

УДК 621.391

**ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ОТ ПРИМЕНЯЕМОГО ВИДА МОДУЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ**

ПЕРЕКРЕСТОВ И.С., СУЛИМА Н.Н., ГОЛЕНКО А.К.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

**DEPENDENCE OF COMMUNICATION SYSTEMS RATE ON THE MODULATION TYPE OF MODULATION IN CONDITIONS OF MULTIPATH PROPAGATION**

PEREKRESTOV I. S., SULIMA N.N., GOLENKO A.K.

Odessa national academy of telecommunications n.a. O.S. Popov

*Аннотация.* Произведен анализ зависимости скорости цифровых систем передачи с большим числом поднесущих от среднего значения отношения мощностей сигнала и шума ( $c/\mu$ ) в условиях многолучевого распространения. Определены границы диапазонов значений  $c/\mu$  в пределах которых, определенные виды модуляции обеспечивают наибольшую скорость передачи. Показано, что при наличии частотно-селективных замираний, переход к модуляциям с большим числом уровней позволяет более эффективно использовать отведенный частотный ресурс.

*Annotation.* Dependence of the digital transmission systems rate with a large number of subcarriers from the average values of signal to noise ratio (SNR) in conditions of multipath propagation is analyzed. The limits of ranges of SNR values at which certain modulation types provide the maximal transmission rate found. It shown that the presence of frequency-selected fading the transition to modulation the type with large number positions allows to increase the efficiency of frequency resource usage.

Постоянно растущие объемы передаваемой информации, при неизменном частотном планировании и требованиях к энергетике каналов связи, привели к возрастанию требований к скорости цифровых систем передачи (ЦСП). При этом для возможности определения адекватных требований к характеристикам оборудования, актуальной стала проблема наличия информации о реально достижимых скоростях цифрового сигнала, причинах, которые ограничивают рост производительности, а также средствах и методах их повышения.

Предложенный недавно метод оценки скорости передачи [1], основанный на учете особенностей современных ЦСП, который условно можно назвать «частотно-пороговым» (ЧП), показывает, что при использовании системой частотно-селективного радиоканала максимально возможная скорость как минимум в два раза меньше, определенной согласно формуле Шеннона [2].

В основу ЧП метода также положено выражение, предложенное Шенноном, но при этом оценка скорости производится с учетом отношения сигнал/шум  $\rho$  ( $c/\mu$ ) в каждом подканале. Из рассмотрения исключаются те подканалы, в которых  $\rho$  меньше некоторого порогового значения. Согласно полученным результатам, несмотря на то, что имеется некоторое отклонение скорости передачи при использовании многолучевого радиоканала от теоретического предела при малых значениях  $\rho$ , неограниченное увеличение  $\rho$  обеспечивает неограниченный рост скорости. Однако, если учесть тот факт, что в оборудовании используют конкретные виды модуляции, то, безусловно, скорость передачи данных будет однозначно определяться числом уровней сигнала  $M$ .

Известно [3], что виды модуляции с малым значением  $M$ , такие как, например, ФМ-2 или ФМ-4, характеризуются наилучшими показателями помехоустойчивости. С другой стороны, системы передачи, использующие такие виды модуляции, обеспечивают наименьшую скорость. С ростом  $M$ , при использовании модуляций КАМ-16 или КАМ-64, происходит обмен энергетических показателей эффективности на частотные, и скорость, соответственно, в 4 (2) и 6 (3) раз выше.

В случае использования модуляции ФМ-2 (ФМ-4), минимально необходимое отношение с/ш  $\rho_n$  будет наименьшим и, следовательно, согласно ЧП методу при фиксированной мощности шума, по сравнению с другими видами модуляции, для передачи данных будет задействовано максимальное количество подканалов, что в свою очередь должно предполагать обеспечение максимальной скорости передачи. В тоже время при меньшем количестве подканалов, в которых выполняется условие  $\rho_i > \rho_n$ , модуляции с  $M > 4$  гарантируют в разы большую скорость передачи, обеспечиваемую каждым подканалом и системой в целом.

Целью данной работы является анализ ЦСП с большим числом поднесущих, использующей многолучевой частотно-селективный радиоканал, на предмет существования такого вида модуляции, который можно считать оптимальным, не зависимо от величины действующего отношения сигнал/шум, используя в качестве критерия оптимальности максимум скорости передачи.

### 1. ДОРАБОТКА ЧАСТОТНО-ПОРОГОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ЦСП

Для того чтобы иметь возможность оценивать скорость передачи с учетом применяемого вида модуляции необходима доработка ЧП метода. Главным образом, причина необходимости доработки состоит в том, что используемая формула учитывает только характеристики физического канала связи, в нашем же случае необходимо оценивать скорость передачи системы в целом.

Так, если ПС канала  $C$  является непрерывной монотонно возрастающей функцией  $\rho$ , то скорость ЦСП однозначно определяется занимаемой полосой частот и применяемым видом модуляции. Если рассматривать неадаптивную систему, то улучшение энергетической обстановки в канале связи обеспечивает лишь уменьшение вероятности ошибки, скорость передачи при этом остается неизменной. Если речь вести об адаптивных системах, например, с адаптивным изменением применяемого вида модуляции, то все равно существует: во-первых, конечное значение диапазона отношений сигнал/шум в пределах которого вид модуляции будет неизменен и, во-вторых, предельное значение количества уровней  $M$ .

Если принять, что в качестве низкочастотных переносчиков используются, импульсы Найквиста с крутизной ската спектра равной нулю (предел Найквиста), то скорость системы передачи при использовании канала ширины  $F_k$  будет следующей:

$$C = F_k \log_2 M . \quad (1)$$

Напомним, что частотно-пороговый метод [1] был разработан применительно к системам передачи, использующим большое количество поднесущих и, соответственно состоящих из  $N$  подканалов ширины  $F_n = F_k / N$ .

Согласно главной идее частотно-порогового метода, если канал связи является частотно-селективным, то при определении скорости необходимо исключить те подканалы, в которых отношение сигнал/шум  $\rho$  меньше минимально необходимого значения  $\rho_n$ . С учетом сказанного, для системы передачи расчет необходимо осуществлять следующим образом:

$$C(\rho) = K(\rho) F_k \log_2 M \quad (2)$$

где  $K(\rho)$  – коэффициент, учитывающий относительное количество подканалов пригодных для использования  $N_{исп}$ ,  $K(\rho) = N_{исп} / N$ .

Видим, что, как и ранее, скорость зависит от  $\rho$ , но теперь она не превышает значения, определяемого с помощью (1).

## 2. ПЕРЕХОД ОТ МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМОГО ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ К ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ БИТА

В отличие от аналоговых систем связи, где главным критерием качества является отношение средних мощностей сигнала и шума, наиболее важной характеристикой любой цифровой системы передачи является вероятность ошибки бита на ее выходе  $p_{\text{доп}}$ , которая, в свою очередь, для каждого конкретного вида модуляции согласно кривым помехоустойчивости определяет минимально необходимое отношение энергии, затрачиваемой на передачу одного бита, к спектральной плотности мощности шума  $h_{\text{бн}}^2$ , связь которого с  $\rho_{\text{н}}$ , следующая:

$$\rho_{\text{н}} = h_{\text{бн}}^2 \log_2 M. \quad (3)$$

Стандартным требованием к помехоустойчивости систем передачи данных является не превышение вероятности ошибки бита величины  $10^{-6} \div 10^{-7}$ . Но, поскольку современное оборудование в своем составе обязательно имеет как сверточное, так и блочное кодирование [3], то вероятность ошибки в цифровом потоке на выходе демодулятора не должна превышать приблизительно  $10^{-2} \div 10^{-3}$ . Примем  $p_{\text{доп}} = 10^{-2}$ .

## 3. АНАЛИЗ СКОРОСТИ ЦСП В МНОГОЛУЧЕВОМ РАДИОКАНАЛЕ

Для проведения исследования зададимся тремя видами модуляции, используемыми в современном оборудовании: ФМ-4 (QPSK), КАМ-16 (16QAM) и КАМ-64 (64QAM). Как и в работе [1], считаем, что система передачи использует  $N = 64$  подканала шириной по  $F_{\text{п}} = 0,3$  МГц. В качестве модели многолучевого радиоканала примем одну из моделей, рекомендуемых для испытания оборудования систем стандарта 802.11 – модель С [4].

В таблице 1 для заданного уровня  $p_{\text{доп}}$  определены  $h_{\text{бн}}^2$ ,  $\rho_{\text{н}}$  и максимально возможная скорость передачи по каналу шириной  $F_{\text{к}}$ .

Таблица 1 – Параметры  $h_{\text{бн}}^2$ ,  $\rho_{\text{н}}$  и  $C$  при  $p_{\text{доп}} = 10^{-2}$

Вид модуляции	$h_{\text{бн}}^2$ , дБ	$\rho_{\text{н}}$ , дБ	$C$ , Мбит/с
ФМ-4	4,4	7,4	38,4
КАМ-16	8,4	14,4	76,8
КАМ-64	12,3	20,1	115,2

Результаты расчетов, проведенных согласно выражению (2) приведены на рис.1. Также на этом рисунке приведена граница пропускной способности гауссового канала связи, определенная согласно формуле Шеннона – граница Шеннона (Boundary of capacity  $C_{Sh}$ ).

Анализируя полученные кривые, можно прийти к выводу о том, что оптимального вида модуляции, т.е. такого, который обеспечивает наибольшую скорость не зависимо от действующего значения с/ш, нет.

На основе полученных результатов можно заключить следующее:

– для каждого значения  $\rho$  (диапазона значений) существует свой оптимальный вид модуляции, следовательно, для поддержания максимальной скорости в условиях меняющегося уровня сигнала (средней мощности всех поднесущих) ЦСП с большим числом поднесущих должна иметь возможность адаптивной подстройки используемого вида модуляции, при этом, в отличие от аналогичных систем с одной несущей, параллельная передача «медленных» потоков обеспечивает плавное изменение скорости в зависимости от  $\rho$ ;

– можно однозначно определить такие уровни  $\rho^{opt}$ , при которых ЦСП должна переходить к виду модуляции с большим или меньшим числом уровней, условно назовем их оптимальными (отмечены на рисунках маркерами в виде «о»);

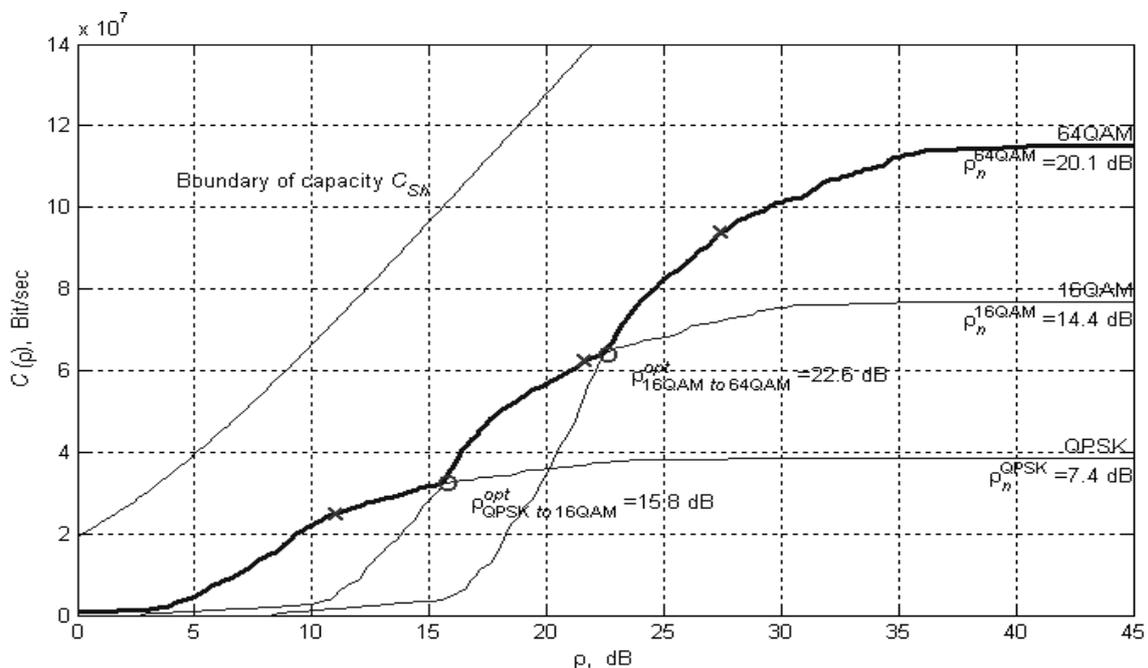


Рисунок 1 – Скорость ЦСП с ФМ-4, КАМ-16 и КАМ-64, использующих частотно-селективный радиоканал модели С

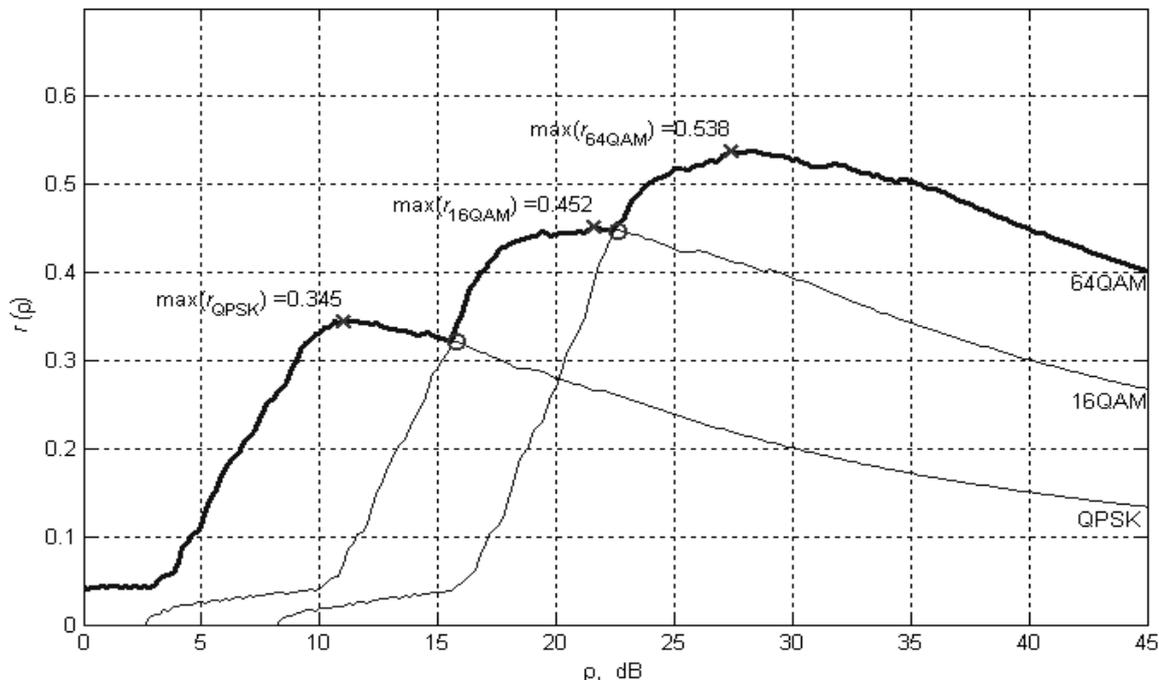


Рисунок 2 – Кривые, отображающие степень приближения скорости ЦСП к границе Шеннона при использовании модуляции ФМ-4, КАМ-16 и КАМ-64

Из рисунка 2 видно, что при использовании модуляций с большим числом уровней эффективность ЦСП возрастает. Значения  $\rho$ , при которых достигаются наибольшие значения  $r(\rho)$  на кривых отмечены маркерами в виде «x».

Причины, по которым скорость многолучевого канала при использовании КАМ-16 ближе к теоретическому пределу, чем при ФМ-4 и, соответственно, при КАМ-64 ближе, чем при КАМ-16, заключаются в следующем:

1. Виды модуляции с большим числом  $M$  характеризуются большими значениями минимально необходимого отношения с/ш  $\rho_n$  (порядка 20 дБ и более), следовательно, используются системами, обеспечивающими большие уровни сигналов на фоне помех и шумов.

2. Статистически, в многолучевых радиоканалах глубоких частотно-селективных замираний (-20 дБ... -30 дБ) значительно меньше, чем небольших замираний глубиной до -10 дБ.

Следовательно, при неизменной структуре радиоканала,  $\rho_n$  большей величины гарантирует меньшее количество подканалов подверженных замиранию, следовательно, меньше будет таких подканалов, в которых не выполнится условие  $\rho > \rho_n$  и, соответственно, наоборот. Проведем аналогичные исследования для остальных моделей многолучевых радиоканалов ( $A, B, D, E$ ) и сведем значения  $\rho^{opt}$  в табл.2.

Из табл.2 видно, что, не считая случая канала модели  $A$ , значения  $\rho^{opt}$  для каналов различных моделей практически не отличаются и, следовательно, в оборудование могут быть заложены фиксированные пороги, определенные как арифметическое среднее или каким-то другим способом.

Таблица 2 – Значения отношений с/ш  $\rho^{opt}$  оптимальные для перехода к использованию следующего вида модуляции

Вид модуляции	$h_b^2$ , дБ	$\rho_n$ , дБ	$\rho^{opt}$ , дБ				
			Модель A	Модель B	Модель C	Модель D	Модель E
ФМ-4	4,36	7,4	-	-	-	-	-
КАМ-16	8,36	14,4	19,4	16,2	15,8	15,6	15,4
КАМ-64	12,3	20,1	26,4	23,8	22,6	22,4	22,6

Для каналов различных моделей для каждой из исследуемых модуляций в табл.3 сведены максимальные значения  $r(\rho)$ .

Таблица 3 – Максимальные значения  $r(\rho)$

Вид модуляции	$\max(r(\rho))$				
	Модель A	Модель B	Модель C	Модель D	Модель E
ФМ-4	0,276	0,352	0,345	0,374	0,362
КАМ-16	0,402	0,460	0,452	0,486	0,486
КАМ-64	0,496	0,550	0,538	0,575	0,575

Увеличение значения коэффициента  $r$  при переходе к видам модуляции с большим  $M$ , позволяет утверждать, что при этом будет происходить рост скорости не только за счет линейного увеличения множителя  $\log_2(M)$  в выражении (2), но и за счет более эффективного использования отведенной полосы частот. Можно предположить, что зависимость увеличения скорости передачи от вида модуляции будет существенно нелинейной, а приближение к теоретической границе может быть достигнуто при относительно небольшом увеличении  $M$ .

#### 4. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ

Использование дополнительных видов модуляции. Рассмотрим, каким образом может быть максимизировано среднее значение отклонения скорости передачи от теоретического

предела  $\max \overline{r(\rho)}$  при рассмотрении составной кривой, отмеченной на графиках утолщенной линией.

Из рисунка 1 и рисунка 2 видно, что ухудшение характеристик происходит в диапазонах отношения с/ш близких к  $\rho^{opt}$ , это происходит по той причине, что в данных областях, использование одного вида модуляции дает почти предельные для него показатели, а другого – лишь небольшую долю от них. Увеличение скорости в диапазоне около  $\rho^{opt}$  может быть достигнуто за счет использования промежуточных видов модуляции, например, в нашем случае можно применить модуляции ФМ-8 (8PSK) и КАМ-32 (32QAM). Т.о. мы получим не два, а четыре значения  $\rho^{opt}$  и при этом значения  $r(\rho^{opt})$  будут большими, чем ранее и соответственно  $\overline{r(\rho)}$  возрастет.

Кривые, рассчитанные согласно выражениям (2) и (4), но теперь уже для пяти видов модуляции приведены на рисунка 3 и рисунка 4, соответственно.

Необходимо обратить внимание на то, что целесообразность увеличения количества различных видов модуляции, как средства максимизации скорости, будет зависеть от стабильности канала связи – постоянства во времени среднего отношения с/ш. Приближение порогов перехода от одного вида модуляции к другому, при нестабильной энергетической обстановке, может привести к превосходству затрат на передачу служебных сообщений и перестройку системы над увеличением скорости в области  $r(\rho^{opt})$ .

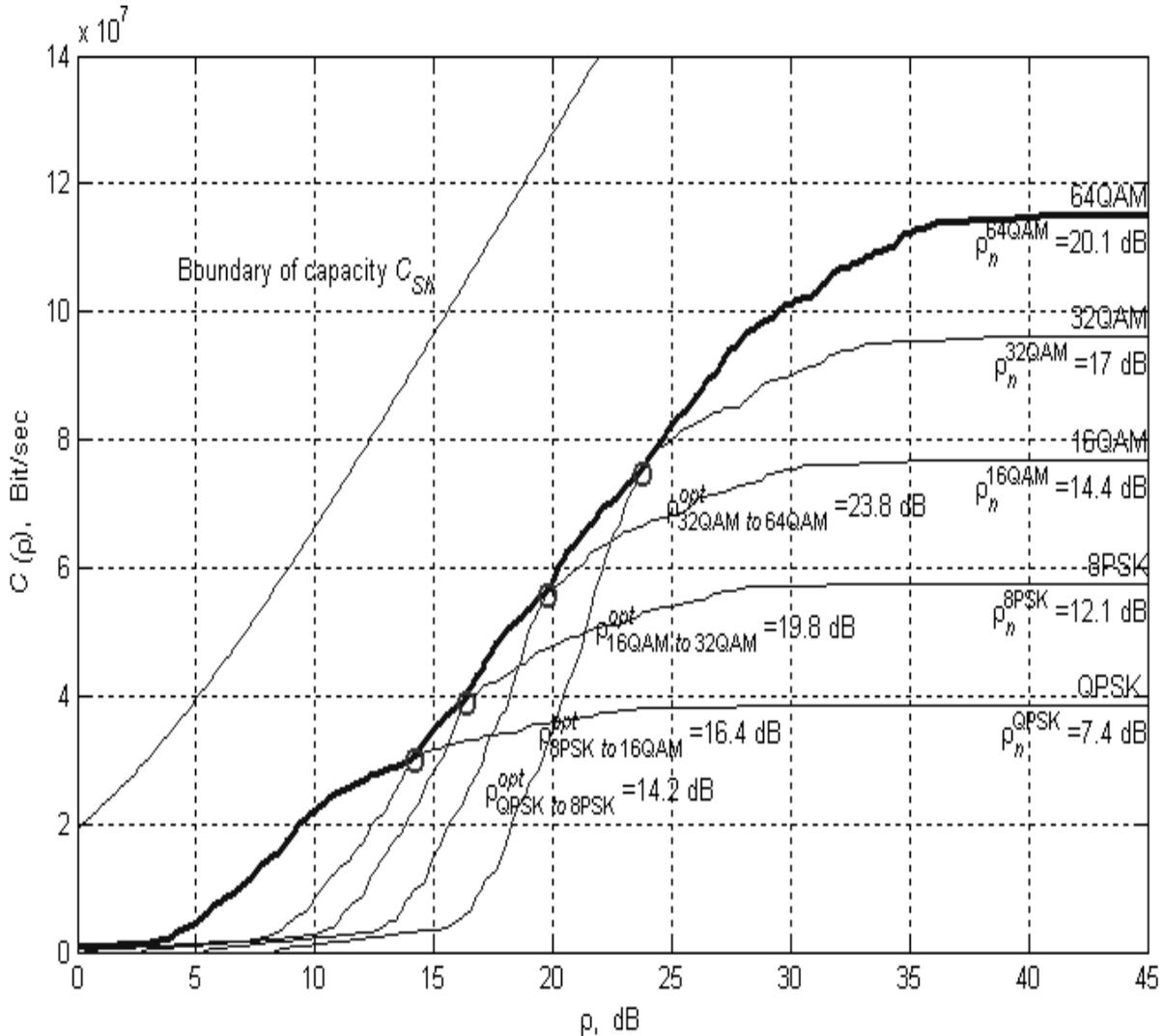


Рисунок 3 – Скорость ЦСП с ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16, КАМ-32 и КАМ-64, использующих частотно-селективный радиоканал модели С

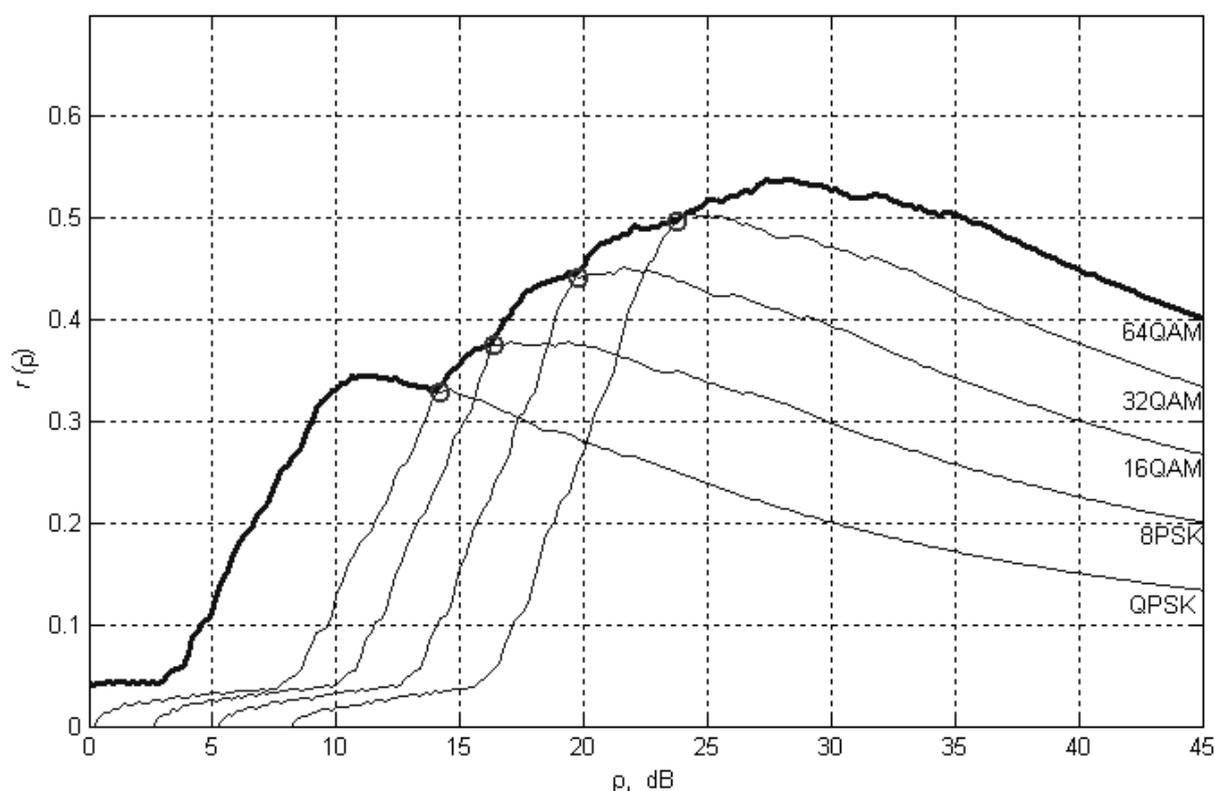


Рисунок 4 – Кривые, отображающие степень приближения скорости ЦСП к границе Шеннона при использовании модуляции ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16, КАМ-32 и КАМ-64

**Дифференцированная адаптация модуляции на поднесущих.** Очевидно, что если осуществлять подстройку вида модуляции отдельно на каждой из поднесущих (или их группе), то можно добиться существенного увеличения скорости за счет максимального использования ресурса каждого подканала. При таком подходе к решению этой проблемы эффективным будет увеличение числа подканалов и количества используемых модуляций. Но, при этом одновременно с полученной выгодой, существенно возрастают требования к ЦСП, необходимо:

- 1) производить оценку состояния энергетики каждого подканала;
- 2) выделение ресурсов канала для передачи служебной информации о его состоянии;
- 3) обеспечение достаточной скорости реакции при быстром изменении параметров.

В дальнейших работах планируется проведение оценки эффективности дифференцированной адаптации модуляции с учетом ограниченного числа используемых видов модуляции.

## ВЫВОДЫ

*В заключение, подытожим результаты, полученные в работе:*

1. Был получен однозначный ответ на поставленный вопрос о существовании вида модуляции обеспечивающего максимальную скорость передачи ЦСП с большим числом поднесущих в условиях меняющейся энергетической обстановки, такого вида модуляции нет.

2. Для каждой области значений отношений  $s/\mu$  существует свой оптимальный вид модуляции.

3. Полученные зависимости позволяют однозначно определить уровни  $s/\mu$ , при переходе через которые, необходимо изменять используемый вид модуляции. Характерно, что эти уровни практически не отличаются для различных моделей каналов и в аппаратуру могут быть заложены их средние значения.

4. Переход к видам модуляции с большим числом уровней, при условии возможности повышения среднего значения отношения  $c/w$ , обеспечивает рост скорости передачи не только за счет увеличения количества бит информации переносимых каждым канальным символом, но и благодаря более эффективному использованию отведенного частотного ресурса (подканалов подверженных глубоким замираниям становится меньше).

5. Минимальное отклонение скорости передачи от теоретически достижимой не зависит от действующего значения  $c/w$  может быть обеспечено путем увеличения количества используемых видов модуляции, но целесообразность применения такого подхода будет зависеть от стабильности канала связи (постоянства во времени среднего отношения  $c/w$ ).

6. Необходимо также подчеркнуть, что, как и изначально предложенный вариант частотно-порогового метода, так и его доработанная в этой работе форма могут быть применимы для любых систем и каналов, при условии известных занимаемой полосы частот, количества подканалов и импульсном отклике.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Перекрестов И. С.* Анализ пропускной способности многолучевого радиоканала / Перекрестов И.С., Неграй А.В. // Цифрові технології. – 2009. – № 5. – С. 51-57.
2. Теория передачи сигналов: [учебник для вузов] / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
3. Складар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение – [2-е изд.] / Складар Б.; [пер. с англ.]. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
4. *Волков Л.Н.* Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: [учеб. пособие] / Волков Л. Н., Немировский М. С. Шинаков Ю. С. – М.: Око-Трендз, 2005. – 392 с.