

# Інфокомунікаційні системи

УДК 621.39

Р.А. Горбенко

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ДИСКРЕТНОГО КАНАЛА СВЯЗИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ ОТ ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВОЙ ОШИБКИ И ДЛИНЫ КАДРА ДАННЫХ

*Проведено исследование факторов, влияющих на эффективную пропускную способность дискретного канала связи беспроводной сенсорной сети стандарта 802.15.4. С целью проведения исследования в статье усовершенствована марковская модель канального уровня беспроводной сенсорной сети. В предложенной модели учитывается влияние повторной передачи кадра данных на эффективную пропускную способность сети за счет учета количества повторных передач и времени задержки. Определено, что при влиянии электромагнитных помех на канала связи выбор размера кадра данных позволяет более чем в два раза повысить эффективную пропускную способность.*

**Ключевые слова:** *беспроводные сенсорные сети, марковская модель беспроводного канала связи, эффективная пропускная способность канала.*

### Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) являются одним из перспективных направлений развития современных телекоммуникационных технологий. Благодаря таким характеристикам БСС, как миниатюрность узлов, низкое энергопотребление, встроенный радиointерфейс, сравнительно невысокая стоимость и простота развертывания сети, стало возможным их широкое использование во многих сферах человеческой деятельности.

Однако специфичность оборудования, использование беспроводных каналов связи, а также способность узлов сенсорной сети к обработке и передаче разнородной информации (включая статические изображения, аудио- и видеоданные) усложняют изучение функционирования и оценку показателей производительности БСС. На практике фактическая пропускная способность может оказаться значительно меньше заявленной стандартом.

Также следует отметить большое разнообразие математического аппарата для составления исследования беспроводных каналов связи: используются имитационные [2], марковские [3], вероятностные [4] модели. Учитывая новую специфику БСС необходимо повторно проводить моделирование типовой предметной области дискретных каналов связи. В частности, стандартами БСС разрешается изменять длину поля данных в кадре при фиксированной длине поля служебных данных.

**Целью данной статьи** является проведение исследований зависимости эффективной пропуск-

ной способности дискретного канала связи беспроводной сенсорной сети от вероятности битовой ошибки и длины кадра данных. Существующие модели не позволяют наглядно проиллюстрировать взаимосвязь между специфичными для БСС параметрами (количество повторных передач, случайная задержка при повторной передаче) и результирующим показателем эффективной пропускной способности канала. Для повышения наглядности использован аппарат марковского моделирования. При этом обоснованы основные допущения, позволяющие использовать простейшие потоки событий.

### Спецификация беспроводного дискретного канала БСС

Стандарт [1] определяет спецификацию физического уровня и подуровня доступа к сетевой среде для низкоскоростной беспроводной среды с портативными переносными устройствами, которые являются основой БСС. Механизм передачи данных зависит от топологии сети и способности устройств поддерживать передачу маяков (beacon). Если сеть не использует кадры-маяки, устройства обмениваются данными в пределах радиовидимости, используя бездоменный механизм множественного доступа к общей среде передачи с контролем несущей и предотвращением конфликтов (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA-CA). Каждый раз, когда узлу нужно передать данные, он ждет случайный промежуток времени, после чего определяет занятость канала (Clear Channel Assignment –

ССА). Алгоритм реализується з використанням періодів часу, названих періодами затримки передачі, які вибираються з діапазону  $\{0, 2^{BE} - 1\}$ , де  $BE$  – показател степені затримки, може приймати значення від 3 до 8 (по умовчаною рівно 3). Вказані періоди для одного пристрою не пов'язані по часу з періодами затримки будь-якого іншого пристрою в мережі. Позначимо дану затримку як

$$t_3(BE) = (2^{BE} - 1)R, \quad (1)$$

де  $R$  – константа (позначена в стандарті `UnitBackOffPeriod`), рівна 20 символним періодам. Во всіх редакціях стандарту для швидкості передачі в 250 кбіт/с і частотного діапазону 2,4 ГГц один символний період рівно 16 мкс. Час прослушування каналу ССА для визначення його зайнятості постійно і рівно восьми символним періодам або 128 мкс.

Якщо канал визнаний пасивним (вільним від передачі), пристрій почне передачу кадрів негайно. Якщо канал виявляється зайнятим, пристрій чекає впродовж ще одного випадкового періоду часу, перш ніж виконає наступну спробу доступу до каналу. Успішний прийом і верифікація кадрів даних може бути опціонально підтверджено відправкою кадрів підтвердження. З описання методу доступу видно, що він носить ймовірнісний характер, і ймовірність успішного отримання в своє розпорядження загальної середовища залежить від навантаженості мережі, тобто від інтенсивності виникнення в вузлах потреби передачі кадрів. Також слід зауважити, що бездротові мережі характеризуються достатньо високою ймовірністю бітрової помилки порівняно з кабельними мережами внаслідок впливу електромагнітних перешкоб.

Структура кадру даних має змінну довжину [1]. Максимальний розмір корисного навантаження залежить від довжини службових полів кадру. Стандартом узгоджено максимальна довжина кадру фізичного рівня в 127 байт. Якщо використовується мінімальний по розміру формат адресації (4 байта), максимальний розмір корисного навантаження рівно 112 байтам. При максимальному вмісті адресної частини корисне навантаження обмежується 82 байтами.

Кадр даних прийнято правильно, якщо всі його біти прийнято правильно. Позначимо ймовірність бітрової помилки як  $BER$  (`Bit Error Rate`), а ймовірність появи помилок кадру даних як  $PER$  (`Packet Error Rate`). Оперируючись на те, що довжина кадру рівна  $L$  байт, ймовірність помилки передачі кадру даних без механізму корекції помилок рівна

$$PER = 1 - (1 - BER)^{8L}.$$

Помилка передачі кадру призводить до повторної передачі.

## Основные допущения марковской модели канального уровня БСС

Применение математического аппарата марковского моделирования предусматривает рассмотрение беспроводного канала как системы, в которой протекают простейшие потоки событий. Для рассмотрения сложного потока событий, его разделяют на составные простейшие потоки.

Рассмотрим беспроводный дискретный канал связи как систему, обслуживающую заявки на передачу кадров. На вход системы поступают заявки с интенсивностью, которая соответствует максимальной скорости передачи согласно спецификации БСС, при этом принимается допущение об экспоненциальном законе распределения времени между заявками на передачу соседних кадров. Канал связи может обслужить заявку с вероятностью  $P = 1 - PER$ . В марковской модели это смоделировано двумя переходами с соответствующими условными вероятностями:  $\lambda_0 \times (1 - PER)$  – в состояние обслуженной заявки, и  $\lambda_0 \times PER$  – в состояние отказа. Для моделирования повторной передачи кадров вместо первичного состояния отказа вводится промежуточное состояние, обеспечивающее задержку перед повторной передачей. Из этого состояния выполняется переход в состояние повторной передачи кадра с интенсивностью  $\mu_{BE} = 1/t_3(BE)$ , где  $t_3(BE)$  определяется (1). Так как повторная передача кадров в реальной системе снижает эффективную пропускную способность канала, из состояния повторной передачи поток заявок будет обслуживаться каналом с интенсивностью  $\lambda_0 = \lambda_0/BE$ , где  $BE$  – показатель степени задержки,  $BE \in [0..5]$ . По исчерпанию заданного числа повторной передачи, система переходит в состояние реального отказа. Таким образом, размеченный граф модели будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Функционирование канала связи согласно модели на рис. 1 происходит следующим образом. В начальный момент времени система принимает заявку на передачу кадра (переход из состояния  $S_0$  в состояние  $S_1$  с интенсивностью  $\lambda_0$ ). Канал может обслужить заявку с вероятностью  $\lambda_0 \times (1 - PER)$  (моделируется переходом  $S_1 \rightarrow S_2$ ). Состояния  $S_3$  и  $S_5$  позволяют смоделировать случайную временную задержку, в случае если канал не может обслужить заявку с вероятностью  $PER$ . Состояния  $S_4$  и  $S_6$  позволяют смоделировать повторную передачу кадра с уменьшением пропускной способности до  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно. По исчерпанию двукратной повторной передачи кадра система переходит в состояние отказа  $S_7$ .

Аналогичным образом строятся модели для другого количества повторной передачи кадров.

Результатом расчета модели являются значения вероятностей  $P_0 \dots P_7$  нахождения системы в соответствующих состояниях. Зная вероятность обслуж-

живания  $P_2(t)$  можно рассчитать уменьшение эффективной пропускной способности канала связи БСС с учетом действия ошибок как

$$L_{эф} = L_0 P_2,$$

где  $P_2$  – устоявшееся значение  $P_2(t)$  при  $t \rightarrow \infty$ .

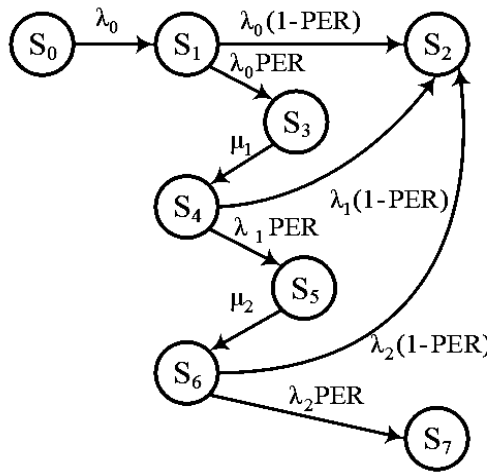


Рис. 1. Размеченный граф модели канала БСС с двумя повторными передачами кадра данных при ошибке в канале

Эффективная пропускная способность канала связи соответствует обслуживанию каждой заявкой  $m$  байт полезной информации в поле данных. Соответственно она будет рассчитывается по формуле

$$V_{эф} = \lambda_{эф} 8(L - O),$$

где  $L$  – длина кадра данных в байтах;  $O$  – количество служебных байт в структуре кадра данных длиной  $L$ .

Система дифференциальных уравнений (СДУ) Колмогорова-Чепмена составленная по графу на рис. 1 представлена формулой (2).

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda_0 P_0(t); \\ \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_0 P_1(t) + \lambda_0 P_0(t); \\ \frac{dP_2}{dt} = (\lambda_0 P_1(t) + \lambda_1 P_4(t) + \lambda_2 P_6(t))(1 - PER); \\ \frac{dP_3}{dt} = -\mu_1 P_3(t) + \lambda_0 P_1(t) PER; \\ \frac{dP_4}{dt} = -\lambda_1 P_4(t) + \mu_1 P_3(t); \\ \frac{dP_5}{dt} = -\mu_2 P_5(t) + \lambda_1 P_4(t) PER; \\ \frac{dP_6}{dt} = \lambda_1 P_6(t) + \mu_2 P_5(t); \\ \frac{dP_7}{dt} = \lambda_2 P_6(t) PER; \\ \sum_{j=0}^7 P_j(t) = 1, P_0(0) = 1, P_k(0) = 0, k \in 1..7. \end{cases} \quad (2)$$

Для определения устоявшегося значения вероятности  $P_2$  СДУ преобразуют в систему линейных уравнений, приравнивая левые части к нулю. Однако система линейных уравнений для данной модели является плохо обусловленной. Поэтому при решении СДУ использован метод ode15s в программной среде MatLab, а устоявшиеся значения  $P_2$  определяется для времени  $t = 100$ . При таком значении времени погрешность расчетов не превышает значения  $10^{-7}$ .

### Входные параметры модели и результаты моделирования

В ходе проведения исследований с целью выявления влияния битовой ошибки BER и длины поля данных  $m$  на эффективную пропускную способность канала  $V_{эф}$ , были приняты следующие значения входных параметров (табл. 1).

Таблица 1

Переменные значения входных параметров модели

Параметр модели	Переменные значения параметров
BER	[0.001...0.1]
L (байт)	[46...161]
$\lambda_0$ (1/с)	[194,09...679,34]
$BE_{max}$	[0..5]

При моделировании базовые параметры модели имели следующий шаг изменения:

- шаг величины BER равен 0,1;
- шаг длины кадра данных L равен 10;
- шаг величины  $BE_{max}$  равен 1.

В результате моделирования получены графики зависимости пропускной способности и вероятности отказа в обслуживании от битовой ошибки при передаче исходного кадра данных с полем полезной нагрузки разной длины (рис. 2 – 4).

Из графиков (рис. 2, б – 4, б) видно, что в случае минимального значения BER, эффективная пропускная способность канала растет с увеличением размера поля данных. Соответственно, при  $L \rightarrow L_{max}$ ,  $V_{эф}$  асимптотически приближается к номинальной скорости передачи в канале. В случае BER = 0,01 наиболее высокая пропускная способность без использования повторной передачи искаженных кадров, наблюдается при длине кадра в 96 байт и составляет 50,6 кбит/с (рис. 2, б).

Для модели с ограничением равным трем (рис. 3, б) и пяти (рис. 4, б) на повторные передачи для одного кадра, при том же значении BER = 0,01, эффективная пропускная способность возрастает до 111 и 146 кбит/с, что соответствует значениям длины кадра в 116 и 146 байт.

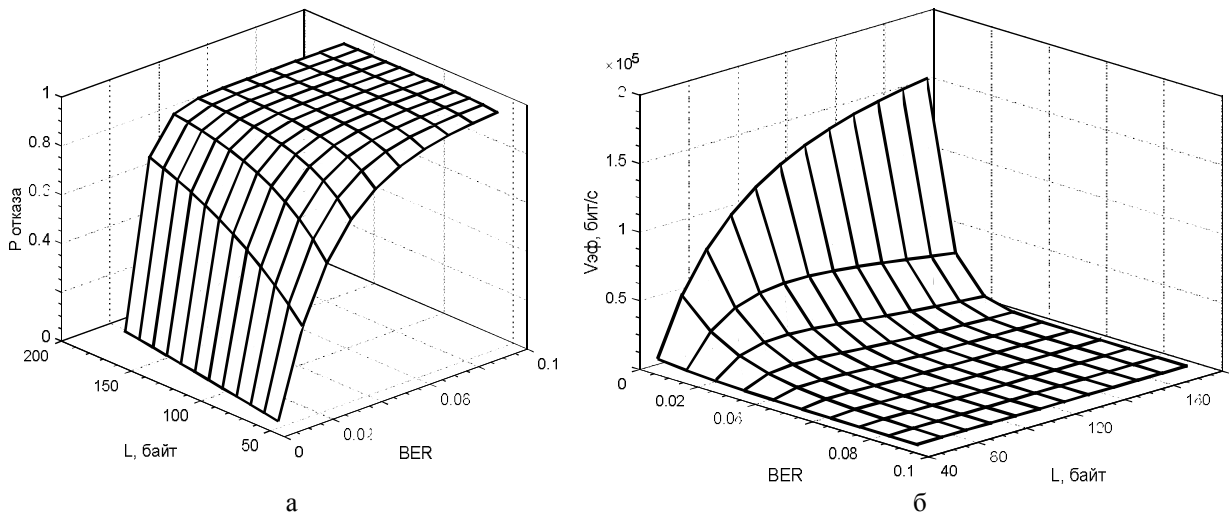


Рис. 2. Графики зависимости вероятности отказа в обслуживании (а) и эффективной пропускной способности (б) от величины BER и длины поля полезной нагрузки кадра данных в канале БСС без повторных передач ( $BE=0$ )

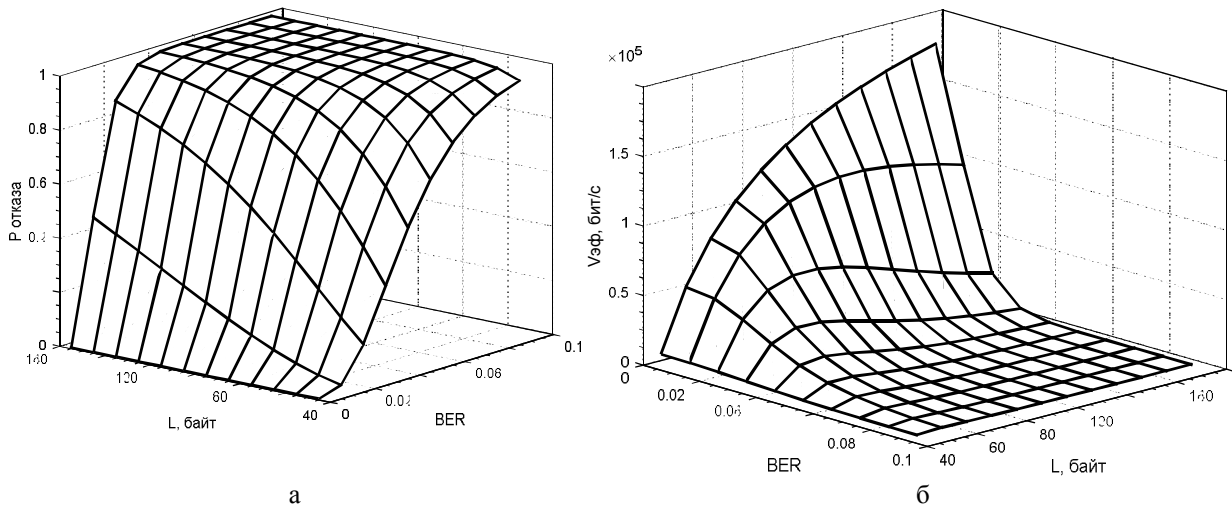


Рис. 3. Графики зависимости вероятности отказа в обслуживании (а) и эффективной пропускной способности (б) от величины BER и длины поля полезной нагрузки кадра данных для канала БСС с тремя повторными передачами кадра при ошибке ( $BE=3$ )

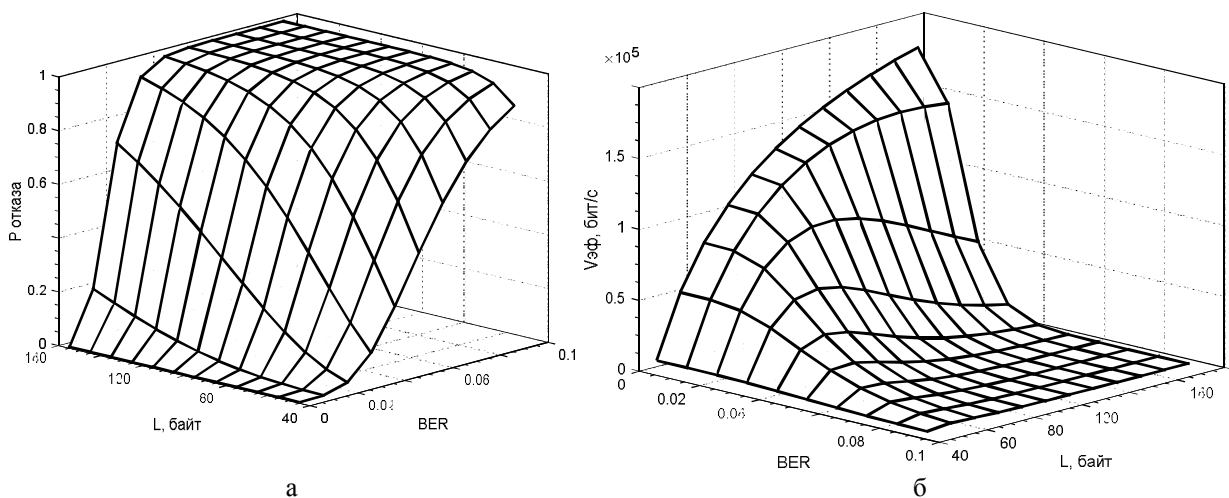


Рис. 3. Графики зависимости вероятности отказа в обслуживании (а) и эффективной пропускной способности (б) от величины BER и длины поля полезной нагрузки кадра данных для канала БСС с пятью повторными передачами кадра при ошибке ( $BE_{\text{max}}=5$ )

При последующем увеличении BER, для модели канала без возможной повторной передачи искаженных кадров,  $V_{эф}$  снижается и принимает неприемлемые значения на отметке BER = 0,04 (рис. 2, б). Вероятность отказа в обслуживании при BER = 0,04 находится в пределах от 0,85 до 0,99 и соответствует значению длины кадра в 46 и 156 байт.

Следует отметить, что такая граница наступает значительно позже при разрешенной повторной передаче искаженных кадров.

Для трехкратной передачи искаженных кадров вероятность отказа в обслуживании находится в пределах от 0,87 до 0,99 при BER = 0,071 (рис. 3, а), а для пятикратной –  $P_{отказа}$  от 0,81 до 0,99 при BER = 0,081 (рис. 4, а). Для трехкратной передачи максимумы пропускной способности в 60,18; 32,9; 18,2; 9,6 кбит/с для BER 0,02; 0,03; 0,04; 0,05 соответственно наблюдаются для длины кадра данных в 86, 66, 66 и 56 байт. Для пятикратной передачи максимумы пропускной способности в 92,7; 57,9; 35,1; 20,1 кбит/с для BER 0,02; 0,03; 0,04; 0,05 соответственно наблюдаются для длины кадра данных в 96, 76, 66 и 66 байт.

## Выводы

В результате проведенных исследований зависимости эффективной пропускной способности дискретного канала связи БСС от вероятности битовой ошибки и длины кадра данных, при использовании усовершенствованной в статье марковской модели канального уровня определено, что при влиянии электромагнитных помех на канал связи выбор раз-

мера кадра данных позволяет более чем в два раза повысить эффективную пропускную способность канала связи. Это в свою очередь позволит повысить скорость передачи данных, уменьшит временные задержки доставки кадров.

## Список литературы

1. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) // IEEE Std 802.15.4, 2011. – 322 p.
2. Мохамед С.Г. Повышение производительности беспроводных сетей на основе управления порогом фрагментации кадров данных / С.Г. Мохамед, А.В. Горбенко, О.М. Тарасюк // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2009. – Вип. 3(21). – С. 73-76.
3. Шелухин О.И. Разработка марковской модели кодирования ошибок при передаче потокового видео в системах беспроводного широкополосного доступа WiMax / О.И. Шелухин, А.Н. Руднев, А.С. Васильковский, Ю.А. Иванов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2011. – №1 (7). – С. 32-40.
4. Mateo J.A. Probabilistic Model Checking: One Step Forward in Wireless Sensor Networks Simulation / J.A. Mateo, M. Hermenegilda, M.C. Ruiz, J. Calleja, F. Royo // International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014.

Поступила в редколлегию 26.05.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Л. Ляхов, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕФЕКТИВНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ДИСКРЕТНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ВІД ІМОВІРНОСТІ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ І ДОВЖИНИ КАДРУ ДАНИХ

Р.А. Горбенко

Проведено дослідження факторів, що впливають на ефективну пропускну здатність дискретного каналу зв'язку бездротової сенсорної мережі стандарту 802.15.4. З метою проведення дослідження в статті вдосконалено марківську модель канального рівня бездротової сенсорної мережі. У запропонованій моделі враховується вплив повторної передачі кадру даних на ефективну пропускну здатність мережі за рахунок урахування кількості повторних передач і часу затримки. Визначено, що при впливі електромагнітних завад на каналу зв'язку вибір розміру кадру даних дозволяє більш ніж у два рази підвищити ефективну пропускну здатність.

**Ключові слова:** бездротова сенсорна мережа, марківська модель бездротового каналу зв'язку, ефективна пропускну здатність каналу.

## ANALYSIS OF EFFECTIVE DATA RATE OF DISCRETE COMMUNICATION CHANNEL IN WIRELESS SENSOR NETWORK FROM BIT ERROR RATE AND LENGTH OF THE DATA FRAME

R.A. Horbenko

It was made research of factors that have the influence to effective data rate of digital channel of wireless sensor network standard 802.15.4. Due to implementation research Markov model of wireless sensor network data link layer was updated. Proposed model is corrected for data frame retransmission to effective data rate network considering retransmitting and backoff time. It was identify that under the influence of electromagnetic influence to the channel the choice of data frame size allows to improve effective data rate more than in twice.

**Keywords:** wireless sensor networks, Markov model of the wireless communication channel, the effective data rate.