

ОПТИМИЗАЦИЯ СИГНАЛЬНО-КОДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ СВЯЗНЫХ РАДИОКАНАЛОВ С ГЛУБОКИМИ РЕЛЕЕВСКИМИ ЗАМИРАНИЯМИ

М. Ф. Шебакпольский, А. Б. Царев, М. М. Крахмалева,
Э. В. Волкова, А. Ю. Родионов
ОАО «Конструкторское бюро «Луч», г. Рыбинск

Получена 6 августа 2009 г.

Рассматривается проблема оптимизации сигнально-кодовой конструкции в релейском канале с глубокими замираниями сигналов.

Ключевые слова: радиосвязь, многолучевой канал, помехоустойчивость, ионосферная радиосвязь, тропосферное рассеяние.

Наиболее актуальной проблемой в современных радиосистемах связи является проблема повышения производительности. Повышение производительности всегда связано со снижением энергетики и все возрастающим влиянием условий распространения. Одним из наиболее распространенных эффектов распространения сигналов в приземных и городских каналах связи является возникновение многолучевого распространения сигнала между передатчиком и приемником. Многолучевой канал связи возникает в следующих случаях:

- при малых углах места прямого луча относительно поверхности земли;
- в ионосферной радиосвязи в диапазоне коротких волн (КВ);
- в радиосвязи с тропосферным рассеянием;
- при распространении сигналов в условиях городской застройки.

Типичная геометрия таких радиолиний связи такова, что фазовый центр передающей антенны расположен на высоте от 3 до 12 м над поверхностью Земли. Высота приемной антенны изменяется от 200 до 10000 м. При этом дальность связи, ограниченная условием прямой радиовидимости, составляет от нескольких десятков, до 500 км. Во всех перечисленных случаях угол места Δ прямого луча передающей антенны составляет десятые доли градуса, и диаграмма направленности антенны касается поверхности земли. Анализ геометрии позволяет сделать следующие выводы:

- диаграмма антенны касается поверхности Земли, поэтому существуют отраженные лучи от области засветки;
- угол скольжения на дальностях прямой радиовидимости не превышает 0,1 градуса.

При таком угле скольжения коэффициент отражения приближается к значению $K_{отр} = 1$.

Рекомендуемый Международным комитетом по радиосвязи угол скольжения должен быть не менее 10 градусов. При этих условиях $K_{отр} = 0,1$, и отраженные лучи можно не учитывать.

В приземных радиоканалах их приходится учитывать, т. к. $K_{отр} = 1$.

Движение приемника (ПРМ) вызывает появление доплеровского сдвига частоты принимаемого радиосигнала относительно излученного. От зоны засветки лучи отражаются с различными доплеровскими сдвигами частоты. В точке приема суммируются несколько лучей с различными доплеровскими сдвигами частоты, поэтому между сигналами, принятыми от различных лучей, наблюдаются биения, которые приводят к появлению глубоких, ниже уровня собственного шума приемника, замираниям суммарного сигнала. Среднестатистическая длительность этих замираний может превышать длительность элемента полезного сигнала в сотни раз. Это означает, что среднестатистически ниже уровня собственного шума приемника оказывается до нескольких сотен элементов принимаемого сигнала.

Графики интерференционного множителя ослабления Земли в зависимости от расстояния для различных несущих частот при средней шероховатости поверхности Земли 0,2 м представлены на рисунке 1.

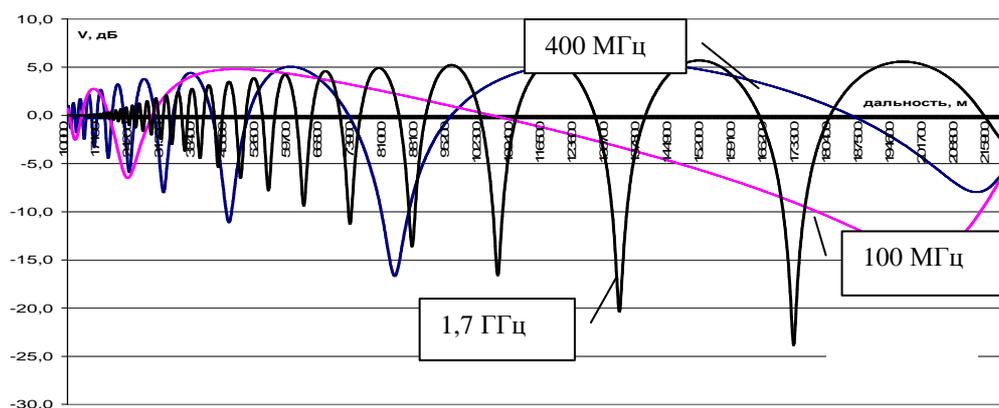


Рис. 1. Зависимость множителя ослабления Земли от расстояния и частоты для $h_1 = 3$ м и $h_2 = 3000$ м

Как видно из рисунка, быстрые колебания уровня принимаемого сигнала зависят от расстояния и частоты сигнала. Здесь мы видим иллюстрацию явления замирания. При определенных расстояниях между антеннами сигналы, распространяющиеся разными путями, приходят в приемную антенну с противоположными фазами, что уменьшает мощность сигнала. По мере увеличения дальности появляются замирания сигнала, и нарастает их глубина. Канал становится сначала райсовским, а на пределе прямой радиовидимости - рэлеевским.

Современные системы радиосвязи в большинстве случаев работают в условиях многолучевого распространения радиосигналов, поэтому возникает необходимость

исследования помехоустойчивости в многолучевом канале с глубокими быстрыми и медленными замираниями.

В общем случае явление многолучевости приводит к искажениям передаваемых сигналов и к снижению достоверности приема информации. Искажения радиосигналов, вызванные многолучевым распространением радиоволн, зависят как от свойств канала связи, так и от характеристик используемых сигнально- кодовых конструкций.

Основным параметром при создании модели многолучевого радиоканала является профиль временного рассеивания, т. е. зависимость коэффициента усиления G отражённого луча от времени задержки τ_0

Типичный пример зависимости коэффициента усиления G отражённого луча от времени задержки τ_0 для радиолинии с параметрами: $h_1=2\text{ м}$, $h_2=10\text{ км}$; $\epsilon = 4,5$ (сухая земля); $h_c = 20\text{ см}$ представлен на рисунке 2.

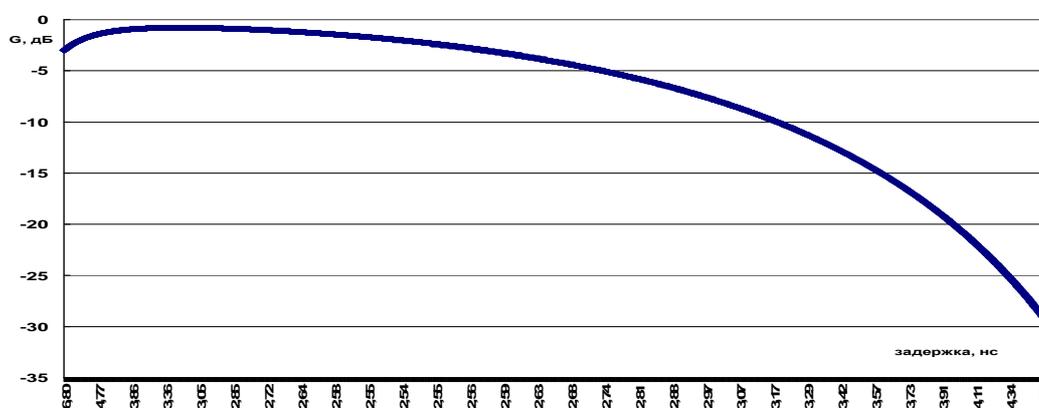


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления G отражённого луча от времени задержки τ_0 для радиолинии с параметрами: $h_1 = 2\text{ м}$; $h_2 = 10\text{ км}$; $\epsilon = 4,5$ (сухая земля); $h_c = 20\text{ см}$

Для высокоскоростных радиолиний связи, в которых длительность символа достигает значений порядка 10 нс, интервал многолучевого растяжения τ_3 соизмерим по величине с длительностью символа. Это приведет к возникновению в канале межсимвольной интерференции. Это обстоятельство должно учитываться при разработке оптимальной сигнально-кодовой конструкции. Кроме того, необходимо использование специальных методов приема сигналов в многолучевых каналах.

Анализ условий распространения радиосигналов в радиолиниях связи показывает, что для обеспечения требуемой помехоустойчивости необходимо совместное применение в таких каналах специальных методов разнесенного приема, перемежения, скремблирования и помехоустойчивого кодирования. С повышением скорости информационного обмена в радиоканале эффекты распространения радиосигналов оказывают все возрастающее влияние на оптимальность выбора сигнально-кодовых конструкций (СКК). Для правильного выбора СКК необходимо исследовать среднестатистические, а лучше наихудшие условия распространения, и разрабатывать

их программные модели. Оптимизацию СКК необходимо осуществлять с использованием этих моделей. Только такими методами можно разработать действительно оптимальную СКК.

Расчет энергетического запаса на замирания F , который обеспечивает устойчивую работу радиолинии, предложен в книге Томаса Уэйна «Электронные системы связи» в виде уравнения надежности Барнетта- Вигнанта:

$$F = 30 \log D + 10 \log(6A Bf) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (1)$$

где D – расстояние связи (км);

f – частота (ГГц);

R – коэффициент готовности, выраженный в долях единицы;

A – коэффициент неравномерности, $A = 4$ при прохождении над водой или очень гладкой поверхностью, $A = 1$ над средней местностью; $A = 0,25$ для горной местности;

B – коэффициент пересчета вероятности наихудшего месяца в годовую, $B = 1$ для преобразования годовой готовности в готовность худшего месяца; $B = 0,5$ для жарких влажных районов; $B = 0,25$ для средних континентальных местностей; $B = 0,125$ для очень сухих или горных местностей.

Результат решения этого уравнения приведен на рисунке 3.

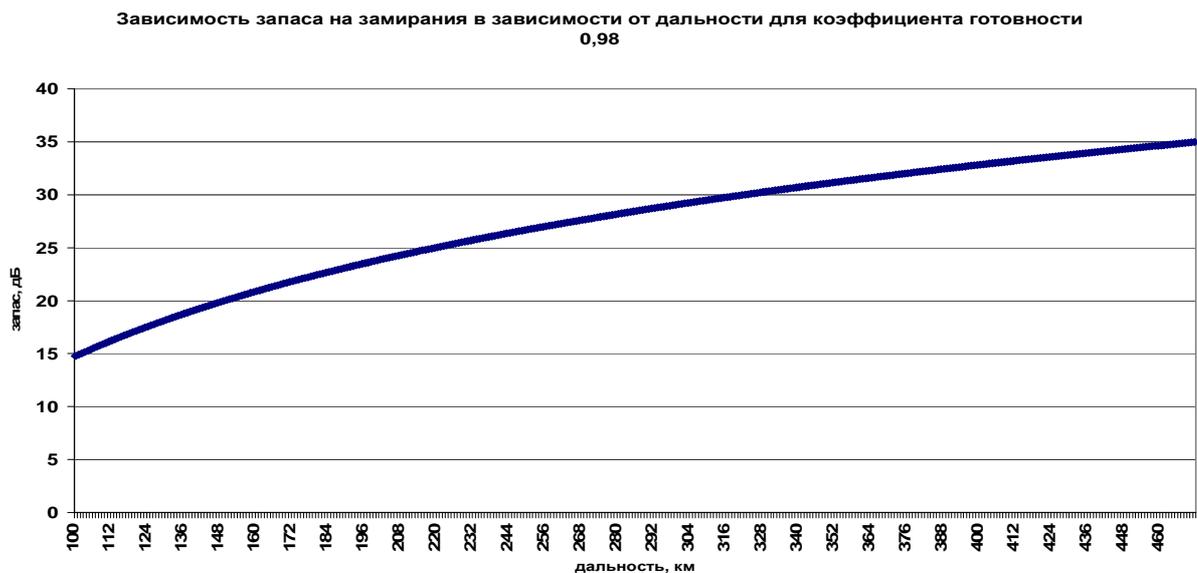


Рис. 3. Зависимость требуемого энергетического запаса в радиолинии от дальности для обеспечения коэффициента готовности 0,98.

Из рисунка видно, что для дальности связи 500 км. требуется дополнительный энергетический запас не менее 35 дБ, т. е. необходимо увеличить мощность передатчика более чем в 1000 раз.

Результаты моделирования дискретного канала, полученного из непрерывного федингового канала после линейного демодулятора, показывают, что двоичные ошибки на выходе демодулятора имеют тенденцию к пакетированию.

Пакетирование ошибок проявляется в возникновении на выходе демодулятора взаимозависимых ошибок различной кратности от 0 до длины кодового слова. Основной причиной пакетирования ошибок является процессы замирания сигналов в непрерывном канале. В таких условиях применение сигнально-кодовых конструкций (СКК), ориентированных на исправление одиночных независимых ошибок, не является оптимальным техническим решением. Для оптимизации СКК необходимо исследовать процесс пакетирования ошибок.

Исследования процессов пакетирования ошибок в канале с АБГШ и в канале с релеевскими замираниями представлены на рисунке 4.

Анализ гистограмм распределения символьных пакетных ошибок на длине кода (длина кода=127 символов) в канале с АБГШ и канале с релеевскими замираниями показал следующее:

- при вероятности ошибки демодулятора $Р_{ош.дем.} = 6,5 \times 10^{-2}$ вероятность ошибки на символ в канале с АБГШ $Р_{ош.сим.} = 3,75 \times 10^{-1}$, а в канале с релевскими замираниями $Р_{ош.сим.} = 1,92 \times 10^{-1}$;
- оптимизированный декодер в канале с АБГШ имеет $Р_{ош.дек} = 6,6 \times 10^{-2}$, в то время как он же полностью исправляет ошибки в канале в релевскими замираниями;
- максимум вероятности появления ошибок в канале с АБГШ приходится на 47 кратность, а в канале с релевскими замираниями после перемежителя на 25 кратность;
- вероятность символьной ошибки в канале с АБГШ $Р_{ош. сим} = 3,75 \times 10^{-1}$, что почти в 2 раза выше, чем в канале с релевскими замираниями $Р_{ош.сим.} = 1,92 \times 10^{-1}$.

Вышеизложенный анализ приводит к полезному выводу: в каналах с релевскими замираниями необходимо применять недвоичные помехоустойчивые коды совместно с перемежителем.

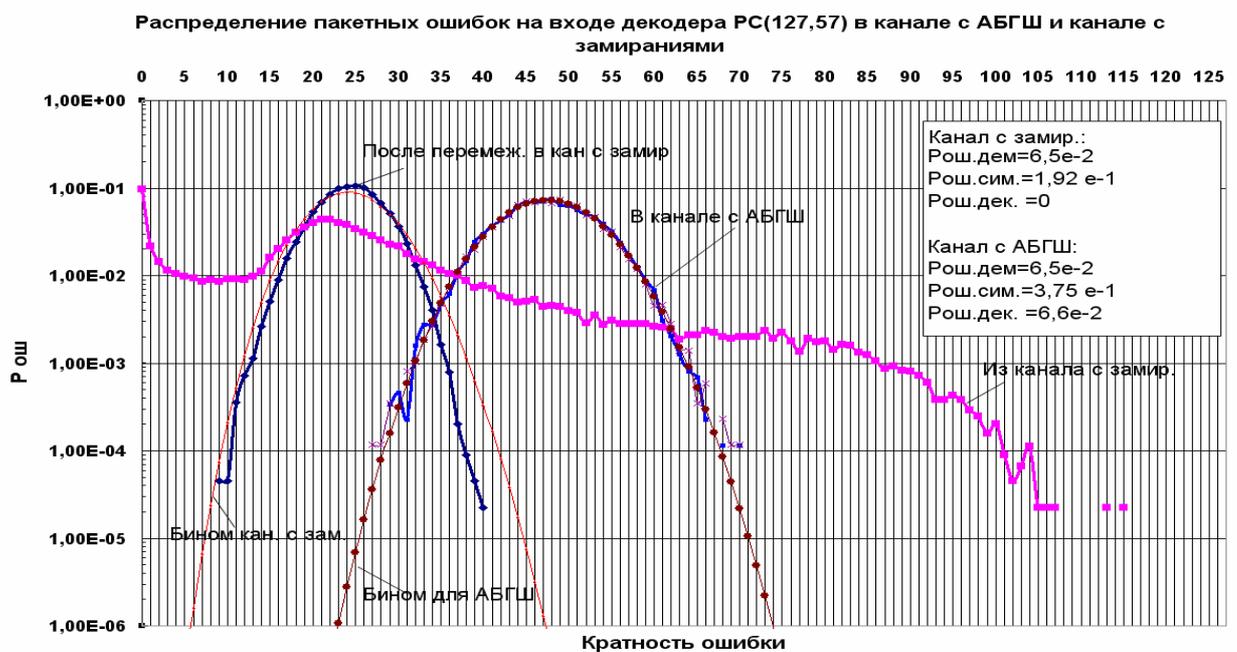


Рис. 4. Распределение пакетных ошибок в канале с АБГШ и канале с замираниями при $Р_{ош.дем.} = 6,5 \times 10^{-2}$.

Результат сравнения наиболее распространенного в настоящее время каскадного кода на базе сверточного кода (СК) и кода Рида-Соломона СК(κ=7,2,3)-РС(185,177) с каскадным кодом на базе двух кодов Рида-Соломона РС(127,57)-РС(127,121) в канале с АБГШ приведен на рисунке 5.

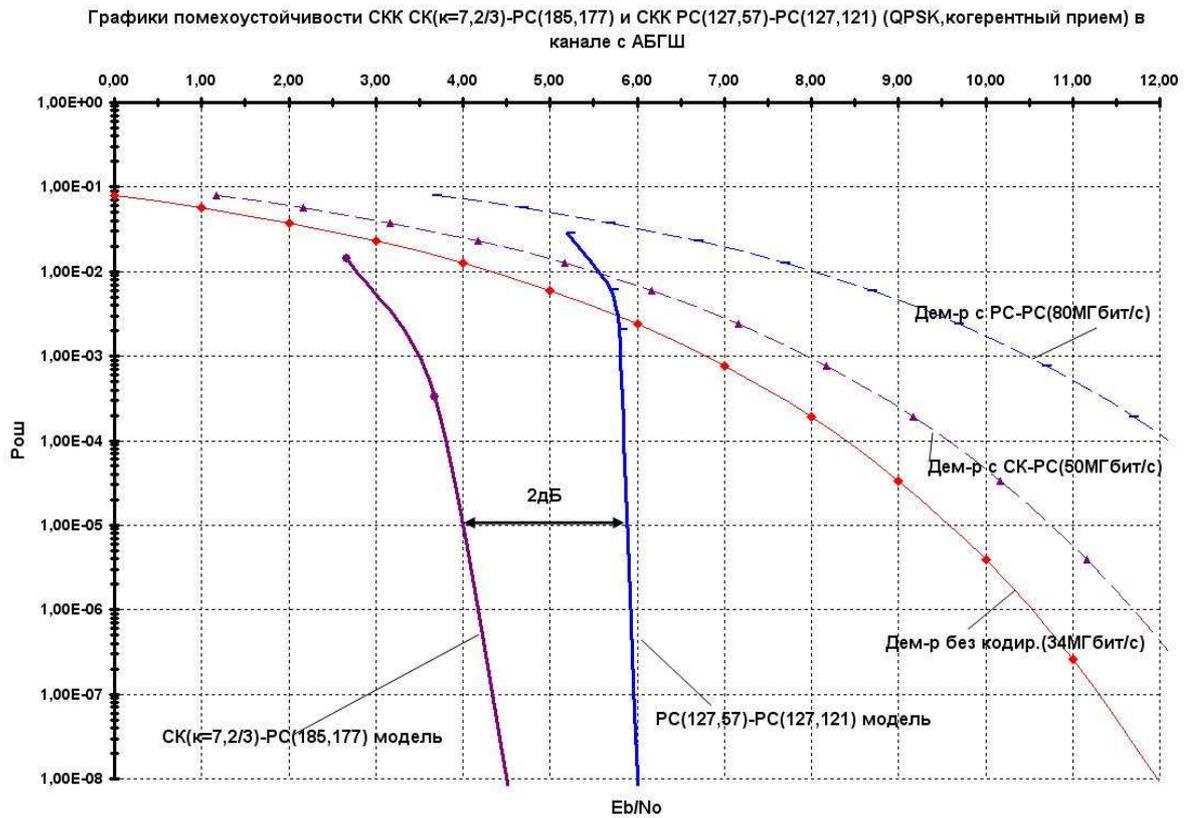


Рис. 5. Результаты моделирования в канале с АБГШ.

Из рисунка видно, что СКК РС-РС проигрывает 2 дБ СК-РС на уровне $Рош=1 \times 10^{-5}$.

На рисунке 6 построены сравнительные кривые помехоустойчивости этих же кодов в канале с релевскими замираниями.

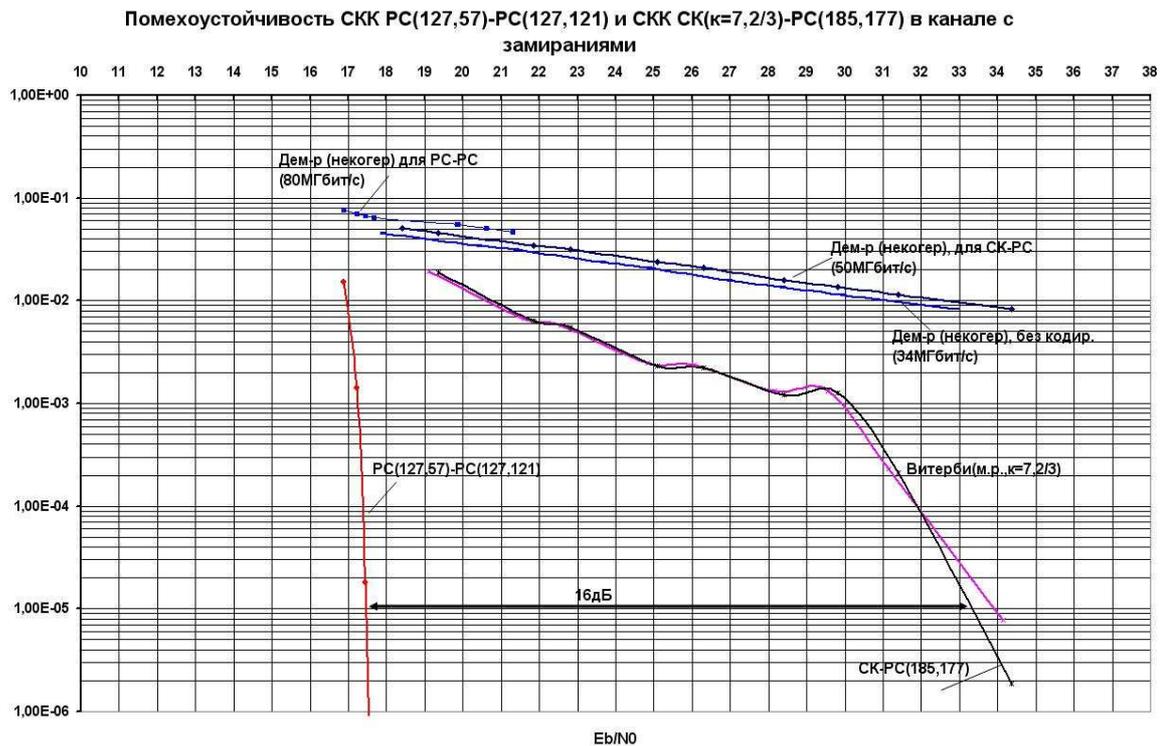


Рис. 6. Результаты моделирования в канале с замираниями.

Из рисунка видно, что в канале с замираниями СКК РС-РС выигрывает 16 дБ на уровне $P_{ош}=1 \times 10^{-5}$.

Анализ рисунка позволяет сделать следующие выводы:

- энергетический выигрыш от применения СКК на базе двух недвоичных кодов Рида-Соломона по сравнению с СКК на базе двоичного сверточного кода и кода Рида-Соломона составляет для $P_{ош} = 10^{-5}$ более 16 дБ в релейском радиоканале с глубокими замираниями.
- на помехоустойчивость СКК влияет не только вероятность ошибки, но и распределение ошибок на входе декодера.
- сверточные коды предпочтительно использовать в каналах с независимым распределением ошибок, таких как каналы спутниковой связи.
- в каналах с замираниями (канале с пакетированием ошибок) предпочтительней использовать коды, предназначенные для борьбы с пакетными ошибками. Такими кодами являются коды РС. Выигрыш СКК РС-РС в канале с замираниями происходит из-за того, что в канале с пакетированием резко уменьшается вероятность символьной ошибки при той же вероятности битовой ошибки (вероятности ошибки демодулятора).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Коржик, Л. М. Финк «Помехоустойчивое кодирование дискретных сообщений в каналах со случайной структурой». М. «Связь», 1975г.