ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ

УДК.621.395

СТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ ОТ ПОТОКОВ ЛОЖНЫХ СОБЫТИЙ

И. А. Богданов, аспирант кафедры «Сети связи и передача данных» СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича; seti_sviazi@bk.ru

Предложен структурный метод защиты беспроводной сенсорной сети от потоков ложных событий. Доказано, что существует оптимальное значение плотности (числа) узлов в первой и второй областях сенсорного поля, обеспечивающее максимальное время жизни сенсорной сети. Определены соответствующие численные характеристики сенсорных полей разной плотности.

Ключевые слова: *беспроводная сенсорная сеть, потоки ложных событий, время жизни сенсорной сети, оптимальное значение плотности узлов.*

Введение. Развитие сетей связи в последующие годы во многом будет определяться концепцией Интернета Вещей [1, 2]. Технологической основой Интернета Вещей являются беспроводные сенсорные сети (БСС) [3, 4], получившие в Секторе Стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) за свое возможное повсеместное применение название всепроникающих сенсорных сетей USN (Ubiquitous Sensor Networks) [5]. Сети USN являются самоорганизующимися и могут состоять из очень большого числа миниатюрных узлов с ограниченными энергетическими возможностями [6, 7]. Последнее приводит к целому ряду особенностей построения сети с широко используемой кластеризацией [8–10].

В области сетевой безопасности, определяемой в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т Y.2701 [11], существенную роль играют атаки на энергетическую систему сенсорных сетей и клонирование сенсорных узлов [12]. Примером таких атак может стать преднамеренное лишение сна сенсорных узлов [13]. Автором в [14] было предложено для уменьшения жизненного цикла сенсорных сетей использовать потоки ложных событий, воздействующих на сенсорные узлы независимо от их состояния в текущий момент времени.

Существует достаточно много работ, посвященных проблемам защиты сенсорных сетей от разнообразных вторжений [15–17]. Однако в области защиты БСС от потоков ложных событий пока не было предложено эффективных методов. Как справедливо отмечено в [18], проблемы защиты сетей, построенных на узлах с ограниченными возможностями, затруднены тем обстоятельством, что внедрение сложных систем защиты от вторжений практически невозможно из-за ограничений энергетической системы сенсорных сетей и параметров сенсорных узлов. В публикации [19], посвященной классификации систем слежения за целью, реализованных на сенсорных сетях [20, 21], в качестве одного из направлений улучшения характеристик сенсорной сети рассматриваются архитектурные методы. Воспользуемся подобным методом, предполагая, что изменение плотности размещения сенсорных узлов на сенсорном поле может увеличить жизненный цикл в условиях воздействия на сеть потока ложных событий.

Модель сети и потоков. В качестве модели сети используется типовая модель из N сенсорных узлов, образующая пуассоновское поле на плоскости размером 200×200 м (рис. 1). Радиус действия сенсорного узла — 20 м, запас энергии в каждом узле — 2 Дж, расход энергии на передачу сообщения — 2 мДж. Все сенсорные узлы однородны, т.е. имеют одинаковый радиус действия и начальные энергетические характеристики.

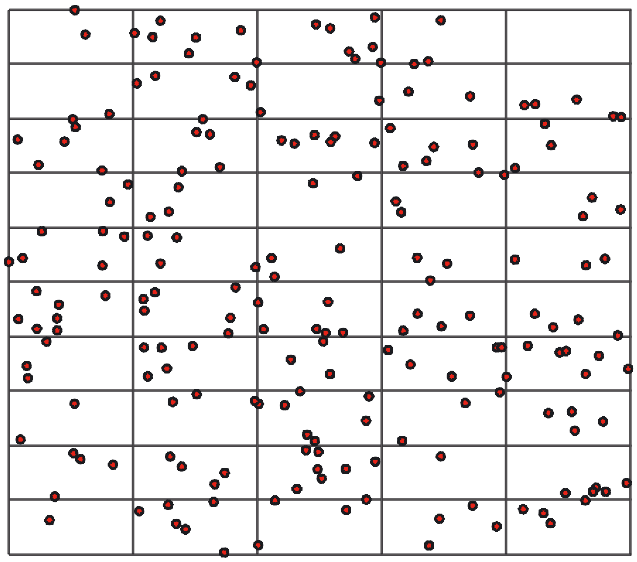


Рис. 1. **Пуассоновское сенсорное поле**

Поток объектов представляет собой смесь потоков двух типов объектов $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, где λ_1 и λ_2 — интенсивности. Первый поток представляет собой поток ложных событий (объектов), направленных только на уменьшение жизненного цикла сети, а второй — поток событий (объектов), который должен быть обнаружен сенсорной сетью. Сенсоры способны идентифицировать тип объекта. Если в области обслуживания O_1 обнаруживается объект первого типа, то передается соответствующее сообщение по сети (области O_1) и данный объект считается обнаруженным, т.е. исключается из дальнейшего рассмотрения. Объекты второго типа в области O_1 не обнаруживаются. Таким образом, в область O_2 поступают только объекты второго типа и часть объектов первого, необнаруженные в области O_1.

Сенсоры второго типа одинаково реагируют на объекты обоих типов, т.е. вырабатывают сообщения при нахождении в зоне обнаружения любого объекта.

Зона обслуживания сети имеет две области обнаружения: объектов первого типа и всех типов объектов (рис. 2). Задача состоит в том, чтобы при заданном числе узлов сети

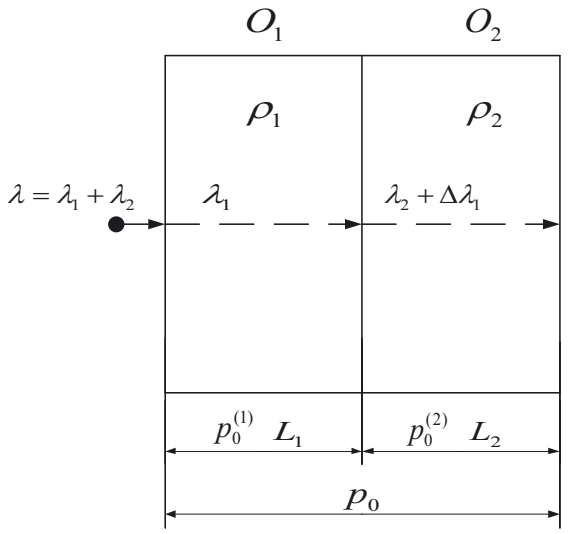


Рис. 2. **Структура зоны обслуживания сети**

оценить значения плотностей размещения сенсоров ρ_1 и ρ_2, при которых достигается максимальное время жизни сети. Под *временем жизни сенсорной сети* понимается длительность функционирования, в течение которого сеть выполняет свои функции, т.е. вероятность обнаружения объектов во второй области не ниже заданной величины p_0.

Оптимизация времени жизни сенсорной сети. Зависимость вероятности обнаружения объектов первого типа от времени может быть определена в соответствии с [22] следующим образом:

$$p_0^{(1)}(t) = F(L_1,t) = \begin{cases} 0, \ L_1 < 0; \\ 1 - e^{-\rho_1(t)\left(r^2 \arccos\left(\frac{r-L_1}{r}\right) - (r-w)\sqrt{2rL_1 - L_1^2}\right)}, \ 0 \le L_1 < r; \\ 1 - e^{-\rho_1(t)\left(2rL_1 + \frac{\pi r^2}{2}\right)}, \ L_1 \ge r, \end{cases} \quad (1)$$

где L_1 — длина области O_1 (м); r — радиус зоны обнаружения сенсора (м);

$$\rho_1(t) = \frac{n_0^{(1)}}{\left(n_0^{(1)} k_1 t + 1\right) L_1 h}; \quad (2)$$

$n_0^{(1)}$ — начальное число узлов сети в области O_1; t — время (с); h — ширина областей O_1 и O_2 (м);

$$k_1 = \frac{2r\tilde{w}e\lambda_1}{n_0 \varepsilon_0 L_1 h}, \quad (3)$$

где λ_1 — интенсивность поступления объектов первого типа (объектов/ед. времени); ε_0 — запас энергии одного сенсорного узла в начальный момент функционирования сети (Дж); e — энергия, расходуемая узлом на передачу одного сообщения (Дж); $n_0 = n_0^{(1)} + n_0^{(2)}$ — общее число активных узлов сети в начальный момент ее функционирования;

$$\tilde{w} = \frac{1}{2\rho r} \quad (4)$$

— средняя длина пути объекта до момента его обнаружения (м) [22].

Зависимость вероятности обнаружения объектов во второй области сети от времени может быть получена аналогично с учетом изменения интенсивности объектов при прохождении через первую область, где происходит обнаружение объектов первого типа с вероятностью $p_0^{(1)}$. Следовательно, интенсивность объектов первого типа, поступающих во вторую область, может быть вычислена как $\lambda_1\left(1 - p_0^{(1)}\right)$. Интенсивность поступления объектов первого и второго типов во вторую область определится как $\lambda_2 + \Delta\lambda_1$, где $\Delta\lambda_1 = \lambda_1\left(1 - p_0^{(1)}\right)$. Тогда

$$p_0^{(2)}(t) = F(L_2,t) = \begin{cases} 0, \ L_2 < 0; \\ 1 - e^{-\rho_2(t)\left(r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-L_2}{r}\right) - (r-w)\sqrt{2rL_2 - L_2^2}\right)}, \ 0 \le L_2 < r; \\ 1 - e^{-\rho_2(t)\left(2rL_2 + \frac{\pi r^2}{2}\right)}, \ L_2 \ge r, \end{cases} \quad (5)$$

где L_2 — длина области O_2 (м);

$$\rho_2(t) = \frac{n_0^{(2)}}{\left(n_0^{(2)} k_2 t + 1\right) L_2 h}; \quad (6)$$

$n_0^{(2)}$ — начальное число узлов сети в области O_2;

$$k_2 = \frac{2r\tilde{w}e\left(\lambda_2 + \lambda_1(1 - p_0^{(1)})\right)}{n_0 \varepsilon_0 L_2 h}; \quad (7)$$

λ_2 — интенсивность поступления объектов второго типа (объектов/ед. времени) .

Выражения (1) и (5) определяют зависимость вероятностей обнаружения объектов первого типа в первой области и объектов первого и второго типа во второй области соответственно.

Выбор значений ρ_1 и ρ_2, при которых достигается максимальное время жизни сети, является задачей оптимизации. В этой задаче переменные (параметры) управления — значения ρ_1 и ρ_2, а параметр состояния — время жизни сети, которое из (5) можно определить как

$$t_0 = \arg\left(p_0^{(2)}(t) = p_0\right), \quad (8)$$

где p_0 – заданная вероятность обнаружения объектов во второй области. Тогда задача оптимизации может быть определена целевой функцией

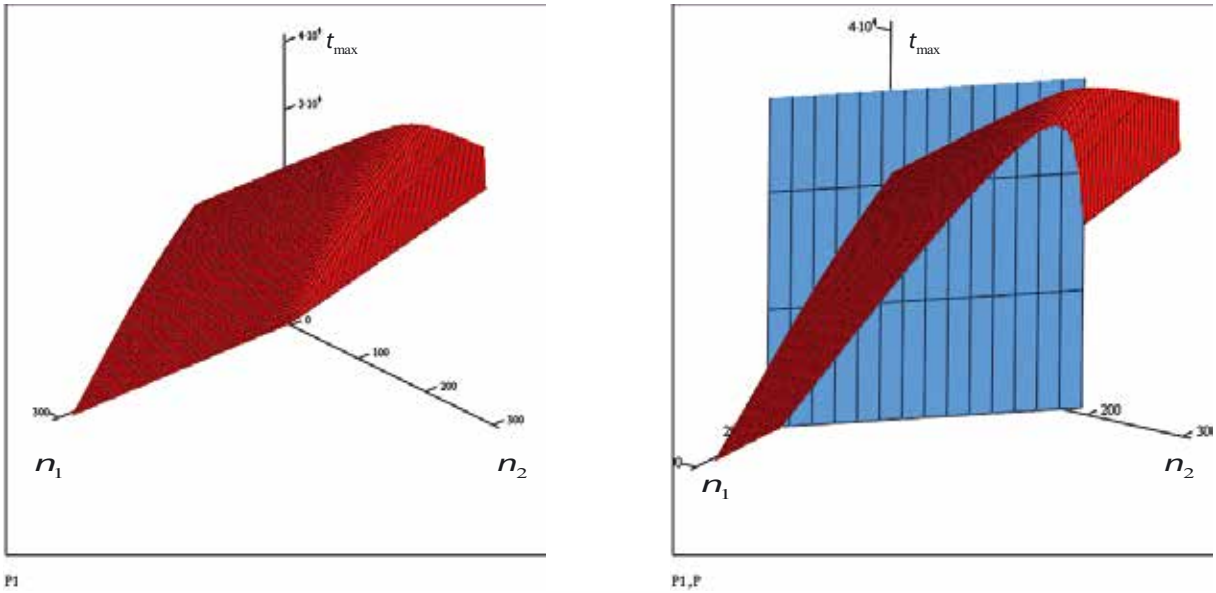
$$t_{\max} = \max_{n_1, n_2}\left\{\arg\left(p_0^{(2)}(t) \ge p_0\right)\right\} \quad (9)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} &\rho_1 \ge 0, \\ &\rho_2 \ge 0, \\ &n = n_1 + n_2 = \text{const}, \\ &p_0 = \text{const}, \\ &L_1 = \text{const}, \\ &L_2 = \text{const}, \\ &h = \text{const}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для решения неравенства $p_0^{(2)}(t) \ge p_0$ (9) относительно t использовался численный метод Риддера из пакета программного обеспечения Mathcad.

Выбор метода решения задачи оптимизации (9), (10) зависит от вида оптимизируемой функции. Анализ выражений (1) — (8) позволяет сделать вывод о том, что в условиях



а) *б)*

Рис. 3. **Зависимости максимального времени жизни сети от числа узлов в первой и второй областях без учета ограничений (*а*) и с учетом ограничения общего числа узлов (*б*)**

(10) данная задача является задачей выпуклой оптимизации. Для оптимизации выпуклой функции могут быть применены различные методы условной оптимизации функции нескольких переменных. Выбор того или иного метода может существенно влиять на время решения задачи (объем вычислений), но практически не отражается на решении. Поскольку в данном случае вычислительная эффективность метода не имеет существенного значения, то для решения задачи был выбран реализованный во многих прикладных системах метод сопряженных градиентов с учетом ограничений (10). Вероятность обнаружения объектов p_0 во второй области задаем на уровне 0,9.

Зависимость максимального времени жизни сети от числа (плотности) узлов в первой и второй областях можно представить поверхностью. На рис. 3 приведена зависимость максимального времени жизни сети от числа узлов в первой и второй областях без учета ограничений (рис. 3, *а*) и с учетом ограничения общего числа узлов (*б*). Интенсивности поступления объектов первого и второго типа выбраны равными.

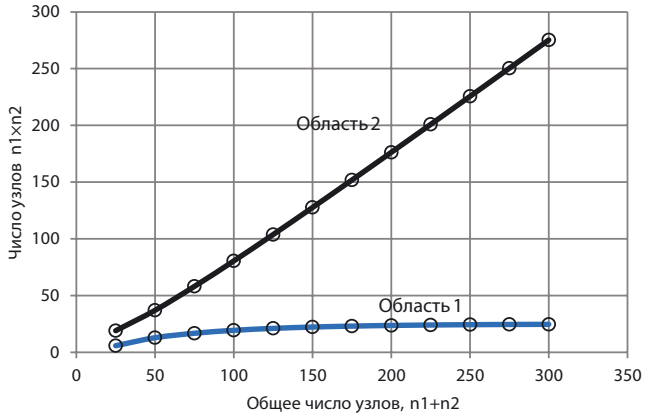


Рис. 4. **Зависимость числа узлов в первой и второй областях от общего числа узлов для сенсорного поля 200×200 м**

Анализ рис. 3 доказывает, что существует некое соотношение узлов в первой и второй областях, обеспечивающее максимальное время жизни сети, под которым по-прежнему понимается интервал времени, в течение которого объекты во второй области обнаруживаются с заданной вероятностью. Из рисунка также видно, что пересечение поверхности функции максимального времени жизни с областью ограничений представляет собой унимодальную функцию с выраженным максимумом.

Рис. 4 конкретизирует зависимость числа узлов в первой и второй областях от общего числа узлов для сенсорного поля 200×200 м, изначально заявленного в исследовании как типового. При указанном на рис.4 числе узлов в первой и второй областях достигается максимальное время жизни сети. При небольших плотностях сенсорных узлов доля узлов первой области может составлять до 40%, в то время как с увеличением плотности узлов эта доля

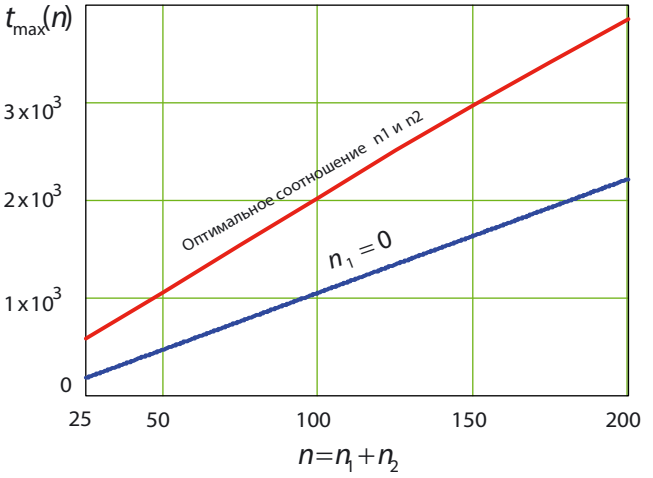


Рис. 5. **Зависимость максимального времени жизни сенсорной сети от общего числа узлов при оптимальном соотношении n_1 и n_2 и при $n_1 = 0$**

уменьшается, сохраняя практически неизменным численное значение примерно в 25 узлов в первой области. Интенсивности поступления объектов первого и второго типа равны.

На рис. 5 представлены зависимости максимального времени жизни сети от общего числа узлов в условиях отсутствия сенсорных узлов в области O_1 (n_1= 0) и при оптимальном соотношении n_1 и n_2 в зависимости от общего числа сенсорных узлов (плотности сенсорного поля). Размеры сенсорного поля по-прежнему 200×200 м, а интенсивности поступления объектов первого и второго типа равны. Как видим, для типового сенсорного поля в 100 узлов время жизни сенсорной сети увеличивается в 2 раза по сравнению со случаем, когда зона O_1отсутствует.

При решении задачи оптимизации получены значения плотностей узлов в первой и второй зонах обслуживания при различном соотношении интенсивностей поступления объектов $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ от 1 до 10 и вероятности обнаружения объектов второго типа 0,9. Результаты приведены на рис. 6. Из анализа рисунка следует, что при соотношении интенсивностей первого и второго потоков меньше единицы в первой области требуется наличие небольшого числа узлов для отслеживания объектов первого типа. Максимального значения число узлов первого типа достигает при соотношении интенсивностей первого и второго потоков 3:4, практически не меняясь при дальнейшем увеличении этого соотношения.

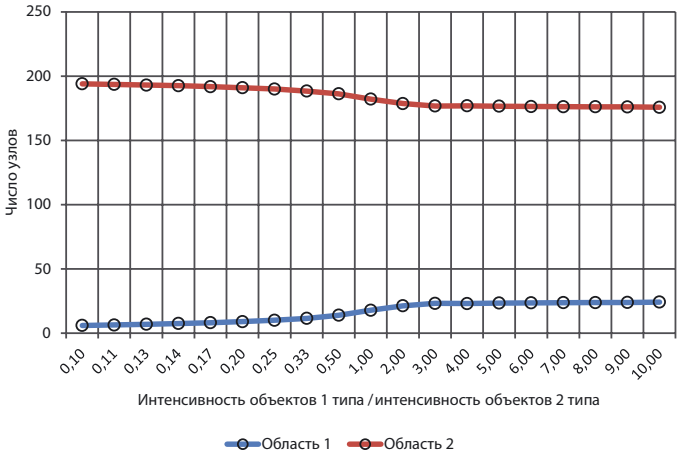


Рис. 6. **Результаты оптимизации значений плотности узлов в первой и второй областях при различном соотношении интенсивности потока объектов первого и второго типов**

Выводы. 1. Предложенный метод защиты БСС от потоков ложных событий путем изменения структурных характеристик сенсорного поля состоит в изменении распределения плотности сенсорных узлов по сравнению с равномерной.

2. Существует оптимальное значение плотности (числа) узлов в первой и второй областях сенсорного поля, обеспечивающее максимальное время жизни сенсорной сети. В статье определены соответствующие численные характеристики для различных значений общего числа узлов на сенсорном поле, а также в условиях различных соотношений интенсивностей потоков ложных и реальных событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е.** Сети связи пост-NGN.— С. Петербург: БХВ, 2013.
2. **Кучерявый А.Е.** Интернет Вещей // Электросвязь.— 2013.— № 1.
3. **Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А.** От е-России к u-России: тенденции развития электросвязи // Электросвязь.— 2005.— № 5.
4. **Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А.** Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета.— М.: ФГУП ЦНИИС, 2008.
5. Recommendation Y.2060 «Overview of Internet of Thing». ITU-T, Geneva.— June 2012.
6. **Кучерявый А.Е.** Самоорганизующиеся сети и новые услуги // Электросвязь.— 2009.— № 1.
7. **Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А.** Самоорганизующиеся сети.— СПб.: Любавич, 2011.
8. **Koucheryavy A., Salim A.** Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2009.— Phoenix Park, Korea.— 2009.
9. **Koucheryavy A., Salim A.** Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2010.— Phoenix Park, Korea.— 2010.
10. **Abakumov P., Koucheryavy A.** The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2014.— Phoenix Park, Korea.— 2014.
11. Recommendation Y.2701. Security Requirements for NGN Release 1. ITU-T, Geneva, April 2007.
12. Recommendation X.1311. Security Framework for Ubiquitous Sensor Networks. ITU-T, Geneva.— February 2011.
13. **Bhattassali T., Chaki R., Sanyal S.** Sleep Deprivation Attack Detection in Wireless Sensor Networks. International Journal of Computer Applications.— February 2012.— Vol.40, № 15.
14. **Богданов И.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е.** Характеристики жизненного цикла мобильной сенсорной сети при различных потоках ложных событий // Электросвязь.— 2013.— № 1.
15. **Бельфер Р.А., Огурцов И.С.** Защита информационной безопасности сенсорной сети кластерной архитектуры с помощью механизма обнаружения вторжения // Инженерный журнал: наука и инновации.—2013.— № 2 (14).
16. **Nickerson J.V., Olariu S.** Protecting with Sensor Networks: Attention and response / 40th Hawaii International Conference on System Science, HICSS.— Waikoloa, Big Island, HI. USA.— 3–6 January 2007.
17. **Alrajeh N.A., Khan S., Shams B.** Intrusion Detection Systems in Wireless Sensor Networks // A Review. International Journal of Distributed Sensor Networks.— Volume 2013.
18. **Таненбаум Э., Уэзеролл Д.** Компьютерные сети.— 5-е издание.— СПб: Питер, 2012.
19. **Mohsin Fayyaz**. Classification of Object Tracking Techniques in Wireless Sensor Networks // Wireless sensor Networks.— April 2011.— № 3.
20. **Chih-Yu Lin, Wen-Chih Peng, Yu-Chee Tseng.** Efficient In-Network Moving Object Tracking in Wireless Sensor Networks // IEEE Transaction on Mobile Computing.— 2006.— V.5, issue 8.
21. **Tian He, et al.** Achieving Real-Time Target Tracking Using Wireless Sensor Networks // 12th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium.— San Jose, California, USA.— April 4–7, 2006.
22. **Богданов И.А., Кучерявый А.Е.** Характеристики беспроводной сенсорной сети для выявления вторжений в виде потоков ложных событий // Информационные технологии и телекоммуникации. Электронный научный журнал.—2014.— Вып. 3.

Получено 29.10.14.