

Задача симуляции затухания радиосигнала: решение и приложения

Н. А. ПОДОЛЬСКАЯ, Ф. Н. ШЕРСТЮК

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

УДК 519.6+519.2

Ключевые слова: затухание радиосигнала, Wi-Fi, IEEE 802.11, симуляция, математическое моделирование, цепи Маркова, распределение Райса, производительность передачи, Network Simulator, алгоритмы настройки скорости передачи.

Аннотация

При передаче цифрового сигнала через радиоэфир эффект затухания радиоволн может вызывать искажение этого сигнала и, следовательно, потерю производительности передачи. В данной статье описывается разработанный авторами метод оценки производительности передачи на различных скоростях в условиях затухания радиоволн, а также применение данного метода к оценке алгоритмов выбора скоростей передачи.

Abstract

N. A. Podolskaya, F. N. Sherstyuk, The problem of Wi-Fi radio fading simulation: solution and applications, Fundamentalnaya i prikladnaya matematika, vol. 13 (2007), no. 1, pp. 179—187.

Digital signal transmission through wireless media is severely complicated by radio fading—time-varying signal distortion that causes the loss of data packets. Retransmission of lost packets degrades data throughput. This paper describes the method of transmission throughput estimation for different rates developed by the authors and also the application of this method to rate adaptation algorithms estimation.

1. Введение

В последнее время всё большее распространение получает передача цифровой информации посредством радиоволн. При передаче цифрового сигнала через радиоэфир эффект затухания радиоволн может вызывать искажение этого сигнала и, следовательно, потерю производительности передачи. Это падение происходит из-за затрат времени на перепосылку искажённых пакетов.

Можно попытаться сократить потери различными методами, например настройкой мощности передатчика, скорости передачи или размеров передаваемых пакетов. В данной работе авторами рассматривается метод повышения производительности передачи путём настройки скорости передачи.

Скорость передачи может влиять на производительность по-разному. Чем ниже скорость передачи, тем выше её надёжность, но тем меньше пакетов с

Фундаментальная и прикладная математика, 2007, том 13, № 1, с. 179—187.

© 2007 Центр новых информационных технологий МГУ,
Издательский дом «Открытые системы»

данными передаётся за единицу времени. И наоборот, чем выше скорость передачи, тем больше пакетов с данными передаётся за единицу времени, но тем больше и вероятность искажения данных, а значит, вероятность перепосылки пакетов. Для каждого значения величины затухания существует оптимальная скорость — та, которая обеспечивает наибольшую производительность передачи. Алгоритм подбора скорости передачи в идеале должен находить эту оптимальную скорость.

В данной статье описывается разработанный авторами метод оценки производительности передачи на различных скоростях в условиях затухания радиоволн, а также применение данного метода к оценке алгоритмов выбора скоростей передачи.

Для оценки производительности передачи авторы использовали программу Network Simulator, исходные тексты которой опубликованы и разрешены к использованию в некоммерческих или внутренних коммерческих целях.

Данная статья описывает модель затухания, реализация которой была встроена авторами в программу Network Simulator, доказывает её аккуратность и оценивает улучшение производительности, обеспечиваемое некоторым алгоритмом выбора скорости передачи при работе в Network Simulator с использованием реализации описываемой модели затухания радиосигнала.

Результаты работы были использованы для разработки и оценки алгоритмов подбора скорости передачи при программировании одного Wi-Fi (IEEE 802.11) MAC-чипа.

2. Измерение характеристик затухания

Характеристики затухания радиоволн в различной обстановке были измерены и опубликованы в [1]. Авторы работы [1] ссылаются на факт, доказанный на практике: вероятностное распределение Райса

$$q\left(\frac{r_d}{\sigma}, \frac{D}{\sigma}\right) = 1 - p\left(\frac{r_d}{\sigma}, \frac{D}{\sigma}\right),$$

где

$$p\left(\frac{r_d}{\sigma}, \frac{D}{\sigma}\right) = \frac{1}{2\pi\sigma} \iint_{(x-D)^2 + y^2 \leq r_d^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right] dx dy,$$

D — амплитуда волны, несущей сигнал, r_d — радиус круга, при попадании в который сигнал распознается правильно, σ — дисперсия, достаточно хорошо описывает процесс затухания радиосигнала.

Основными характеристиками затухания радиосигнала служат райсовский k -фактор, частота пересечения уровней и среднее время затухания. k -фактором распределения Райса называют величину $k = \frac{D^2}{2\sigma^2}$. Частотой пересечения некоторого уровня называется среднее число пересечений графиком функции горизонтальной прямой, соответствующей этому уровню, за единицу времени.

Таблица 1. Частота пересечения уровня (N_L) и среднее время затухания (t_L), измеренные и промоделированные для значения райсовского k -фактора 2,2

Уровень $L, \text{ дБ}$	Измерения		Модель (2)		Модель (3)	
	N_L, c^{-1}	t_L, c	N_L, c^{-1}	t_L, c	N_L, c^{-1}	t_L, c
9	0,25	3,94	0,05	20	0,01	20
6	1,5	0,598	0,35	2,833	0,67	1,456
3	2,7	0,275	1,75	0,5	3,89	0,186
0	4,1	0,122	4,15	0,112	4,35	0,088
-3	3,4	0,081	2,95	0,061	3,04	0,055
-6	2,35	0,068	1,75	0,041	1,76	0,041
-9	1,5	0,057	0,85	0,029	1,22	0,029
-12	0,85	0,055	0,35	0,02	0,7	0,023
-15	0,55	0,054	0,25	0,018	0,46	0,015
-18	0,35	0,054	0,25	0,012	0,3	0,014
-21	0,1	0,05	0,25	0,008	0,18	0,011
-24	0,1	0,05	0,15	0,007	0,1	0,007

Средним временем затухания для некоторого уровня сигнала называется средний интервал времени между двумя соседними значениями, находящимися на этом уровне.

Авторы работы [1] измерили основные характеристики затухания — райсовский k -фактор, частоту пересечения уровней и среднее время затухания — для передатчика с частотой 5 ГГц (модуляция OFDM) в помещении.

Мы будем использовать результаты этих измерений для оценки алгоритма, моделирующего затухание. В частности, мы будем сравнивать основные характеристики затухания, вычисленные для нашей модели, с реальными измеренными характеристиками, приведёнными в [1] (табл. 1).

3. Реализация модели затухания радиосигнала в программе Network Simulator

Для реализации модели затухания было промоделировано распределение Райса. В данном разделе описывается подход, применённый авторами к построению модели этого распределения.

3.1. Рассматриваемые модели райсовского распределения

Для моделирования райсовского распределения мы будем использовать марковские цепи. Были выбраны три следующие цепи Маркова:

$$\xi[n] = a_0 x[n] + b_1 \xi[n-1], \quad a_0 = \sigma \sqrt{1-\rho^2}, \quad b_1 = \rho, \quad \rho = e^{-\gamma_*}, \quad \gamma_* = \omega_* \Delta t; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \xi[n] &= a_0 x[n] + a_1 x[n-1] + b_1 \xi[n-1] + b_2 \xi[n-2], \\ a_0 &= \sigma \sqrt{\frac{\alpha_1^2 + \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0^2}}{2}}, \quad a_1 = \frac{\sigma \alpha_0}{\alpha}, \quad b_1 = 2\rho, \quad b_2 = -\rho^2, \\ \alpha_0 &= \rho^3(1 + \gamma_*) - \rho(1 - \gamma_*), \quad \alpha_1 = 1 - 4\rho^2 \gamma_* - \rho^4, \quad \rho = e^{-\gamma}, \quad \gamma_* = \omega_* \Delta t; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\xi[n] = \sum_{-p}^p c_k x[n-k], \quad c_k = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi \gamma_*}} \frac{\sin \gamma_* k}{k}, \quad \gamma_* \leq \pi, \quad \gamma_* = \omega_* \Delta t. \quad (3)$$

В данных формулах $\xi[n]$ обозначает n -й элемент цепи Маркова, а $x[n]$ обозначает n -й элемент последовательности нормально распределённых случайных чисел. Параметры γ_* и ω_* подбирались для соответствия параметров модели экспериментальным данным.

3.2. Оценка приближения моделей райсовского распределения

Чтобы оценить модели (1)–(3), нам нужно исследовать, достаточно ли хорошо они приближают распределение Райса. Исследования показывают, что модели (1) и (3) приближают райсовское распределение лучше, чем (2). Результаты этих исследований визуализированы на рис. 1, который содержит график стандартной функции распределения Райса и функции распределения для величин, полученных в моделях (1)–(3).

3.3. Оценка модели по характеристикам затухания

Для модели (1) оказалось невозможным вычислить частоту пересечения уровней, так как эта частота меняется при изменении интервала разбиения времени. Это делает модель (1) непригодной для наших целей. Для моделей (2) и (3) частота пересечения уровня оказалась стабильна при изменении Δt . Полученные значения частоты пересечения уровня и средней длительности затухания приведены в табл. 1.

3.4. Выбор модели

Используя оценки моделей, сделанные в разделах 3.2 и 3.3, и учитывая, что модель (3) лучше, чем (2), а модель (1) непригодна, мы выбрали модель (3)

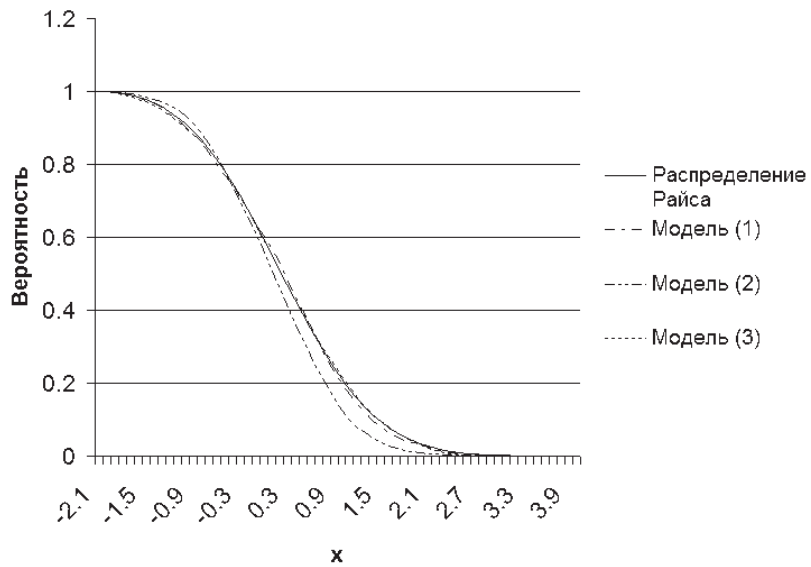


Рис. 1

для реализации затухания радиосигнала в программе Network Simulator. Рисунок 2 содержит график уровня сигнала, полученный из модели (3). Этот график вполне соответствует графику, построенному для экспериментальных данных, опубликованному в [1].

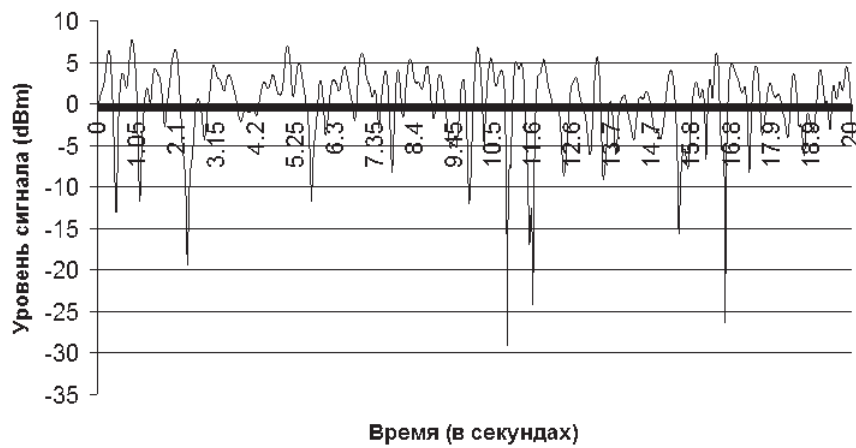


Рис. 2

Таблица 2. Значения APER и BER, использованные при симуляции

SNR дБ	APER	BER ск. 6	BER ск. 9	BER ск. 12	BER ск. 18	BER ск. 24	BER ск. 36	BER ск. 48	BER ск. 54
0	5.00E-02	2.79E+05	1	1	1	1	1	1	1
1	0.03	7.73E-06	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	9.78E-05	1	1	1	1	1	1
3	0	0	2.53E-06	5.01E-05	1	1	1	1	1
4	0	0	0	5.10E-06	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	2.01E-04	1	1	1	1
6	0	0	0	0	9.07E-06	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	2.33E-05	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	1	1	1
12	0	0	0	0	0	0	2.79E-05	1	1
13	0	0	0	0	0	0	0	1	1
14	0	0	0	0	0	0	0	1	1
15	0	0	0	0	0	0	0	1.09E-04	1
16	0	0	0	0	0	0	0	8.66E-05	1.00E+00
17	0	0	0	0	0	0	0	9.07E-06	2.13E-04
18	0	0	0	0	0	0	0	0.00E+00	4.46E-05
19	0	0	0	0	0	0	0	0.00E+00	1.87E-05
20	0	0	0	0	0	0	0	0.00E+00	5.10E-06
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.5. Симуляция потери пакетов

Полученный пакет считается потерянным, если его преамбула, посылаемая перед данными, содержит ошибку или какой-то из его битов данных содержит ошибку. Вероятности ошибки в преамбуле пакета (APER) и ошибки бита (BER) для различных скоростей передачи и уровня шума (SNR), измеренные для одного MAC-чипа, приведены в табл. 2.

Используя APER и BER, содержащиеся в табл. 2, мы можем вычислить вероятность искажения информации в пакете для различных скоростей передачи и размеров пакетов по формуле

$$p_s = 1 - (1 - p_a) \cdot (1 - p_b)^l,$$

где p_a — вероятность ошибки в преамбуле пакета (APER), p_b — вероятность ошибки в бите пакета (BER), l — количество битов в пакете. Рисунок 3 содержит графики вероятностей потери пакетов размера 1536 байт для скоростей передачи от 6 до 54 Мбит/с, соответствующих стандарту IEEE 802.11a.

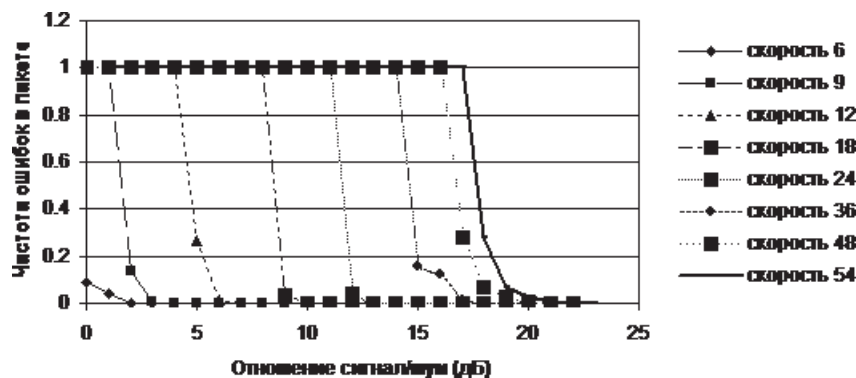


Рис. 3

4. Результаты симуляции затухания радиосигнала

Наша реализация затухания радиосигнала в программе Network Simulator позволяет определить производительность передачи данных в условиях затухания. Рисунок 4 визуализирует результаты симуляции для одинаковых величины затухания на передающей и принимающей станциях.

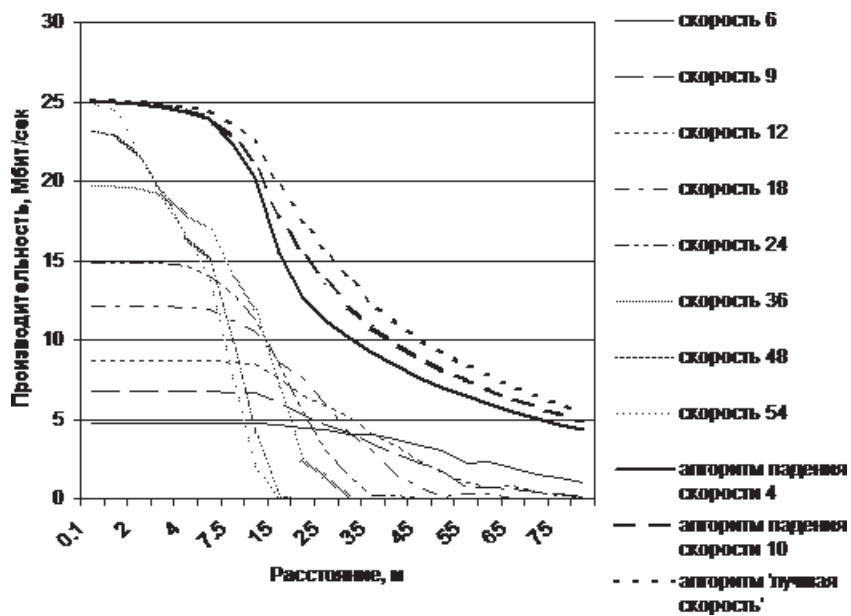


Рис. 4

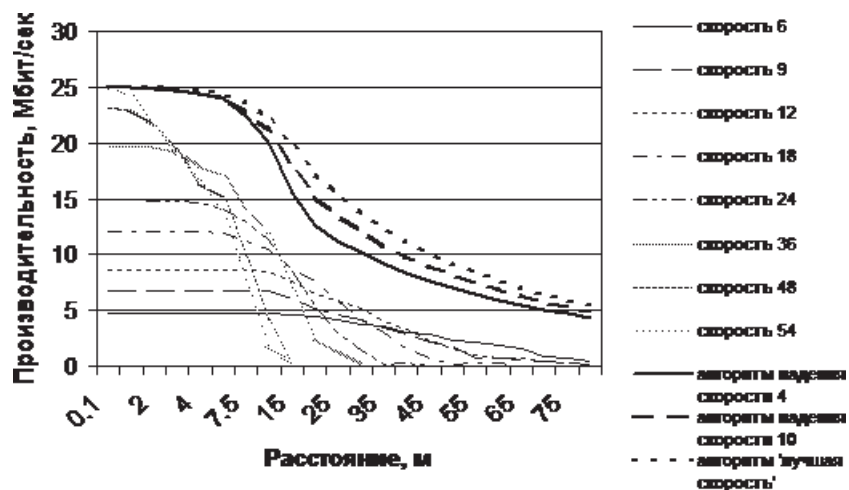


Рис. 5

Рисунок 5 визуализирует результаты симуляции для различных значениях величины затухания на передающей и принимающей станциях.

Были использованы следующие параметры симуляции:

- двулучевой вид распространения радиоволн (на коротких дистанциях аналогичен свободному распространению);
- полоса пропускания 20 МГц;
- частота радиоволны 5,2 ГГц;
- шум 90 бДм;
- мощность передачи 0,1 Вт;
- порог чувствительности несущей $1.559E-11$ Вт;
- порог приёма $3.652e-10$ Вт;
- фактор системных потерь 1,0;
- райсовский k -фактор 2,2.

Пакеты размером 1536 байт (содержащие 1360 байт данных) передавались с одной станции на другую на различных постоянных скоростях, а также на скоростях, выбранных динамически с использованием следующих алгоритмов.

1. Алгоритм «Падения скорости» понижает скорость передачи после двух неудачных передач и повышает скорость после определённого (4 или 10) количества удачных передач.
2. Алгоритм «Лучшая скорость» выбирает такую скорость передачи, чтобы производительность передачи оказалась наилучшей, т. е. вероятная длительность передачи пакета (включая длительность послышки подтверждения пакета и временные зазоры между пакетами) была наименьшей.

Вероятная длительность рассчитывается по следующей формуле:

$$d = P_f \cdot d_f + P_s \cdot d_s,$$

где P_f — вероятность неудачной посылки, d_f — длительность посылки при неудаче, P_s — вероятность удачной посылки, d_s — длительность удачной посылки.

5. Оценка алгоритма изменения скорости

С использованием результатов симуляции, визуализированных на рис. 4 и 5, сделаны следующие выводы.

1. В условиях затухания радиосигнала алгоритм «Падение скорости» даёт лучшую производительность, чем передача на любой постоянной скорости.
2. В условиях затухания радиосигнала производительность алгоритма «Падение скорости» (счётчик удачных посылок 10) ненамного меньше, чем максимально возможная производительность. Мы рассматриваем максимальную производительность как производительность, достигнутую при передаче на наилучшей возможной скорости (скорости, которая даёт максимальную производительность для текущей величины затухания).

6. Заключение

Результаты данной работы были проверены экспериментально путём измерения производительности передачи одного Wi-Fi MAC-чипа, на котором был реализован алгоритм «Падение скорости».

Эксперименты показали хорошее приближение результатов, описываемых в данной работе, к реальности.

Литература

- [1] Carroll M., Wysocki T. A. Fading characteristics for indoor wireless channels at 5GHz unlicensed bands. — http://www.elec.uow.edu.au/people/staff/wysocki/publications/Fading_Characteristics_v2.1.pdf.
- [2] McDysan D. QoS & Traffic Management in IP & ATM Networks. — McGraw-Hill, 2000.
- [3] Patzold M. Mobile Fading Channels. — Wiley, 2002.

