

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМ CDMA

В настоящее время число сотовых сетей, построенных на базе стандарта CDMA и предоставляющих услуги как фиксированной, так и подвижной связи, неуклонно растёт. Обладая рядом существенных преимуществ по сравнению с системами FDMA и TDMA, технология CDMA является доминирующей для систем третьего поколения (3G). Вместе с тем, для сотовых систем CDMA характерным является влияние взаимных (внутрисистемных) помех (интерференции). Эти помехи обусловлены неидеальной ортогональностью сигналов, поступающих от одновременно работающих радиостанций, наличием взаимной корреляции между сигналами, многолучёвостью распространения сигналов и неидеальной синхронизацией. Уровень взаимных помех возрастает по мере увеличения числа одновременно работающих радиостанций, что снижает качество используемого широкополосного дуплексного (прямого и обратного) радиоканала и в конечном итоге ограничивает число активных пользователей как в прямом (от БС к АС), так и в обратном (от АС к БС) канале (ограничивает допустимое количество логических каналов CDMA на БС). Особенностью CDMA является то, что по мере увеличения числа активных пользователей постепенно увеличивается уровень помех и система постепенно приближается к моменту неприемлемого качества связи. Оценкой качества связи является вероятность отказа радиоканала, определяющая процент времени, в течение которого отношение сигнал/помеха по мощности на входе приёмников БС (прямой канал) или АС (обратный канал) меньше допустимого значения. При этом удерживается заданный уровень ошибок. Таким образом, пропускная способность базовой станции CDMA определяется пропускной способностью её каналов – прямого и обратного.

Можно показать, что пропускная способность обратного канала (число активных каналов) определяется соотношением

$$N_a = \frac{\mu (E_{инс} / B_{инф})}{\rho_0}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент, учитывающий корреляционные свойства сигналов и факторы, воздействие которых приводит либо к увеличению, либо к уменьшению числа N_a ; ρ_0 – заданное отношение сигнал/взаимная помеха по мощности на выходе приёмника; $B_{инс}/B_{инф}$ – отношение скорости передачи элементов широкополосного сигнала к скорости передачи элементов информационного сигнала, количественно равно базе сигнала.

Соотношение (1) получено в предположении, что в сотовой сети CDMA БС обеспечивает необходимое выравнивание мощности каждой из обслуживаемых АС, а уровень собственных (тепловых) шумов значительно ниже уровня взаимных помех, поэтому влиянием собственных шумов можно пренебречь.

Рассмотрим степень влияния некоторых факторов на величину N_a .

Положительный эффект обеспечивает использование режима прерывания передачи на время пауз речи, за счёт чего коэффициент использования канала α составляет величину порядка 0,3-0,4. В расчётах принимают значение α , равное 3/8. В результате этого число N_a может быть увеличено в $1/\alpha=8/3=2,5$ раза [2].

Если учесть влияние взаимных помех, создаваемых не только источниками внутри зоны обслуживания БС, но и теми, которые расположены в соседних ячейках, то это приведёт к увеличению уровня взаимных помех примерно на 1,9 дБ [2] и уменьшит число N_a в $\beta = 10^{0,1 \cdot 1,9} = 1,55$ раз.

С другой стороны использование антенны БС с секторной диаграммой направленности снижает влияние помех от источников, расположенных вне сектора диаграммы направленности антенны. В результате число N_a может быть увеличено примерно в $q = 2,5$ раза.

С учётом изложенного соотношение для определения максимального числа обслуживаемых абонентов (абонентских станций) в обратном канале принимает вид

$$N_{\text{амакс}} = \frac{q}{\alpha\beta\rho_0} \cdot \frac{B_{\text{шлс}}}{B_{\text{шлф}}} \quad (2)$$

Учитывая приведенные значения коэффициентов α , β и q , соотношение (2) принимает вид

$$N_{\text{амакс}} = \frac{4}{\rho_0} \cdot \frac{B_{\text{шлс}}}{B_{\text{шлф}}} \quad (3)$$

Так, например, если учесть, что в системе CDMA IS-95 $\rho_0 = 5$ (7 дБ), а $B_{\text{шлс}}/B_{\text{шлф}} = (1228,8 \text{ кбит/с})/(9,6 \text{ кбит/с}) = 128$, то $N_{\text{амакс}} = 102$. Фактически обратный канал в системе IS-95 может включать в себя до 94 логических каналов CDMA, из которых 62 канала трафика и 32 канала доступа [1]. Таким образом, полученный результат $N_{\text{амакс}} = 102$ совпадает с фактически организуемым общим числом каналов в этой системе.

Вместе с тем следует заметить, что точный расчёт пропускной способности системы CDMA достаточно сложен и требует учёта большого числа различных факторов.

Пропускная способность прямого канала также ограничена, поскольку на вход приёмника АС поступают сигналы не только от «рабочей» БС, но и от нескольких других БС, расположенных в соседних сотах. Все базовые станции синхронизированы между собой. Методика расчёта N_a [3] предусматривает такой вариант взаимного расположения базовых станций и абонентской станции (рис. 1), при котором влияние принимаемых сигналов от БС оказывается максимальным.

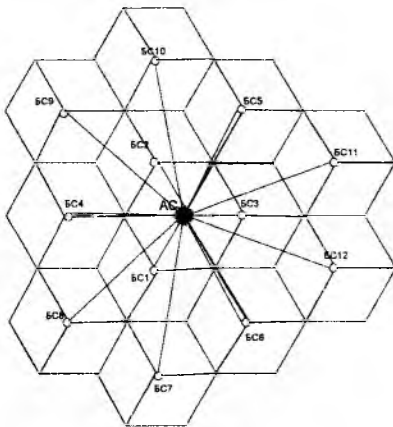


Рис. 1

Изображенная на рис. 1 АС расположена на границе зоны обслуживания и находится на одинаковом расстоянии, равном R , от трех ближайших БС. Уровни сигналов, принимаемых от этих БС, случайны и АС, производя измерения уровней этих сигналов, устанавливает связь с той БС, чей уровень сигнала оказывается наибольшим (предположим, от БС1). Помехи же на входе приемника АС возникают от двух ближайших БС (БС2 и БС3), трех БС, расположенных на расстоянии $2R$ (БС3, БС4, БС5), и шести БС (БС6...БС12), расположенных на расстоянии $\sqrt{7}R$ (где R – радиус зоны обслуживания БС) и использующих антенны с круговыми ДНА. При использовании направленных ($\phi=120^\circ$) антенн количество мешающих БС, расположенных на

расстоянии $2R$, равно шести (влияние оказывают излучения из двух секторов БС4, БС5 и БС6).

Помехи, создаваемые БС, находящимися на больших расстояниях от АС, можно не учитывать, так как в условиях городской застройки уровень сигналов от этих БС (т.е. уровень помех в данном случае) за счёт затенений достаточно мал.

При определении полной мощности сигнала, излучаемого БС, и в данном случае необходимо учитывать прерывание передачи на время пауз. С учётом коэффициента использования канала величина α составляет $3/8$. Если учесть, что на БС используется автоматическое регулирование мощности излучаемых сигналов, то полная мощность сигнала P_t , излучаемого антенной БС, определяется соотношением

$$P_t = \alpha (N_a/2) P_R, \quad (4)$$

где N_a – количество одновременно работающих АС; P_R – мощность сигнала, излучаемого БС на одну АС.

На трассе распространения сигнала от БС к АС происходит его ослабление по закону:

$$L(D_i) = (\gamma/D_i^n)10^{0,1x_i}, \quad (5)$$

где D_i – расстояние между i -ой БС и АС; γ – коэффициент, зависящий от частоты передачи, высоты антенны БС и т. д.; n – параметр затухания радиоволн. Его величина колеблется в пределах 2...5. В теоретических расчетах величину n принимают равной 4; x_i – случайная величина, моделирующая флуктуации параметра затухания.

Таким образом, мощность помехи на входе приемника АС от i -й БС, находящейся от АС на расстоянии D_i , определяется соотношением:

$$P_i = P_i L(D_i) = (\gamma P_i / D_i^n) 10^{0,1x_i}. \quad (6)$$

Суммарная мощность помех от всех мешающих БС определяется соотношением:

$$P_\Sigma = \sum_{i=2}^{12} P_i = \frac{\gamma P_i}{R^n} \left[10^{0,1x_2} + 10^{0,1x_3} + \frac{M+1}{2^{n+1}} \sum_{i=4}^6 10^{0,1x_i} + \frac{1}{\sqrt{7^n}} \sum_{i=7}^{12} 10^{0,1x_i} \right]. \quad (7)$$

Соотношение (7) справедливо как для случая применения антенн с круговыми ($\phi = 360^\circ$, $M = 1$), так и для случая использования антенн с секторными диаграммами направленности ($\phi = 120^\circ$, $M = 3$) и предполагает, что максимальный сигнал АС принимается от БС-1 (рис. 1). Поскольку ослабление сигналов, приходящих от трёх первых БС (БС-1, БС-2 и БС-3), удалённых от АС на расстояние, равное радиусу соты R , зависит от x_i ($i = 1, 2, 3$), то мощность полезного сигнала на входе АС определяется соотношением:

$$P_s = \frac{\gamma P_R}{R^n} 10^{0,1x_s}, \quad (8)$$

где $x_s = \max(x_1, x_2, x_3)$.

С учетом (7) и (8) отношение сигнал/помеха по мощности на входе приемника АС можно записать в виде:

$$\rho = \frac{P_s}{P_\Sigma} = \frac{2}{\alpha N_a} \cdot \frac{10^{0,1x_s}}{\left[10^{0,1x_2} + 10^{0,1x_3} + \frac{M+1}{2^{n+1}} \sum_{i=4}^6 10^{0,1x_i} + \frac{1}{\sqrt{7^n}} \sum_{i=7}^{12} 10^{0,1x_i} \right]}. \quad (9)$$

Если предположить, что мощности сигналов, принимаемых от БС-1, БС-2 и БС-3 примерно равны, то соотношение (9) можно записать в виде:

$$\rho = \frac{2}{\alpha N_a} \cdot \left(2 + \left[\frac{M+1}{2^{n+1}} \sum_{i=4}^6 10^{0,1x_i} + \frac{1}{\sqrt{7^n}} \sum_{i=7}^{12} 10^{0,1x_i} \right] \cdot 10^{-0,1x_s} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Обозначим: $V_1 = \exp(m_1 + z_1)$

$$V_0 = \left[\frac{M+1}{2^{n+1}} \sum_{i=4}^6 10^{0,1x_i} + \frac{1}{\sqrt{7^n}} \sum_{i=7}^{12} 10^{0,1x_i} \right] \cdot 10^{-0,1x_s} = V_1 \cdot V_2. \quad (11)$$

Приближенные методы позволяют аппроксимировать распределения V_1 и V_2 логнормальным законом, т.е.

$$V_2 = \exp(m_2 + z_2) = 10^{0,1x_s} = \exp(-\gamma x_s), \quad (12)$$

где $m_2 + z_2 = -\gamma x_s$; z_1 и z_2 – гауссовы случайные величины, имеющие нулевые средние значения и дисперсии σ_1^2 и σ_2^2 соответственно.

В [3] показано, что значения m_1 и m_2 определяются соотношениями:

$$m_1 = \ln \left[\frac{\xi_1 \exp\left(\frac{\gamma^2 \sigma^2}{2}\right)}{\sqrt{(1-\xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma^2 \sigma^2)}} \right]; \quad m_2 = \frac{3\gamma}{2\sqrt{\pi}} \sigma, \quad (13)$$

а σ_1^2 и σ_2^2 определяются соотношениями:

$$\sigma_1^2 = \ln \left[(1-\xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma^2 \sigma^2) \right]; \quad \sigma_2^2 = \left[1 - \frac{9-2\sqrt{3}}{4\pi} \right] \cdot \gamma^2 \sigma^2, \quad (14)$$

где $\xi_1 = 3(M+1) \cdot 2^{-(n+1)} + 6 \cdot 7^{-n/2}$; $\xi_2 = [3(M+1)^2 \cdot 2^{-2(n+1)} + 6 \cdot 7^{-n}] \cdot [3(M+1) \cdot 2^{-(n+1)} + 6 \cdot 7^{-n/2}]^{-2}$; $\gamma = 0,1 \ln 10 = 0,23$; σ^2 – дисперсия флуктуаций сигнала.

Распределение V_0 в (11) тоже логнормальное: $V_0 = \exp(m_0 + z_0)$, где z_0 – гауссова случайная величина со средним значением, равным нулю и дисперсией σ_0^2 . Значения m_0 и σ_0 определяются соотношениями [3]: $m_0 = (m_1 - m_2)$; $\sigma_0 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$.

Так как V_0 аппроксимировано логнормальным законом, то условие:

$$\rho \leq \frac{2}{\alpha N_a \exp(m_0 + k \sigma_0)} \quad (15)$$

выполняется в P_τ процентах времени, если P_τ и k связаны соотношением:

$$P_\tau = 100 \int_k^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \frac{dt}{\sqrt{2\pi}}.$$

Величина P_τ определяет процент времени, в течение которого отношение сигнал/помеха ρ меньше заданного уровня. В системах CDMA за счёт широкополосности обеспечивается увеличение отношения сигнал/помеха на выходе приёмника (ρ_0) по сравнению с отношением сигнал/помеха на его входе (ρ). Увеличение определяется значением базы широкополосного сигнала, т. е.:

$$\rho_0 = \rho \left(\frac{B_{\text{инс}}}{B_{\text{инф}}} \right). \quad (16)$$

Из (15) с учётом (16) запишем соотношение, определяющее допустимое число активных каналов, которые могут работать в одном секторе каждой соты, при заданном качестве приема сигналов любой АС (определяемом допустимой величиной ρ_0) и заданной ненадежности приема (определяемой значением P_τ):

$$N_a = \frac{2}{\alpha \rho_0} \cdot \frac{B_{\text{инс}}/B_{\text{инф}}}{(2 + \exp(m_0 + k \sigma_0))}. \quad (17)$$

Обычно приемлемым в CDMA считается качество приема информации, при котором вероятность приема с ошибкой одного информационного символа составляет 10^{-3} , что обеспечивается при $\rho_0 = 5$ (7 дБ)[1,2].

Максимальное число каналов (каналов трафика и служебных каналов) на БС можно определить, используя (17). Предположим, что $k = 0$ (при этом $P_\tau = 0,5$) и величина $\exp(m_0)$ существенно меньше единицы. Приведенные предположения фактически справедливы для сети CDMA (рис. 1), состоящей из трёх базовых станций (БС-1, БС-2 и БС-3). Тогда на БС системы IS-95 (для $\alpha = 3/8$; $B_{\text{инс}}/B_{\text{инф}} = 128$; $\rho_0 = 5$ (7 дБ)) рассчитанное значение числа $N_{\text{амакс}}$ составляет 64 канала. Полученное значение $N_{\text{амакс}}$ соответствует общему числу каналов в системе IS-95.

На рис. 2 приведены графики зависимости $N_a = f(P_\tau)$ с учётом использования круговых ($\phi = 360^\circ$, $M = 1$) и секторных ($\phi = 120^\circ$, $M = 3$) диаграмм направленности антенн БС для разных значений σ . Значение σ принимается равным 8 дБ для центров больших городов и 6 дБ для городов с низкой плотностью застройки.

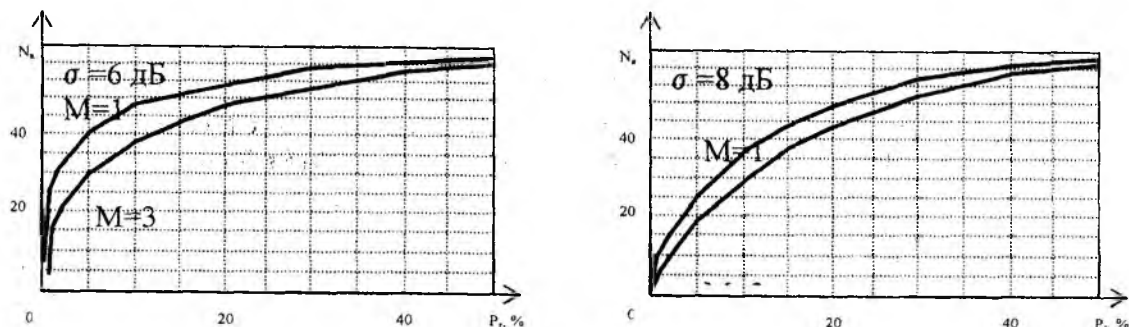


Рис. 2

Из графиков видно, что с повышением требуемой надёжности связи (с уменьшением P_r) допустимое число активных каналов снижается, причём в более сложных условиях распространения сигналов (в городах с высокой плотностью застройки) такое снижение происходит в большей мере. Например, из графиков видно, что если $P_r = 15\%$ и $\sigma = 6$ дБ, то допустимое число активных пользователей $N_a = 51$ (для $M = 1$) и $N_a = 43$ (для $M = 3$), при $\sigma = 8$ дБ значение этих величин составляют $N_a = 43$ (для $M = 1$) и $N_a = 37$ (для $M = 3$). При снижении величины P_r , например, до значения 5% , допустимое число N_a уменьшается и составляет соответственно при $\sigma = 6$ дБ $N_a = 40$ (для $M = 1$) и $N_a = 25$ (для $M = 3$), при $\sigma = 8$ дБ $N_a = 36$ (для $M = 1$) и $N_a = 18$ (для $M = 3$). Из общего числа каналов количество каналов трафика для действующих систем CDMA составляет порядка 80% , а остальные 20% каналов используются в качестве служебных.

Из соотношения (17) следует, что при увеличении базы сигнала (в первую очередь за счёт расширения спектра широкополосного сигнала и соответствующего увеличения скорости передачи элементов широкополосного сигнала) пропорционально увеличивается количество одновременно обслуживаемых абонентов.

Следует заметить, что в сотовых системах CDMA 3-го поколения (3G) возможно увеличение полосы частот до 5 МГц (в 4 раза), что обеспечивает требуемые скорости передачи (3 Мчип/с и более) и отвечает требованиям конкуренции [2, 5].

Выводы

1. Пропускная способность БС существенно зависит от требований, предъявляемых к качеству связи. С повышением этих требований пропускная способность снижается и тем в большей степени, чем больше усложняются условия распространения сигнала.

2. Допустимое число активных каналов (пользователей) в обратном канале увеличивается при замене антенны с круговой диаграммой направленности (ДНА) на антенну с секторной ДНА. Указанное увеличение числа каналов обусловлено уменьшением уровня взаимных помех от абонентских станций, работающих как в зоне обслуживания «своей», так и в ячейках других БС. В противоположность этому в прямом канале указанная замена антенн приводит к уменьшению допустимого числа каналов из-за увеличения уровня взаимных помех.

3. Пропускную способность БС системы CDMA можно повысить увеличением базы сигнала в первую очередь за счёт увеличения используемой полосы частот, а также использования способов, понижающих требуемое отношение сигнал/взаимная помеха, что приведёт соответственно к снижению скорости передачи.

Список литературы: 1. Столлинг В. Беспроводные линии связи и сети. М.: «Вильямс», 2003. 640 с. 2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: «Вильямс», 2003. 1104 с. 3. Быховский М.А. Исследование эффективности сотовых систем сухопутной подвижной связи с кодовым разделением каналов. // Электросвязь. 1995. №8. С. 29 – 33. 4. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной связи. М.: Эко-Трендз, 1997. 238 с. 5. Невдяев Л.М. Мобильная связь 3-го поколения. М.: МЦНТИ ООО «Мобильные телекоммукации». 208с. (Связь и бизнес).

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редакцию 02.04.2004