

УДК 621.396.41

С.В. Мелихов

## Уравнение дуплексной радиосвязи сотовой системы

Предложено уравнение дуплексной радиосвязи сотовой системы, в которое входят все основные параметры приемопередающей аппаратуры базовой станции и мобильной станции. Решение уравнения возможно относительно любого параметра приемопередающей аппаратуры. Определены условия сбалансированной радиосвязи в нисходящем и восходящем каналах соты. Обсуждена необходимость использования антенного малошумящего усилителя на базовой станции при существенных потерях в комбайнере или антенном фидере.

**Ключевые слова:** сотовая система, дуплекс, базовая станция, мобильная станция, нисходящий канал, восходящий канал, малошумящий усилитель.

Упрощенные структурные схемы приемопередающей аппаратуры (ППА) базовой станции (БС) и мобильной станции (МС) изображены на рис. 1. В составе ППА БС может входить «комбайнер» – блок объединения-распределения радиосигналов, позволяющий нескольким передатчикам работать с одной передающей антенной и нескольким приемникам работать с одной приемной антенной. В состав приемного канала БС может входить антенный малошумящий усилитель (МШУ) с полосовым фильтром (ПФ) на входе. ПФ необходим для защиты МШУ от внеполосных мешающих радиосигналов. Структурная схема ППА МС, на которой изображены два фидера и две антенны, представлена в таком виде для вывода обобщенного уравнения сбалансированной дуплексной радиосвязи (что сделано ниже). Как правило, в малогабаритных переносных МС нет необходимости в фидерах и используется одна приемопередающая антенна.

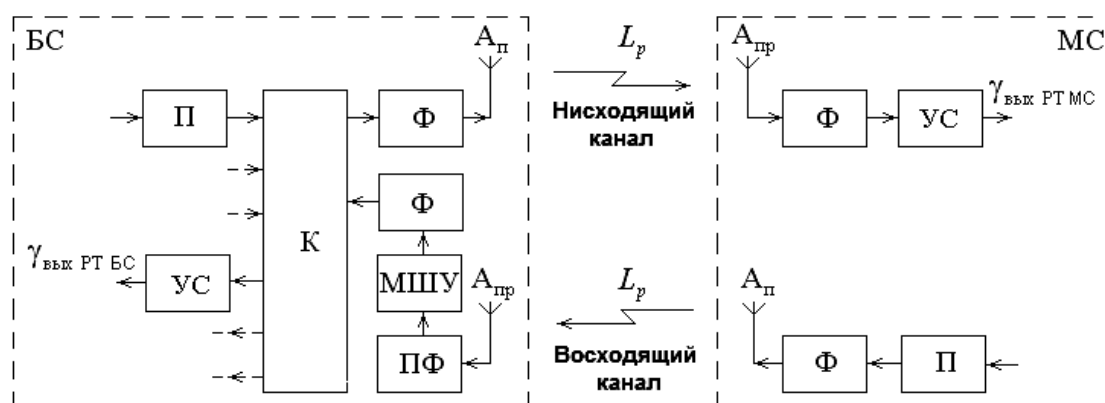


Рис. 1. Упрощенные структурные схемы ППА БС и МС: П – передатчик; УС – усилитель-селектор (выполняет функции основного усиления и селекции радиосигнала); К – комбайнер; Ф – фидер; МШУ – малошумящий усилитель; ПФ – полосовой фильтр;  $A_{пр}$  – передающая антенна;  $A_{пр}$  – приемная антенна

При проектировании сотовой системы на «квазигладкой местности» [1] оценивается возможность радиосвязи в нисходящем канале: от БС к МС. Для этого определяется допустимое ослабление мощности радиоволны на трассе распространения ( $L_p$ ) из условия [1, 2]

$$P_{с\text{ вх } МС} = P_{с\text{ вх } 0\text{ МС}}, \quad (1)$$

где

$$P_{с\text{ вх } МС} = \frac{P_{БС} G_{П\text{ БС}} G_{пр\text{ МС}}}{\eta_{П\text{ БС}} L_p} - \quad (2)$$

мощность радиосигнала на входе приемника МС (в антенне МС);

$$P_{с\text{ вх } 0\text{ МС}} = \gamma_{в\text{ых } РТ\text{ МС}} P_{ш0} \left[ (N_{\Sigma\text{ МС}} - 2) + \eta_{пр\text{ Ф } МС} N_{УС\text{ МС}} \right] - \quad (3)$$

реальная чувствительность приемника МС [3];  $P_{\text{БС}}$  – мощность передатчика БС;  $G_{\text{п БС}}$  – коэффициент усиления антенны БС в режиме передачи;  $G_{\text{пр МС}}$  – коэффициент усиления антенны МС в режиме приема;  $\eta_{\text{п БС}} = \eta_{\text{п Ф БС}} \eta_{\text{п К БС}}$  – потери мощности радиосигнала в фидере ( $\eta_{\text{п Ф БС}}$ ) и в комбайнере ( $\eta_{\text{п К БС}}$ ) БС в режиме передачи (комбайнер – блок объединения-распределения радиосигналов, позволяющий нескольким передатчикам и приемникам БС работать с одной антенной);  $\gamma_{\text{вых РТ МС}}$  – отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума на выходе радиотракта (РТ) приемника МС, которое характеризует качество связи нисходящего канала;  $P_{\text{ш0}} = kT_0 B_{\text{ш}}$  – номинальная мощность теплового шума;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T_0 = 290$  К (считается, что комнатная температура  $17^\circ\text{C}$ );  $B_{\text{ш}}$  – шумовая полоса приемника;  $N_{\Sigma \text{ МС}}$  – результирующий коэффициент внешнего шума для приемника МС;  $\eta_{\text{пр Ф МС}}$  – потери в фидере МС в режиме приема;  $N_{\text{УС МС}}$  – коэффициент шума усилителя-селектора приемника МС.

По допустимому затуханию  $L_p$  с использованием моделей Окамуры–Хата рассчитывается радиус соты  $r$  (т.е. радиус круговой зоны обслуживания БС для «квазигладкой местности» различного характера: «большой город»; «малый город»; «пригород»; «сельская местность»; «открытая местность»).

Например, для «квазигладкого пригорода» («квазигладкий пригород» – крупный населенный пункт с низкой плотностью застройки жилых домов и хозяйственных построек высотой 3, 4 этажа) затухание радиоволны по модели Окамуры–Хата [4]:

$$L_p[\text{дБ}] = \left\{ 63,35 - 13,82 \lg(h_{\text{БС}}) + 27,72 \lg(f) - 2[\lg(f/28)]^2 - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{\text{МС}} \right\} + \\ + \left\{ 44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}}) \right\} \lg(r) = A + B \lg(r), \quad (4)$$

где  $h_{\text{БС}}, h_{\text{МС}}$  – высоты антенн БС и МС, м;  $f$  – несущая радиочастоты, МГц;

$$A = \left\{ 63,35 - 13,82 \lg(h_{\text{БС}}) + 27,72 \lg(f) - 2[\lg(f/28)]^2 - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{\text{МС}} \right\}; \\ B = \left\{ 44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}}) \right\}.$$

Из (4) радиус круговой зоны обслуживания БС (радиус соты):

$$r[\text{км}] = 10^{(L_p - A)/B}. \quad (5)$$

Однако при такой методике расчета зоны обслуживания БС не учитываются особенности восходящего канала: от МС к БС.

Целью настоящей работы является получение уравнения, связывающего технические параметры ППА БС и МС с учетом особенности как нисходящего, так и восходящего каналов. Использование такого уравнения позволяет определить условия для сбалансированной дуплексной радиосвязи соты.

**Уравнение сбалансированной дуплексной радиосвязи сотовой системы.** Под термином «сбалансированная дуплексная радиосвязь» будем понимать одинаковое качество радиосвязи в нисходящем и восходящем каналах ( $\gamma_{\text{вых РТ МС}} = \gamma_{\text{вых РТ БС}}$ , где  $\gamma_{\text{вых РТ БС}}$  – отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума на выходе РТ приемника БС) при максимальном удалении МС от БС (т.е. при нахождении МС на границе соты).

По аналогии с (1)–(3) запишем следующие выражения для восходящего канала:

$$P_{\text{с вх БС}} = P_{\text{с вх 0 БС}}, \quad (6)$$

где

$$P_{\text{с вх БС}} = \frac{P_{\text{МС}} G_{\text{п МС}} G_{\text{пр БС}}}{\eta_{\text{п Ф МС}} L_p} - \quad (7)$$

мощность радиосигнала на входе приемника БС (в антенне БС, рис. 1);

$$P_{\text{с вх 0 БС}} = \gamma_{\text{вых РТ БС}} P_{\text{ш0}} \left\{ (N_{\Sigma \text{ БС}} - 2) + \eta_{\text{п Ф}} \left[ N_{\text{МШУ}} + (1/k_{\text{МШУ}}) (\eta_{\text{пр БС}} N_{\text{УС БС}} - 1) \right] \right\} - \quad (8)$$

реальная чувствительность приемника МС (данное выражение получено с использованием методики, предложенной в [3]);  $P_{\text{МС}}$  – мощность передатчика МС;  $G_{\text{п МС}}$  – коэффициент усиления ан-

тенны МС в режиме передачи;  $G_{\text{пр БС}}$  – коэффициент усиления антенны БС в режиме приема;  $\eta_{\text{п Ф МС}}$  – потери мощности радиосигнала в фидере МС в режиме передачи;  $N_{\Sigma \text{ БС}}$  – результирующий коэффициент внешнего шума для приемника МС;  $\eta_{\text{ПФ}}$  – потери полосового фильтра;  $N_{\text{МШУ}}$ ,  $k_{\text{МШУ}}$  – коэффициент шума и коэффициент усиления по мощности МШУ;  $\eta_{\text{пр БС}} = \eta_{\text{пр Ф БС}} \eta_{\text{пр К БС}}$  – потери мощности радиосигнала в фидере ( $\eta_{\text{пр Ф БС}}$ ) и комбайнере ( $\eta_{\text{пр К БС}}$ ) БС в режиме приема;  $N_{\text{УС БС}}$  – коэффициент шума усилителя-селектора приемника БС.

Заметим, что в силу принципа взаимности значение  $L_p$  в (2) и (7) равновелико.

Поделим (1) на (6) с учетом (2), (3), (7), (8), считая, что качество радиосвязи в нисходящем и восходящем каналах одинаково ( $\gamma_{\text{вых РТ МС}} = \gamma_{\text{вых РТ БС}}$ ). Получим:

$$\frac{P_{\text{БС}} G_{\text{п БС}} G_{\text{пр МС}} \eta_{\text{п Ф МС}}}{P_{\text{МС}} G_{\text{п МС}} G_{\text{пр БС}} \eta_{\text{п БС}}} = \frac{(N_{\Sigma \text{ МС}} - 2) + \eta_{\text{пр Ф МС}} N_{\text{УС МС}}}{(N_{\Sigma \text{ БС}} - 2) + \eta_{\text{ПФ}} [N_{\text{МШУ}} + (1/k_{\text{МШУ}})(\eta_{\text{пр БС}} N_{\text{УС БС}} - 1)]}. \quad (9)$$

Поскольку уравнение (9) связывает основные параметры ППА БС и МС при дуплексной радиосвязи, то целесообразно назвать его «уравнением дуплексной радиосвязи сотовой системы».

Заметим, что уравнение (9) может быть решено относительно любого параметра ППА БС и МС.

**Необходимая мощность передатчика БС.** Исходными параметрами ППА БС и МС, которые определяются разработчиком при проектировании сотовой системы, являются:

$G_{\text{п БС}}$ ;  $G_{\text{пр БС}}$ ;  $\eta_{\text{п БС}}$ ;  $\eta_{\text{пр БС}}$ ;  $\eta_{\text{ПФ}}$ ;  $k_{\text{МШУ}}$ ;  $N_{\text{МШУ}}$ ;  $G_{\text{п МС}}$ ;  $G_{\text{пр МС}}$ ;  $\eta_{\text{п Ф МС}}$ ;  $\eta_{\text{пр Ф МС}}$ ;  $P_{\text{МС макс}}$ , где  $P_{\text{МС макс}}$  – максимальная мощность передатчика МС.

Если известны перечисленные исходные параметры, то из (9) следует, что оптимальная мощность передатчика БС ( $P_{\text{БС опт}}$ ), необходимая для сбалансированной дуплексной радиосвязи на максимальном удалении МС от БС (т.е. при нахождении МС на границе соты), выражается следующим образом:

$$P_{\text{БС опт}} = \frac{P_{\text{МС макс}} G_{\text{п МС}} G_{\text{пр БС}} \eta_{\text{п БС}} [(N_{\Sigma \text{ МС}} - 2) + \eta_{\text{пр Ф МС}} N_{\text{УС МС}}]}{G_{\text{п БС}} G_{\text{пр МС}} \eta_{\text{п Ф МС}} \{(N_{\Sigma \text{ БС}} - 2) + \eta_{\text{ПФ}} [N_{\text{МШУ}} + (1/k_{\text{МШУ}})(\eta_{\text{пр БС}} N_{\text{УС БС}} - 1)]\}}. \quad (10)$$

На основе (10) можно сделать очевидные выводы:

- 1) если мощность передатчика БС  $P_{\text{БС}}$  будет больше, чем  $P_{\text{БС опт}}$  ( $P_{\text{БС}} > P_{\text{БС опт}}$ ), то дальность радиосвязи нисходящего канала будет больше, чем дальность радиосвязи восходящего канала;
- 2) если мощность передатчика БС  $P_{\text{БС}}$  будет меньше, чем  $P_{\text{БС опт}}$  ( $P_{\text{БС}} < P_{\text{БС опт}}$ ), то дальность радиосвязи нисходящего канала будет меньше, чем возможная дальность радиосвязи восходящего канала.

При коэффициенте усиления МШУ  $k_{\text{МШУ}} \approx (40-100) \approx (16-20)$  дБ слагаемым  $(1/k_{\text{МШУ}})(\eta_{\text{пр БС}} N_{\text{УС БС}} - 1)$  в (10) можно пренебречь. Тогда

$$P_{\text{БС опт}} = \frac{P_{\text{МС макс}} G_{\text{п МС}} G_{\text{пр БС}} \eta_{\text{п БС}} [(N_{\Sigma \text{ МС}} - 2) + \eta_{\text{пр Ф МС}} N_{\text{УС МС}}]}{G_{\text{п БС}} G_{\text{пр МС}} \eta_{\text{п Ф МС}} [(N_{\Sigma \text{ БС}} - 2) + \eta_{\text{ПФ}} N_{\text{МШУ}}]}. \quad (11)$$

Если дуплексная радиосвязь осуществляется на радиочастотах  $f > 500$  МГц (при этом  $N_{\Sigma \text{ МС}} = N_{\Sigma \text{ БС}} = N_{\text{зем}} = 2$  [3]), то выражение (11) упрощается:

$$P_{\text{БС опт}} = \frac{P_{\text{МС макс}} G_{\text{п МС}} G_{\text{пр БС}} \eta_{\text{п БС}} \eta_{\text{пр Ф МС}} N_{\text{УС МС}}}{G_{\text{п БС}} G_{\text{пр МС}} \eta_{\text{п Ф МС}} \eta_{\text{ПФ}} N_{\text{МШУ}}}. \quad (12)$$

На практике, как правило:  $G_{\text{п БС}} \approx G_{\text{пр БС}}$ ;  $G_{\text{п МС}} \approx G_{\text{пр МС}}$ ;  $\eta_{\text{пр Ф МС}} = \eta_{\text{п Ф МС}} = 1$  (в малогабаритных переносных МС антенный фидер отсутствует). При этом из (12) следует, что

$$P_{\text{БС опт}} = P_{\text{МС макс}} \eta_{\text{п БС}} \frac{N_{\text{УС МС}}}{\eta_{\text{ПФ}} N_{\text{МШУ}}}. \quad (13)$$

Если  $\eta_{\text{ПФ}} \approx 1$  и  $N_{\text{УСМС}} \approx N_{\text{МШУ}}$ , то из (13) следует, что оптимальная мощность передатчика БС должна быть больше максимальной мощности передатчика МС приблизительно в  $\eta_{\text{ПБС}}$  раз:

$$P_{\text{БС опт}} \approx P_{\text{МС макс}} \eta_{\text{ПБС}}. \quad (14)$$

Потери мощности радиосигнала в комбайнере и фидере БС могут достигать существенного значения ( $\eta_{\text{ПБС}} = \eta_{\text{ПКБС}} \eta_{\text{ПФБС}} = 10 = 10 \text{ дБ}$  и более).

Существенные потери  $\eta_{\text{ПКБС}} \approx (2-5) \approx (3-7) \text{ дБ}$  характерны для многоканальных комбайнеров [5], объединяющих радиосигналы с различными частотами от нескольких передатчиков БС (использование нескольких передатчиков позволяет повысить возможный трафик БС).

Существенные потери в фидере ( $\eta_{\text{ПФБС}}$ ) имеют место при большой высоте антенн БС (в этом случае длина фидера может достигать несколько десятков метров [6]) или при высокой радиочастоте (потери фидера увеличиваются с ростом радиочастоты). Например, для фидера RFA 1/2"-50 при его длине 100 м и радиочастоте 1000 МГц  $\eta_{\text{ПФБС}} \approx 5,3 \approx 7,2 \text{ дБ}$ , а при радиочастоте 2000 МГц –  $\eta_{\text{ПФБС}} \approx 11,8 \approx 10,7 \text{ дБ}$  [7]. Большая высота подъема антенн БС характерна для соты с большим радиусом обслуживания (1 км и более).

Как правило, потери в комбайнере и фидере БС в режиме приема равны потерям в режиме передачи ( $\eta_{\text{прБС}} = \eta_{\text{ПБС}}$ ). Поэтому для компенсации существенных потерь фидера и комбайнера БС в режиме приема (т.е. для обеспечения работы восходящего канала) необходимо использование антенного МШУ (с ПФ на входе), имеющего коэффициент усиления  $k_{\text{МШУ}} \approx (40-100) \approx (16-20) \text{ дБ}$ . При этом для оценки чувствительности приемника БС, как следует из (8), необходимо использовать формулу

$$P_{\text{с вх 0 БС}} = \gamma_{\text{вых}} \Gamma_{\text{ТБС}} P_{\text{ш0}} \left[ (N_{\Sigma \text{ БС}} - 2) + \eta_{\text{ПФ}} N_{\text{МШУ}} \right]. \quad (15)$$

Если на БС МШУ с ПФ не используется, то оптимальная мощность передатчика БС выражается из (10) при  $\eta_{\text{ПФ}} = 1$ ,  $N_{\text{МШУ}} = 1$ ,  $k_{\text{МШУ}} = 1$ :

$$P_{\text{БС опт}} = \frac{P_{\text{МС макс}} G_{\text{ПМС}} G_{\text{прБС}} \eta_{\text{ПБС}} \left[ (N_{\Sigma \text{ МС}} - 2) + \eta_{\text{прФМС}} N_{\text{УСМС}} \right]}{G_{\text{ПБС}} G_{\text{прМС}} \eta_{\text{ПФМС}} \left[ (N_{\Sigma \text{ БС}} - 2) + \eta_{\text{прБС}} N_{\text{УСБС}} \right]}. \quad (16)$$

В этом случае при дуплексной радиосвязи на частотах  $f > 500 \text{ МГц}$  ( $N_{\Sigma \text{ МС}} = N_{\Sigma \text{ БС}} = N_{\text{зем}} = 2$ )

$$P_{\text{БС опт}} = \frac{P_{\text{МС макс}} G_{\text{ПМС}} G_{\text{прБС}} \eta_{\text{ПБС}} \eta_{\text{прФМС}} N_{\text{УСМС}}}{G_{\text{ПБС}} G_{\text{прМС}} \eta_{\text{ПФМС}} \eta_{\text{прБС}} N_{\text{УСБС}}}. \quad (17)$$

Если  $G_{\text{ПБС}} \approx G_{\text{прБС}}$ ,  $G_{\text{ПМС}} \approx G_{\text{прМС}}$ ,  $\eta_{\text{ПБС}} \approx \eta_{\text{прБС}}$ ,  $\eta_{\text{прФМС}} = \eta_{\text{ПФМС}} = 1$ , то

$$P_{\text{БС опт}} = P_{\text{МС макс}} \frac{N_{\text{УСМС}}}{N_{\text{УСБС}}}. \quad (18)$$

При  $N_{\text{УСМС}} \approx N_{\text{УСБС}}$  из (18) следует, что, в случае отсутствия антенного МШУ с ПФ, оптимальная мощность передатчика БС должна быть приблизительно равна максимальной мощности передатчика МС:

$$P_{\text{БС опт}} \approx P_{\text{МС макс}}. \quad (19)$$

Из (8) следует, что чувствительность приемника БС при отсутствии антенного МШУ с ПФ ( $\eta_{\text{ПФ}} = 1$ ,  $N_{\text{МШУ}} = 1$ ,  $k_{\text{МШУ}} = 1$ )

$$P_{\text{с вх 0 БС}} = \gamma_{\text{вых}} \Gamma_{\text{ТБС}} P_{\text{ш0}} \left[ (N_{\Sigma \text{ БС}} - 2) + \eta_{\text{прБС}} N_{\text{УСБС}} \right]. \quad (20)$$

Из сравнения (20) и (15) следует, что при существенных потерях  $\eta_{\text{прБС}}$  ( $\eta_{\text{прБС}} > \eta_{\text{ПФ}} \approx 1 \text{ дБ}$  [8]) чувствительность приемника БС без МШУ хуже, чем чувствительность приемника БС с МШУ, т.е.  $(P_{\text{с вх 0 БС}})_{\text{без МШУ}} > (P_{\text{с вх 0 БС}})_{\text{МШУ}}$ , поскольку при  $N_{\text{УСБС}} \approx N_{\text{МШУ}}$

$$\eta_{\text{прБС}} N_{\text{УСБС}} > \eta_{\text{ПФ}} N_{\text{МШУ}}. \quad (21)$$

**Вывод:** использование на БС антенного МШУ увеличивает дальность радиосвязи восходящего канала (см. формулу (5)), т.к., исходя из (6) и (7), допустимое ослабление мощности радиоволны на

трассе распространения  $L_p$  увеличивается при уменьшении  $P_{с\text{вх}0\text{БС}}$  (при улучшении чувствительности приемника БС):

$$L_p = \frac{P_{\text{МС макс}} G_{\text{П МС}} G_{\text{пр БС}}}{\eta_{\text{П Ф МС}} P_{с\text{вх}0\text{БС}}}. \quad (22)$$

**Заключение.** Полученное уравнение (9) связывает между собой основные технические параметры приемопередающей аппаратуры базовой станции и мобильной станции. Его использование при проектировании сотовой сети позволяет обеспечить сбалансированную дуплексную радиосвязь (с одинаковым качеством приема) в нисходящем и восходящем каналах соты за счет выбора оптимальной мощности передатчика базовой станции.

Полученное уравнение сбалансированной радиосвязи может быть использовано и для других систем, работающих, например, в полудуплексном режиме или в симплексном режиме.

#### Литература

1. Маковеева М.М. Системы связи с подвижными объектами / М.М. Маковеева, Ю.С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
2. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
3. Мелихов С.В., Кологривов В.А. Оценка чувствительности радиоприемников с настроенными антеннами // Труды ТУСУРа (Томск). – 2006. – №6. – С. 63–67.
4. Милютин Е.Р. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона / Е.Р. Милютин, Г.О. Василенко, М.А. Сиверс, А.Н. Волков, Н.В. Певцов. – СПб.: Трида, 2003. – 159 с.
5. Что такое комбайнер и для чего он нужен [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.r2c-pro.ru/info/>, свободный (дата обращения: 29.12.2014).
6. Стандарты и технологии сотовой связи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://celnet.ru/standarts.php>, свободный (дата обращения: 29.12.2014).
7. Кабель 50 Ом RFA 1/2"-50 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.tt-telecom.ru/catalog/sistemy\\_radiosvyazi/kabel-aksessuary/kabel-s-malymi-poteryami-0-4000-mgts-/9275/](http://www.tt-telecom.ru/catalog/sistemy_radiosvyazi/kabel-aksessuary/kabel-s-malymi-poteryami-0-4000-mgts-/9275/), свободный (дата обращения: 29.12.2014).
8. Пивоваров И., Похвалин А. Опыт проектирования высокочастотных фильтров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2007\\_04\\_190.pdf](http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2007_04_190.pdf), свободный (дата обращения: 29.12.2014).

---

#### Мелихов Сергей Всеволодович

Зав. каф. средств радиосвязи (СРС) ТУСУРа, д-р техн. наук, профессор

Тел.: (382-2) 41-37-09, 8-913-820-02-58

Эл. почта: [mrc@main.tusur.ru](mailto:mrc@main.tusur.ru)

Melikhov S.V.

#### The equation of duplex radio cellular system

The paper deals with the equation of a duplex cellular radio communication system, which includes all key parameters of transmit equipment of a base station and mobile station. The solution of the equation is possible with respect to any parameter of transmission equipment. The conditions of the balanced radio communication in the descending and ascending channels of cells are defined. The need of use of the antenna low-noise amplifier on a base station at essential losses in the combine operator or an antenna feeder is discussed.

**Keywords:** cellular system, duplex, base station, mobile station, downlink, uplink, a low noise amplifier.