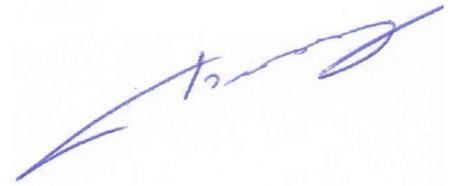


На правах рукописи



**Богданов Игорь Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ ЛОЖНЫХ СОБЫТИЙ  
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена на кафедре сетей связи и передачи данных (ССиПД) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича» (ФГБОУ ВО СПбГУТ).

**Научный руководитель:** **Кучерявый Андрей Евгеньевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных (ССиПД) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ)», г. Санкт-Петербург

**Официальные оппоненты:** **Колбанев Михаил Олегович**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет»; г. Санкт-Петербург

**Гайдамака Юлия Васильевна**  
к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский Университет Дружбы Народов», г. Москва

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт связи» Санкт-Петербургский филиал «Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи» ФГУП ЦНИИС – ЛО ЦНИИС, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «20» декабря 2016 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.233.05 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», а также на сайте университета <http://dissov.guar.ru>

Автореферат разослан «15» ноября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.233.05  
кандидат технических наук, доцент



Овчинников А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие сетей связи в настоящее время и в долгосрочной перспективе происходит на основе концепции Интернета Вещей. Эта концепция основана на идее о том, что наиболее существенную часть клиентской базы сетей связи будут составлять вещи. Внедрение концепции Интернета Вещей предполагает коренные изменения в архитектуре сетей связи, услугах, сетевой безопасности и т.д. Сети связи из инфраструктурных превращаются в самоорганизующиеся, появляются услуги машина-машина, предоставляемые без участия человека, в области сетевой безопасности наряду с традиционными видами атак и вторжений появляются новые, обусловленные новизной архитектуры и услуг сетей. Эти качественные изменения являются следствием количественных изменений клиентской базы сетей связи. Существенно большее число вещей приводит к созданию в перспективе триллионных сетей связи, а прогнозы развития предполагают появление до 50 триллионов вещей, являющихся элементами сетей связи.

Технологической базой для внедрения концепции Интернета Вещей в настоящее время являются беспроводные сенсорные сети, имеющие также название всепроникающих сенсорных сетей за счет предполагаемого повсеместного использования сенсорных узлов. Исследования беспроводных сенсорных сетей являются одним из наиболее широко распространенных направлений научной деятельности в области систем, сетей и устройств телекоммуникаций во всем мире, начиная с первого десятилетия 21 века. Разработка алгоритмов выбора головного узла кластера, исследования связности и надежности сенсорных сетей, сенсорных сетей с мобильными узлами представляют собой известные примеры этой деятельности.

Существенную роль в исследованиях по сенсорным сетям играют, естественно, и вопросы информационной безопасности. Наряду с исследованиями традиционных для сетей связи атак и вторжений, в последние годы после выхода рекомендации Сектора Стандартизации Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) X.1311“Структура безопасности для всепроникающих сенсорных сетей” появились и работы, связанные с атаками на энергетическую систему сенсорных сетей, а также с их клонированием. Отметим, что МСЭ-Т рассматривает проблемы так называемой сетевой безопасности, определяемой на участке от пользовательского интерфейса до пользовательского интерфейса, что исследуется также и в настоящей диссертации.

Беспроводные сенсорные сети в качестве своих приложений достаточно часто используют слежение за целью и защиту территорий от вторжений. В работе предлагается и исследуется новый вид вторжений в беспроводные сенсорные сети, основанный на создании потоков ложных событий. С учетом изложенного тема диссертации представляется актуальной.

**Степень разработанности темы.** В области Интернета Вещей и беспроводных сенсорных сетей известны основополагающие работы отечественных и зарубежных ученых Б.С.Гольдштейна, Р.А.Бельфера, А.Е.Кучерявого, Е.А.Кучерявого, Д.А.Молчанова, В.А.Мочалова, А.В.Рослякова, А.П.Пшеничникова, К.Е.Самуйлова, В.К.Сарьяна, В.Н.Туруты, М.А.Шнепса, I.Akyildiz, W.Heinzelman, J.V.Nickerson, S.Olariu, T.Bhattassali, R.Chaki, S.Sanyal. Тема диссертации относится к исследованиям вторжений в беспроводные сенсорные сети, имеющих своей целью уменьшение жизненного цикла сенсорной сети. В этой связи можно отметить работы T.Bhattassali, R.Chaki, S.Sanyal, в которых уменьшение жизненного цикла сенсорной сети достигалось за счет лишения сенсорных узлов спящего режима. В диссертации предлагается и исследуется новый вид вторжений в беспроводные сенсорные сети, основанный на создании потоков ложных событий, воздействующих на любые сенсорные узлы сети независимо от их состояния в конкретный момент времени.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью диссертации является разработка и исследование моделей вторжений в беспроводные сенсорные сети на основе потоков ложных событий и метода защиты от этих вторжений.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе последовательно решаются следующие задачи:

- анализ концепции Интернета Вещей, принципов построения самоорганизующихся сетей и особенностей построения беспроводных сенсорных сетей;
- анализ видов вторжений в сетях связи и особенностей вторжений для беспроводных сенсорных сетей;
- разработка модели вторжения в сенсорные сети потоков ложных событий;
- исследование воздействия на жизненный цикл беспроводной сенсорной сети пуассоновского и детерминированного потоков ложных событий;
- разработка метода защиты беспроводной сенсорной сети от потоков ложных событий путем придания мобильности сенсорным узлам;
- определение структурных характеристик беспроводной сенсорной сети для выявления ложных событий с заданной вероятностью обнаружения;
- разработка структурного метода защиты беспроводной сенсорной сети от потоков ложных событий.

**Научная новизна.** В диссертации получены следующие основные новые научные результаты:

- разработана модель вторжения в беспроводную сенсорную сеть с целью уменьшения ее жизненного цикла, отличающаяся от известных тем, что для достижения данной цели используются потоки ложных событий;

- в отличие от известных результатов установлено, что длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети зависит от вида потока ложных событий;

- разработан метод защиты беспроводных сенсорных сетей, отличающийся тем, что в условиях вторжения потоков ложных событий для увеличения длительности жизненного цикла сети сенсорным узлам придается мобильность со скоростью 2 м/с;

- разработан метод защиты беспроводных сенсорных сетей, отличающийся тем, что в условиях вторжения потоков ложных событий модифицируются структурные характеристики сенсорного поля путем изменении распределения плотности сенсорных узлов по сравнению с равномерной.

**Теоретическая и практическая значимость исследования.** Теоретическая значимость работы состоит в разработке новой модели вторжения в беспроводные сенсорные сети на основе потоков ложных событий и методов защиты беспроводных сенсорных сетей от этих потоков. Важным для теории является также доказательство зависимости уровня воздействия на сенсорную сеть от вида потока и скорости перемещения сенсорных узлов, а также существования оптимального соотношения плотностей узлов, обеспечивающего максимальное время жизни сенсорной сети.

Практическая ценность работы состоит в обеспечении возможности при планировании сети заранее определить ее характеристики так, чтобы беспроводная сенсорная сеть была наиболее устойчива к воздействиям в виде потоков ложных событий. Для планирования беспроводных сенсорных сетей могут быть использованы численные значения оптимальной плотности распределения сенсорных узлов на плоскости, длительности жизненного цикла беспроводной сенсорной сети в зависимости от вида потока ложных событий и скорости перемещения сенсорных узлов.

Результаты работы использованы в ОКР акционерного общества «Московский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский радиотехнический институт» (АО «МНИРТИ»), а также в учебном процессе Военно-космической Академии им. А.Ф. Можайского и Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

**Методология и методы исследования.** Методология исследования основана на обобщении передового опыта и анализе особенностей беспроводных сенсорных сетей. В качестве методов

исследования использовались методы теории телетрафика, теории вероятностей, теории оптимизации. Для моделирования использовался пакет программ C#.NET.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются беспроводные сенсорные сети.

**Объект исследования.** Объектом исследования являются вторжения в беспроводные сети в виде потоков ложных событий.

**Положения, выносимые на защиту.**

- модель вторжения в беспроводную сенсорную сеть на основе потоков ложных событий;
- зависимость длительности жизненного цикла беспроводной сенсорной сети от вида потока ложных событий;
- метод защиты беспроводной сенсорной сети от потоков ложных событий, состоящий в придании сенсорным узлам мобильности;
- метод защиты беспроводных сенсорных сетей от потоков ложных событий, состоящий в изменении распределения плотности сенсорных узлов по сравнению с равномерной.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования, а также достаточно широким спектром публикаций и выступлений на международных и российских конференциях.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 13-й Международной конференции «Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking NEW2AN» (Санкт-Петербург, август 2013 г.), на 68-й конференции СПбНТОРЭС им. А. С. Попова. (Санкт-Петербург, апрель 2013 г.), 2, 4 и 5-ой Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» СПбГУТ (Санкт-Петербург, февраль 2013, март 2015, апрель 2016), Международной конференции «Интернет Вещей» (Санкт-Петербург, ноябрь 2014), а также на заседаниях кафедры Сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 9 работах, из них 3 статьи в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит 118 страниц текста и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы из 130 наименований и приложения, включающего акты внедрения.

**Личный вклад.** Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, рассматривается состояние исследуемой проблемы, сформулированы цель работы, перечислены основные научные результаты, полученные в диссертации, определены практическая ценность и область применения результатов, приведены сведения об апробации работы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** является аналитической и ее основное предназначение - формирование задач диссертационной работы. Беспроводные сенсорные сети достаточно часто называют технологической основой реализации концепции Интернета Вещей, имея в виду, как всепроникающий характер этих сетей, так и достаточно широкое их внедрение уже в настоящее время. В Российской Федерации исследования беспроводных сенсорных сетей при их использовании на сетях связи общего пользования (ССОП) широко проводятся, начиная с 2005 года. При этом достигнут существенный прогресс в области создания алгоритмов для функционирования этих сетей, изучения моделей потоков трафика, а результаты этих работ получили заслуженное международное признание. Однако в области сетевой безопасности беспроводных сенсорных сетей масштабных исследований пока проведено не было, а научно-исследовательские работы посвящались, в основном, исследованию традиционных проблем обеспечения информационной безопасности применительно к беспроводным сенсорным сетям. Беспроводные же сенсорные сети по своей природе являются самоорганизующимися, к тому же состоящими из очень большого числа сенсорных узлов, что требует выявления и исследования особенностей обеспечения сетевой безопасности в беспроводных сенсорных сетях.

Анализ научно-исследовательских работ, проводимых в области построения беспроводных сенсорных сетей, показал, что основные усилия направлены на увеличение длительности жизненного цикла беспроводной сенсорной сети за счет уменьшения энергетических затрат и увеличения остаточной энергии. Диссертация посвящена проблемам обеспечения сетевой безопасности беспроводных сенсорных сетей, что дает основания для детального исследования воздействий на энергетическую систему этих сетей и разработки методов защиты от вторжений в беспроводные сенсорные сети, связанных с попытками уменьшить жизненный цикл беспроводной сенсорной сети за счет уменьшения остаточной энергии.

В диссертации предлагается новый вид вторжений – создание потоков ложных событий, который должен воздействовать на сеть на сетевом уровне модели взаимодействия открытых систем. Ложное событие так же, как и легальное событие требует реакции от сенсорного узла, которая в данном случае выражается в детектировании события и формировании пакета информации для передачи информации о возникновении события либо для головного узла кластера, либо непосредственно от головного узла к шлюзу. Это требует дополнительного расхода энергии и уменьшает жизненный цикл сети. Имея информацию о реальных потоках событий, технически несложно создать

подобные им потоки ложных событий. В последние годы все больше внимания в научных исследованиях уделяется беспроводным сенсорным сетям с мобильными узлами. Поэтому, указанные выше задачи должны быть решены как для беспроводных сенсорных сетей со стационарными узлами, так и с мобильными. Естественно, предлагая новый вид вторжений, необходимо разработать и методы защиты от них.

Разработка в диссертации моделей потоков ложных событий и методов защиты от них для беспроводных сенсорных сетей позволила также сформулировать и ряд новых задач для концепции Интернета Вещей, классификация ложных структур для которого предложена в первой главе. Помимо потоков ложных событий, в эту классификацию включены также ложные облака и клонирование вещей. Облачные технологии играют ключевую роль в архитектуре сетей при реализации концепции Интернета Вещей. Действительно, зачастую Интернет Вещи имеют ограниченные вычислительные возможности, и использование облачных ресурсов является единственной возможностью эффективной организации сети. Поэтому, создание ложных облаков является одним из современных способов воздействия на приложения Интернета Вещей. Кроме того, для многих приложений концепции Интернета Вещей узлы сетей очень просты физически и имеют низкую стоимость. Поэтому еще одно направление создания ложных структур в сетях приложений Интернета Вещей – клонирование элементов таких сетей.

По результатам аналитического исследования в первой главе сформулирован комплекс взаимосвязанных задач, решаемых в диссертационной работе.

**Вторая глава** посвящена разработке модели потоков ложных событий и ее исследованию в условиях детерминированного и пуассоновского потока, а также влиянию мобильности беспроводных сенсорных узлов на длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети в условиях вторжения в нее потоков ложных событий.

В главе разработана следующая модель: 100 мобильных узлов распределены изначально случайным образом на плоскости размером 200 на 200 метров. Радиус действия сенсорного узла – 25 м, средняя скорость от 2 м/с (быстро идущий пешеход) до 10 м/с (автомобиль в городских условиях) запас энергии в каждом узле – 2Дж, расход энергии на прием - 50 нДж/бит, на передачу – 50 нДж/бит и дополнительно 100 пДж/кв.м. Все сенсорные узлы однородны, т.е. имеют одинаковый радиус действия и начальные энергетические характеристики. В соответствии с практикой использования алгоритма LEACH доля головных узлов предопределена в количестве 5% от общего числа сенсорных узлов. Шлюз расположен в центре сети. На указанную сеть воздействуют вторжения в виде потоков ложных событий. Исследуется и сравнивается воздействие пуассоновского и детерминированного потоков. Значения параметров жизненного цикла атакуемой сенсорной сети для самоподобных потоков с параметром Херста от 0,5 (пуассоновский поток) до 1 (детерминированный поток) будут находиться внутри интервала полученных значений для

пуассоновского и детерминированного потоков. Интенсивность потока ложных событий изменяется в пределах от одного до 10 событий в секунду. Скорость перемещения подвижных сенсорных узлов в модели варьируется в пределах от 2 м/с до 10 м/с. Ложные события материализованы в виде ложных объектов, проникающих на территорию сенсорной сети. При обнаружении ложного объекта сенсорным узлом информация о ложном событии передается на шлюз и этот объект уничтожается.

Исследования проведены методом имитационного моделирования, программное обеспечение написано на языке C#.NET.

На рисунке 1 представлено сравнение длительности жизненного цикла пуассоновского и детерминированного потоков при скорости перемещения сенсорных узлов 2 м/с. Как видим, для детерминированного потока при интенсивности потока до 4-х, 6-и и т.д. ложных событий в секунду, уменьшение длительности жизненного цикла сенсорной сети не так существенно в численном выражении, как и для пуассоновского. Мало того, уменьшение длительности жизненного цикла беспроводной сенсорной сети при таких значениях интенсивности потока ложных событий практически не зависит от вида потока. В области же интенсивности потока ложных событий менее 2 м/с детерминированный поток ложных событий в более существенной степени снижает длительность жизненного цикла сенсорной сети, чем пуассоновский. Это явление можно использовать при планировании вторжений в беспроводные сенсорные сети методом создания потоков ложных событий.

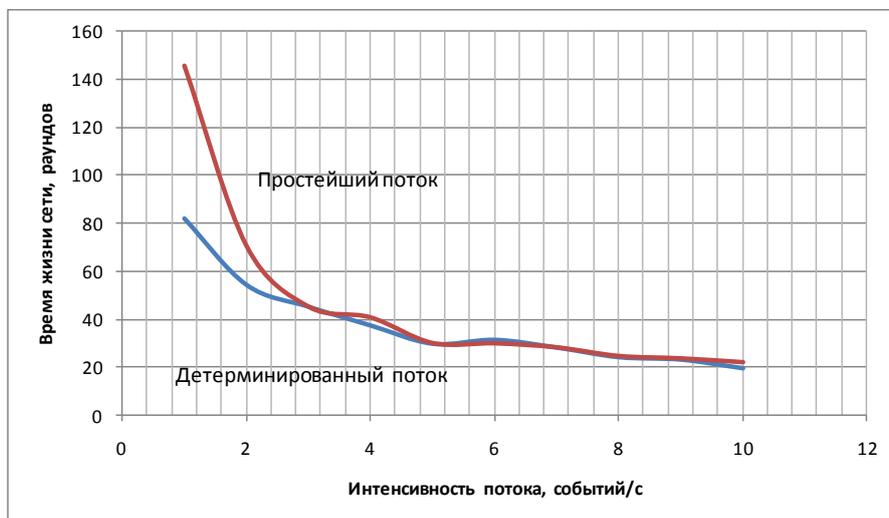


Рисунок 1- Сравнение длительности жизненного цикла пуассоновского и детерминированного потоков при скорости перемещения сенсорных узлов 2 м/с

На рисунке 2 представлена аппроксимация результатов моделирования для пуассоновского потока ложных событий с интенсивностью 1 событие/с и различных скоростей перемещения объектов. Анализ результатов моделирования показывает, что придание сенсорным узлам мобильности до 2 м/с, что соответствует исследуемой области мобильных сенсорных сетей WMSN, может существенно, до двух раз, приводить к увеличению остаточной энергии в течение жизненного цикла

беспроводной сенсорной сети. Дальнейшее увеличение скорости перемещения объектов, вплоть до используемых скоростей в сетях MANET, также может привести к экономии остаточной энергии, но уже не в столь существенной степени.

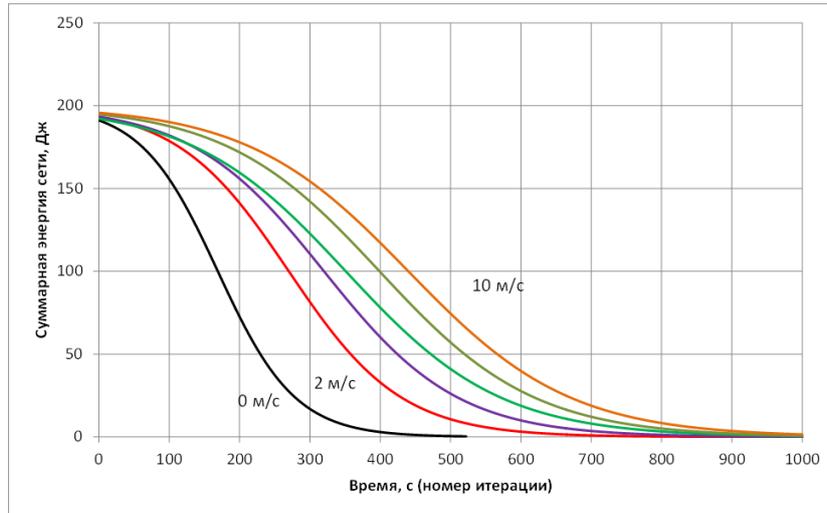


Рисунок 2 - Остаточная энергия для пуассоновского потока ложных событий с интенсивностью 1 событие/с и различных скоростей перемещения объектов

Таким образом, остаточную энергию и длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети при воздействии потоков ложных событий можно увеличить, если придать сенсорным узлам мобильность со скоростью 2 м/с (скорость быстро идущего пешехода). Это позволяет предложить в качестве метода защиты от потоков ложных событий придание мобильности беспроводным сенсорным узлам.

**В третьей главе** определены характеристики беспроводной сенсорной сети для выявления вторжений в виде потоков ложных событий с заданной вероятностью обнаружения. Рассматривается модель беспроводной сенсорной сети, представляющая собой пуассоновское сенсорное поле и поток событий в виде ложных объектов, пересекающих заданную плоскость. В модели:

- сенсорные узлы расположены на плоской поверхности, ограниченной прямоугольником  $ABCD$ , определяющим сенсорное поле;
- сенсорные узлы способны детектировать наличие ложного события в зоне действия сенсора, которая представляет собой круг радиуса  $r$ ;
- с одной стороны сенсорного поля поступает детерминированный поток ложных объектов с интенсивностью  $\lambda$  и скоростью  $v$ ;
- каждый из ложных объектов, попав в зону действия сенсорного узла, расценивается как событие, приводящее к генерации сообщения данным узлом сети;
- сообщение доставляется через сеть в центр обработки данных. Через некоторое время  $\tau$ , после этого объект считается обнаруженным и исключается из дальнейшего рассмотрения;

-если на пути следования ложный объект не попадает в зону действия ни одного из узлов, то он беспрепятственно проходит через сенсорное поле.

Целью исследования данной модели является определение характеристик сенсорной сети, в первую очередь плотности размещения сенсорных узлов, обеспечивающих заданную вероятность обнаружения ложных событий. Модель приведена на рисунке 3.

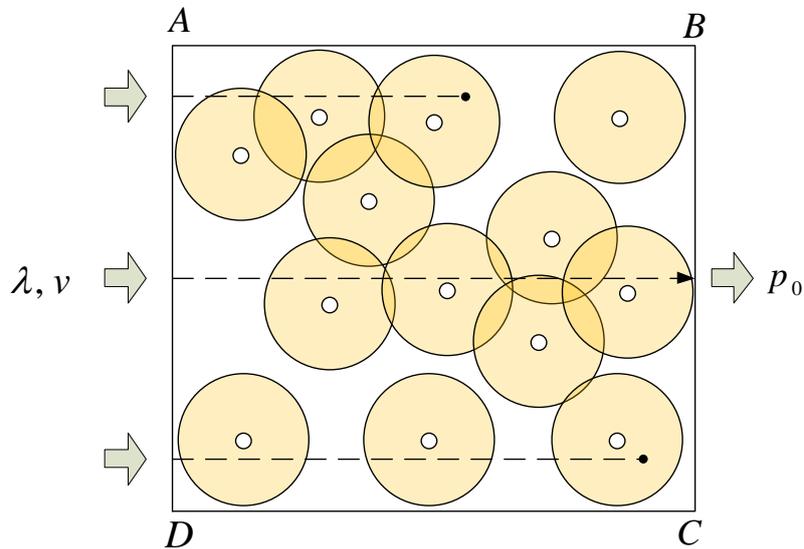


Рисунок 3 - Поток объектов в сенсорном поле

На рисунке 4 изображена используемая при этом модель обнаружения объекта сенсорами. Предполагается, что траектория движения объекта – произвольная линия. Объект попадет в зону действия сенсора, если в прямоугольнике  $abcd$  расположен хотя бы один сенсорный узел сети. Таким образом, обнаружение объекта возможно, когда в фигуре  $afgd$  имеется хотя бы один сенсор.

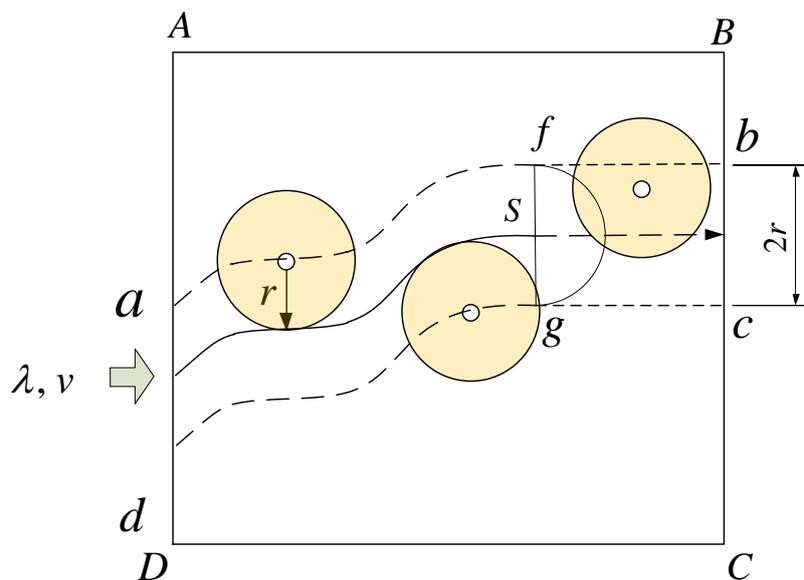


Рисунок 4 - Модель обнаружения объекта сенсорами

По результатам исследований получены аналитические выражения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики сенсорной сети для выявления вторжений в виде ложных событий

	Характеристика	Модель
1	Расстояние до первого сенсора (момента обнаружения)	<p>Плотность вероятности</p> $f(w) = \begin{cases} 0 & w < 0 \\ 2\rho \cdot \sqrt{2rw - w^2} \cdot e^{-\rho \left( r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-w}{r}\right) - (r-w) \cdot \sqrt{2rw - w^2} \right)} & 0 \leq w < r \\ 2\rho \cdot r \cdot e^{-\rho \left( 2r \cdot w + \frac{\pi \cdot r^2}{2} \right)} & w \geq r \end{cases}$
2	Среднее расстояние до первого сенсора	<p>Приближенная оценка снизу <math>\tilde{w}_0 = \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot r}</math></p> <p>Приближенная оценка сверху <math>\hat{w}_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\rho}} + \frac{e^{-\rho \cdot r^2}}{2\rho \cdot r} (1 + 2\rho \cdot r^2)</math></p>
3	Максимальное расстояние до обнаружения объекта при заданной вероятности обнаружения $p_0$	<p>(оценка необходимой длины зоны обслуживания)</p> $Z(\rho, r, p_0) = r + \frac{1}{2} \left( \frac{p_0}{\rho \cdot r} - \frac{\pi \cdot r}{2} \right), \quad Z \geq r$
4	Необходимая плотность сенсорного поля при заданной вероятности обнаружения $p_0$	<p>(оценка необходимой плотности сенсорного поля)</p> $\rho(Z, r, p_0) = \frac{p_0}{r \cdot \left( 2(Z - r) - \frac{\pi \cdot r}{2} \right)}, \quad Z \geq r$
5	Необходимый радиус обнаружения сенсорного узла при заданной вероятности обнаружения $p_0$	<p>(оценка необходимого радиуса обнаружения сенсора)</p> $r(Z, \rho, p_0) = \frac{\sqrt{2\rho \cdot (2 \cdot Z^2 + p_0(4 - \pi))} + 2\rho \cdot Z}{\rho(4 - \pi)}, \quad Z \geq r$
6	Число сообщений, передаваемых в сети при прохождении объекта	$\tilde{m} = 1 + 2r\rho \cdot \tau \cdot v$
7	Расстояние, пройденное объектом, до границы сенсорного	Плотность вероятности

	поля	$f(w) = \begin{cases} 0 & w < L \\ \frac{2w}{h^2} \cdot \left( \frac{h}{\sqrt{w^2 - L^2}} - 1 \right) & L \leq w \leq \sqrt{L^2 + h^2} \\ 0 & w > \sqrt{L^2 + h^2} \end{cases}$
8	Среднее расстояние, пройденное объектом, до границы сенсорного поля	$\hat{w} = \sqrt{L^2 + h^2} + \frac{2}{3h^2} \left( L^3 - \sqrt{(L^2 + h^2)^3} \right) + \frac{L^2}{h} \ln \left( \frac{\sqrt{L^2 + h^2} + h}{L} \right)$
9	Число сообщений при пересечении объектом сенсорного поля	Плотность вероятности $f(m) = \begin{cases} 0 & m < 2L\rho r \\ \frac{m}{2(\rho r)^2 h^2} \cdot \left( \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{m}{2\rho r}\right)^2 - L^2}} - 1 \right) & 2L\rho r \leq m \leq 2\rho r \sqrt{L^2 + h^2} \\ 0 & m > 2\rho r \sqrt{L^2 + h^2} \end{cases}$
10	Математическое ожидание числа сообщений при пересечении объектом сенсорного поля	$\bar{m} = 2\rho \cdot r \sqrt{L^2 + h^2} + \frac{4\rho \cdot r}{3h^2} \left( L^3 - \sqrt{(L^2 + h^2)^3} \right) + \frac{2L^2 \rho \cdot r}{h} \ln \left( \frac{\sqrt{L^2 + h^2} + h}{L} \right)$

**Четвертая глава** посвящена разработке метода защиты беспроводных сенсорных сетей от потоков ложных событий, состоящего в изменении распределения плотности сенсорных узлов по сравнению с равномерной, и поиску оптимального значения распределения плотности (числа) узлов на плоскости, обеспечивающего максимальное время жизни сенсорной сети.

Рассматривается типовая модель сенсорной сети, на которую поступает поток объектов, представляющий собой смесь потоков двух типов объектов  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ , где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  интенсивности. Первый поток представляет собой поток ложных событий (объектов), направленных только на уменьшение жизненного цикла сети, а второй поток – поток событий (объектов), который должен быть обнаружен сенсорной сетью. Сенсоры способны идентифицировать тип объекта. Когда в области обслуживания  $O_1$  обнаруживается объект первого типа, 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 об-

ласть  $O_2$  поступают только объекты второго типа и часть объектов первого типа, необнаруженных в области  $O_1$ . Сенсоры второго типа одинаково реагируют на объекты обоих типов, т.е. вырабатывают сообщения при нахождении в зоне обнаружения любого объекта.

Задача состоит в том, чтобы при заданном числе узлов сети оценить значения плотностей размещения сенсоров  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , 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  $p_0$ .

Зависимость вероятности обнаружения объектов первого типа от времени может быть определена следующим образом:

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

где  $L_1$  - длина области  $O_1$  (м);

$r$  - радиус зоны обнаружения сенсора (м);

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

где  $n_0^{(1)}$  - начальное число узлов сети в области  $O_1$ ;

$t$  - время (с);

$h$  - ширина областей  $O_1$  и  $O_2$  (м);

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

$\lambda_1$  - интенсивность поступления объектов 1 типа (объектов/ед. времени);

$\varepsilon_0$  - 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;

$\tilde{w}$  - средняя длина пути, объекта до момента его обнаружения (м):

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

Зависимость вероятности обнаружения объектов во второй области сети от времени может быть получена аналогично, с учетом изменения интенсивности объектов, при прохождении через первую область. В первой области происходит обнаружение объектов первого типа с вероятностью  $p_0^{(1)}$ , следовательно, интенсивность объектов первого типа, поступающих во вторую область, может быть определена как  $\lambda_1 \cdot (1 - p_0^{(1)})$ . Тогда интенсивность поступления объектов первого и второго типов во вторую область будет определяться как  $\lambda_2 + \Delta\lambda_1$ , где

$$\Delta\lambda_1 = \lambda_1 \cdot (1 - p_0^{(1)}). \quad (5)$$

Задача выбора значений  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , при которых достигается максимальное время жизни сети, является задачей оптимизации. В этой задаче переменными (параметрами) управления являются значения  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , а параметром состояния является время жизни сети, которое из (5) можно определить как

$$t_0 = \arg(p_0^{(2)}(t) = p_0) \quad (6)$$

где  $p_0$  - заданная вероятность обнаружения объектов в области 2.

Тогда задача оптимизации может быть определена следующей целевой функцией

$$t_{\max} = \max_{n_1, n_2} \{ \arg(p_0^{(2)}(t) \geq p_0) \} \quad (7)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \rho_1 &\geq 0 \\ \rho_2 &\geq 0 \\ n &= n_1 + n_2 = \text{const} \\ p_0 &= \text{const} \\ L_1 &= \text{const} \\ L_2 &= \text{const} \\ h &= \text{const} \end{aligned} \quad (8)$$

Для решения неравенства  $p_0^{(2)}(t) \geq p_0$  из (7) относительно  $t$  использовался численный метод Рунддера из пакета программного обеспечения Mathcad.

Выбор метода решения задачи оптимизации (7), (8) зависит от вида оптимизируемой функции. Анализ выражений (1) – (6) позволяет сделать вывод о том, что в условиях (8) данная задача является задачей выпуклой оптимизации. Для оптимизации выпуклой функции могут быть использованы 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. Ввиду того, что в данном случае вычислительная эффективность метода не имеет существенного значения, для решения задачи был выбран реализованный

во многих прикладных системах метод сопряженных градиентов с учетом ограничений (8). Вероятность обнаружения объектов  $p_0$  в области 2 задаем на уровне 0,9.

Зависимость максимального времени жизни сети от числа (плотности) узлов в первой и второй областях можно представить поверхностью. На рисунке 5 приведена зависимость максимального времени жизни сети от числа узлов в первой и второй областях без учета ограничений (левый рисунок) и с учетом ограничения общего числа узлов. Интенсивности поступления объектов первого и второго типа были выбраны равными.

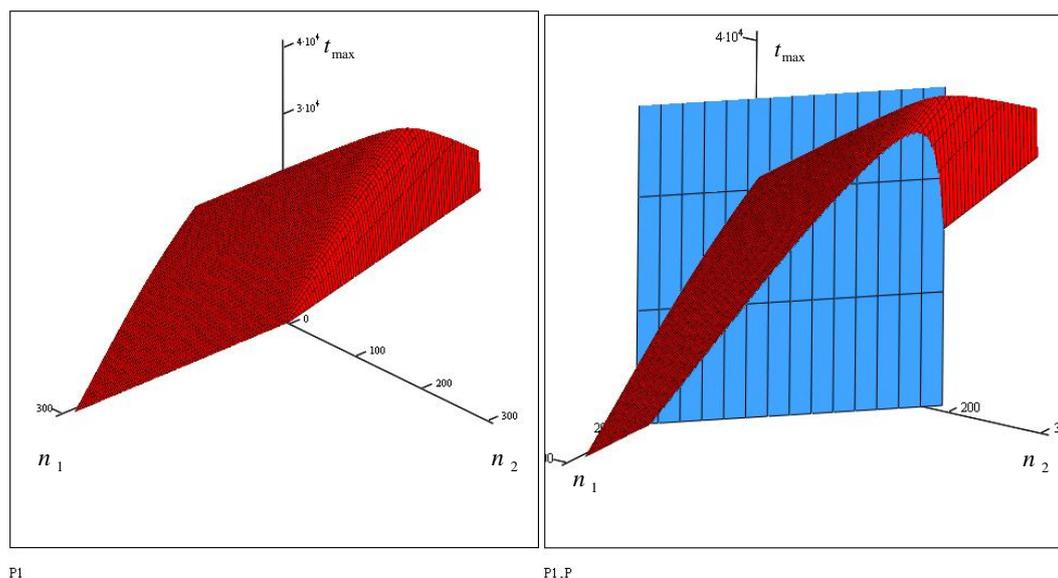


Рисунок 5 - Зависимости максимального времени жизни сети от числа узлов в первой и второй областях без учета ограничений и с учетом ограничения общего числа узлов

Анализ рисунка 5 доказывает, прежде всего, что существует некоторое соотношение узлов в первой и второй областях, которое обеспечивает максимальное время жизни сети, под которым по-прежнему понимается интервал времени, в течение которого объекты во второй области обнаруживаются с заданной вероятностью.

Из рисунка 5 видно также, что пересечение поверхности функции максимального времени жизни с областью ограничений представляет собой унимодальную функцию, имеющую выраженный максимум.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные новые научные результаты:

1. Беспроводные сенсорные сети обладают целым рядом особенностей по сравнению с существующими сетями, ключевой из которых является их самоорганизация. Важнейшими характеристиками беспроводных сенсорных сетей являются длительность жизненного цикла и остаточная энергия. Особенности, присущие беспроводным сенсорным сетям, определяют новые проблемы обеспечения сетевой безопасности для этих сетей.

2. Предложен новый вид атаки на беспроводные сенсорные сети – создание потоков ложных событий с целью уменьшения длительности жизненного цикла сети за счет воздействия на ее энергетическую систему.
3. Разработана модель вторжения в беспроводную сенсорную сеть с целью уменьшения ее жизненного цикла, отличающаяся от известных тем, что для достижения данной цели используются потоки ложных событий. Модель разработана на основе типовых геометрических, количественных и энергетических параметров беспроводных сенсорных сетей с использованием базового алгоритма кластеризации для гомогенной мобильной сенсорной сети при вторжении в сеть пуассоновского и детерминированного потоков ложных событий.
4. Выявлено в отличие от известных результатов, что длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети может существенно зависеть от вида потока ложных событий и при прочих равных условиях при воздействии детерминированного потока может быть почти в два раза меньше, чем при воздействии пуассоновского.
5. Установлено в отличие от известных результатов, что остаточную энергию и длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети при воздействии потоков ложных событий можно увеличить, если придать сенсорным узлам мобильность со скоростью 2 м/с (скорость быстро идущего пешехода).
6. Обнаружение ложных событий в беспроводной сенсорной сети можно рассматривать как задачу слежения за целью, а для выявления ложных событий с заданной вероятностью с учетом ограниченных возможностей сенсорных узлов целесообразно использовать архитектурные характеристики сети, например, распределение плотности размещения узлов на сенсорном поле. Определены следующие характеристики беспроводной сенсорной сети для выявления вторжений в виде ложных событий:
  - расстояние до первого сенсора (момента обнаружения),
  - среднее расстояние до первого сенсора,
  - максимальное расстояние до обнаружения объекта при заданной вероятности обнаружения  $p_0$ ,
  - необходимая плотность сенсорного поля при заданной вероятности обнаружения  $p_0$ ,
  - необходимый радиус обнаружения сенсорного узла при заданной вероятности обнаружения  $p_0$ ,
  - число сообщений, передаваемых в сети при прохождении объекта,
  - расстояние, пройденное объектом, до границы сенсорного поля,
  - среднее расстояние, пройденное объектом, до границы сенсорного поля,
  - число сообщений при пересечении объектом сенсорного поля,

- математическое ожидание числа сообщений при пересечении объектом сенсорного поля.

7. Разработан метод защиты беспроводных сенсорных сетей от потоков ложных событий путем изменения структурных характеристик сенсорного поля, состоящий в изменении распределения плотности сенсорных узлов по сравнению с равномерной.
8. Доказано, что существует оптимальное значение плотности (числа) узлов в первой и второй областях сенсорного поля, обеспечивающее максимальное время жизни сенсорной сети, и 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.
9. Предложена классификация ложных структур для Интернета Вещей, где наряду с потоками ложных событий рассматриваются ложные облака и клонированные интернет вещи. Дано определение ложных облаков и рассмотрены примеры клонирования сенсорных полей. Приведены основные характеристики ложных облаков и клонирования для Интернета Вещей.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Научные статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:**

[1] И.А. Богданов, Характеристики жизненного цикла мобильной сенсорной сети при различных потоках ложных событий / И.А. Богданов, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь, 2013.- №1. - С.32-33.

[2] Богданов, И.А. Структурный метод защиты беспроводной сенсорной сети от потоков ложных событий / И.А. Богданов // Электросвязь, 2014.- №11.- С.14-17.

[3] И.А.Богданов Летящие сенсорные сети / А.Е.Кучерявый, А.Г.Владыко, Р.В.Киричек, А.И.Парамонов, А.В.Прокопьев, И.А.Богданов, А.А.Дорт-Гольц // Электросвязь, 2014.-№9.-С. 2-5.

#### **Научные статьи в журналах, включенных в РИНЦ и доклады в материалах научных конференций:**

[4] Богданов И.А. Сетевая безопасность в беспроводных сенсорных сетях / И.А. Богданов // 68-я Научно-техническая конференция НТОРЭС им. Попова. Труды конференции, Апрель, 2013.

[5] И.А. Богданов. Влияние мобильности узлов беспроводной сенсорной сети на жизненный цикл при вторжении в виде потоков ложных событий / И.А. Богданов // 68-я Научно-техническая конференция НТОРЭС им. Попова. Труды конференции, Апрель, 2013.

[6] Богданов, И.А. Характеристики беспроводной сенсорной сети для выявления вторжений в виде потоков ложных событий [Электронный ресурс] / И.А. Богданов, А.Е. Кучерявый //

Информационные технологии и телекоммуникации. Электронный научный журнал. СПб ГУТ, выпуск 3 (7), 2014, с.59-74. Режим доступа: <https://sut.ru/>. – (Дата обращения: 20.09.2016).

[7] Богданов, И.А. Особенности вторжений во всепроникающие сенсорные сети. Новые виды вторжений / И.А. Богданов, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // 2-ая Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сборник научных статей, СПб, 26-27 февраля 2013. – С. 49 – 52.

[8] Богданов, И.А. Ложные структуры в Интернете Вещей. / Богданов И.А., Кучерявый А.Е. // Информационные технологии и телекоммуникации, 2015, №4 (12). - С.4-10.

**Научные статьи (доклады), индексируемые в международных базах данных Scopus и/или Web of Science:**

[9] Bogdanov, I. The mobile Sensor Network Life-Time under Different Spurious Flows Intrusion / I.Bogdanov, A.Koucheryavy, A.Paramonov // LNCS, Springer. 13 th NEW2AN, LNCS 8121, August, 2013. - PP. 312-317.