

УДК 621.396.41
EDN: ZVYCEM

Уравнение сбалансированного дуплекса и бюджеты нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи на его основе

Мелихов С. В.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, 634034, Российская Федерация

Цель работы: вывод уравнения сбалансированного дуплекса и разработка методики расчета бюджетов нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи GSM-2G. **Методы исследования:** схемотехнический анализ условий дуплексной радиосвязи для типовых структур нисходящего и восходящего каналов соты. **Новизна:** по предложенной методике максимальная дальность радиосвязи в соте системы GSM-2G из-за ограниченной мощности абонентской станции рассчитывается на основе параметров восходящего канала, а необходимая мощность передатчика базовой станции определяется с использованием уравнения сбалансированного дуплекса на основе параметров приемо-передающей аппаратуры базовой и абонентской станций, а также характеристик нисходящего и восходящего радиоканалов. **Результат:** получено новое уравнение сбалансированного дуплекса и предложена методика расчета бюджетов нисходящего и восходящего каналов сотовой системы GSM-2G. **Практическая / Теоретическая значимость:** результаты работы могут быть полезны для разработчиков приемо-передающей аппаратуры различных радиосистем.

Ключевые слова: мобильная связь, базовая станция, абонентская станция, нисходящий канал, восходящий канал, сбалансированный дуплекс, мощность, передатчик, затухание радиоволн, радиоприемник, радиотракт, полосовой фильтр, мал шумящий усилитель, фидер, усилитель-селектор, коэффициент шума, реальная чувствительность радиоприемника

Введение

В работе [1] для вывода уравнения сбалансированного дуплекса в соте мобильной связи GSM-2G использованы структурные схемы приемо-передающей аппаратуры (ППА) базовой станции (БС) и абонентской станции (АС) системы GSM, изображенные на рисунке 1, где П — передатчик; УС — усилитель-селектор; К — комбайнер; Ф — фидер; МШУ — мал шумящий усилитель; ПФ — полосовой фильтр; А_п — передающая антенна; А_{пр} — приемная антенна.

Структурные схемы ППА БС и АС имеют ряд особенностей. В составе ППА БС используется комбайнер — блок объединения — распределения радиосигналов, позволяющий нескольким передатчикам работать с одной передающей антенной и нескольким приемникам — с одной приемной антенной. Для улучшения чувствительности приемного тракта БС используется антенный МШУ с ПФ на входе. ПФ необходим для защиты МШУ от внеполосных мешающих радиосигналов.

Структурная схема ППА АС содержит два фидера и две антенны, что необходимо для вывода уравнения сбалансированного дуплекса. На практике в малогабаритных переносных АС нет необходимости

Библиографическая ссылка на статью:

Мелихов С. В. Уравнение сбалансированного дуплекса и бюджеты нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи на его основе // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 2. С. 1. EDN: ZVYCEM

Reference for citation:

Melikhov S. Balanced Duplex Equation and Budgets of Downlink and Uplink Channels in a Cell of a Mobile Communication System Based on It // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 2. P. 1. EDN: ZVYCEM

в фидерах, и используется одна приемо-передающая антенна. УС приемных трактов БС и АС выполняют функции основного усиления и селекции радиосигнала.

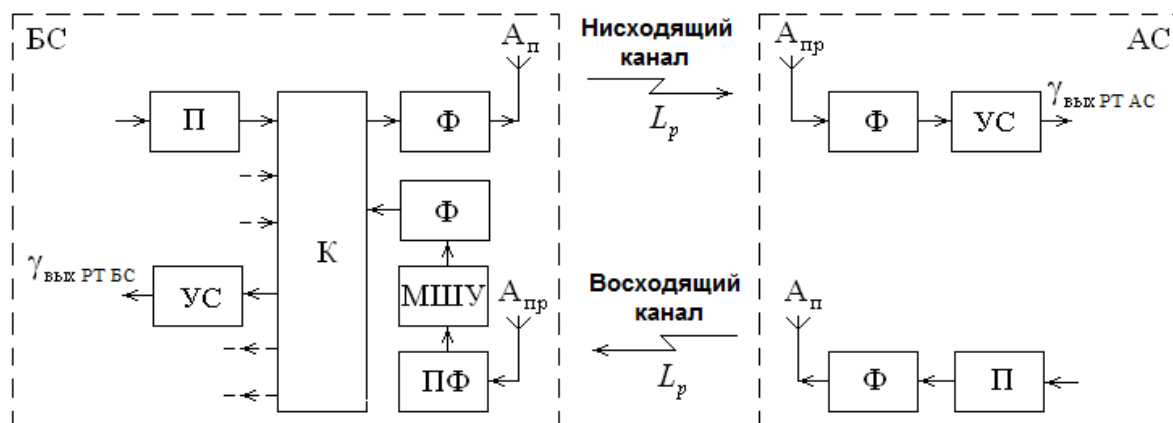


Рис. 1. Структурные схемы ППА БС и АС

Полученное в работе [1] уравнение сбалансированной дуплексной радиосвязи между БС и АС в соте мобильной системы имеет вид:

$$\frac{P_{\text{БС}} G_{\text{п_БС}} G_{\text{пр_АС}} \eta_{\text{п_Ф_АС}}}{P_{\text{АС}} G_{\text{п_АС}} G_{\text{пр_БС}} \eta_{\text{п_БС}}} = \frac{(N_{\text{внеш_АС}} - 2) + \eta_{\text{пр_Ф_АС}} N_{\text{УС_АС}}}{(N_{\text{внеш_БС}} - 2) + \eta_{\text{п_Ф}} [N_{\text{МШУ}} + (\eta_{\text{пр_БС}} N_{\text{УС_БС}} - 1) / k_{\text{МШУ}}]}, \quad (1)$$

где $P_{\text{БС}}$ — мощность передатчика БС; $P_{\text{АС}}$ — мощность передатчика АС; $G_{\text{п_БС}}$, $G_{\text{пр_БС}}$ — коэффициенты усиления антенны БС в режимах передачи и приема соответственно; $G_{\text{п_АС}}$, $G_{\text{пр_АС}}$ — коэффициенты усиления антенны АС в режимах передачи и приема соответственно; $\eta_{\text{п_БС}} = \eta_{\text{п_Ф_БС}} \eta_{\text{п_К_БС}}$ — потери мощности радиосигнала в фидере ($\eta_{\text{п_Ф_БС}}$) и в комбайнере ($\eta_{\text{п_К_БС}}$) БС в режиме передачи; $\eta_{\text{пр_БС}} = \eta_{\text{пр_Ф_БС}} \eta_{\text{пр_К_БС}}$ — потери мощности радиосигнала в фидере ($\eta_{\text{пр_Ф_БС}}$) и комбайнере ($\eta_{\text{пр_К_БС}}$) БС в режиме приема; $\eta_{\text{п_Ф_АС}}$, $\eta_{\text{пр_Ф_АС}}$ — потери в фидере АС в режимах передачи и приема соответственно; $\eta_{\text{п_Ф}}$ — потери полосового фильтра; $N_{\text{УС_АС}}$, $N_{\text{УС_БС}}$ — коэффициенты шума УС приемников АС и БС соответственно; $N_{\text{МШУ}}$, $k_{\text{МШУ}}$ — коэффициент шума и коэффициент усиления по мощности МШУ; $N_{\text{внеш_АС}}$, $N_{\text{внеш_БС}}$ — результирующие коэффициенты внешнего шума для приемников АС и БС соответственно.

Термин «сбалансированная дуплексная радиосвязь», используемый в работе [1], характеризует одинаковое качество радиосвязи в нисходящем и восходящем каналах:

$$\gamma_{\text{вых_РТ_АС}} = \gamma_{\text{вых_РТ_БС}},$$

где $\gamma_{\text{вых_РТ_АС}}$, $\gamma_{\text{вых_РТ_БС}}$ — отношения средней мощности сигнала к средней мощности шума на выходах радиотрактов (РТ) приемников АС и БС соответственно (см. рисунок 1) при максимальном удалении АС от БС (т. е. при нахождении АС на границе соты).

Однако при выводе уравнения (1) в [1] использованы выражения для реальной чувствительности приемников АС и БС, имеющие систематическую ошибку, значения которой, как показано в работе [2], лежат в пределах от 2 до 5 дБ при значениях результирующего коэффициента внешнего шума от 0 до 40 дБ. Кроме этого, дуплексная радиосвязь возможна и при условии, что $\gamma_{\text{вых_РТ_АС}} \neq \gamma_{\text{вых_РТ_БС}}$. Целесообразно поэтому вывести новое уравнение сбалансированной дуплексной радиосвязи в соте системы GSM-2G на основе новых выражений для реальной чувствительности приемников АС и БС, полученных в [2], а также с учетом возможного отличия значений $\gamma_{\text{вых_РТ_АС}}$ и $\gamma_{\text{вых_РТ_БС}}$.

Вывод нового уравнения сбалансированной дуплексной радиосвязи в соте мобильной системы GSM-2G

Для структурных схем ППА (см. рисунок 1), характеризующих дуплексную радиосвязь в соте системы GSM-2G между БС и АС, справедливы следующие выражения с учетом формул для реальной чувствительности приемного тракта АС ($P_{с_вх_0_АС}$) и реальной чувствительности приемного тракта БС ($P_{с_вх_0_БС}$), полученных в [2]:

$$P_{с_вх_АС} = \frac{P_{БС} G_{п_БС} G_{пр_АС}}{\eta_{п_БС} L_{p_БА}} = P_{с_вх_0_АС} = \gamma_{вых_РТ_АС} P_{ш_0_АС} N_{внеш_АС} \eta_{пр_Ф_АС} N_{УС_АС}, \quad (2)$$

$$P_{с_вх_БС} = \frac{P_{АС} G_{п_АС} G_{пр_БС}}{\eta_{п_Ф_АС} L_{p_АБ}} =$$

$$= P_{с_вх_0_БС} = \gamma_{вых_РТ_БС} P_{ш_0_БС} N_{внеш_БС} \eta_{п_Ф} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}], \quad (3)$$

где $P_{с_вх_АС}$ — мощность сигнала на входе АС от БС; $P_{с_вх_БС}$ — мощность сигнала на входе БС от АС; $P_{БС}$ — мощность передатчика БС; $P_{АС}$ — мощность передатчика АС; $L_{p_БА}$, $L_{p_АБ}$ — затухания радиоволн в нисходящем и восходящем каналах соответственно; $P_{ш_0_АС} = k T_0 B_{ш_АС} = N_0 B_{ш_АС}$ — номинальная мощность теплового шума в шумовой полосе АС $B_{ш_АС} \approx B_{RF_АС}$; $B_{RF_АС}$ — полоса пропускания приемника АС для сигнала с радиочастотой (Radio Frequency); $N_0 = k T_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц — спектральная плотность мощности аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) в полосе 1 Гц; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $T_0 = 290$ К (при 17 °C); $P_{ш_0_БС} = k T_0 B_{ш_БС} = N_0 B_{ш_БС}$ — номинальная мощность теплового шума в шумовой полосе приемника БС $B_{ш_БС} \approx B_{RF_БС}$; $B_{RF_БС}$ — полоса пропускания приемника БС для сигнала с радиочастотой.

Поделив выражение (2) на (3), получим:

$$\frac{P_{БС} G_{п_БС} G_{пр_АС} \eta_{п_Ф_АС}}{P_{АС} G_{п_АС} G_{пр_БС} \eta_{п_БС} L_{p_БА}} = \frac{\gamma_{вых_РТ_АС} B_{RF_АС} N_{внеш_АС} \eta_{пр_Ф_АС} N_{УС_АС}}{\gamma_{вых_РТ_БС} B_{RF_БС} N_{внеш_БС} \eta_{п_Ф} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}]} \quad (4)$$

Выражение (4) связывает (балансирует) параметры ППА и характеристики нисходящего и восходящего радиоканалов ($L_{p_АБ}$, $L_{p_БА}$, $N_{внеш_АС}$, $N_{внеш_БС}$) при дуплексной радиосвязи для структурных схем БС и АС, изображенных на рисунке 1, поэтому целесообразно называть его «уравнением сбалансированного дуплекса». Уравнение (4), в отличие от (1), устанавливает связь между основными параметрами ППА БС и АС без систематической ошибки, а также позволяет учесть возможные различия в характеристиках нисходящего и восходящего радиоканалов (различия между $L_{p_АБ}$ и $L_{p_БА}$, а также между $N_{внеш_АС}$ и $N_{внеш_БС}$). Следует также заметить, что уравнение (4) может быть решено относительно любого параметра ППА БС и АС.

Методика расчета бюджетов нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи GSM-2G с использованием уравнения сбалансированного дуплекса

Для минимизации вредного влияния высокочастотного излучения на организм человека мощность передатчика АС жестко ограничивается. Например, для системы GSM-2G-900 максимальная мощность передатчика носимой АС $P_{АС_макс} = 1$ Вт [4]. В связи с этим в работе [1] предложено максимальную дальность радиосвязи в соте, т. е. радиус круговой зоны обслуживания БС r (км), рассчитывать с использованием моделей Окамура — Хата [5] для «квазигладких местностей» различного типа («большой город», «малый город», «пригород», «сельская местность», «открытая местность») по формуле:

$$r = 10^{(L_{p_доп} - A)/B} \quad (5)$$

на основе допустимого ослабления мощности радиоволны в восходящем канале:

$$L_{p_доп} = \frac{P_{AC_макс} G_{п_AC} G_{пр_BC}}{\eta_{п_Ф_AC} P_{с_вх_0_BC}}, \quad (6)$$

где $P_{с_вх_0_BC}$ – реальная чувствительность приемника БС.

В частности, для «сельской местности» (характеризующейся наличием открытых участков длиной не менее 300 м, чередующихся с 1–2-этажными домами) по модели Окамура – Хата затухание радиоволны (дБ):

$$L_p = \{32,81 - 13,82 \lg(h_{BC}) + 46,05 \lg(f) - 4,78 [\lg(f)]^2 - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{MC}\} + \{44,9 - 6,55 \lg(h_{BC})\} \lg(r) = A + B \lg(r), \quad (7)$$

где h_{BC} , h_{AC} – высоты антенн БС и АС (м); f – несущая радиочастоты (МГц).

В предположении того, что $L_p = L_{p_доп}$, из (7) для (5) следует:

$$A = \{32,81 - 13,82 \lg(h_{BC}) + 46,05 \lg(f) - 4,78 [\lg(f)]^2 - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{AC}\}, \quad (8)$$

$$B = \{44,9 - 6,55 \lg(h_{BC})\}. \quad (9)$$

Нужно отметить, что мощность излучения БС также ограничивается, однако не так жестко, как АС, и может превосходить ее [6].

Если радиус соты определен на основе допустимого ослабления мощности радиоволны в восходящем канале с использованием выражений (5, 6, 8, 9), то для обеспечения сбалансированного дуплекса на границе соты достаточно рассчитать на основе уравнения (4) необходимую мощность передатчика БС ($\hat{P}_{BC}$) при определенных параметрах ППА БС и АС и характеристиках нисходящего и восходящего радиоканалов. Рассчитанное значение $\hat{P}_{BC}$ определит сбалансированные бюджеты нисходящего и восходящего каналов.

Несущие частоты радиосвязи нисходящего и восходящего каналов в соте системы GSM-2G различны. При этом затухания радиоволн в нисходящем и восходящем каналах несколько отличаются. Поскольку относительное различие несущих частот незначительно $(f_{восх} - f_{нисх})/f_{восх} \approx 0,05$ [3], в силу принципа взаимности можно предположить, что $L_{p_БА} = L_{p_АБ}$. Считая также, что в нисходящем и восходящем каналах системы GSM-2G одинаковы качество радиоприема ($\gamma_{вых_PT_AC} = \gamma_{вых_PT_BC}$), полосы пропускания приемников АС и БС ($B_{RF_AC} = B_{RF_BC}$) и результирующие коэффициенты внешнего шума ($N_{внеш_AC} = N_{внеш_BC}$), из (4) получим выражение для расчета необходимой мощности передатчика БС:

$$\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс} \left\{ \frac{G_{п_AC} G_{пр_BC} \eta_{п_BC} \eta_{пр_AC} N_{УС_AC}}{G_{п_BC} G_{пр_AC} \eta_{п_AC} \eta_{Ф} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_BC} N_{УС_BC} - 1)/k_{МШУ}]} \right\}. \quad (10)$$

На основе выражения (10) можно утверждать, что:

- при $P_{BC} > \hat{P}_{BC}$ дальность радиосвязи нисходящего канала будет больше, чем дальность радиосвязи восходящего канала;
- при $P_{BC} < \hat{P}_{BC}$ дальность радиосвязи нисходящего канала будет меньше, чем возможная дальность радиосвязи восходящего канала.

Учитывая изложенное, предлагается следующая методика расчета сбалансированных бюджетов нисходящего и восходящего каналов, а также максимально возможного радиуса зоны обслуживания БС (радиуса соты) системы мобильной связи при известных параметрах приемо-передающих трактов ($G_{п_BC}$, $G_{пр_BC}$, $G_{п_AC}$, $G_{пр_AC}$, $\eta_{п_Ф_BC}$, $\eta_{пр_Ф_BC}$, $\eta_{п_К_BC}$, $\eta_{пр_К_BC}$, $\eta_{п_Ф_AC}$, $\eta_{пр_Ф_AC}$, B_{RF} , $N_{внеш_BC}$, $N_{внеш_AC}$, $N_{УС_BC}$, $N_{УС_AC}$).

Шаг 1. По формулам (2) и (3) рассчитываются реальные чувствительности приемных трактов АС и БС: $P_{с_вх_0_AC}$; $P_{с_вх_0_BC}$.

Шаг 2. По формуле (6), исходя из ограниченной мощности АС $P_{AC_макс}$ и реальной чувствительности БС $P_{с_вх_0_BC}$, определяется допустимое ослабление мощности радиоволны в восходящем канале $L_{p_доп}$.

Шаг 3. По формуле (10) при ограниченной мощности АС ($P_{AC_макс}$) рассчитывается необходимая мощность передатчика БС ($\hat{P}_{BC}$) для сбалансированного дуплекса на границе соты.

Шаг 4. На основе значения необходимой мощности полезного радиосигнала на выходе РТ и значения чувствительности приемного тракта рассчитываются коэффициенты усиления УС АС и БС.

Шаг 5. С использованием рассчитанных данных строятся диаграммы сбалансированных бюджетов нисходящего и восходящего радиоканалов на границе соты.

Шаг 6. Рассчитывается максимально возможный радиус зоны обслуживания БС (радиус соты) по формуле (5), для которой коэффициенты A и B определяются моделью Окамура – Хата для «квазигладких местностей» различного типа («большой город», «малый город», «пригород», «сельская местность», «открытая местность»).

Ниже продемонстрировано применение разработанной методики для расчета сбалансированных бюджетов нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи GSM-900.

Сбалансированные бюджеты нисходящего и восходящего каналов на границе соты при отсутствии антенного МШУ в приемном тракте БС системы GSM-2G-900

Если на БС антенный МШУ с ПФ не используется, то из (10) при $\eta_{ПФ} = 1$, $k_{МШУ} = 1$, $N_{МШУ} = 1$ для сбалансированного дуплекса на границе соты необходимая мощность передатчика БС рассчитывается следующим образом:

$$\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс} \left(\frac{G_{п_AC} G_{пр_BC} \eta_{п_BC} \eta_{пр_AC} N_{УС_AC}}{G_{п_BC} G_{пр_AC} \eta_{п_AC} \eta_{пр_BC} N_{УС_BC}} \right).$$

Если для упрощения расчетов предположить, что $G_{п_BC} = G_{пр_BC}$, $G_{п_AC} = G_{пр_AC}$, $\eta_{п_BC} = \eta_{пр_BC}$, а $\eta_{пр_AC} = \eta_{п_AC} = 1$ (что соответствует отсутствию фидера в малогабаритных переносных АС), то:

$$\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс} (N_{УС_AC} / N_{УС_BC}). \quad (11)$$

При принятых упрощениях из (11) следует, что в случае отсутствия на БС антенного МШУ необходимая мощность передатчика БС должна быть больше (или меньше) максимальной мощности передатчика АС в $(N_{УС_AC} / N_{УС_BC})$ раз.

Если в приемниках АС и БС используются УС с одинаковым коэффициентом шума ($N_{УС_AC} = N_{УС_BC}$), то $\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс}$.

На рисунке 2 представлены бюджеты нисходящего и восходящего каналов в соте для «сельской местности» при отсутствии в приемном тракте БС антенного МШУ с учетом следующих типовых значений параметров РТ соты системы GSM-2G-900:

$$G_{п_BC} = G_{пр_BC} = 4 = 6 \text{ дБ}; G_{п_AC} = G_{пр_AC} = 1 = 0 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_Ф_BC} = \eta_{пр_Ф_BC} = 1,58 = 2 \text{ дБ}; \eta_{п_К_BC} = \eta_{пр_К_BC} = 4 = 6 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_BC} = \eta_{пр_BC} = 1,58 \cdot 4 = 6,32 = 8 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_Ф_AC} = \eta_{пр_Ф_AC} = 1 = 0 \text{ дБ}; B_{ш_BC} = B_{ш_AC} \approx B_{RF} = 200 \text{ кГц};$$

$$N_{внеш_BC} = N_{внеш_AC} = 2 = 3 \text{ дБ (шум атмосферы Земли)};$$

$$N_{УС_BC} = N_{УС_AC} = 2 = 3 \text{ дБ};$$

$$\gamma_{вых_РТ_BC} = \gamma_{вых_РТ_AC} = (E_b / N_0) [2 n / (1 + \alpha)] = 10,3 \cdot [2 \cdot 2 / (1 + 0,3)] \approx 31,7 \approx 15 \text{ дБ},$$

где E_b – энергия сигнала на 1 бит; $n = 2$ – число битов в символе GMSK-радиосигнала; $\alpha = 0,3$ – коэффициент спада АЧХ (Roll-off-Factor) каналов обработки БС–АС и АС–БС; $(E_b/N_0) = 10,2$ дБ $\approx 10,3$ при вероятности ошибочных битов $P_b = 10^{-3}$ [7];

$$P_{с_вх_0_АС} = \gamma_{вх_РТ_АС} P_{ш_0_АС} N_{внеш_АС} \eta_{пр_Ф_АС} N_{УС_АС} =$$

$$= 31,7 \cdot 4 \cdot 10^{-21} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 1,01 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} \approx -130 \text{ дБВт};$$

$$P_{вх_РТ} = U_{вх_РТ}^2 / R_H = (1 \text{ В})^2 / (50 \text{ Ом}) = 0,02 \text{ Вт} \approx -17 \text{ дБВт},$$

где $U_{вх_РТ}$ – выходное напряжение РТ; R_H – сопротивление нагрузки РТ;

$$k_{УС_АС} = P_{вх_РТ} - P_{с_вх_0_АС} = -17 \text{ дБВт} - (-130 \text{ дБВт}) = 113 \text{ дБ};$$

$$P_{с_вх_0_БС} = \gamma_{вх_РТ_БС} P_{ш_0_БС} N_{внеш_БС} \eta_{пр_БС} N_{УС_БС} =$$

$$= 31,7 \cdot 4 \cdot 10^{-21} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 6,32 \cdot 2 = 6,34 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} \approx -122 \text{ дБВт};$$

$$k_{УС_БС} = P_{вх_РТ} - P_{с_вх_0_БС} + \eta_{Ф_БС} + \eta_{К_БС} =$$

$$= -17 \text{ дБВт} - (-122 \text{ дБВт}) + 2 \text{ дБ} + 6 \text{ дБ} = 113 \text{ дБ};$$

$$L_{p_доп} = \frac{P_{АС_макс} G_{П_АС} G_{пр_БС}}{\eta_{П_Ф_АС} P_{с_вх_0_БС}} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 4}{1 \cdot 6,34 \cdot 10^{-13}} = 6,3 \cdot 10^{12} = 128 \text{ дБ};$$

$$\hat{P}_{БС} = P_{АС_макс} (N_{УС_АС} / N_{УС_БС}) = 1 \cdot (2/2) = 1 \text{ Вт} = 0 \text{ дБВт}. \quad (12)$$

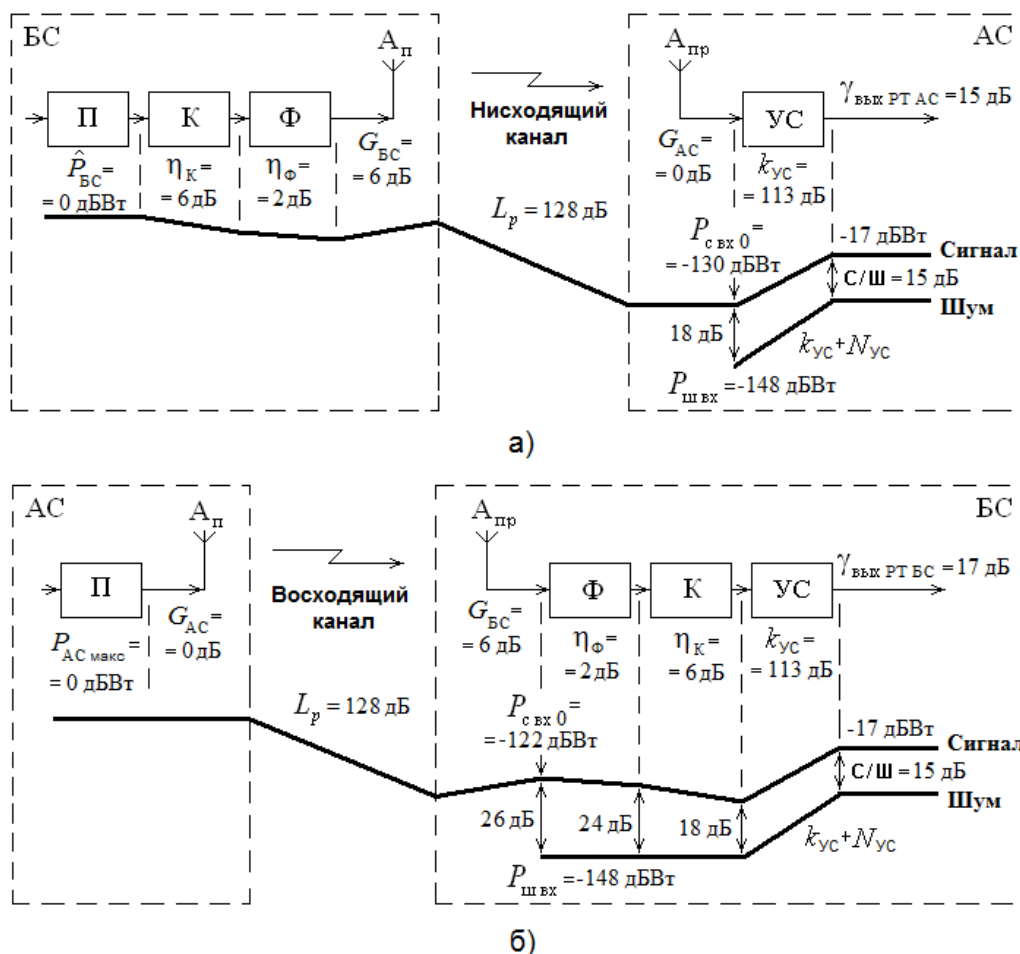


Рис. 2. Диаграммы сбалансированных бюджетов нисходящего (а) и восходящего (б) радиоканалов на границе соты системы GSM-2G-900 для «сельской местности» при отсутствии в приемном тракте БС антенного МШУ

Если $h_{BC} = 30$ м, $h_{AC} = 1,5$ м, $f = 900$ МГц, то с использованием выражений (8 и 9):

$$A = \{32,81 - 13,82 \lg(30) + 46,05 \lg(900) - 4,78 [\lg(900)]^2 - [1,1 \lg(900) - 0,7] \cdot 1,5\} = 102,9;$$

$$B = \{44,9 - 6,55 \lg(30)\} = 35,22.$$

На основе формулы (5) радиус соты в «сельской местности» без использования антенного МШУ в приемном тракте БС составит:

$$r = 10^{(L_{p_доп} - A)/B} = 10^{(128 - 102,9)/35,22} \approx 5,2 \text{ км.}$$

Сбалансированные бюджеты нисходящего и восходящего каналов на границе соты при использовании антенного МШУ в приемном тракте БС системы GSM-2G-900

При использовании на БС МШУ с ПФ на входе и в предположении того, что $G_{п_БС} = G_{пр_БС}$, $G_{п_МС} = G_{пр_МС}$, $\eta_{п_БС} = \eta_{пр_БС}$, $\eta_{пр_АС} = \eta_{п_АС} = 1$, из (10) следует:

$$\hat{P}_{BC} = P_{МС_макс} \left\{ \frac{\eta_{п_БС} N_{УС_АС}}{\eta_{ПФ} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}]} \right\}. \quad (13)$$

При принятых упрощениях выражение (13) показывает, что в случае использования на БС антенного МШУ требуемая мощность передатчика БС должна быть больше максимальной мощности передатчика АС приблизительно в $\left\{ \frac{\eta_{п_БС} N_{УС_АС}}{\eta_{ПФ} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}]} \right\}$ раз.

На рисунке 3 представлены бюджеты нисходящего и восходящего каналов в соте для «сельской местности» при использовании в приемном тракте БС антенного МШУ с ПФ на входе с учетом следующих типовых значений параметров РТ соты системы GSM-900:

$$G_{п_БС} = G_{пр_БС} = 4 = 6 \text{ дБ}; G_{п_АС} = G_{пр_АС} = 1 = 0 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_Ф_БС} = \eta_{пр_Ф_БС} = 1,58 = 2 \text{ дБ}; \eta_{п_К_БС} = \eta_{пр_К_БС} = 4 = 6 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_БС} = \eta_{пр_БС} = 1,58 \cdot 4 = 6,32 = 8 \text{ дБ};$$

$$\eta_{ПФ} = 1,26 = 1 \text{ дБ}; k_{МШУ} = 100 = 20 \text{ дБ}; N_{МШУ} = 1,26 = 1 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_Ф_АС} = \eta_{пр_Ф_АС} = 1 = 0 \text{ дБ}; B_{ш_БС} = B_{ш_АС} \approx B_{RF} = 200 \text{ кГц};$$

$$N_{внеш_БС} = N_{внеш_АС} = 2 = 3 \text{ дБ}; N_{УС_БС} = N_{УС_АС} = 2 = 3 \text{ дБ};$$

$$P_{АС_макс} = 1 \text{ Вт} = 0 \text{ дБВт};$$

$$P_{с_вх_0_АС} = \gamma_{вых_РТ_АС} P_{ш_0_АС} N_{внеш_АС} \eta_{пр_Ф_АС} N_{УС_АС} = 31,7 \cdot 4 \cdot 10^{-21} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 1 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} = -130 \text{ дБВт};$$

$$k_{УС_АС} = P_{вых_РТ} - P_{с_вх_0_АС} = -17 \text{ дБВт} - (-130 \text{ дБВт}) = 113 \text{ дБ};$$

$$P_{с_вх_0_БС} = \gamma_{вых_РТ_БС} P_{ш_0_БС} N_{внеш_БС} \eta_{ПФ} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}] = 31,7 \cdot 4 \cdot 10^{-21} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 1,26 \cdot \left[1,26 + \frac{(6,32 \cdot 2 - 1)}{100} \right] = 8,81 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} = -130,6 \text{ дБВт};$$

$$k_{УС_БС} = P_{вых_РТ} - P_{с_вх_0_АС} + \eta_{ПФ} + k_{МШУ} + \eta_{Ф_БС} + \eta_{К_БС} = -17 \text{ дБВт} - (-130,6 \text{ дБВт}) + 1 \text{ дБ} - 20 \text{ дБ} + 2 \text{ дБ} + 6 \text{ дБ} = 102,6 \text{ дБ};$$

$$L_{p_доп} = \frac{P_{AC_макс} G_{п_AC} G_{пр_BC}}{\eta_{п_Ф_AC} P_{с_вх_0_BC}} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 4}{1 \cdot 8,81 \cdot 10^{-14}} = 4,54 \cdot 10^{13} = 136,6 \text{ дБ};$$

$$\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс} \left\{ \frac{\eta_{п_BC} N_{уc_AC}}{\eta_{п_Ф} \left[N_{мшu} + \frac{(\eta_{пр_BC} N_{уc_BC} - 1)}{k_{мшu}} \right]} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{6,32 \cdot 2}{1,26 \cdot \left[1,26 + \frac{(6,32 \cdot 2 - 1)}{100} \right]} \right\} = 7,29 \text{ Вт} = 8,6 \text{ дБВт}. \quad (14)$$

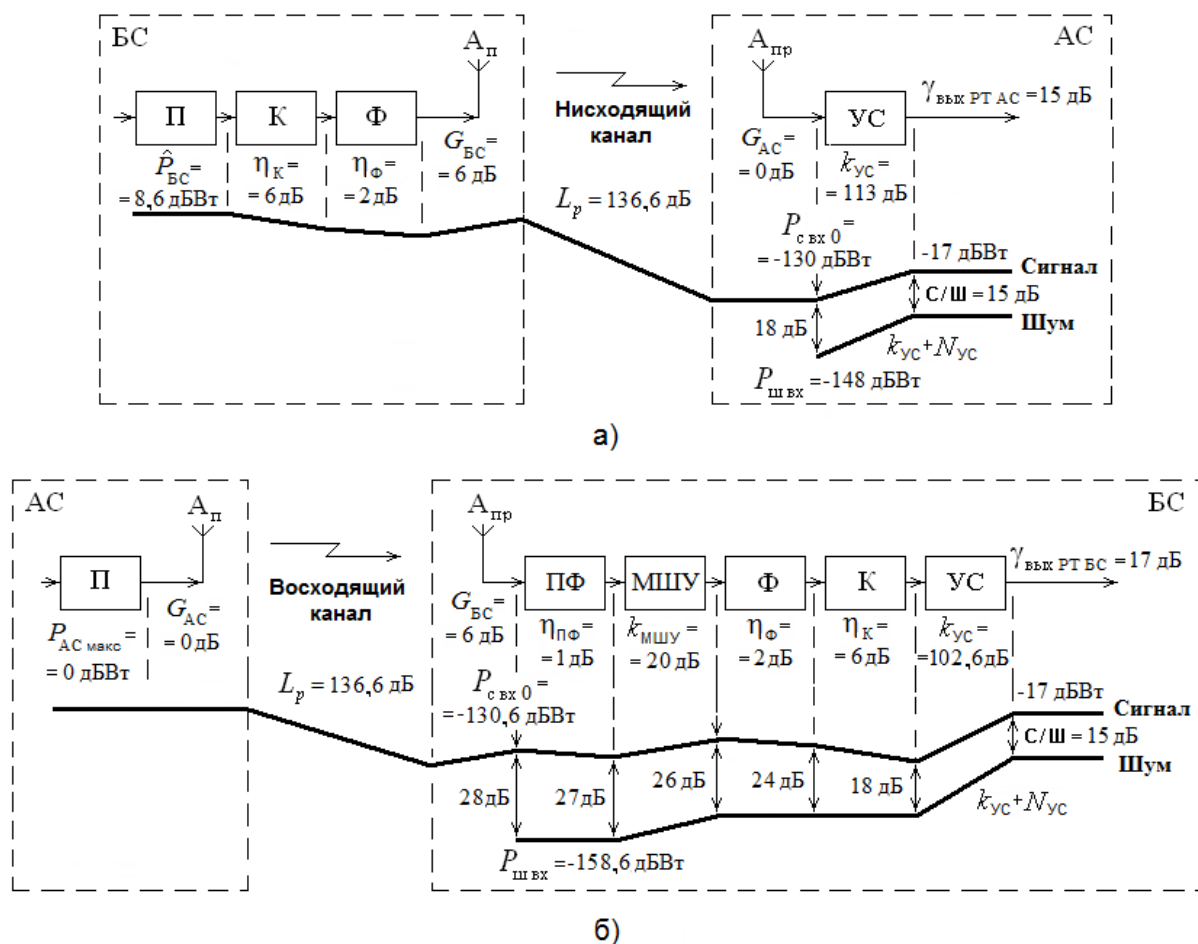


Рис. 3. Диаграммы сбалансированных бюджетов нисходящего (а) и восходящего (б) радиоканалов на границе соты системы GSM-2G-900 для «сельской местности» при наличии в приемном тракте БС антенного МШУ

В этом случае радиус соты БС в «сельской местности» составит:

$$r = 10^{(L_{p_доп} - A)/B} = 10^{(136,6 - 102,9)/35,22} \approx 9,05 \text{ км}.$$

Проведенные расчеты показали, что использование антенного МШУ на БС, обслуживающей «квазигладкую сельскую местность», увеличивает максимальную дальность с 5,2 км до 9,1 км и приводит к увеличению необходимой мощности передатчика БС с 0 до 8,6 дБВт (см. выражения (12, 14), рисунки 2а, 3а).

Выводы

Во-первых, дуплексная радиосвязь в соте системы мобильной связи GSM-2G описывается «уравнением сбалансированного дуплекса» (4), связывающим технические параметры ППА и характеристики нисходящего и восходящего радиоканалов.

Во-вторых, максимальную дальность сбалансированного дуплекса в соте из-за ограниченной мощности АС необходимо рассчитывать с использованием параметров восходящего канала, используя выражение (4) для расчета необходимой мощности передатчика БС.

В-третьих, использование уравнения (4) для расчета необходимой мощности передатчика БС, соответствующей максимальной дальности сбалансированного дуплекса в соте, позволяет реализовать сбалансированные бюджеты нисходящего и восходящего каналов.

В заключение целесообразно отметить, что полученное «уравнение сбалансированного дуплекса» при соответствующих предпосылках может быть использовано и для других поколений сотовой связи.

Литература

1. Мелихов С. В. Уравнение дуплексной радиосвязи сотовой системы // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 1 (35). С. 37–41. EDN: TVUDXN
2. Мелихов С. В. Оценка чувствительности радиоприемника с использованием коэффициентов внешних и внутренних шумов // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 3. С. 5. EDN: IHBCRE
3. Бабков В. Ю., Цикин И. А. Сотовые системы мобильной связи. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 432 с.
4. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной связи. М.: Международный центр научной и технической информации, 1996. 240 с.
5. Милютин Е. Р., Василенко Г. О., Сиверс М. А., Волков А. Н., Певцов Н. В. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона / под ред. Е. Р. Милютина. СПб.: Триада, 2003. 159 с. EDN: QMNNJL
6. Мордачев В. И., Свистунов А. С. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2013. № 7 (77). С. 44–50. EDN: YZBKOP
7. Мелихов С. В., Кологривов В. А. Взаимосвязь качественных характеристик для различных видов цифровой манипуляции // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2006. № 6 (14). С. 68–76. EDN: KUBZQH

Статья поступила 18 апреля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 06 мая 2025 г.
Принята к публикации 12 мая 2025 г.

Информация об авторе

Мелихов Сергей Всеволодович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.
E-mail: mrc@main.tusur.ru

Balanced Duplex Equation and Budgets of Downlink and Uplink Channels in a Cell of a Mobile Communication System Based on It

S. Melikhov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Tomsk, 634034, Russian Federation

The purpose: derivation of the balanced duplex equation and development of the calculation method of the downlink and uplink channel budgets in the cell of the GSM-2G mobile communication system. **Research methods:** circuit analysis of the duplex radio communication conditions for typical structures of the downlink and uplink channels of the cell. **The novelty:** according to the proposed method, the maximum radio communication range in a GSM-2G cell, due to the limited power of the subscriber station, is calculated based on the parameters of the uplink channel, and the required transmitter power of the base station is determined using the balanced duplex equation based on the parameters of the receiving and transmitting equipment of the base and subscriber stations, as well as the characteristics of the downlink and uplink radio channels. **Result:** a new balanced duplex equation was obtained and a method for calculating the downlink and uplink channel budgets of the GSM-2G cellular system was proposed. **Practical / Theoretical significance:** the results of the work can be useful for developers of receiving and transmitting equipment of various radio systems.

Key words: mobile communication, base station, subscriber station, downlink, uplink, balanced duplex, power, transmitter, radio wave attenuation, radio receiver, radio path, bandpass filter, low-noise amplifier, feeder, amplifier-selector, noise figure, real sensitivity of radio receiver

Information about Author

Melikhov Sergey – Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Radio Engineering Systems (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics). E-mail: mrc@main.tusur.ru