

УДК 004.716

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.15.4

*Зуб М.А., Мальчева Р.В.*

*Донецкий национальный технический университет*

*кафедра компьютерной инженерии*

*E-mail: micheal.zub@gmail.com*

### Введение

Беспроводные сети датчиков являются сложным программно-аппаратным комплексом, разработка которого включает в себя проектирование аппаратного обеспечения узлов сети, разработку программного обеспечения для микроконтроллеров и разработку серверного ПО для персональных компьютеров, являющихся центральными узлами сбора информации и управления.

В процессе разработки необходимо выполнять тестирование как отдельных компонентов, так и системы в целом. Поскольку беспроводные сенсорные сети могут включать в себя тысячи конечных устройств, проведение масштабного тестирования системы с использованием реальной сети зачастую либо невозможно физически, либо является слишком дорогостоящим.

Для решения этой проблемы используется моделирование беспроводных сенсорных сетей. Модельная сеть может быть сконфигурирована для работы с серверным ПО центральных узлов сбора информации. Изучение модельных сетей позволяет исследовать топологии, алгоритмы, а также функционирование сети при неблагоприятных радиоусловиях и при больших нагрузках.

Поскольку в беспроводных сетях передача информации ведется посредством радиоволн, которые не являются надежным каналом связи, в основе правильного моделирования лежит адекватная модель физического уровня сети. В данной работе мы рассмотрим модель физического уровня беспроводных сетей датчиков, которая включает в себя модель области радиопокрытия, модель ошибок, модель энергопотребления, и модель чувствительности датчика.

### Модель области радиопокрытия

Модель области радиопокрытия необходима для предсказания наличия радиоканала между двумя узлами. Сигналы, которые посылаются с определенной мощностью передатчиком, испытывают затухания. Приемник способен получить информацию, если сигнал будет получен с уровнем мощности, превышающим чувствительность его трансивера. Затухание, обычно называемое потерями в тракте передачи, напрямую зависит от расстояния между отправителем и получателем, частоты передачи и других факторов. Наиболее часто упоминаемыми в литературе моделями являются модель свободного пространства, двулучевая модель и логарифмическая модель пути [1].

Модель распространения в свободном пространстве применяется, когда существует прямой и беспрепятственный путь между отправителем и получателем, т.е., есть прямая видимость. Полученная мощность на расстоянии  $d \geq d_0$  между отправителем и получателем согласно модели составляет:

$$P_{rx}(d) = \frac{P_{tx} \cdot G_{tx} \cdot G_{rx} \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L} = C_f \cdot \frac{P_{tx}}{d^2},$$

где  $P_{rx}(d)$  – мощность, полученная приемником на расстоянии  $d$ ;  $P_{tx}$  – мощность, с которой передавался сигнал;  $G_{tx}$  и  $G_{rx}$  – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника, соответственно; коэффициент  $L \geq 1$  обозначает потери в схемах приемника и передатчика;  $\lambda$  – длина волны, в метрах; и  $C_f$  – константа, которая зависит от приемопередатчиков.

Как видно из уравнения, сигнал затухает пропорционально квадрату расстояния  $d$ . С точки зрения трансмиттера, уравнение воспринимается как круг радиуса  $r = \sqrt{C_f \cdot P_{tx}}$ , эквивалентный площади покрытия.

Двулучевая модель предполагает более реалистичный сценарий, в котором приемник получает сигналы, идущие непосредственно от отправителя к получателю совместно с другими сигналами, которые достигают приемника, отражаясь от плоскости земли. Эта модель более точна, чем модель свободного пространства. Мощность, полученная приемником на расстоянии  $d$ , определяется следующим уравнением:

$$P_{rx}(d) = \frac{P_{tx} \cdot G_{tx} \cdot G_{rx} \cdot h_{tx}^2 \cdot h_{rx}^2}{d^4} = C_t \cdot \frac{P_{tx}}{d^4},$$

где  $H_{tx}$  – высота антенны передатчика;  $H_{rx}$  – высота антенны приемника;  $C_t$  – константа, которая зависит от приемопередатчиков.

Как видно из уравнения модели двух лучей, сигнал сейчас затухает пропорционально четвертой степени расстояния  $d$ . Таким образом, область покрытия представляет собой круг радиуса  $r = \sqrt[4]{C_t \cdot P_{tx}}$ .

Логарифмическая модель пути была разработана на основе полевых измерений. Этот подход обычно используется для получения моделей потерь в необычных условиях, таких как пещеры или в других местах с множеством препятствий или отражающих материалов. Модель задается уравнением:

$$P_{rx}(d) \propto \frac{P_{tx}}{d^\alpha},$$

которое означает, что потери в тракте пропорциональны отношению мощности передатчика  $P_{tx}$  и расстояния  $d$  между отправителем и получателем, возведенного в степень коэффициента потерь в тракте  $\alpha$ , который зависит от окружающей среды. В этом случае передатчик может иметь область покрытия радиусом  $r = \sqrt[\alpha]{P_{tx}}$ . Уравнение может быть выражено в децибелах, как:

$$PL_{r,dB}(d) = PL_{dB}(d) + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + x_{\sigma,dB},$$

где  $PL_{r,dB}(d)$  – полученная мощность в децибелах;  $PL_{dB}(d)$  – потери в тракте, в децибелах, на расстоянии  $d$ ;  $d_0$  является опорным расстоянием;  $\alpha$  – экспонента потерь в тракте;  $X_{\sigma,dB}$  – гауссовская случайная величина с нулевым средним со стандартным отклонением  $\sigma$ .

### Модель ошибок

Особенности возникновения ошибок и их количество имеют прямое и непосредственное влияние на разработку и анализ протоколов и механизмов связи.

Наиболее часто используемыми моделями ошибок являются модель независимой ошибки и марковская модель ошибок с двумя состояниями. [2]

Модель независимой ошибки предполагает, что ошибки случайны и, следовательно, они являются независимыми. Эта модель является моделью без памяти, так как отсутствует временная корреляция между символами, т. е. вероятность того, что один символ ошибочен, не влияет на то, что случилось с любым другим символом. Эта модель не отражает реальное поведение беспроводных каналов, так как в них ошибки возникают всплесками и, таким образом, они взаимосвязаны.

Более подходящей моделью для беспроводных каналов является марковская модель ошибок с двумя состояниями. Эта модель, изображенная на рис. 1, реализуется с помощью цепей Маркова с дискретным временем, которые моделируют состояния канала на битовом уровне.

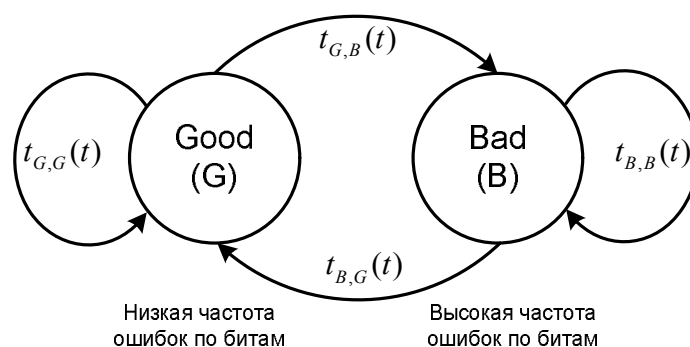


Рисунок 1 – Марковская модель ошибок с двумя состояниями

В состоянии «Good» предполагается, что канал обладает высоким качеством и вероятность появления ошибочных битов низка. В состоянии «Bad» качество канала ухудшается, и вероятность появления ошибочных битов увеличивается. Как правило, модель большую часть времени пребывает в состоянии «Good», а в состоянии «Bad» пребывает достаточно короткий промежуток времени. Эти длинные и короткие продолжительности приводят к "пульсирующей" модели ошибок, которая очень точно воспроизводит часто встречающиеся эффекты беспроводной связи, такие как короткие потери сигнала, длинные пути и т.д. Пример ошибок показан на рис. 2.

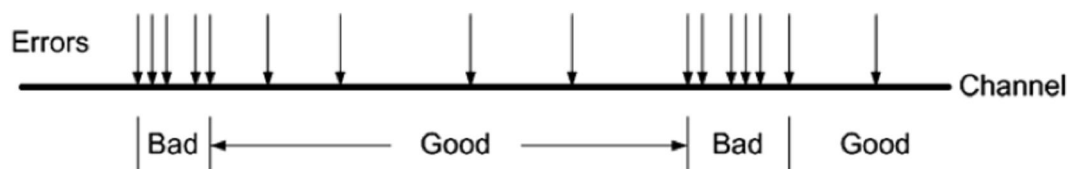


Рисунок 2 – Пример возникновения ошибок

Марковская модель с двумя состояниями характеризуется четырьмя вероятности переходов, начальным распределением вероятности состояния и матрицей вероятностей ошибки. Вероятность перехода обозначает вероятность перехода в

состояние  $S = \{G(\text{Good}), B(\text{Bad})\}$  в момент времени  $t + 1$ , при нахождении в состоянии  $S$  в момент времени  $t$ . Математически эти вероятности можно описать в виде:

$$t_{G,G}(t) = P\{S_{t+1} = G \mid S_t = G\}$$

$$t_{G,B}(t) = P\{S_{t+1} = G \mid S_t = B\}$$

$$t_{B,G}(t) = P\{S_{t+1} = B \mid S_t = G\}$$

$$t_{B,B}(t) = P\{S_{t+1} = B \mid S_t = B\}$$

### Модель энергопотребления

Модели рассеивания энергии являются очень важными в беспроводных сенсорных сетях, так как они могут быть использованы для сравнения эффективности различных коммуникационных протоколов с энергетической точки зрения. Очень простая и обычно используемая модель рассеивания энергии – это радиомодель первого порядка. Согласно модели, для передачи  $k$ -битных пакетов от отправителя к получателю на расстояние  $d$  система затрачивает:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec-Tx(k)} + E_{amp-Tx(k, d)}$$

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec \times k} + E_{amp} \cdot k \cdot d^2$$

где  $E_{Tx}(k, d)$  – энергия, потребляемая передатчиком для отправки  $k$ -битного пакета на расстояние  $d$ ;  $E_{elec-Tx(k)}$  – энергия, использованная электроникой передатчика;  $E_{amp-Tx(k, d)}$  – затраты энергии на усилитель.

Кроме того, на приемном узле, для получения сообщения трансивер затрачивает:

$$E_{Rx}(k) = E_{elec-Rx(k)}$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec \times k}$$

где  $E_{Rx}(k)$  – энергия, потребляемая приёмником при получении  $k$ -битного пакета, которая равна энергии, использованной электроникой приёмника  $E_{elec-Rx(k)}$ .

### Модель чувствительности датчика

Подобно зоне коммуникационного покрытия узла сети, которая определяется передающей мощностью трансивера и моделью распространения сигнала, датчики имеют свои собственные зоны чувствительности. Важно подчеркнуть, что зона чувствительности датчика не обязательно совпадает с зоной коммуникационного покрытия.

Согласно модели, область покрытия датчика делится на три области, обозначенные на рис. 3. Внутренняя область определяется расстоянием  $r - r_u$  и гарантирует, что датчик будет обнаруживать события  $e$  с вероятностью 1, где  $r_u$  известно как расстояние неопределенности. Внешняя область как раз наоборот является областью, где вероятность обнаружения события  $e$  равна нулю. Другими словами,  $d(s, p)$  больше, чем  $r + r_u$ . Неопределенной является область, в которой датчик обнаруживает событие  $e$  с определенной вероятностью, экспоненциально убывающей с расстоянием.

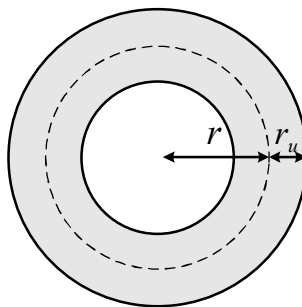


Рисунок 3 - Вероятностная модель чувствительности

Математически область чувствительности датчика  $S$  может быть выражена как:

$$C(s) = \begin{cases} 1, & \text{if } r - r_u \geq d(s, p) \\ e^{-\lambda \alpha^\beta}, & \text{if } r - r_u < d(s, p) \leq r + r_u, \\ 0, & \text{if } r + r_u < d(s, p) \end{cases}$$

где  $\alpha = d(s, p) - (r - r_u)$ , а  $\beta$  и  $\lambda$  – параметры вероятности обнаружения, которые используются для моделирования различных типов датчиков, в частности, таких как инфракрасные и ультразвуковые сенсоры.

### Выводы

Предложенные модели являются базисом для построения симуляторов беспроводных сетей. Подобные симуляторы обычно выполняются в виде библиотек, вызывая функции которых можно создавать объекты беспроводных сетей и управлять ими. Таким образом, создание симулятора представляет собой написание программы на языке высокого уровня (C++, Java, Python).

Разработка симуляторов беспроводных сенсорных сетей ведется преимущественно университетами США и Евросоюза. Большинство проектов имеют открытый исходный код и бесплатны для использования. Подобными проектами являются симуляторы OMNeT++, GloMoSim, ns-2, SensorSim, VisualSense, SWAN. [3]

Обычно симуляторы представляют собой библиотеки для языка высокого уровня (ns-2, SWAN), некоторые из них имеют развитый графический интерфейс пользователя (VisualSense). Отдельно следует выделить среды моделирования TOSSIM, АТЕМУ, Avroga которые снабжены виртуальными машинами для микроконтроллеров. Подобные симуляторы позволяют выполнять отладку программы для узлов сети, эмулируя конечные устройства, однако они поддерживают ограниченное количество аппаратных платформ. Нужно отметить, что большинство библиотек симуляторов написаны для применения в операционной системе GNU/Linux, существуют также кроссплатформенные реализации на Java.

### Литература

- [1] Drew Gislason. ZigBee Wireless Networking. – Newnes, 2008. – 448 с.
- [2] Miguel A. Labrador, Pedro M. Wightman. Topology Control In Wireless Sensor Networks. – Springer, 2009. – 210 с.
- [3] Ana-Belen Garcia-Hernando, Jose-Fernan Martinez-Ortega. Problem Solving for Wireless Sensor Networks. – Springer, 2008. – 232 с.