

УДК 621.3.019.3

## **Имитационная модель для исследования адаптивных сенсорных сетей**

**Бородин В.В.\*, Петраков А.М.\*\*, Шевцов В.А.\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [doc\\_bor1@mail.ru](mailto:doc_bor1@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [nio4@mai.ru](mailto:nio4@mai.ru)*

*\*\*\*e-mail: [vs@mai.ru](mailto:vs@mai.ru)*

### **Аннотация**

В статье представлена имитационная модель для исследования и анализа эффективности функционирования адаптивных сенсорных сетей связи. Приведена структура модели, описаны функциональные возможности и ограничения модели.

**Ключевые слова:** адаптивные радиосети передачи данных, сенсорные радиосети, имитационное моделирование, методы доступа, маршрутизация.

### **Введение и постановка задачи**

В настоящее время широкое распространение получают адаптивные сенсорные сети, предназначенные для сбора данных от большого числа беспроводных датчиков (сенсоров) [1 – 4]. Успехи технологии позволяют в ряде случаев интегрировать в одном миниатюрном устройстве один или несколько

сенсоров и сетевой узел. Такие сети используются для управления и мониторинга беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), выполняющие полеты как индивидуально, так и в составе группы. В последнее время сенсорные сети [5 – 8] находят широкое применение в таких проектах, как «Умный город», «Умный дом», «Летающие сети», «Интернет вещей», «Промышленный интернет» и др. Рассматриваемый класс сетей, как правило, характеризуется следующим набором свойств:

1. Большое количество сетевых узлов и разнотипных сенсоров от десятков до сотен или тысяч;
2. Функционирование в ограниченном и узкополосном частотном диапазоне, в котором одновременно может находиться большое число сетей и другого приемо-передающего оборудования;
3. Пространство, в котором развернута и функционирует сеть чаще всего ограничено, может иметь сложную геометрическую структуру (например, внутренность котлована для добычи полезных ископаемых) и содержать радио непроницаемые перегородки, образующие сложную топологию сети;
4. Малое энергопотребление сетевых узлов и сенсоров (доли милливатт), использование режима сна для дополнительного снижения энергопотребления, ограниченный энергетический потенциал радиолинии, и связанные с этим низкие скорости передачи и ограниченный радиус действия;
5. Мобильность сетевых узлов и сенсоров с достаточно сложным и плохо

предсказуемым характером движения;

В полной мере перечисленные свойства и особые условия функционирования сетей при их проектировании могут быть проанализированы и учтены на основе имитационного моделирования. В настоящее время известно большое число программных продуктов, см., например, GPSS, OPNET, NS-2 [9 – 14], в которых модели сетей и их элементов написаны на высокоуровневом универсальном языке программирования. Вместе с тем необходимо отметить, что для исследования сетей часто целесообразно использовать специализированные программные средства [15 – 16], обеспечивающие более полное и оперативное решение поставленных задач.

В статье рассматривается специализированная имитационная модель сенсорной сети. Специализация позволила, на наш взгляд, существенно упростить процедуры изменения входных параметров сети, повысить прозрачность алгоритмов функционирования, динамически изменять программу и план моделирования, оптимизировать время испытаний, что особенно важно при исследовании и сравнительном анализе большого количества вариантов архитектуры сети.

### **Описание модели сети**

Модель предназначена для исследования адаптивной радиосети с коммутацией пакетов. При моделировании предполагается, что  $N$  сетевых узлов находятся внутри области (области нахождения) заданной формы (квадрат, куб, и тд) единичной площади (объема). Имеется возможность формирования нескольких

типов структур, в том числе:

- Случайная структура, узлы которой имеют случайные координаты. Каждый узел может передавать пакеты в адрес любого другого сетевого узла.
- Иерархическая структура, содержащая определенное число уровней и количество элементов на каждом уровне. Потоки информации в такой сети направлены от узлов нижнего к узлам верхнего уровня (сеть сбора информации), или от высокоуровневых узлов к узлам нижнего уровня (сеть управления).
- Линейная структура, узлы которой расположены последовательно друг за другом. Такая структура может использоваться для моделирования процессов ретрансляции пакетов.
- Кольцевая структура и др.

Для оценки поведения сети используется набор показателей эффективности. В частности, имеется возможность по результатам испытаний определять следующие показатели эффективности:

- временные характеристики (гистограмма распределения, первые два момента распределения) времени передачи пакетов по сети;
- вероятность потери пакетов вследствие превышения времени передачи пакета допустимого уровня;

- временные характеристики периодов повторной передачи (при использовании методов случайного доступа);
- метрические характеристики маршрута (гистограмма распределения длины маршрута, средняя длина и дисперсия длины маршрута);
- вероятностные характеристики очереди пакетов на передачу по каналам связи;
- вероятностные и метрические характеристики маршрутных циклов;
- вероятностные характеристики дубликатов передаваемых пакетов, и тд.

При моделировании движения узлов, координаты каждого узла получают определенные приращения, отражающие характер движения.

Каждый узел сети может являться источником сообщений. Модель позволяет формировать рекуррентные потоки общего вида (в том числе и пуассоновские), а также самоподобный трафик.

Модель сети позволяет анализировать характеристики решения следующих прикладных задач:

- Передача пакетов от одного узла к другому;
- Сбор данных от сенсоров в один или несколько шлюзов интеграции с внешними сетями;
- Ретрансляция пакетов;
- Широковещательная рассылка данных от одного узла ко всем и от всех

узлов ко всем.

Для реализации алгоритмов управления сетью, маршрутизации пакетов и реконфигурации, в сети предусмотрен служебный канал, пропускная способность которого составляет часть от общей пропускной способности каналов между сетевыми узлами.

В сети предусмотрена передача пакетов с использованием следующих протоколов доступа:

- случайного многостанционного синхронного доступа,
- циклического доступа с временным или частотным разделением каналов,
- резервирование канала,
- прослушивание несущей.

Расчет вероятности коллизии пакетов при случайном доступе выполняется аналитически с учетом воздействия шумов, помех, вызванных одновременной передачей пакетов несколькими узлами, энергетикой оборудования и координат узлов.

Для распознавания коллизий моделируются процедуры квитирования, в том числе, учитывается возможность искажения или коллизий самих квитанций. При передаче сообщений возможно изучение алгоритмов резервирования многоточечных (в частности, двухточечных) каналов.

В условиях низкого энергетического потенциала радиоканала для обеспечения полной связности сети, используется ретрансляция пакетов. Анализ эффективности сети в этом случае проводится с учетом характеристик служебного канала, используемого для рассылки маршрутной информации о состоянии узлов, каналов и сети в целом.

В сети реализованы следующие адаптивные механизмы управления:

1. Управление периодом повторной передачи искаженных пакетов в зависимости от сетевого трафика и энергетического потенциала канала связи.
2. Управление доступом в зависимости от трафика и количества узлов сети.
3. Управление функционированием служебного канала связи и его взаимодействием с информационным каналом.

В модели реализованы процессы, обеспечивающие при определенных условиях, повышение эффективности функционирования сети, в том числе:

1. Изменение диаграммы направленности приемо-передающих антенн.
2. Переход с одноканального на многоканальный режим передачи пакетов.
3. Группировка пакетов в сообщения и резервирование каналов.
4. Изменение соотношений между скоростью передачи основного и служебного каналов.

## Состав модели

Функционально модель содержит следующие блоки:

- блок задания исходных данных для моделирования,
- блок моделирования,
- блоки обработки и отображения результатов моделирования.

Входные параметры блока задания исходных данных определяются для четырех уровней модели взаимодействия открытых систем МВОС.

На физическом уровне определяются следующие параметры:

- Размеры и форма области нахождения узлов,
- Количество узлов сети,
- Потенциалы радиолинии,
- Количество каналов передачи, методы уплотнения и закрепления каналов,
- Модели для расчета вероятности искажения символов и пакетов в целом,
- Диаграммы направленности антенн,
- Параметры искажений и характеристики преднамеренных помех.

На канальном уровне определяются следующие параметры:



- Методы доступа,
- Методы квитирования пакетов,
- Алгоритмы функционирования и параметры служебного канала.

На сетевом уровне определяются:

- Состав метрик для маршрутизации пакетов,
- Параметры изменений структуры сети,
- Методы маршрутизации.

На транспортном уровне определяются:

- Структура передаваемых сообщений и способ разбиения сообщения на пакеты,
- Варианты резервирования каналов для обмена данными между узлами.

На уровне прикладных процессов задаются:

- Характеристики источника сообщений,
- Сопоставления узлам-источникам адресатов сообщений.

Имитационное моделирование выполняется по событиям на заданном интервале времени функционирования сети. Имеется возможность исследовать

стационарные и нестационарные процессы поведения сети с заданной допустимой статистической ошибкой.

Модель позволяет определять статистические характеристики следующих величин:

- времени ожидания передачи пакета в узле,
- времени передачи пакета по сети от источника до потребителя,
- времени повторной передачи пакетов и количества повторных передач,
- очередь ожидания пакетов, и др.

В модели заложены механизмы для:

- распознавания перехода сети в неустойчивое состояние,
- сокращения времени моделирования и получения экспресс результатов,
- оптимизации параметров сети,
- отображения в ходе моделирования параметров сети.

Блоки обработки и отображения результатов моделирования формируют по полученным результатам заданные статистики (законы распределения, средние, дисперсии и т.д.) и отображают полученные результаты в виде графиков и таблиц.

## Основные области исследования сетей

Рассмотренная модель используется для определения характеристик широкого класса сенсорных сетей, различающихся протоколами функционирования, структурой и составом оборудования при проведении следующих исследований:

- Определение условий нахождения сети в устойчивом состоянии и перехода в состояние блокировки. Показано, в частности, что оценка состояния сети может быть осуществлена на основе анализа поведения локальных (т.е. вычисляемых на каждом узле) параметров;
- Разработка и оптимизация алгоритмов многостанционного доступа, определение области эффективного использования для адаптивного управления сетью;
- Оптимизация пропускной способности служебного канала для управления процессом функционирования сети с целью предотвращения ее перехода в неустойчивое состояние и состояние блокировки;
- Анализ влияния на эффективность сети вида входного потока сообщений, оптимизация размера пакетов, выделяемых из сообщений;
- Разработка алгоритмов оптимального управления сетью, как по локальным, так и по глобальным (общесетевым) параметрам;
- Разработка и оптимизация алгоритмов функционирования служебного канала для передачи маршрутной информации;
- Разработка и исследование алгоритмов маршрутизации, предотвращающих появление дубликатов пакетов и заикливание маршрутов, а также определение

времени доставки маршрутной информации, загрузки сети, объема переданной информации;

– Исследование поведения сети в пространстве сложной геометрии (в частности, на поверхности полусферы, тора и тд), а также при наличии непрозрачных перегородок, пространственно разделяющие сетевые узлы;

– Изучение поведения сети и алгоритмов маршрутизации в нестационарных условиях, в том числе при отказах узлов или каналов обмена данными, изменении во времени активности выбранных узлов, изменении конфигурации пространства, в котором функционирует сеть.

### **Заключение**

Представленная в докладе модель разработана на высокоуровневом графическом объектно-ориентированном языке программирования. Модель специализирована для проведения исследований, в связи с чем имеется достаточно удобный интерфейс разработчика для модификации исходных данных и программного кода. Результаты моделирования отображаются в графическом виде, возможна настройка параметров отображения, в том числе масштабирование, фокусировка на выбранном диапазоне изменения входных и выходных переменных, нормирование и параметрирование графиков. В настоящее время по результатам исследований получен большой статистический материал. Частично результаты исследования отражены в [17 – 20].

## Библиографический список

1. Ким Н.В., Крылов И.Г. Групповое применение БЛА в задачах наблюдения // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов». Москва, 25 - 27 мая 2005: сборник докладов. - М.: Изд-во МАИ, 2012, С. 59 - 62.
2. Разгуляев Л. Перспективные мобильные адаптивные сети передачи информации для СВ США // Зарубежное военное обозрение. 2008. № 1. С. 35 - 39.
3. Молчанов Д.А. Самоорганизующиеся сети и проблемы их построения // Электросвязь. 2006. № 6. С. 24 - 28.
4. Назаренко А.П., Сарьян В.К., Лутохин А.С., Сущенко Н.А. Использование летающих систем Интернета Вещей до, во время и после катастрофической фазы чрезвычайной ситуации // Электросвязь. 2015. № 7. С. 12 - 15.
5. Jacquet P., Clausen T. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) // Internet Engineering Task Force, October 2003, available at: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
6. Ogier R., Templin F., Lewis M. Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF), Internet Engineering Task Force, February 2004, available at: <http://tools.ietf.org/html/rfc3684>
7. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing // Internet Engineering Task Force, July 2003, available at: <http://tools.ietf.org/html/rfc3561>
8. Network Simulator 2 (NS-2), available at: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/developers>

9. Руководство по среде моделирования GPSS World. URL: [http://www.minutemansoftware.com/tutorial/tutorial\\_manual.htm](http://www.minutemansoftware.com/tutorial/tutorial_manual.htm)
10. Боев В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS WORLD. - СПб.: БХВ-Петербург, 2004. - 368 с.
11. The VINT Project A Collaboration between researchers at UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC. Kevin Fall, Kannan Varadhan, November 4, 2011, URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>
12. Development of laboratory exercises based on OPNET Modeler // OPNET. 2012. URL: [https://nauchforum.ru/archive/MNF\\_tech/4\(23\).pdf](https://nauchforum.ru/archive/MNF_tech/4(23).pdf)
13. Акимов Е.В., Кузнецов М.Н. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей (БСС) // Труды МАИ. 2010. № 40. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=22873>
14. Attarzadeh N., Mehrani M.A. New Three Dimensional Clustering Method for Wireless Sensor Networks // Global Journal of Computer Science and Technology, April 2011, vol. 11, issue 6, version 1.0.
15. Терентьев М.Н. Имитационная модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 3. С. 178 - 183.
16. Настасин К.С. Родионов В.В. Особенности маршрутизации в совмещенной сети сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: [http://trudymai.ru/published.php?ID=28108&PAGEN\\_2=2](http://trudymai.ru/published.php?ID=28108&PAGEN_2=2)
17. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды

МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57894>

18. Бородин В.В., Петраков А.М. Анализ алгоритмов управления адаптивной сетью передачи данных по локальным параметрам // Труды МАИ. 2015. № 80. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=57035>

19. Бородин В.В. Шевцов В.А. Выбор параметров управления доступом в сетях связи с мобильными объектами // Труды МАИ. 2012. № 80. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=56886>

20. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Моделирование служебного канала передачи маршрутной информации адаптивной летающей сети связи //

Электросвязь. 2016. № 11. С. 41 - 45.