въпрос вече е разглеждан в литературата, например Samaras и др. [34] и Delicato и др. [10]). Поради една или друга причина тези решения са насочени към реализация на ориентиран към услугите мидълуер (middleware), работещ директно със сензорните възли на мрежата чрез директна инсталация на ориентирани към услуги протоколни стекове като например DPWS[28][17].

На практика, основният недостатък на този подход е необходимостта от внедряване на сложен web базиран механизъм по генериране и валидиране на XML съобщения в относително маломощни като процесорна мощ и памет устройства, като сензорни модули, които са с ограничен енергиен ресурс. За да се преодолеят тези ограничения, авторите предлагат да се използват предварително дефинирани XML съобщения, което е за сметка на загубата на гъвкавост и адаптивност на предлаганата от тях софтуерна платформа. Друг основен проблем при използването на web услуги в такъв род устройства е наличие на латентност и съществена енергоемкост на решението. Priyantha и др. [29].

За разлика от горните изследвания предлаганият подход се фокусира в изграждане на мощна платформа, към която са свързани различни по вид и характер хетерогенни сензорни мрежи и системи от мрежи.

Такова решение по принцип не е ново. Съществува подобно решение разработено от Gil Martinez Abarca и др. [14], което позволява отдалечено управление на фърмуера на мрежови възли през Интернет от Kansal и др. [15]. Въпросното решение има смисъл само при peer to peer инфраструктура за обмен на сензорни данни през Интернет. Трябва да се отбележи че тези решения са подчертано универсални и поради тази причина не решават типични проблеми на безжичните сензорни мрежи, като управление на енергийни ресурси и QoS (Quality of Service) решения при обработката на сензорните данни.

Съществува решение предложено от Moeller и Sleman [25], за интегриране на безжични сензорни мрежи в други съществуващи IP базирани мрежи. Тяхната работа е насочена специално към решения на т.н. "умен" дом и в тяхното решение е разработена абстракция само на ниво единичен сензор, т.е. приложенията за да могат да комуникират с тези сензори трябва да разполагат с предварително въведена в софтуера техническа конфигурация за мрежата и адресите на сензорите,

Предлаганият подход е на ниво абстракция сензорни мрежи и системи. Това позволява приложенията обслужващи заявки да не се интересуват от конкретната имплементация на дадена мрежа или от протоколите по които комуникират сензорните модули помежду си. Този подход напълно се различава от системи тип TinyDB [25], които са проектирани за извличане на данни от сензорни мрежи, но на практика не предоставят услуги свързани с интегриране на извлечените данни и/или анализ на качеството(QoS) на получените данни. Този тип системи използват техники на събиране на данни на ниско ниво (low level techniques) и по-скоро могат да се разглеждат като функционално разширение на конкретна сензорна мрежа[34]. Поради тази причина такъв род решения са полезни само като интерфейс на конкретна сензорна мрежа за обмен на данни. Предлаганата в дисертационния труд платформа за интегриране и управление на данни, която е независима от дизайна (топология, стандарти за комуникация и др.) на сензорните мрежи свързани с нея, до голяма степен е освободена от описаните по-горе недостатъци.

Описание на архитектура на SOA-базирана софтуерна платформа за интегриране на данни от интелигентни сензорни системи.

Предлаганата софтуерна платформа за интегриране на данни от сензорни системи е базирана на SOA (Service Oriented Architecture)[37][38] и използва Apache технологии и езикът на високо ниво WSDL (Web Service Definition Language). Блоковете с услуги реализирани в софтуерната платформа са достъпни чрез използвани на стандартни интернет протоколи и по специално SOAP (Simple Object Access protocol). Част от тези услуги са новоразработени приложения, а други са реализирани само като обвивка на вече съществуващи интерфейси и протоколи за комуникация със сензорни мрежи. Всеки блок с услуги в SOA платформата може да изпълнява една или повече роли в процеса на интегриране на сензорни данни като:

Доставчик на услуга

Доставчикът на услуги е софтуерно приложение, проектирано като back end web интерфейс и осигурява достъп до информация, записана в регистъра на услугата. В зависимост от заявките за информация и/или данни, доставчикът на услуги изпраща искания за информация или необработени данни към съответните центрове за обработка и съхранение на данни. Исканията за информация към доставчика на услуги се формират чрез специално разработена спецификация на XML наречена UDDI (Universal Description Discovery and Integration) в която се дефинират адреса на центъра за информация, типа и спецификацията на исканата информация).

Потребител на услуга

Потребителят на услуга е софтуерно приложение проектирано като web client. Основната задача на това приложение е на база регистрирани типове данни да изпрати заявка за услуга към доставчика на услуги. Един потребител на услуги в зависимост от характеристиките на информацията може да изпрати заявка до един или няколко доставчика на услуги.

В предлаганата платформа за интегриране на сензорни данни, всички блокове с услуги са изградени на база протокол SOAP и и технологията RPC (Remote Procedure Call). Тези стандарти публикувани и като Recommendation ver. 1.2 на W3C (World Wide Web Consortium) през 2003г. [6] осигуряват добра междуплатформена съвместимост.

Протокол SOAP

SOAP (съкращение на Simple Object Access Protocol) е протокол за обмен на структурирана информация в изпълнение на уеб услуги в областта на компютърните мрежи. Протоколът обменя съобщения в XML формат и е базиран на протоколи от приложно ниво, най-вече на HTTP(Hypertext Transfer Protocol) и SMTP(Simple Mail Transfer Protocol).

RPC (Remote Procedure Call)

RPC е стандартизирана процедура позволяваща на една компютърна програма да се обърне към друга подпрограма или процедура, намираща се в друго адресно пространство, (например на друг компютър в споделена мрежа) без програмистът изрично да укаже параметри за това дистанционно взаимодействие. При ООР(Object Oriented Programming) RPC се нарича метод за дистанционно обръщение.

Основната цел на разработената SOA базирана софтуерна платформа е да се интегрират различни хетерогенни сензорни мрежи на базата на различен хардуер и използвани

различни комуникационни технологии в една интегрирана интелигентна сензорна система (ISSS).

Тази концепция ни позволява пълно интегриране на данните от сензорите и възможността за обмен на данни между сензорните мрежи, включени в платформата както и между интелигентни сензорни модули от различни мрежи.

Вграденият в софтуерната платформа 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) интерфейс позволява директна адресация до всеки сензорен модул, поддържащ този стандарт (специфициран в RFC6282) и пряк обмен на данни между софтуерната платформа и сензорния модул.

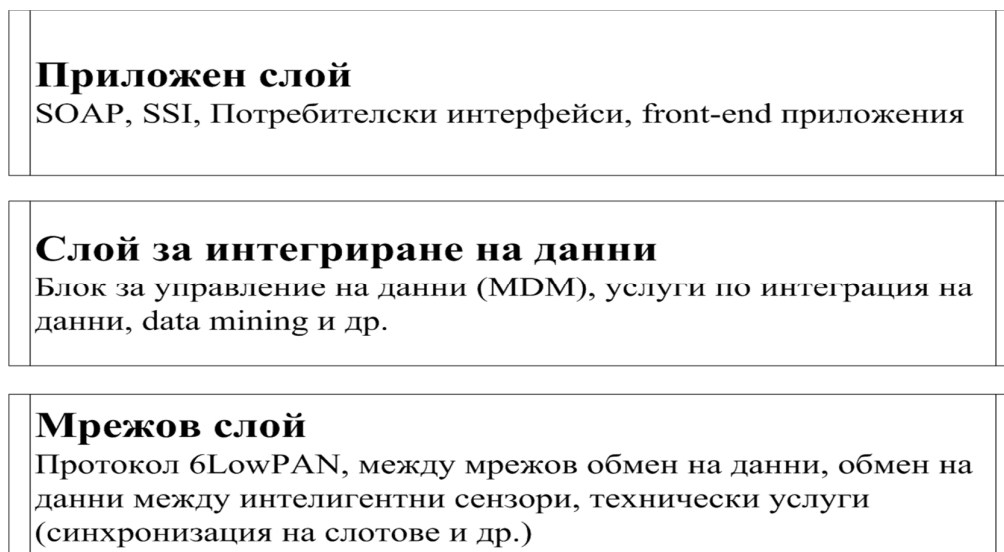
Въз основа на тази технология, разработената платформа осигурява възможност за изграждане на виртуални сензорни мрежи и системи (VSS-Virtual Sensor System).

В технологично отношение дизайнът на софтуерната разработка е базиран на фреймуърка (framework) WSO2 Carbon SOA. Фреймуъркът на WSO2 включва вграден регистър, SOA базиран блок за управление на потребителите, вградени софтуерни услуги за сигурност, групиране и кеширане на данните, както и вътрешен фреймуърк за потребителски интерфейс (GUI - Graphical User Interface).

В настоящата версия на предлаганата софтуерна платформа, са дефинирани 3 слоя:

1. Приложен слой
2. Слой за интегриране на данни
3. Мрежов слой

Блоквата схема на фиг.9 илюстрира разпределението на задачите между така дефинираните слоеве.



Фиг. 9 SOA архитектура на дефинираните слоеве в софтуерната платформа

Приложен слой.

Приложният слой на разработваната платформа се основава главно на SOAP с XML формат на данните. Допълнително в приложния слой са интегрирани RPC базирани протоколи за комуникация и SSI(Simple Sensor Interface). Протоколът на SSI ("Simple Sensor Interface") е комуникационен протокол, проектиран за пренос на данни между компютри или потребителски терминали и интелигентни сензори.

Слой за интегриране на данни

Слоят за интегриране на данни в зависимост от нивото на интегриране на получените от сензорните мрежи данни използва различни методи и алгоритми за интегриране.

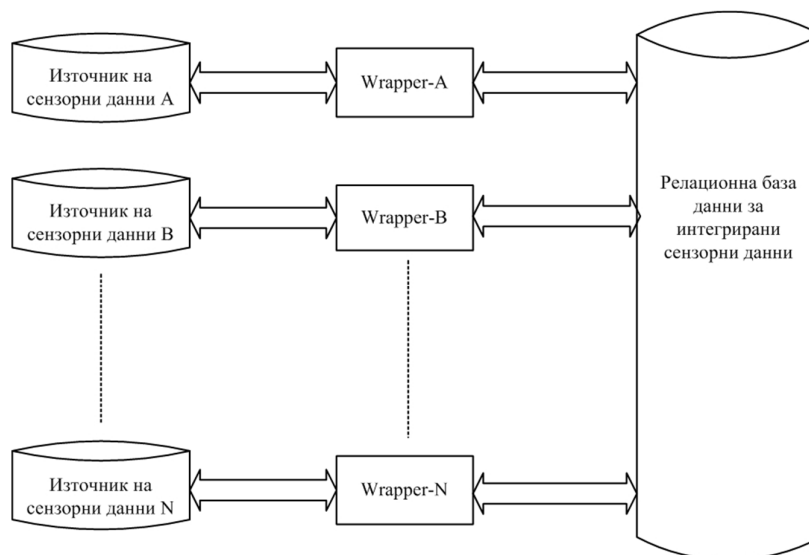
Основната функционалност на слоя за интегриране на данни е блокът за управление на данните.

Блокът за управление на данни (MDM - Master Data Management) се състои от набор софтуерни модули, които осигуряват методи и алгоритми за интегриране на данни с последващ анализ, класифициране и логическа обработка на вече интегрираните данни.

Основният метод използван за интегриране на данни в MDM е метода и софтуерния алгоритъм на филтъра на Калман описан в раздел 3.1 на настоящия дисертационен труд.

Блокът MDM разполага с вътрешна база данни, структурирана по параметризирани източници от данни.

Блок-схемата на MDM е показана на фиг. 10.



Фиг. 10 Блок-схема на блока за управление на данни MDM

Мрежов слой.

Основната задача на мрежовия слой е да се осигури функционални и процедурни средства за прехвърляне на групи от данни с променлива дължина от сензорни мрежи и/или интелигентни сензорни модули до слоя за интегриране на данни.

Софтуерната имплементация на мрежовия слой е проектирана да поддържа следните групи от протоколи:

- **Протокол IPv6 / 6LoWPAN.** 6LoWPAN е акроним на IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks. Концепцията за 6LoWPAN произлиза от идеята, че "интернет протокол може и трябва да се прилага дори за най-малките устройства," [13] и че устройства с ограничени изчислителни възможности за обработка трябва да бъдат в състояние да участват в Интернет на нещата (IoT - Internet of Things) [35] [36].

Спецификацията на база разработен от група 6LoWPAN IETF е RFC 6282.

- **Протокол ICMPv6 (Internet Control Message Protocol version 6)** Протоколът ICMPv6 е имплементация на протокола за управление на интернет съобщения (ICMP) за Интернет протокол версия 6 (IPv6), дефинирани в RFC 4443 [37].

ICMPv6 е неразделна част от IPv6 и извършва отчитането на грешки и диагностични функции (например ping) и има фреймуърк за разширяване на функционалността му при бъдещи промени на RFC 4443.

Към този протокол са имплементирани няколко разширения касаещи комуникацията със сензорни модули и сензорни мрежи:

NDP (Neighbour Discovery Protocol) е протокол предназначен за откриване на мрежови възли и представлява разширение на функциите на ARP(Address Resolution Protocol)

Протокол SEND (Secure Neighbour Discovery) - представлява разширение на NDP и се използва при комуникация в мрежи с криптирана комуникация между възлите.

Протокол MRD (Multicast Router Discovery) - специално проектиран за откриване на multicast рутери, използвани за синхронизация на възлите на сензорните мрежи или при конфигуриране на AD HOC мрежи.

- **ZigBee 3.0 група от протоколи** - по специално ZigBee IP, ZigBee Green Power 1.0 и ZigBee Gateway 1.0

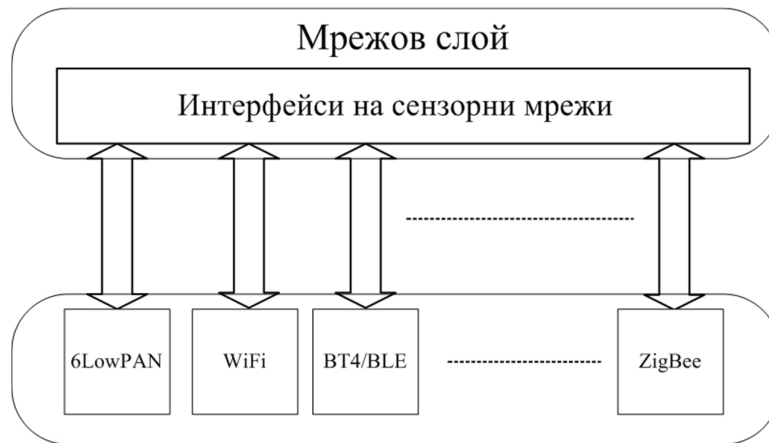
В процес на бъдещо развитие на софтуерната платформа, което е извън обхвата на настоящия дисертационен труд е внедряването на WiFi и Bluetooth BT4/BLE интерфейси за комуникация с WiFi и Bluetooth базирани сензорни мрежи.

Основните компоненти на платформата са:

- сървър на приложения, използващ собствен дизайн на модифициран WCO2 Carbon фреймуърк;
- база данни сървър с MySQL RDBMS;
- шлюзови сървъри свързани с интерфейси за достъп до хетерогенни сензорни мрежи или интелигентни сензорни модули;
- софтуерни интерфейси, поддържащи 802.15.4 ZigBee 3.0 протоколи, 6LoWPan, WiFi 802.11/bgn и BT4 / BLE протоколи за обмен на данни;

Структурата на платформата е отворена и може лесно да бъде обновена с различна функционалност в зависимост от специфичните изисквания.

На фиг. 11 е показана функционална блок схема на мрежовия слой на SOA базираната софтуерна платформа за интегриране на сензорни данни.



Фиг.11 Функционална блок схема на мрежовия слой на SOA базирана платформа

В предлаганата софтуерна архитектура са предвидени услуги за управление на различни сензорни мрежи или група от интелигентни сензорни модули в сензорна система с цел осигуряване на необходимата оперативна съвместимост.

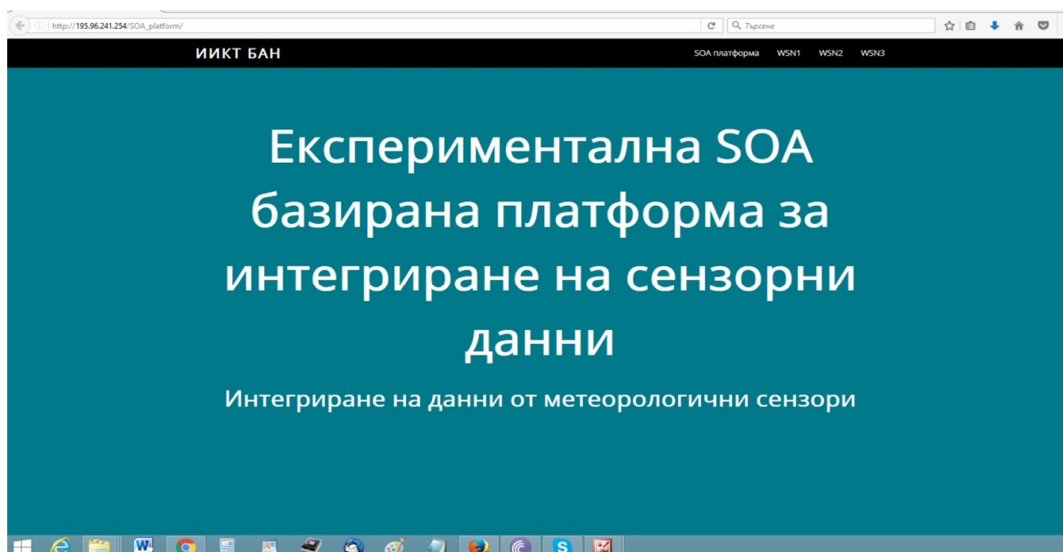
Предимство на разработените услуги е че дават възможност за лесно интегриране на хетерогенни сензорни мрежи.

Платформата е хардуерно независима и разработчиците на базата на предлаганите услуги могат лесно да получат достъп до данните от всеки интелигентен сензорен

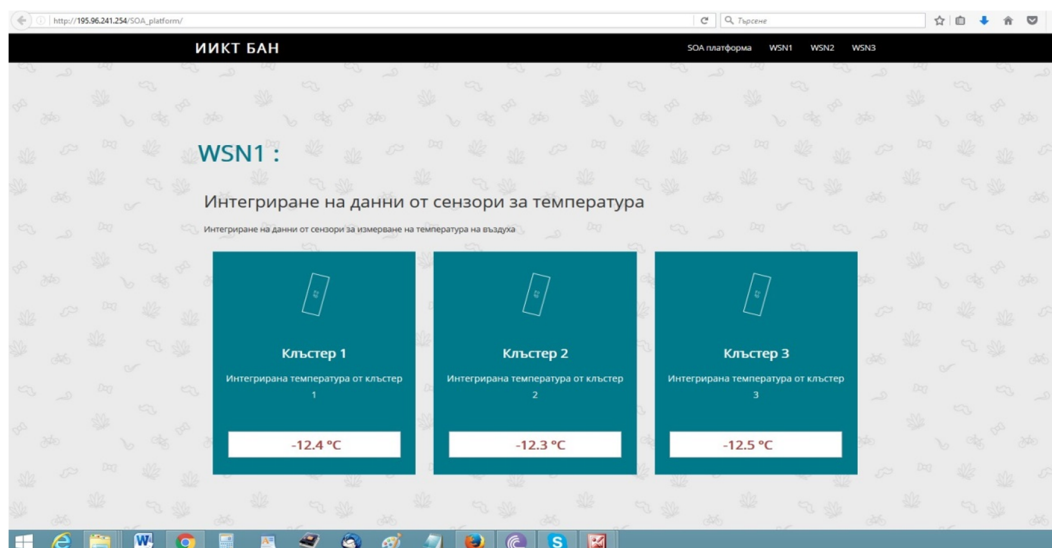
модул или сензорна мрежа, без да имат нужда информация относно вида и топологията на сензорната мрежа или вида на използваните комуникационни протоколи.

Процесът на интегриране на данни е прозрачен и географски независим. Чрез предлаганата отворена архитектура на SOA базирана софтуерна платформа се дава възможност за изграждане на услуги по виртуализация и формиране на виртуални сензорни мрежи.

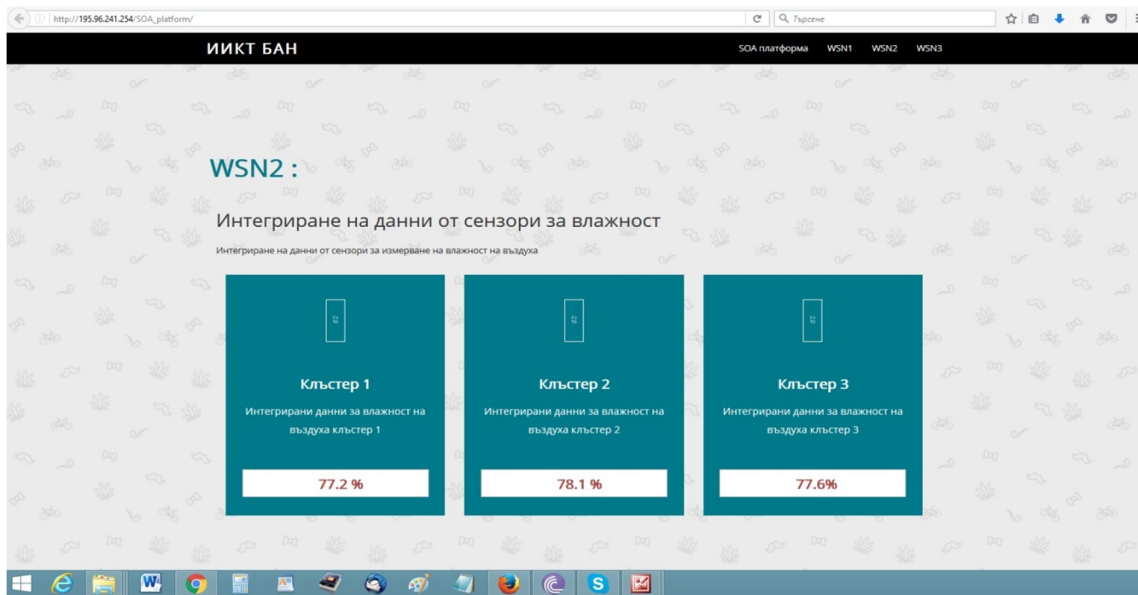
На снимки 3, 4 и 5 са показани екрани на графичния интерфейс на „Потребителя на услуга“ web client с визуализирани резултати от заявки за интегрирани сензорни данни по клъстери за температура, влажност на въздуха и барометрично налягане.



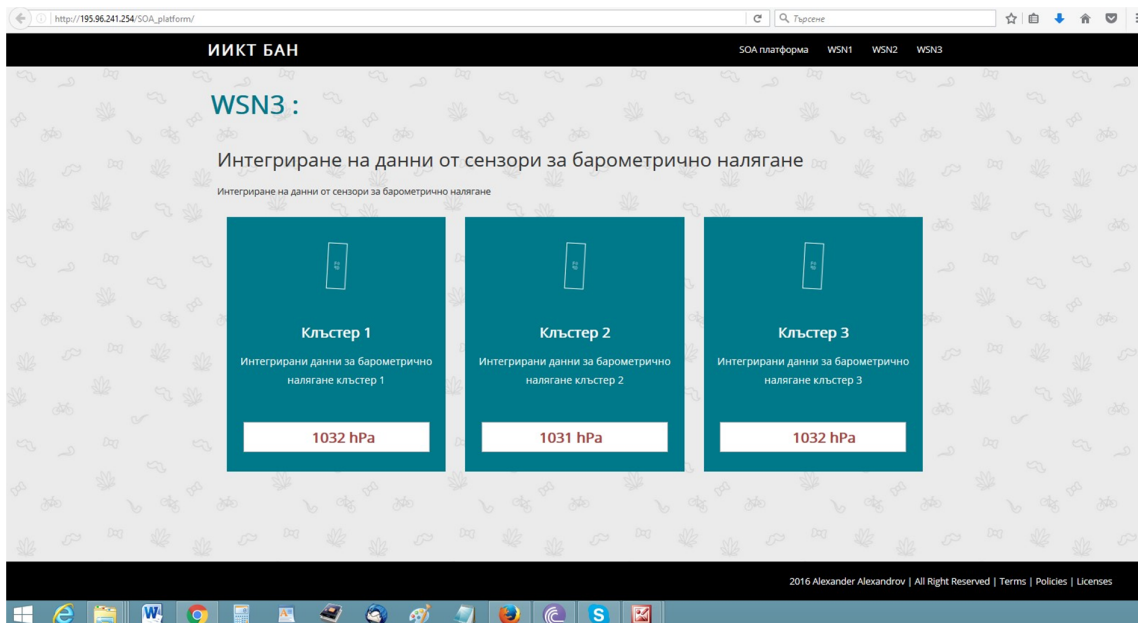
Сн.3 Екран на заглавната страница на експерименталната SOA платформа



Сн.4 Визуализирани резултати от заявки за интегрирани сензорни данни по клъстери за температура.



Сн.5 Визуализирани резултати от заявки за интегрирани сензорни данни по клъстери за влажност.



Сн.6 Визуализирани резултати от заявки за интегрирани сензорни данни по клъстери за барометрично налягане.

В предлаганата платформа за интегриране на сензорни данни, всички блокове с услуги са изградени на база протокол SOAP и и технологията RPC (Remote Procedure Call). Тези стандарти публикувани и като Recommendation ver. 1.2 на W3C (World Wide Web Consortium) през 2003г. [15] осигуряват добра междуплатформена съвместимост.

На снимки 7 и 8 е показана експерименталната система на SOA базираната софтуерна платформа за интегриране на данни от безжични сензорни мрежи..



Сн.7 и 8 Експериментална WSO2 Carbon SOA базирана платформа

Заклучение

В тази част от дисертационния труд е дадено резюме на постигнатите резултати и направените приноси от научно и научно-приложно естество, които в основната си част се припокриват по съдържание със следващият раздел „Авторска справка“ на автореферата.

Авторска справка

Основните научни приноси на настоящата дисертация са:

1. Разработен е нов метод и софтуерен алгоритъм за децентрализирано интегриране на сензорни данни с използване на разширен филтър на Калман (Extended Kalman filter), central Limit Theorem и уравнения на Fraser-Potter. В отличие на публикувани в литературата алгоритми за интеграция на сензорни данни новата разработка реализира двустепенен процес на интегриране. Ключов принос в новия алгоритъм е въведеният блок за анализ на локално интегрирани данни и интелигентен адаптивен алгоритъм позволяващ на модула самостоятелно да вземе решение дали да изпрати вече обработените на първо ниво данни до клъстерния координатор или само да генерира код, че новите данни са идентични в рамките на инструменталната грешка с предходни вече изпратени сензорни данни. В редица случаи новият алгоритъм позволява съществено намаляване на трафика в мрежата и редуциране на процесорна мощност и консумация на енергия за обработка на сензорни данни по същество идентични с предходни сензорни данни.

2. Разработен е метод за оптимизация на енергийна консумация на безжичен сензорен модул по време на предаване на данни и/или маршрутизация на пакети в мрежа. Предлаганият нов метод променя динамично т.н. SI (Sleep Interval) в зависимост от текущото натоварване на мрежата, което води до съществена икономия на енергия и увеличаване на автономността на батерийно захранвани безжични устройства включително безжични сензорни модули.

Основните научно-приложни приноси на настоящата дисертация са:

1. Разработен е иновативен сензорен модул (хардуер и системен софтуер) намиращ се в процес на патентоване, за мониторинг и интелигентна обработка на метеорологични данни и възможност за безжична комуникация. Ключово предимство на разработения сензорен модул е способността му да самовъзстановява изразходваната по време на работа енергия чрез вграден соларен панел и специализирани хардуерни и софтуерни решения с вградени адаптивни алгоритми. Тези алгоритми с характеристики на мини експертна система позволяват на модула самостоятелно да взема решения относно промяна на параметрите на комуникация и/или промяна на режима на работа на различни хардуерни блокове въз основа на локално интегрирани данни от сензори и анализ на комуникационния трафик с цел минимизиране на енергийните разходи и подобряване на надеждността на интегрираните данни.

2. Разработена е иновативна концепция, архитектура и нов софтуерен алгоритъм за формиране на ad hoc интелигентна безжична сензорна мрежа с клъстерна топология. На база на т.н. WCA алгоритъм (Weighted Clustering Algorithm) дефиниран в предходни публикации е разработен нов подобрен алгоритъм, отличаващ се с функционалност водеща до формиране на клъстери с приоритет на качеството на свързаност между възлите, а не клъстери формирани на база разстояние между възлите,

което редуцира съществено риска от разпадане на мрежата при отказ на някой от формираните клъстерни координатори.

В отличие от класическия WCA алгоритъм е въведен нов параметър K_{i_link} отчитащ не разстоянието между два съседни възела а качеството на комуникацията между тях. Допълнителна особеност при новия алгоритъм е критерия за избор на клъстерен координатор. В отличие от WCA тук за клъстерен координатор се избира възелът с най-голям коефициент на тежест с цел намаляване на броя на СН възлите и увеличаване на броя на членовете на клъстера. Тези нововъведения подобряват съществено работата на алгоритъма за избор на клъстерни координатори и формиране на клъстери при ad hoc безжични сензорни мрежи и впоследствие позволяват да се оптимизира съществено процеса на маршрутизация на пакети между клъстерните координатори и PAN координатора.

Новият софтуерен алгоритъм е тестван успешно в реална експериментална безжична сензорна мрежа базирана на описания в глава 2 безжичен сензорен модул.

3. Разработена е архитектура на софтуерна платформа използваща SOA (Service Oriented Architecture) за интегриране на данни от интелигентни сензорни мрежи и системи. В платформата са предвидени софтуерни услуги за управление на различни хетерогенни сензорни мрежи или група от интелигентни сензорни модули в сензорна система, която осигурява необходимата оперативна съвместимост. Предимство на разработените услуги е че дават възможност за лесна интеграция на хетерогенни сензорни мрежи и създаване на мнения данни за разработчиците на приложения.

Платформата е хардуерно независима и разработчиците на базата на предлаганите услуги могат лесно да получат достъп до данните от всеки интелигентен сензорен модул или сензорна мрежа, без да имат нужда информация относно вида и топологията на сензорната мрежа или вида на използваните комуникационни протоколи.

Процесът на интегриране на данни е прозрачен и географски независим. Чрез предлаганата отворена архитектура на SOA базирана софтуерна платформа се дава възможност за изграждане на услуги по виртуализация и формиране на виртуални сензорни мрежи.

Благодарности

Изказвам специални благодарности на научният ми ръководител доц. д-р Владимир Монов - Ръководител секция "Моделиране и оптимизация" към Института по Информационни и Комуникационни Технологии при Българската Академия на Науките за неговите ценни напътствия, професионална компетентност и съдействие при подготовката на дисертацията.

Реализацията на настоящият дисертационен труд би била невъзможна без неговите ценни съвети и съдействие.

Литература

- 1 A. Dahane, N. Berrached, and B. Kechar, "Energy Efficient and Safe Weighted Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks," *Procedia Computer Science*, vol. 34, pp. 63-70, 2014.
- 2 A. Duda, G. Harsanyi, Y. Haddad and G. Bernard, "Estimating Global Time in Distributed Systems," *Proceedings of the 7th International Conference on Distributed Computing Systems*, Berlin, Vol. 18, 1987.
- 3 A. Zabian, A. Ibrahim, and F. Al-Kalani, "Dynamic head cluster election algorithm for clustered Ad-Hoc networks," *Journal of Computer Science*, vol. 4, no. 1, pp. 42-50, 2008.
- 4 A. Zabian, A. Ibrahim, and F. Al-Kalani, "Head clustering election algorithm for Ad-Hoc networks," *Journal of Computer Science*, vol. 5, no. 1, pp. 42-50, 2009.
- 5 B. Poirier, R. Roy and M. Dagenais, "Accurate Offline Synchronization of Distributed Traces Using Kernel-Level Events," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, Vol. 44, No. 3, July 2010, pp. 75-87.
- 6 Bacchanalian, H., Toggler, 2003. Migrating to a service oriented architecture, IBM Developer Works, pp. 117-121
- 7 Blasch, E., Steinberg, A., Das, S., Llinas, J., Chong, C.-Y., Kessler, O., Waltz, E., White, F. (2013) "Revisiting the JDL model for information Exploitation," *International Conference on Information Fusion*.
- 8 C. Brown, H. Durrant-Whyte, J. Leonard, B. Rao, and B. Steer, "Distributed data fusion using Kalman filtering: a robotics application," in *Data, Fusion in Robotics and Machine Intelligence*, M. A. Abidi and R. C. Gonzalez, Eds., pp. 267–309, 1992.
- 9 D. L. Hall and J. Llinas, "An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 1, pp. 6–23, 1997. *An Introduction to the Kalman Filter*, Greg Welch and Gary Bishop, Department of Computer Science University of North Carolina, UNC-Chapel Hill, TR 95-041, July 24, 2006
- 10 Delicato, F., Pires, P., Pinnez, L., Fernando, L., L. da Costa, L., 2003. A flexible web service based architecture for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 23rd International Conference on, Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 730–735.

- 11 E. P. Blasch and S. Plano, "JDL level 5 fusion model "user refinement" issues and applications in group tracking," in Proceedings of the Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XI, pp. 270–279, April 2002.
- 12 EN. Huh, and TH. Hai, in Lightweight Intrusion Detection for Wireless Sensor Networks, Rijeka, Croatia: INTECH Open Access Publisher, 2011.
- 13 G. Mulligan, "The 6LoWPAN architecture", in Proc. 4Th workshop on Embedded networked sensors, EmNets '07,2007, p. 78–82, USA. ACM.
- 14 Gil-Martinez-Abarca, J., Macia-Perez, J.F., Marcos- Jorquera, D., Gilart-Iglesias, V., 2006. Wake on lan over internet as web service, In Proceedings of the ETFA '06 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 1261 – 1268.
- 15 Grosky, W., Kansal, A., Nath, S., Liu, J., Zhao, F., 2007. Senseweb: An infrastructure for shared sensing. Multimedia, IEEE, 14(4), pp. 8 –13
- 16 H. F. Durrant-Whyte and M. Stevens, "Data fusion in decentralized sensing networks," in Proceedings of the 4th International Conference on Information Fusion, pp. 302–307, Montreal, Canada, 2001.
- 17 I. Samaras, G. Hassapis, and J. Gialelis, "A modified DPWS protocol stack for 6LoWPAN-based wireless sensor networks," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 1, pp. 209–217, Feb. 2013.
- 18 J. L. Crowley and Y. Demazeau Principles and Techniques for Sensor Data Fusion Signal Processing, Volume 32, Issues 1–2, May 1993, Pages 5–27
- 19 J. Llinas, C. Bowman, G. Rogova, A. Steinberg, E. Waltz, and F. White, "Revisiting the JDL data fusion model II," Technical Report", DTIC Document, 2004.
- 20 J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks", in Proc. 2nd intl conf. on embedded networked sensor systems, SenSys'04, 2004, p. 95–107, USA. ACM.
- 21 Kushalnagar, N., Montenegro, G., Schumacher, C.: IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs): Overview, assumptions, problem statement, and goals. RFC4919, Internet Engineering Task Force (2007)

- 22 L. Chen, M. J. Wainwright, M. Cetin, and A. S. Willsky, "Data association based on optimization in graphical models with application to sensor networks," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 43, no. 9-10, pp. 1114–1113, 2006
- 23 M. Chatterjee, SK. Das, and D. Turgut, "A weight based distributed clustering algorithm for mobile ad hoc networks," in *Proceedings of the 7th International Conference on High Performance Computing (HiPC2000)*, Bangalore, India, 2000; pp. 511-521.
- 24 M. Lehsaini, H. Guyennet, and M. Feham, "An efficient cluster-based self-organisation algorithm for wireless sensor networks," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 7, no. 1, pp. 85-94, 2010.
- 25 Madden, S.R., Franklin, M.J., Hellerstein, J.M., Hong, W., 2011. TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Trans. Database Syst.*, 30(1), pp. 122–173.
- 26 Moeller, R., Sleman, A., 2008. Wireless networking services for implementation of ambient intelligence at home. In *Proceedings of the 7-th International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems, ICCDCS*, pp. 1 –5.
- 27 Mulligan, G., 2007. The 6LoWPAN architecture, In *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors, EmNets '07*, ACM.
- 28 OASIS Standard, 2009. Devices profile for web services (DPWS) version 1.1.
- 29 Priyantha, N.B., Kansal, A., Goraczko, M., Zhao, F., 2008. Tiny web services: design and implementation of interoperable and evaluable sensor networks. In *SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, pp. 253–266, ACM, New York.
- 30 R. C. Luo, C.-C. Yih, and K. L. Su, "Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions," *IEEE Sensors Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 107–119, 2002.
- 31 R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems" *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960.
- 32 S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems," in *Proceedings of the International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls*, vol. 3, 1997.

- 33 S. Sasidharan, F. Pianegiani, and D. Macii, "A protocol performance comparison in modular WSNs for data center server monitoring", in Intl Symp. on Industrial Embedded Systems (SIES), July 2010, pp. 213–216. IEEE.
- 34 Samaras, I.K., Gialelis, J.V., Hassapis, G.D., 2009. Integrating wireless sensor networks into enterprise information systems by using web services. In SENSORCOMM '09: Proceedings of the Third International Conference, pp. 785-791
- 35 Shelby, Z., Bormann, C., 2011. 6LoWPAN: The wireless embedded Internet - Part 1: Why 6LoWPAN?, EE Times.
- 36 Shelby, Z., Bormann, C.: 6LoWPAN—The Wireless Embedded Internet. Wiley, New York (2009) Wang, R.C., Chang, R.S., Chao, H.C.: Internetworking between ZigBee/802.15.4 and IPv6/802.3
- 37 SOAP Specifications -World Wide Web Consortium:
<http://www.w3.org/TR/2001/WD-soap12-20010709/>.
- 38 Svelte, A. T., 2010. Cloud Computing: A Practical Approach. McGraw Hill.
- 39 TH. Hai, EN. Huh, and M. Jo, "A lightweight intrusion detection framework for wireless sensor networks," Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 10, no. 4, pp. 559-572, 2010.
- 40 Z. A. Akhand and M. A. Bauer, Managing Quality-of-Service in Internet Applications Using Differentiated Services, Journal of Network and Systems Management, Vol. 10, No. 1, 2002.

Abstracts of Dissertations

Number 5, 2017

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

**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ**

Брой 5, 2017

Автореферати на дисертации