

## ГРАНИЦЫ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ДЛЯ КАНАЛОВ С ЗАМИРАНИЯМИ

Л. Н. Протопопов, ведущий научный сотрудник ОАО «РИМР», д.т.н.; avel121@yandex.ru

**Предложен способ вычисления границ пропускной способности каналов связи с замираниями на основе оценок ряда параметров случайного процесса, соответствующих мгновенным значениям огибающей наблюдаемого сигнала.**

**Ключевые слова:** пропускная способность, границы пропускной способности, канал связи, математическая модель канала связи.

**Введение.** Известно, что одним из факторов, влияющих на качество передачи дискретных сообщений по каналам радиосвязи, являются случайные изменения уровня сигнала и мгновенного значения фазы в точке приема [1]. В зависимости от соотношения между характером этих изменений и параметрами сигнала в работах, посвященных проектированию линий связи, рассматривается несколько частных случаев аппроксимации моделей канала, в соответствии с которыми синтезированы оптимальные алгоритмы декодирования [2, 3]. В данной работе рассмотрены вопросы описания характеристик замираний применительно к каналу с «медленными (или селективными по времени) замираниями» [2]. Согласно результатам синтеза алгоритмов обработки сигнала в этих условиях [2—4] оптимальным является метод приема «в целом». Качество приема при таком алгоритме приема будет определяться величиной энергии, накопленной за время приема, которая, в свою очередь, зависит от плотности вероятности распределения (ПВР) мгновенных значений уровня принимаемого колебания.

Изменение энергетике линии связи, обусловленное замираниями, может быть учтено путем вычисления среднего значения пропускной способности ПС на один отчет [1, 2, 3, 4, 5 и 7]

$$C_1 = \int_0^{\infty} C(h) w(u) du, \quad (1)$$

где  $C(h)$  — зависимость ПС (на один отчет) рассматриваемой линии связи при аддитивном «белом» Гауссовском шуме (АБГШ) от отношения сигнал-шум,  $w$  — плотность вероятности распределения уровня принимаемого колебания (или значений отношения сигнал-шум),  $h = q^*u$  отношение сигнал-шум (ОСШ),  $u$  — мгновенное значение огибающей,  $q$  — множитель, соответствующий отношению сигнал-шум в канале при единичном значении огибающей.

К сожалению, в настоящее время в известной нам литературе отсутствует установившееся представление о феноменологической модели, с помощью которой можно было бы достаточно корректно описать ПВР  $w(u)$ , так как физические процессы, ответственные за возникновение этого явления, достаточно сложны [5, 6]. Поэтому при исследованиях и проектировании новых систем используются структурно-физические модели, свойства которых выбраны таким образом, чтобы в той или иной степени соответствовать экспериментальным данным. Поскольку трудно рассчитывать, что искусственные конструкции смогут в полной мере соответствовать всему многообразию реально существующих процессов (особенно при ионосферном рас-

пространении радиоволн) для более корректного отображения реальной ситуации, предлагаются различные варианты по усовершенствованию известных ранее математических моделей [8—13, 15—17]. Причем, характер этих усовершенствований касается исключительно способа описания ПВР мгновенных значений (увеличения числа независимых параметров). Такое усложнение предлагаемых моделей предполагает использование параметрической идентификации, с помощью которой можно получить более детальное описание реальной ПВР. Тем не менее, даже увеличение числа параметров и повышение точности их оценки не гарантирует соответствия наблюдаемого состояния канала с результатами расчета, основанными на оценках этих параметров.

Неопределенность оценки состояния канала связи может быть уменьшена путем отказа от попыток использовать «точную» ПВР, заменив структурно-физическую модель ПВР моделями, полученными при определении границ пропускной способности для данного канала, выполненном на основе оценки параметров наблюдаемого процесса замираний. В качестве таких параметров могут быть использованы либо оценки моментов распределения, либо оценки коэффициентов при базисных функциях, используемых для представления ПВР [14], а также максимальное значение наблюдаемого процесса замираний.

В данной работе рассмотрены свойства границ ПС, полученных на основе оценок моментов ПВР наблюдаемых замираний и пропускной способности рассматриваемого канала при АБГШ. Задача определения границ ПС сводится к синтезу такой ПВР, которая соответствовала бы минимальному (максимальному) значению ПС для измеренных оценок упомянутых параметров. Синтезированная при этих условиях ПВР будет эквивалентна любой реальной ПВР с такими же характеристиками в том смысле, что минимальные и максимальные значения ПС соответствующих каналов связи будут равны. Полученные таким способом границы могут быть использованы для оценки минимальной величины ПС, требований к коду, определения наиболее неприятной конфигурации ошибок, обусловленных замираниями, и формирования критерия для принятия решения в режиме адаптации [15—18].

В целях предварительной апробации предлагаемого способа описания свойств канала с замираниями рассмотрены сравнительные характеристики математических моделей СКК в канале с релейскими замираниями и с замираниями, описываемыми синтезированной ПВР.

**Синтез плотности вероятности распределения мгновенных значений замираний.** Выбор способа идентификации вероятностных характеристик случайного процесса, описывающего замирания, зависит от априори известных данных об этом процессе. В данном случае известно [5 и 22], что принятый сигнал представляет собой сумму конечного числа лучей, отличающихся амплитудами и временем запаздывания. Это обстоятельство позволяет считать максимальное значение, среднее значение и дисперсию

ограниченными и в качестве основы для идентификации свойств канала использовать оценки следующих характеристик: ОСШ, среднее значение, 2-й, 3-й, 4-й моменты и максимальное значение наблюдаемого процесса замираний. Плотность вероятности случайного процесса, синтезированного на основе использования упомянутых параметров, будет представлять собой конечную суперпозицию дельта-функций и ее производных [14].

Определение распределения вероятностей (РВ) обеспечивающего максимальное (минимальное) значение функционалу (1), сводится в данном случае к решению задачи отыскания экстремума величины

$$C_1 = \sum_{i=1}^N C(h_i)w(u_i) \rightarrow \max(\min) \text{ при следующих условиях:}$$

$$\sum_{i=1}^N w(u_i) = 1, \quad \sum_{i=1}^N u_i w(u_i) = M_1, \quad \sum_{i=1}^N u_i^2 w(u_i) = M_2,$$

$$\sum_{i=1}^N u_i^3 w(u_i) = M_3, \quad \sum_{i=1}^N u_i^4 w(u_i) = M_4,$$

$$w(u_i) > 0 \text{ и } 0 < u_i < u_{\max},$$

где  $u_i = i^* \delta u_i$  — мгновенное значение огибающей;  $M_1$  — матожидание огибающей;  $M_j$  —  $j$ -й момент огибающей;  $C(q^* u_i)$  — зависимость ПС от ОСШ в канале с АБГШ;  $w(u_i)$  — искомое РВ;  $N = h_{\max} / \delta u_i$ ;  $u_{\max}$  и  $\delta u_i$  — максимальное значение и шаг изменения огибающей, соответственно.

Методом линейного программирования определяются значения  $w(u_i)$ , при которых функция  $C_1$  достигает экстремума.

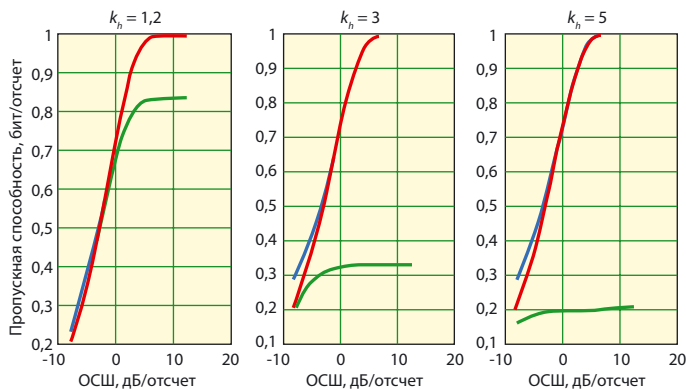


Рис. 1. Зависимость граничных значений пропускной способности от ОСШ и пиковых значений огибающей

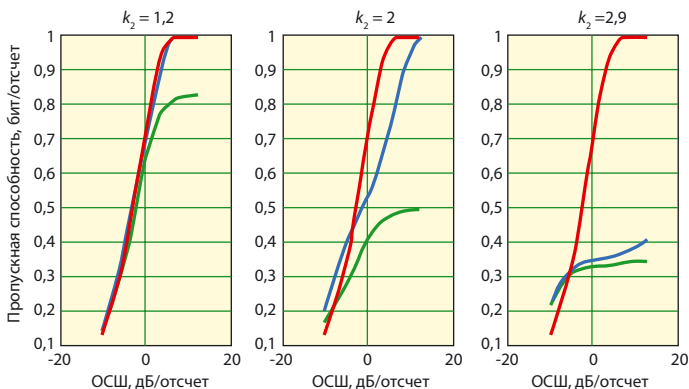


Рис. 2. Зависимость граничных значений пропускной способности от ОСШ и  $k_2$  при  $kh = 3$

Здесь рассмотрен случай, соответствующий «мягкому» решению при приеме ФТ-2, когда ПС для канала с АБГШ [17] аппроксимирована функцией

$$C(h) = 1 - \exp(-\alpha h^\beta), \quad (2)$$

где  $\alpha = 1,27496$ ,  $\beta = 1,89166$ .

Результаты вычисления зависимости границ  $C_1$  от ОСШ при синтезированных РВ представлены на рисунках 1—5 для различных значений коэффициентов  $k(j) = M_j/M_1^j$ , где  $j$  — номер соответствующего момента наблюдаемого случайного процесса и  $kh = u_{\max}/M_1$ .

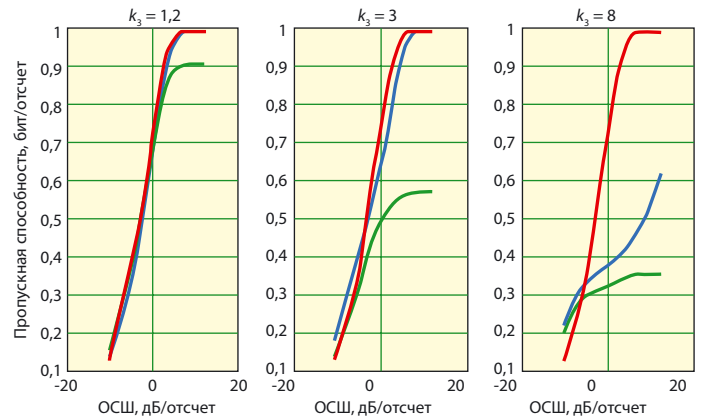


Рис. 3. Зависимость граничных значений пропускной способности от ОСШ и  $k_3$  при  $kh = 3$

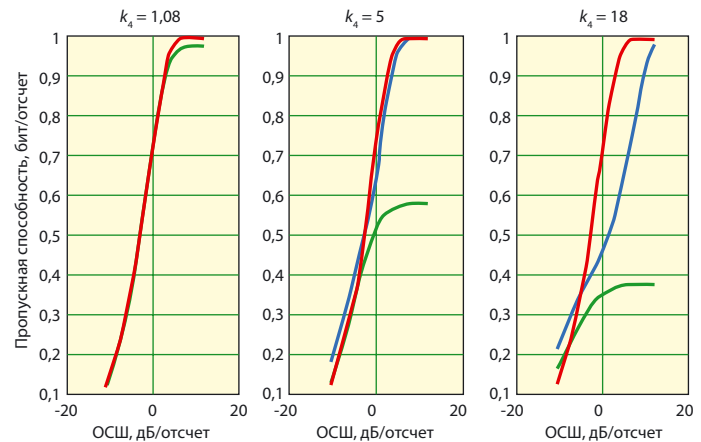


Рис. 4. Зависимость граничных значений пропускной способности от ОСШ и  $k_4$  при  $kh = 3$

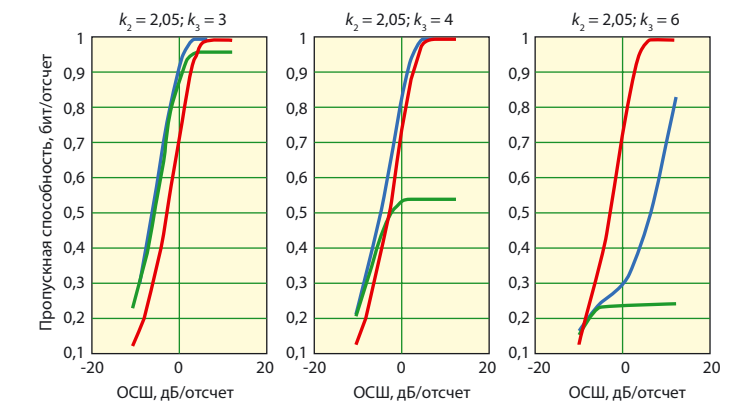


Рис. 5. Зависимость граничных значений пропускной способности от ОСШ,  $k_2$ ,  $k_3$  и  $kh = 3$

Красным цветом отмечены зависимости ПС при отсутствии замираний, синим — верхние границы, а зеленым — нижние. Во всех случаях коэффициент  $q = 1$ .

Из приведенных зависимостей следует, что существует область значений ОСШ, в пределах которой нижняя и верхняя границы ПС мало отличаются друг от друга ( $h$ , дБ/отсчет  $< 0$ ) при всех значениях моментов. Это обстоятельство означает, что при малых значениях ОСШ ПС практически не зависит особенностей ПРВ и полученные в результате синтеза оценки ПС и параметров РВ с большой степенью достоверности могут быть использованы для расчета линии связи.

Дискретный характер РВ позволяет существенно упростить вычисления, в которых используется закон распределения, например, расчет характеристик группирования ошибок [2] или оценка эффективности при разнесенном приеме в случае ионосферного распространения радиоволн. В последнем случае, при условии сложения некоррелированных замираний отдельных лучей одинаковой интенсивности, с помощью характеристической функции достаточно просто вычисляется зависимость ПС от ОСШ для 2-го и 3-каналов. (Рис. 6)

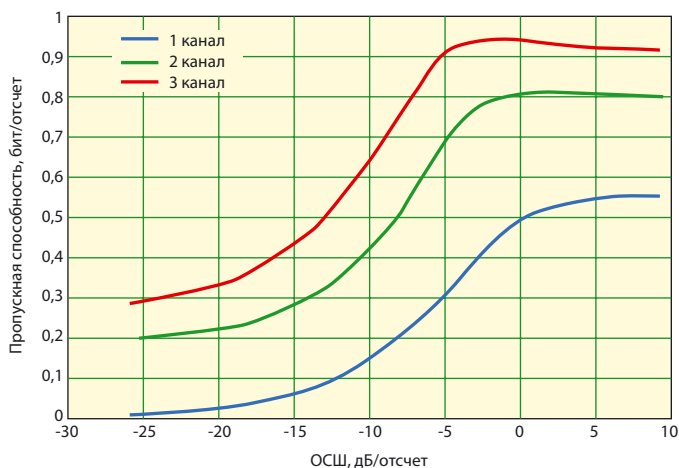


Рис. 6. Зависимость нижней границы пропускной способности от ОСШ при разнесенном приеме для следующих параметров канала:  $q = 1, k_3 = 3,14$  и  $kh = 3$

**Математическое моделирование фрагмента системы связи с замираниями в канале передачи.** Целью математического моделирования является сравнение влияния различных законов распределения замираний на энергетические характеристики линии связи.

В качестве начального состояния системы, по отношению к которому оценивается влияние замираний, используются показатели системы, состоящей из кода LDPC [21] со скоростью 0,25 и сигналов ФТ-2 с когерентной обработкой, при воздействии БГШ. Согласно материалам работы [19] достаточно хорошая величина энергетической эффективности (ЭЭ) ( $\sim 0$  дБ/бит) достигается при значении ОСШ ( $h_0$ ) (в дальнейшем — рабочая точка) равном, примерно,  $\sim 6$  дБ/отсчет и максимально допустимой вероятности ошибки на входе декодера — 0,24.

Из приведенных на рис. 1—5 зависимостей следует, что в этой области значений ОСШ величина ПС практически не отличается от ПС для системы без замираний и, следовательно, среднее значение ЭЭ близко к оптимальному. В ходе исследования были использованы модели мультипликативных помех с распределением Релея (у которого

$k_3 = 3$ ) и с распределением, соответствующим нижней границе ПРВ с параметрами:  $q = 1, kh = 3$  и  $k_3 = 3,5$ .

Вычисление положения рабочей точки в режиме замираний ( $h_1$ ) производится путем решения приведенного ниже уравнения относительно  $h_1$

$$p_{\text{ош}} = 0,5 \int_0^{u_{\text{max}}(u_1)} \text{erfc}(h_1) w(u_1) du_1, \quad (3)$$

где  $w(u_1)$  — функция РВ, соответствующая нижней границе при  $q = 1, kh = 3, k_3 = 3,5$  и  $p_{\text{ош}} = 0,24$ .

Решением этого уравнения является значение  $h_1 = -4,6$  дБ/отсчет.

Структурная схема фрагмента моделируемой системы представлена на рис. 7. В ходе исследования при выбранном виде мультипликативной помехи изменялось среднее значение ОСШ на входе демодулятора, фиксировались вероятность ошибки на выходе демодулятора (на входе декодера) и результат декодирования. Полученные зависимости приведены на рис. 8. Зеленая кривая относится к режиму, при котором отсутствуют замирания, а красная и голубая — к релейскому распределению и ПРВ, соответственно. Расчетное значение ОСШ, соответствующее положению рабочей точки, полученной с помощью решения уравнения (3), представлено в виде синей линии, вычисленной при  $kh = 3$  и  $k_3 = 3,5$ .

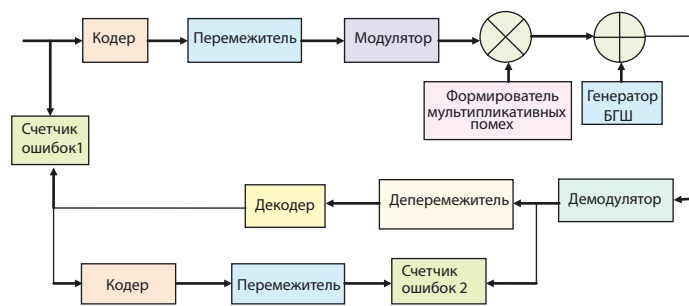


Рис. 7. Структурная схема моделируемого фрагмента системы связи

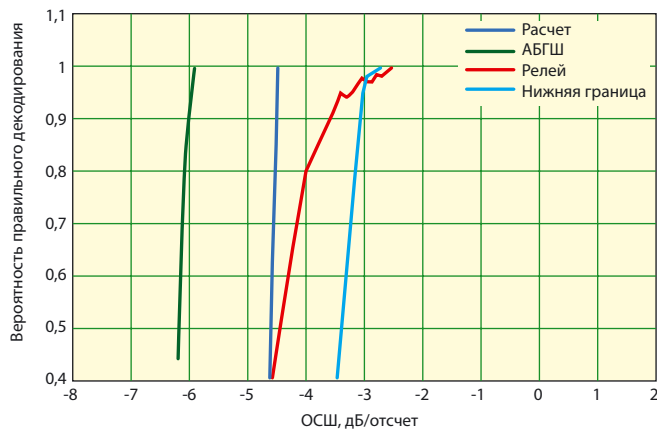


Рис. 8. Зависимости вероятности правильного декодирования от ОСШ на отсчет для помех в виде БГШ, БГШ и релейских замираний, БГШ и мультипликативной помехи, соответствующей нижней границе синтезированной ПРВ, и расчетного значения порога ошибочного декодирования для нижней границы синтезированного ПРВ

Оценка вероятности ошибки на выходе декодера равна 0,239 при дисперсии 0,07.

Анализ результатов моделирования показал:

● положение начального состояния системы совпадает с расчетным значением;

- значение вероятности ошибки на выходе демодулятора практически равно расчетному значению;
- положение рабочей точки при замираниях достаточно хорошо совпадает с расчетным значением;
- величина энергетических потерь, обусловленных замираниями в канале с параметром  $k_3 = 3,5$ , примерно равна 3дБ/отсчет;
- влияние максимального значения распределения  $u_{\max}$  незначительно сказывается на энергетических показателях системы;
- величины энергетических потерь, обусловленные рассмотренными законами распределений, практически совпадают, что свидетельствует о корректности предлагаемого подхода к оценке влияния замираний.

**Заключение.** Предложенный подход к оценке влияния замираний на прием дискретных сообщений позволяет определить границы пропускной способности и сформулировать требования к сигнально-кодовой конструкции, при которых гарантируется прием с заданной степенью достоверности.

В области малых значений ОСШ ( $< 0$ дБ/отсчет) верхняя и нижняя границы пропускной способности мало отличаются друг от друга во всем диапазоне значений моментов ПВ.

Анализ результатов математического моделирования сигнально-кодовой конструкции, параметры которой выбраны в соответствии с требованиями оптимальной энергетической эффективности, показал, что минимально-необходимое ОСШ при релейских замираниях, для которых  $k_3 = 3$ , и нижней границей синтезированной ПВР при  $k_3 = 3$  практически совпадают.

В области значений  $1 < k_3 < 3,5$  свойства ПВР близки к свойствам распределения Накагами с параметром  $0,5 < m < \infty$ , а в области  $3,5 < k_3 < 8$  свойства ПВР близки к свойствам логнормального распределения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Финк Л. М.** Теория передачи дискретных сообщений.— М.: Сов. радио, 1970.
2. **Коржик В. И., Финк Л. М.** Помехоустойчивое кодирование дискретных сообщений в каналах со случайной структурой.— М.: Связь, 1975.
3. **Коржик В. И., Финк Л. М.** Оптимальное декодирование в полунепрерывных каналах с переменными параметрами // Проблемы передачи информации.— 1971.— Т. VII.— Вып. 4.
4. **Bigliery E.** Coding for wireless channels // Springer Science+Business Media Inc., 2005.
5. **Долуханов М. П.** Флуктуационные процессы при распространении радиоволн.— М.: Связь, 1971.
6. **Герм В. Э., Зернов Н. Н.** Исследование эффектов флуктуаций электронной плотности ионосферы при распространении электромагнитных полей высоких частот // Вестник Санкт-Петербургского университета.— 2009.— Сер. 4.— Вып. 4.
7. **Goldsmith A.** Wireless Communication. Cambridge University Press, 2005.
8. **Кловский Д. Д.** Передача дискретных сообщений по радиоканалам.— М.: Радио и связь, 1982.
9. **Бузин А. Ю., Зарубин А. Ю., Малышев И. Н.** Обобщенная вероятностная модель мультипликативных помех в канале связи // Вестник ТГТУ.— 2007.— Т. 13.— № 3.
10. **Бузин А. Ю., Зарубин А. Ю., Малышев И. Н.** Показатели вероятности передачи информации в адаптивных коротковолновых каналах связи // Вестник ТГТУ.— 2007.— Т. 13.— № 1.
11. **Алексеев А. А., Чучин Е. В., Яковлев Е. Е.** Аналитический базис моделей качества передачи информации по каналам цифровой связи // Учен. зап.: Электронный науч. журнал Курского гос. ун-та.— 2012.— Т. 2.— № 4 (24).
12. **Мелентьев О. Г.** Комплекс решений по оптимизации передачи данных в радиоканалах с замираниями: Автореф. дис. д-ра техн. наук.— Новосибирск, 2007.
13. **Батенков А. А., Богачев А. Г.** Применение рандомизированных смесей для моделирования радиоканалов с межсимвольной интерференцией // Изв. ОрёлГТУ, серия «Информационные технологии».— 2008.— № 1—3/268 (544).
14. **Малахов А. Н.** Кумулятивный анализ случайных негауссовских процессов и их преобразований.— М. Сов. радио, 1978.
15. **Feng Xue, Kumar P. R.** Scaling Laws for Ad Hoc Wireless Networks: An Information Theoretic Approach. Foundation and Trend in Networking.— 2006.— Vol. 1, № 2, p. 145—270.
16. **Е. А. Каплин, Лебединский Е. В., Егоров В. В.** Современные системы передачи данных по КВ радиоканалам // Электросвязь.— 2003.— № 7.
17. **Лузан Ю. С., Хмырова Н. П.** Адаптивная радиосвязь в ДКМ диапазоне частот. Современное состояние и тенденции развития // Техника радиосвязи.— 2008.— Вып. 13.
18. **Alouini M. S., Goldsmith A.** Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels / IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '97), Phoenix, Arizona, USA, 1997.
19. **Протопопов Л. Н.** Оптимизация сигнально-кодовых конструкций по критерию энергетической эффективности // Электросвязь.— 2013.— № 4.
20. **Проакис Дж.** Цифровая связь.— М.: Радио и связь, 2000.
21. **Sripimanwat K.** Turbo Code Applications.— Springer, Dordrecht, 2005.
22. **Nakagami M.** The m-Distribution — A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading / Proceedings of a Symposium held at the University of California, Los Angeles, June 18—20, 1958.

Получено 26.03.14

## ИНФОРМАЦИЯ

### ПГУТИ ЗАПУСКАЕТ ПОРТАЛ ОБОРУДОВАНИЯ NGN

В Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ) на кафедре автоматической электросвязи реализован проект общедоступного портала, на котором размещена информация об оборудовании платформ сетей следующего поколения

(NGN). Он размещен в Интернете по адресу [www.ngn.psuti.ru](http://www.ngn.psuti.ru).

Портал обеспечивает возможность быстрого, простого и объективного сравнения характеристик оборудования сетей NGN различных зарубежных и отечественных производителей. Портал является хо-

рошей альтернативой печатным справочникам: он позволяет руководителям предприятий связи, инженерам, проектировщикам, студентам и аспирантам вузов связи быстро получить необходимую техническую информацию по оборудованию NGN, используемому на сетях связи России.