

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗИ С РЕГУЛИРОВКОЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАТЧИКА В КАНАЛЕ MS-BS И КОМПЕНСАЦИЕЙ АДДИТИВНЫХ ЗАМИРАНИЙ

Введение

В системах мобильной связи (системах радиодоступа) мощность излучения передатчиков регулируют на базовой станции BS и мобильной станции MS. Однако регулирование мощности в широком динамическом диапазоне осуществляют только на MS (в обратном канале радиосвязи). Примером может служить система радиодоступа CDMA на базе стандарта IS-95 [1]. Мощность излучения передатчика на BS (в прямом канале радиосвязи) изменяют в узком динамическом диапазоне для грубой коррекции отношения сигнал/шум в приемном тракте MS. Свободное перемещение абонентов обуславливает произвольное положение MS на территории обслуживания, поэтому для приведения уровней сигналов, поступающих от MS, на входе приемника BS к заданному диапазону необходима быстродействующая система автоматического регулирования мощности излучения передатчика в обратном радиоканале связи – система АРМП [2]. В данной статье рассмотрен один из вариантов математической модели системы автоматического управления, которая регулирует мощность излучения передатчика в обратном канале радиосвязи MS-BS. Данная система при любой дальности мобильной станции MS от базовой станции BS обеспечивает один и тот же уровень сигнала, поступающего от MS, на входе приемника BS и компенсирует аддитивные замирания в обратном канале радиосвязи MS-BS. Проведено исследование математической модели системы мобильной связи с регулировкой мощности передатчика и компенсацией аддитивных замираний в обратном канале радиосвязи MS-BS.

Математическая модель системы мобильной связи с регулировкой мощности передатчика в обратном канале радиосвязи MS-BS

Модель системы АРМП, выполненная в интерактивной системе MATLAB, представлена на рис.1. Прямой канал радиосвязи включает следующие основные элементы: генератор сигнала (Generator) мощностью $P_{\max BS} = 20$ Вт и управляемый аттенюатор (Attenuator) на базовой станции BS, среду распространения радиоволн в канале радиосвязи BS-MS и приемник (радиозвено R1) на мобильной станции MS. Обратный канал радиосвязи включает следующие основные элементы: генератор сигнала (Generator1) мощностью $P_{\max} = 2$ Вт и управляемый аттенюатор (Attenuator1) на мобильной станции MS, среду распространения радиоволн в канале радиосвязи MS-BS и приемник (радиозвено R2) на базовой станции BS.

Модели аттенюаторов приведены на рис. 2. Аттенюатор в прямом канале радиосвязи (Attenuator) описывается зависимостью

$$P_{BS} = \begin{cases} P_{\max BS}, & m \leq 0; \\ P_{\max BS} [1 - 0,1m], & 0 \leq m \leq 9; \\ 0,1P_{\max BS}, & m \geq 9, \end{cases} \quad (1)$$

где $P_{\max BS}$ - мощность генератора BS; m - сигнал на входе аттенюатора; P_{BS} - мощность на выходе аттенюатора.

Аттенюатор в обратном канале радиосвязи (Attenuator1) описывается зависимостью

$$P_{MS} = P_{\max MS} (1 - x), \quad 0 \leq x \leq 1, \quad (2)$$

где $P_{\max MS}$ - мощность генератора MS; x - сигнал на входе аттенюатора; P_{MS} - мощность на выходе аттенюатора.

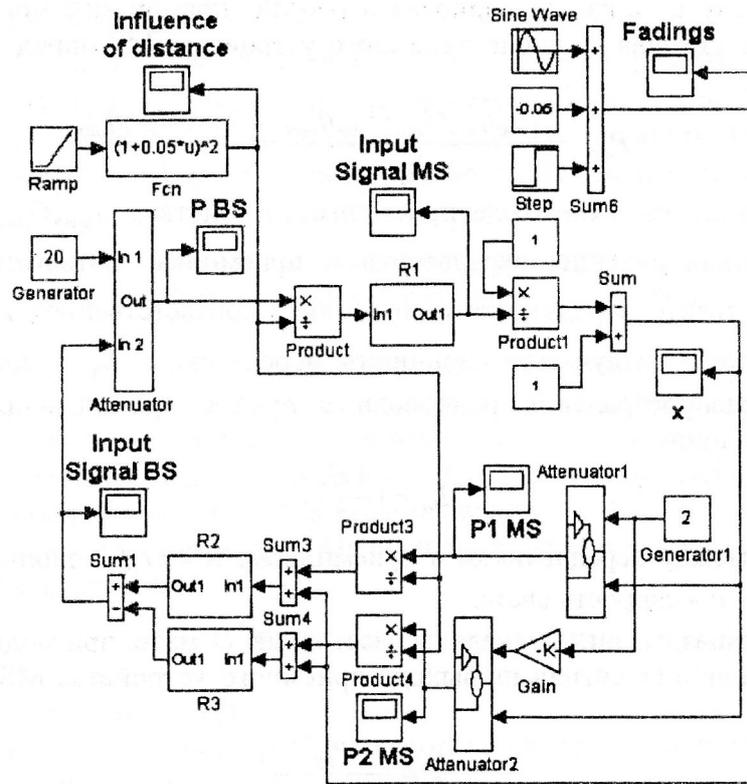


Рис.1. Математическая модель системы мобильной связи с регулировкой мощности передатчика и компенсацией замираний в обратном канале радиосвязи MS-BS, выполненная в интерактивной системе MATLAB

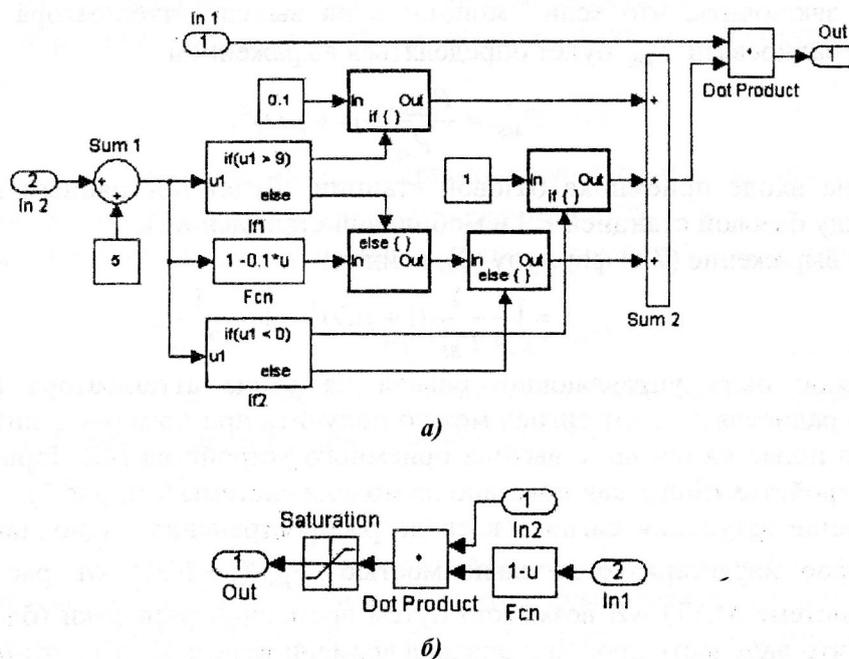


Рис.2. Модели аттенуаторов в прямом а и обратном б каналах радиосвязи

Из формулы (2) запишем

$$x = 1 - \frac{P_{MS}}{P_{\max MS}} \quad (3)$$

Радиозвенья R1 и R2 с учетом только запаздывания сигнала в среде распространения и фильтров приемников опишем передаточной функцией

$$G_{p2}(s) = be^{-\tau s} / (s + b).$$

В простейшем случае в канале радиосвязи BS-MS прямой видимости при отсутствии отражений мощность сигнала на входе приемного устройства MS определяется выражением [2]

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}} \eta_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \eta_{\text{прм}}}{L_o} = \frac{P_{\text{элим}} G_{\text{прм}} \eta_{\text{прм}}}{L_o}, \quad (4)$$

где $P_{\text{прм}}$ - мощность сигнала на входе приемного устройства; $G_{\text{прд}}, G_{\text{прм}}$ - коэффициенты направленного действия антенны передатчика и приемника соответственно; $\eta_{\text{прд}}, \eta_{\text{прм}}$ - потери в фидерном тракте передатчика и приемника соответственно; $P_{\text{элим}} = P_{\text{прд}} \eta_{\text{прд}} G_{\text{прд}}$ - эквивалентная изотропно излучаемая мощность передатчика; L_o - потери в свободном пространстве при распространении радиоволн в луче с прямой видимостью, которые определяются выражением

$$L_o = \left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right)^2, \quad (5)$$

где D - расстояние между передатчиком и приемником; $\lambda = c/f$ - длина волны колебаний несущей частоты f ; c - скорость света.

Учитывая, что запаздывание сигнала на расстоянии D мало, при моделировании можно определить установившийся сигнал на выходе приемного устройства MS (Input Signal MS) по формуле

$$P_{\text{inMS}} = \frac{P_{\text{BS}}}{(1 + \mu D)^2}, \quad (6)$$

где множитель $1/(1 + \mu D)^2$ характеризует уменьшение мощности (затухание сигнала), зависящее от расстояния D .

Не трудно заключить, что если мощность на выходе аттенюатора (Attenuator1) в обратном канале радиосвязи P_{MS} будет определяться выражением

$$P_{\text{MS}} = \frac{P_{\text{maxMS}}}{P_{\text{BS}}} (1 + \mu D)^2, \quad (7)$$

то сигнал на входе приемника базовой станции будет постоянным при различных расстояниях между базовой станцией BS и мобильной станцией MS.

Подставляя выражение (7) в формулу (3), найдем:

$$x = 1 - \frac{1}{P_{\text{BS}}} (1 + \mu D)^2 = 1 - \frac{1}{P_{\text{inMS}}}. \quad (8)$$

Таким должен быть управляющий сигнал на входе аттенюатора (Attenuator1) в обратном канале радиосвязи. Этот сигнал можно получить при помощи делителя (Product1), на вход которого подается сигнал с выхода приемного устройства MS (Input Signal MS), и вычитающего устройства (Sum), как показано на модели системы (см. рис.1).

Моделирование затухания сигнала в среде распространения радиоволн (уменьшение мощности, которое характеризуется зависимостью $P_{\text{BS}}/(1 + \mu D)^2$ от расстояния D) в интерактивной системе MATLAB возможно путем временной развертки (блоки Ramp, Fsp, Product), считая, что дальность пропорциональна времени развертки. При этом следует иметь в виду, что реально расстояние между мобильной и базовой станциями меняется значительно медленнее, чем протекают переходные процессы в модели. Поэтому в самом начале временной развертки процессы в модели и реальной системе будут отличаться.

Для борьбы с аддитивными замираниями в канале радиосвязи MS-BS модель системы АРМП (см. рис.1) имеет два канала обратной связи, которые работают на одной и той же несущей частоте и имеют одну и ту же среду распространения радиоволн.

Первый обратный канал включает следующие элементы: генератор Generator1, аттенюатор Attenuator1, делитель Product2 (имитирует затухания сигнала в среде

распространения радиоволн (уменьшение мощности передатчика), которое характеризуется зависимостью $P_{1MS} / (1 + \mu D)^2$ от расстояния D), сумматор Sum2, радиозвено R2.

Второй обратный канал включает следующие элементы: генератор Generator1, делитель мощности Gain с постоянным коэффициентом деления, делитель Product3 (имитирует затухания сигнала в среде распространения радиоволн (уменьшение мощности), которое характеризуется зависимостью $P_{2MS} / (1 + \mu D)^2$ от расстояния D), аттенюатор Attenuator2, идентичный аттенюатору Attenuator1, сумматор Sum3, радиозвено R3.

Аддитивные замирания (*Fadings*) поступают на нижние входы сумматоров Sum2 и Sum3.

Следует иметь в виду, что физически и первый, и второй обратные каналы имеют одну и ту же среду распространения радиоволн и одно и то же приемное устройство базовой станции, поэтому в модели системы мобильной связи делители Product2 и Product3, сумматоры Sum2 и Sum3, радиозвенья R2 и R3 – идентичны. Используется временное разделение (уплотнение) каналов путем их стробирования.

Мощность на выходе аттенюатора (Attenuator1) в первом обратном канале радиосвязи будет определяться выражением

$$P_{1MS} = \frac{P_{\max MS}}{P_{BS}} (1 + \mu D)^2, \quad (9)$$

которое совпадает с выражением (7).

Мощность на выходе аттенюатора (Attenuator2) во втором обратном канале радиосвязи будет определяться выражением

$$P_{2MS} = KP_{2MS} = K \frac{P_{\max MS}}{P_{BS}} (1 + \mu D)^2, \quad (10)$$

где K - постоянный коэффициент деления делителя мощности Gain.

В первом обратном канале сигнал на выходе звена R2 (поступающий с выхода сумматора Sum2):

$$u_{\Sigma 1}(t) = u_{c1}^* + u(t), \quad (11)$$

где u_{c1}^* - постоянный сигнал на выходе первого обратного канала, принятый BS; $u(t)$ - замирания в среде распространения радиоволн между MS и BS.

Во втором обратном канале сигнал на выходе звена R3 (поступающий с выхода сумматора Sum3):

$$u_{\Sigma 2}(t) = u_{c2}^* + u(t), \quad (12)$$

где u_{c2}^* - постоянный сигнал на выходе второго обратного канала, принятый BS; $u(t)$ - замирания в среде распространения радиоволн между MS и BS.

Нетрудно заметить, что

$$u_{\Sigma 1}(t) - u_{\Sigma 2}(t) = u_{c1}^* - u_{c2}^*. \quad (13)$$

Таким образом, вычитая из выходного сигнала звена R2 выходной сигнал звена R3 при идентичности звеньев R2 и R3, получаем на выходе сумматора Sum1 постоянный сигнал, принятый базовой станцией BS от мобильной станции MS. Аддитивные замирания в обратном канале MS-BS устраняются.

Результаты моделирования

Результаты моделирования математической модели системы мобильной связи с регулировкой мощности передатчика в обратном канале радиосвязи MS-BS представлены на рис. 3.

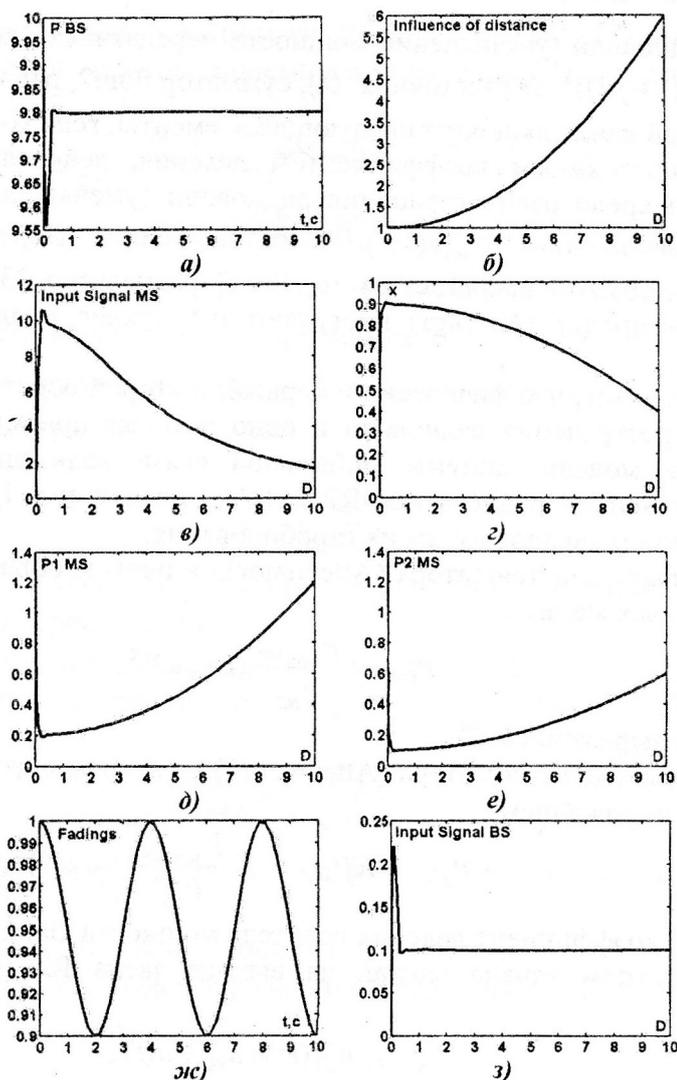


Рис.3. Процессы в математической модели системы мобильной связи с регулировкой мощности передатчика в обратном канале радиосвязи MS-BS

Процессы в модели системы АРМП (см. рис.1) отображаются на индикаторах: а) **P BS** (мощность на выходе аттенюатора (Attenuator) в прямом канале радиосвязи P_{BS} , равная в установившемся режиме 9,8 Вт); б) **Influence of distance** (затухание мощности в зависимости от дальности, определяемое формулой $(1 + \mu D)^2$, где $\mu = 0,05$, а дальность (расстояние мобильной станции MS от базовой станции BS) D , выраженная в относительных единицах, пропорциональна временной развертке); в) **Input Signal MS** (сигнал на выходе приемника мобильной станции); г) **x** (управляющий сигнал на управляющих входах аттенюаторов (Attenuator1 и Attenuator2) в обратном канале радиосвязи, определяемый по формуле (8)); д) **P1 MS** (мощность на выходе аттенюатора (Attenuator1) в обратном канале радиосвязи P_{1MS} , определяемая выражением (9)); е) **P2 MS** (мощность на выходе аттенюатора (Attenuator2) в обратном канале радиосвязи P_{2MS} , определяемая выражением (10)); ж) **Fadings** (аддитивные замирания сигналов в среде распространения радиоволн между MS и BS); з) **Input Signal BS** (сигнал на выходе приемника базовой станции).

При моделировании приняты следующие значения параметров модели на рис.1: $\mu = 0,05$; $b = 10 c^{-1}$; $\tau = 0,001c$. Аддитивные замирания сигналов в среде распространения радиоволн между MS и BS представлены функцией $u(t) = -0,05 + 0,05\sin(0,5\pi \cdot t + \pi/2)$.

Как показывают результаты моделирования, система АРМП (см. рис.1) при увеличении дальности D (увеличении расстояния мобильной станции MS от базовой

станции BS) увеличивает мощность передатчика мобильной станции (см. рис.3, *д* и *е*) таким образом, что принимаемый базовой станцией сигнал от мобильной станции при любой дальности D (любом расстоянии мобильной станции MS от базовой станции BS) имеет один и тот же уровень (см. рис.3, *з*). Аддитивные замирания, показанные на рис.3, *ж*, в обратном канале MS-BS устраняются, что хорошо видно из рис.3, *з*.

Отметим одно существенное обстоятельство. В системе мобильной связи, представленной на рис.1, уменьшение мощности (затухание сигнала), зависящее от расстояния D , и для прямого BS-MS (линия “вниз”), и для обратного MS-BS (линия “вверх”) каналов радиосвязи определено одной и той же формулой $(1 + \mu D)^2$. Но указанные каналы в реальных системах работают в разных диапазонах частот. Например, в системе радиодоступа CDMA на базе стандарта IS-95 диапазон частот для линии “вниз” находится в пределах 869...894 МГц, диапазон частот для линии “вверх” – 824...849 МГц, причем дуплексный разнос равен 45 МГц. Выберем средние частоты $f_1=880$ МГц и $f_2=835$ МГц. Найдем коэффициенты из формулы (5): $(4\pi f_1/c)^2=1358,8$; $(4\pi f_2/c)^2=1223,3$. Допустим, минимальное расстояние между BS и MS $D_{\min} = 20$ м.

По формуле (5) находим:

– уменьшение мощности (затухание сигнала), зависящее от расстояния D , для прямого BS-MS (линия “вниз”) канала радиосвязи

$$L_{01} = [4\pi f_1(D_{\min} + D)/c]^2 = (4\pi f_1 D_{\min} / c)^2 (1 + D/D_{\min})^2 = 1358,8 \cdot 400 \cdot (1 + 0,05D)^2;$$

– уменьшение мощности (затухание сигнала), зависящее от расстояния D , для обратного MS-BS (линия “вверх”) канала радиосвязи

$$L_{02} = [4\pi f_2(D_{\min} + D)/c]^2 = (4\pi f_2 D_{\min} / c)^2 (1 + D/D_{\min})^2 = 1223,3 \cdot 400 \cdot (1 + 0,05D)^2.$$

Поскольку коэффициенты затухания $1358,8 \cdot 400$ и $1223,3 \cdot 400$ можно компенсировать за счет установки соответствующих коэффициентов усиления в приемных трактах, то уменьшение мощности (затухание сигнала), зависящее от расстояния D , и для прямого BS-MS (линия “вниз”), и для обратного MS-BS (линия “вверх”) каналов радиосвязи можно определять одной и той же формулой $(1 + \mu D)^2$.

Отметим также тот факт, что в данном варианте построения системы мобильной радиосвязи (см. рис.1) рассматриваются только каналы управления мощностью излучения передатчиков и не затрагиваются вопросы, касающиеся информационных каналов прямой и обратной радиосвязи.

Вариант технической реализации передающего тракта обратного канала MS-BS представлен на рис.4.

Генератор Ген генерирует СВЧ-колебания частотой f_1 , которые подаются на неуправляемый вход аттенюатора Атт1 непосредственно и на неуправляемый вход аттенюатора Атт2 через делитель Д. На управляемые входы аттенюаторов подается сигнал х. Переключатель П (антенный коммутатор) поочередно подключает канал 2 и канал 1 с СВЧ-колебаниями постоянной амплитуды, которые излучаются антенным устройством Ант, как показано на рис. 4, а и б. F_d - циклическая частота. Каналы подключаются к антенному устройству на одинаковые отрезки времени T_k (см. рис.4,б). При проектировании передающего тракта обратного канала MS-BS должны выполняться следующие условия:

$$f_1 \gg F_d; T_k \ll t_p, 1/F_d \ll t_p,$$

где t_p - время регулирования в системе АРМП, определяемое по реакции системы на ступенчатое воздействие.

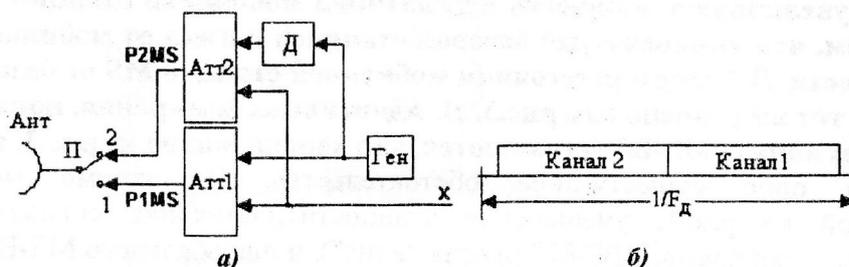


Рис.4

Вариант технической реализации приемного тракта обратного канала MS-BS при аддитивных замираниях представлен на рис.5.

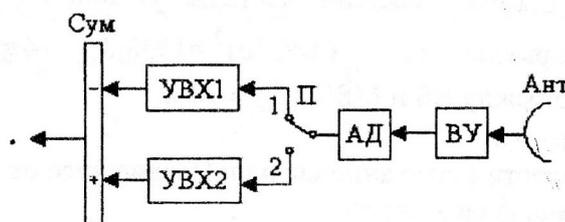


Рис.5

Принимаемые СВЧ-колебания частотой f_2 приемной антенной Ант с выхода входного устройства приемника ВУ поступают на амплитудный детектор АД, который преобразует колебания высокой частоты каналов 2 и 1 в импульсы постоянной амплитуды (оглабляющие колебаний высокой частоты). Переключатель П (коммутирующее устройство) поочередно подключает на интервалы времени T_k к соответствующим устройствам выборки и хранения УВХ импульсы постоянной амплитуды, соответствующие каналам 2 и 1. Таким образом, на каждое УВХ поступает последовательность импульсов постоянной амплитуды, соответствующих одному из каналов. Устройства выборки и хранения работают с шагом квантования $h = 1/F_d$ и служат для выделения оглабляющих импульсных последовательностей соответственно $u_{\Sigma 1}(t) = u_{c1}^* + u(t)$ в канале 1 и $u_{\Sigma 2}(t) = u_{c2}^* + u(t)$ в канале 2. Разность оглабляющих $u_{\Sigma 1}(t) - u_{\Sigma 2}(t) = u_{c1}^* - u_{c2}^*$ получим на выходе сумматора Сум (вычитающего устройства).

Выводы

Рассмотренный вариант построения системы мобильной радиосвязи открывает возможность проектирования адаптивных каналов радиосвязи, обеспечивающих независимость (инвариантность) обратных радиоканалов системы от аддитивных замираний, имеющих место в среде распространения радиоволн, и постоянный стабильный уровень сигнала, принимаемый базовой станцией BS на любом расстоянии мобильной станции MS от базовой. Это подтверждается результатами математического моделирования. Предложены варианты технической реализации передающего и приемного трактов обратного канала MS-BS.

Список литературы

1. Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.
2. Системы связи с кодовым разделением каналов / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, А.Н. Никитин, М.А. Сиверс. – СПб.: ГУТ, 1999. – 120 с.

Поступила 20.02.2006