

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУР И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Е.Ю. Богданов

ОАО «МСС-Поволжье»,
443080, Самара, Московское шоссе, 15

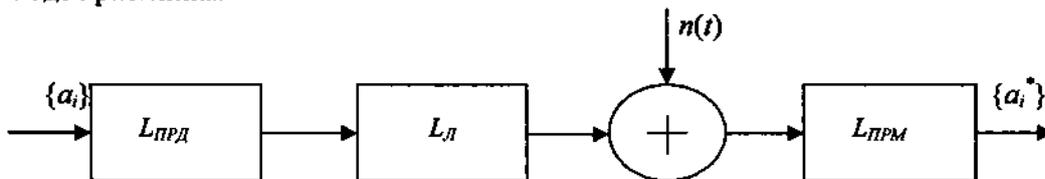
E-mail: sam.yoshiki@gmail.ru

Рассмотрены основные математические подходы, применяемые для определения структур и показателей качества сверхширокополосных каналов связи.

Ключевые слова: показатели качества, сверхширокополосный канал связи, помехозащищенность, широкополосный множественный доступ с кодовым разделением, спектральная плотность.

Процесс передачи сообщений в дискретном канале включает две основные операции: сопоставление каждого сообщения с сигналом-переносчиком конечной длительности T_C , который поступает в радиолинию, и идентификация (распознавание) сигнала, поступающего с выхода радиолинии на вход приемника.

Для математического описания основных преобразований (операций) соответствующих множеств, которые происходят в процессе передачи информации, будем использовать понятие оператора. Обозначим оператор передатчика, превращающий кодированные сообщения $\{a_i\}$ в сигналы $\{s_i\}$, через $L_{ПРД}$, оператор линии связи обозначим как $L_{Л}$, оператор приемника, преобразующий сигналы в решения $\{a_i^*\}$, как $L_{ПРМ}$. Тогда получим обобщенную структурную схему дискретного канала, представленную на рис. 1, где $n(t)$ – аддитивные помехи и шум, действующие на входе приемника.



Р и с. 1. Обобщенная структурная схема дискретного канала

На основании структурной схемы рис. 1 можно записать следующее отображение:

$$\{a_i^*\} = L_{ПРМ} \{x_i(t)\} = L_{ПРМ} \{L_{Л} L_{ПРД} [\{a_i\}] + [\{n_i(t)\}]\} \quad (1)$$

где $x_i(t) = L_{Л} \{s_i(t)\} + n_i(t)$ – аддитивная смесь сигнала и помех на входе приемника.

Основная задача канала связи состоит в том, чтобы между элементами множеств $\{a_i\}$ и $\{a_i^*\}$ было однозначное соответствие. Поскольку в канале действуют по-

мехи и искажения, постольку соответствие между $\{a_i\}$ и $\{a_i^*\}$, будет вероятностным (случайным), т.е. степень этого соответствия необходимо характеризовать количественно вероятностными величинами, например, вероятностью правильной передачи символа (правильного соответствия), или разборчивостью, при передаче речевых сообщений. Очевидно, лишь для идеального дискретного канала справедливо тождество $\{a_i\} \equiv \{a_i^*\}$, которое выполняется при гипотетических условиях $\{n(t)\} = 0$ и $L_{ПРМ} L_{Д} L_{ПРД} = 1$ (см. выражение (1)).

На основе анализа целевого назначения системы связи, рекомендаций и отчетов МККР (Международный консультативный комитет по радио) и требований ГОСТов главным показателем качества целесообразно принять характеристику верности передаваемой информации. Для характеристики достоверности связи в n -канальной СС обычно используют либо коэффициент ошибок $P_{Ош}$ (вероятность ошибки в передаче единицы информации), либо отношение «сигнал-шум» q_n (отношение энергии символа (бита) к спектральной плотности шума) на выходе корреляционного (согласованного) приемника (на входе решающего устройства):

$$q_n = \frac{P_{C_1}}{P_{Ш_0} + P_{Ш_1} + P_{Y_1} + P_{B_1}}, \quad (2)$$

где P_{C_1} – мощность сигнала на выходе приемника (ПРМ); $P_{Ш_0} = k t_w / T_C$ – мощность внутренних шумов на выходе ПРМ; t_w – шумовая температура; T_C – длительность сигнала; $P_{Ш_1}$ – средняя мощность внешних сверхширокополосных помех (шума); P_{Y_1} – мощность узкополосных помех; P_{B_1} – мощность взаимных помех.

При линейной согласованной обработке внешние помехи будут иметь среднюю мощность на выходе ПРМ, определяемую следующими выражениями:

$$P_{Ш_1} = \mathfrak{S}_{Ш}^2 / T_C, \quad (3)$$

где $\mathfrak{S}_{Ш}^2$ – спектральная плотность мощности внешнего шума;

$$P_{Y_1} = P_Y / B_C, \quad (4)$$

где P_Y – мощность узкополосных помех на входе ПРМ, B_C – база сигнала [1];

$$P_{B_1} = \sum_{e=1, e \neq k}^n \rho_{ek}^2 P_{C_e}, \quad (5)$$

где ρ_{ek} – коэффициент взаимной корреляции l -го и k -того сигналов, имеющих мощность P_l и P_k , P_{C_e} – мощность сигнала;

$$\rho_{ek} = \frac{1}{\sqrt{E_{C_e} E_{C_k}}} \int_0^{T_C} S_e(t) S_k(t) dt, \quad (6)$$

где E_C – энергия сигнала; n – число одновременно работающих каналов с кодовым разделением.

При одном работающем канале и отсутствии внешних помех из выражения (2) следует:

$$q_0 = \left(\frac{P_{C_1}}{P_{Ш_0}} \right) = \frac{E_C}{N_0}, \quad (7)$$

где N_0 – спектральная плотность мощности внутреннего шума.

Величина (2) является максимальным значением и не зависит от формы сигнала. При переходе к многоканальной передаче (в общей полосе) и наличии внешних помех ухудшается качество передачи информации по сравнению с (7). В отдельных случаях можно компенсировать это ухудшение путем увеличения мощности сигнала, но, во-первых, такой путь при кодовом разделении каналов может оказаться неэффективным из-за действия взаимных помех (их уровень, естественно, определяется величиной P_C), а во-вторых, это противоречит условию сравнительного анализа (постоянство мощности сигнала на входе канала).

Целесообразность принятия критерия (2) объясняется тем, что его значение определяет многие характеристики систем связи (вероятность обнаружения сигнала, вероятность ошибки в цифровых системах передачи информации, точность измерения параметров сигнала в системе синхронизации и др.). Рассмотрение согласованного приемника целесообразно по двум основным причинам: во-первых, такой приемник в условиях действия флуктуационных помех является оптимальным по показателю (2), а во-вторых, он наиболее широко используется в современных системах передачи информации.

Понятно, что перечисленные характеристики практически идентичны, поскольку вероятность ошибки для данной СС связана монотонной однозначной зависимостью с отношением «сигнал-шум». Однако для задач оценки качества СС целесообразно принять критерий вероятности ошибки, а для задач оптимизации целесообразно принять критерий максимума отношения «сигнал-шум» на входе решающего устройства. Эта целесообразность определяется, во-первых, тем, что в рекомендациях МККР для характеристики качества конкретного канала непосредственно указывается уровень допустимой вероятности ошибок за некоторый максимально допустимый интервал времени, и, во-вторых, тем, что в общем случае вероятность ошибки связана с отношением «сигнал-шум» неаналитической зависимостью, затрудняющей решение задач оптимизации в аналитическом виде. Поэтому далее для характеристики качества передаваемой информации будут использоваться и вероятность ошибки $P_{Oш}$, и отношение «сигнал-шум» q .

Из выражения (2) следует, что мощность сигнала и полоса частот (база сигнала) являются основными ресурсами СС. Эти ресурсы расходуются на передачу информации. Эффективность расхода ресурсов СС обычно характеризуют показателями энергетической и частотной эффективности:

$$\beta = \frac{R_u N_0}{P_C}; \gamma = \frac{R_U}{F_C}, \quad (8)$$

где N_0 – спектральная плотность нормального белого шума, действующего в радиоканале СС.

Используя понятия информационной эффективности, которая характеризуется коэффициентом пропускной способности канала η , можно объединить показатели (7), т.е. скаляризовать векторный показатель при условии $\eta = 1$. Основанием для такого условия служит теорема Шеннона о том, что при соответствующих способах модуляции и кодирования значение η может быть очень близким к единице, $\eta = R_u/C$, где C – пропускная способность канала.

Известна предельная зависимость для эффективности канала

$$\beta = \frac{\gamma}{2^\gamma - 1}. \quad (9)$$

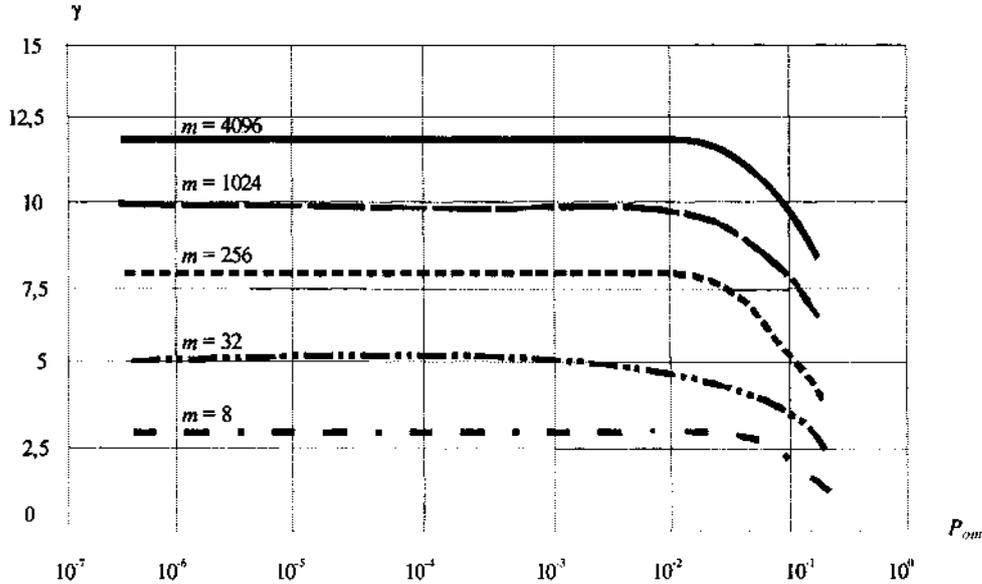
Любой реальный радиоканал будет обладать худшими характеристиками энергетической и частотной эффективности, т.е. для реального канала зависимость $\beta = f(\gamma)$ на плоскости (β, γ) будет располагаться ниже предела Шеннона. Отметим,

что коэффициент γ в системах связи может меняться от нуля до бесконечности (для дискретных m -ных каналов до $\log(m)$), а коэффициент β – от нуля до $1/\ln 2 = 1,68Б$.

Для дискретного m -ричного канала можно получить:

$$\gamma = \left[\log m - P_{OШ} \log \frac{m-1}{P_{OШ}} - (1-P_{OШ}) \log \frac{1}{1-P_{OШ}} \right]. \quad (10)$$

На рис. 2 приведена зависимость (10) в виде графиков, показывающих пределы изменения частотной эффективности от использования сигналов с большей базой.



Р и с. 2. Пределы изменения частотной эффективности

Если в СС используются ортогональные сигналы (например, система WCDMA), то величина вероятности ошибки определяется следующим известным выражением [2]:

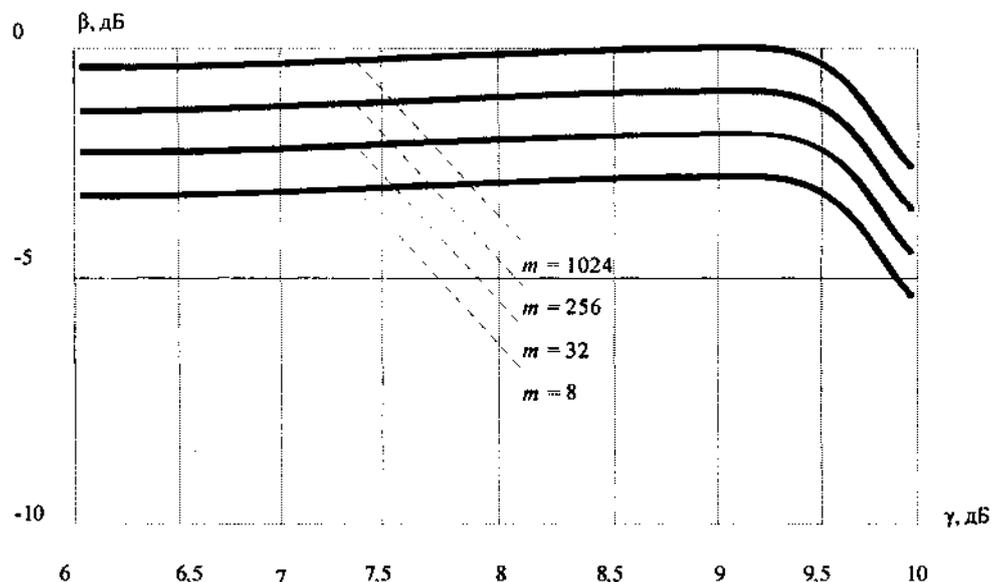
$$P_{OШ} = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\rho\vartheta}} e^{-(y-\sqrt{E_c})^2/\vartheta} \left[\int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{\pi\vartheta}} e^{-y^2/\vartheta^2} dy \right]^{m-1} dy. \quad (11)$$

Для двоичного симметричного канала без памяти при использовании противоположных сигналов находим из (10) и (11):

$$\gamma = \left[1 - P_{OШ} \log \frac{1}{P_{OШ}} - (1 - P_{OШ}) \log \frac{1}{1 - P_{OШ}} \right], \quad (12)$$

где $P_{OШ} = 1 - \Phi(\gamma/\beta)$; $\Phi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^X e^{-y^2/2} dy$.

На рис. 3 приведена зависимость энергетической эффективности β от частотной эффективности γ для различных оснований T , рассчитанная по формулам (10) и (11). Анализ зависимостей (10), (11) и (12), а также рис. 3 показывают, что если скорость передачи информации задана ($R_U = const$), то желание работать с низким отношением «сигнал-шум» (помехозащищённая система связи) можно удовлетворить лишь путем уменьшения частотной и энергетической эффективности. При этом в соответствии с теоремой Шеннона о пользе кодирования качество передачи сообщения можно сделать сколь угодно хорошим.



Р и с. 3. Зависимость энергетической эффективности от частотной эффективности

Таким образом, основным показателем качества сверхширокополосного канала является отношение «сигнал-шум» на выходе корреляционного приемника. Для уменьшения отношения «сигнал-шум» на входе приемника необходимо понижать частотную и энергетическую эффективность системы связи.

Из-за отсутствия опыта внедрения сетей сверхширокополосных каналов связи в РФ данная методика позволяет специалистам самостоятельно производить расчет покрытия сетей сверхширокополосного доступа на практике, набирая тем самым опыт внедрения технологий сверхширокополосного доступа в РФ с обеспечением качества и предложением конкурентоспособных услуг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Урядников Ю.Ф., Аджемов С.С. Сверхширокополосная связь. Теория и применение. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 368 с.
2. Попов С.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Экотрендз, 2005. – 292 с.

Статья поступила в редакцию 22 мая 2009 г.

UDC 004.733

MATHEMATICAL APPROACH FOR DETERMINING THE STRUCTURES AND QUALITY ULTRABROADBAND CHANNEL COMMUNICATIONS

E.U. Bogdanov

The basic mathematical approaches used to determine the structures and quality indicators of ultrabroadband communication channels are examined.

Key words: *Quality, ultrabroadband communication, noise, channel, Wideband Code Division Multiple Access, the spectral density.*