

УДК 621.396.96

Б.Б. ПОСПЕЛОВ

Государственный университет информационно-коммуникационных технологий, г. Киев

О.Н. ШИНКАРУК, Л.В. КАРПОВА

Хмельницкий национальный университет

МЕТОДЫ МНОГОАНТЕННОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХОВОЙ СИТУАЦИОННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассматриваются методы многоантенной связи в условиях неопределенности помеховых ситуаций на основе использования управляемых MIMO антенных систем на передающей и приемной сторонах.

Consider methods of multi-antenna communications in the face of uncertainty jamming situations through the use of controlled MIMO antenna systems for transmitting and receiving sides.

Ключевые слова: беспроводная связь, многоантенные технологии, помеха, антенные системы.

Введение. По мере развития беспроводных телекоммуникаций все большее внимание уделяется проблеме повышения их пропускной способности и надежности связи. Из-за интенсивного использования радиочастотного ресурса радиосистемами, увеличения плотности размещения радиооборудования и роста числа потребителей беспроводных информационных приложений существенно возрастает электромагнитная "загрязненность" среды передачи. В этих условиях решения, базирующиеся на увеличении частотно-энергетического ресурса беспроводных телекоммуникаций, оказываются не вполне приемлемыми, поскольку новые приложения требуют существенного возрастания времени использования беспроводных терминалов, что приводит к увеличению нежелательного электромагнитного воздействия на окружающую среду. Это требует снижения общего частотно-энергетического ресурса и стимулирует развитие других подходов к решению данной проблемы. Одними из конструктивных следует считать подходы, основанные на комплексном использовании с существующими подходами различных «частотно-энергосберегающих» технологий. Такие технологии должны базироваться на целенаправленном создании и рациональном использовании пространственного и поляризационного ресурсов в беспроводных телекоммуникациях. Это предполагает переход от использования традиционных технологий формирования (обработки) пространственно-временных полей с помощью одиночных антенн или традиционных антенных решеток к различным многоантенным технологиям с произвольной геометрией апертур.

Известные многоантенные технологии управления направленностью передающих антенн, разнесенного приема, многолучевых антенн, адаптивного формирования характеристик антенн, MIMO антенных систем, цифровых адаптивных антенных решеток, распределенных антенных систем [1, 2], а также их развитие могут рассматриваться в рамках реализации концепции динамических каналов связи [3, 4]. Основой для реализации данной концепции служат управляемые многоантенные структуры с произвольной геометрией, которые используются в беспроводных телекоммуникациях на передающей и приемной сторонах.

Важной особенностью современных условий беспроводной связи является существенная электромагнитная "загрязненность" среды передачи, характеризующаяся как неопределенностью помеховой ситуации, так и непредсказуемостью ее быстрого изменения. В этих условиях развитие многоантенных технологий должно осуществляться на основе адаптивного подхода. В этой связи развитие методов многоантенной связи в условиях неопределенности помеховой ситуации является особо актуальным.

Модель многоантенной связи с использованием MIMO антенных систем. Будем полагать, что на передающей стороне сформировано i информационных потоков. Каждый поток характеризуется совокупностью последовательно передаваемых сигналов x_{λ}^i . Для организации многоантенной связи используются MIMO передающая и MIMO приемная антенные системы, размещаемые соответственно на передающей и приемной сторонах. Число входов MIMO передающей антенной системы определяется числом i передаваемых потоков информационных сигналов, а число выходов – количеством N используемых передающих антенн. При этом число входов MIMO приемной антенной системы определяется количеством M используемых приемных антенн, а число выходов – числом i передаваемых информационных потоков.

В передающей MIMO антенной системе, включающей N произвольных антенн с известными пространственными $Fl(\bar{\varphi})$ и поляризационными $\bar{p}_{Fl}(\bar{\varphi})$ характеристиками направленности, где $l = \overline{1, N}$, формируются i пространственных каналов передачи (в общем случае $N \neq i$). Здесь вектор $\bar{\varphi}$ определяет произвольное направление излучения волн (в заданной сферической системе координат на передающей стороне). Полагается, что каждый из пространственных каналов является управляемым, а их характеристики

определяются соответствующими векторными U^i_T управлениями. Поскольку структура организуемых пространственных каналов передачи идентична, в дальнейшем ограничимся рассмотрением модели многоантенной связи для одного из каналов передачи произвольного потока информационных сигналов. В связи с этим далее верхний индекс i , указывающий на принадлежность к соответствующему потоку, опущен.

Пусть преобразования информационного сигнала x_λ в произвольном пространственном канале с учетом его структуры и параметров описываются матричным оператором D_T соответствующего вида и размера. Тогда для произвольного пространственного канала ММО передающей антенной системы справедливо операторное представление вида:

$$F_{UT} : F_T(x_\lambda, \bar{\varphi}, U_T) = U_T^T D_T A_T(\bar{\varphi}) V_T(\bar{\varphi}) x_\lambda \quad (1)$$

где
$$A_T(\bar{\varphi}) = \begin{vmatrix} F1(\bar{\varphi}) \bar{p}_{F1}(\bar{\varphi}) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & FN(\bar{\varphi}) \bar{p}_{FN}(\bar{\varphi}) \end{vmatrix}; \quad V_T(\bar{\varphi}) = \begin{vmatrix} e^{-j2\pi r(\bar{R}, \bar{R}1)/\lambda} / r(\bar{R}, \bar{R}1) \\ \dots & \dots & \dots \\ e^{-j2\pi r(\bar{R}, \bar{R}N)/\lambda} / r(\bar{R}, \bar{R}N) \end{vmatrix}.$$

В (1) вектор $V_T(\bar{\varphi})$ описывает влияние среды на сигналы, излучаемые N антеннами, положения которых определяются произвольными векторами $\bar{R}l$ в сферической системе координат на передающей стороне, и наблюдаемые в произвольной удаленной точке \bar{R} с координатами $(\bar{\varphi}, \bar{R})$. Полагается, что среда не оказывает влияния на поляризацию излучаемых волн, а лишь приводит к ослаблению и изменению их фазовой структуры.

Преобразование произвольного сигнала ζ , рассматриваемого в точке \bar{R} и наблюдаемого в направлении $\bar{\theta}$ в связанной системе координат на приемной стороне (оси соответствующих координат на передающей и приемной сторонах коллинеарны) в ММО приемной антенной системе будет определяться оператором:

$$F_{UR} : F_R(\zeta, \bar{\theta}, U_R) = V_R^T(\bar{\theta}) A_R(\bar{\theta}) D_R U_R \zeta, \quad (2)$$

где $V_R(\bar{\theta})$, $A_R(\bar{\theta})$ и D_R – вектор и матрицы, определяемые соответствующими характеристиками и параметрами для ММО приемной антенной системы, а вектор U_R определяет управление соответствующим пространственным каналом приема. Пусть в области размещения M приемных антенн кроме информационных сигналов действуют аддитивные помехи j^p от $p = 1..L$ внешних источников и шумы n . При этом пространственное положение источников помех отличается от пространственного положения источника сигнала. С учетом передаваемых информационных сигналов x_λ , внешних помех, действующих в направлениях $\bar{\theta}_p$, и вектора шумов \bar{n} сигналы на выходе M приемных антенн, расположенных в заданных точках пространства, определяемых в связанной системе координат на приемной стороне, представимы в виде вектора, функционально связанного с управлением U_T :

$$Y^T(U_T) = U_T^T D_T A_T(\bar{\varphi}) V_T(\bar{\varphi}) V_R^T(\bar{\theta}) A_R(\bar{\theta}) x_\lambda + \sum_p V_R^T(\bar{\theta}_p) A_R(\bar{\theta}_p) j^p + \bar{n}^T. \quad (3)$$

С учетом (3) сигнал на выходе соответствующего пространственного канала приема с учетом его структуры, параметров и управления будет определяться:

$$y_\lambda(U_T, U_R) = Y^T(U_T) D_R U_R. \quad (4)$$

Соотношение (4) определяет модель многоантенной связи для произвольного пространственного канала передачи потока информационных сигналов, организуемого с помощью ММО антенных систем на передающей и приемной сторонах. Свойства организуемых пространственных каналов, следуя (4), зависят от текущих управлений на передающей и приемной сторонах. В случае изменения соответствующих управлений во времени пространственные каналы становятся динамическими. Качество многоантенной связи в этом случае можно оценивать средним квадратом невязки $\varepsilon^2 = M\{[y_\lambda(U_T, U_R) - s_0]^2\}$ между выходным сигналом динамического канала и опорным s_0 .

Неопределенность помеховой ситуации в среде передачи. При многоантенной связи в условиях неопределенности помеховой ситуации априорные сведения о направлениях воздействия и статистике помех и шумов в (3) отсутствуют и при этом могут существенно меняться в процессе связи. Это означает, что статистика и моменты распределений, например, корреляционная матрица $R_{YY} = M\{Y(U_T) Y^T(U_T)\}$

вектора наблюдений $Y(U_T)$ неизвестны априори. Поэтому использовать для оценивания качества многоантенной связи в этих условиях $\varepsilon^2 = M\{[y_\lambda(U_T, U_R) - s_0]^2\}$ не представляется возможным.

Однако в соответствии с развиваемым адаптивным подходом могут быть измерены реализации $Y(U_T)$ и по ним для заданного вектора управлений U_R определены соответствующие реализации функционала:

$$\varepsilon_t^2(U_T, U_R) = s_0^2 - 2s_0 Y^T(U_T) D_R U_R + U_R^T D_R^T Y(U_T) Y^T(U_T) D_R U_R. \quad (5)$$

Для удобства дальнейшего рассмотрения преобразуем (5) к более удобному виду:

$$\varepsilon_t^2(U_T, U_R) = s_0^2 - 2s_0 y_\lambda(U_T, U_R) + y_\lambda^2(U_T, U_R). \quad (6)$$

Реализация (6) допускает представление $\varepsilon_t^2(U_T, U_R) = \varepsilon_{1t}^2(U_T, U_R) + \varepsilon_{2t}^2(U_R)$. Введем матрицу $T_M = A_T V_T V_R^T A_R$ (здесь и далее аргументы у соответствующих векторов опущены), описывающую преобразования сигнала в среде передачи с учетом многоантенных передающей и приемных апертур. Тогда составляющая $\varepsilon_{1t}^2(U_T, U_R)$ характеризует искажения, обусловленные передачей сигнала через среду без учета помех и шумов и определяемые $(U_T^T D_T T_M D_R U_R x_\lambda - s_0)^2$, а составляющая $\varepsilon_{2t}^2(U_R)$ – искажения, обусловленные за счет внешних помех и шумов $U_R^T D_R^T (\sum_l A_l^T V_l j^l + \bar{n}) (\sum_l V_l^T A_l j^l + \bar{n}^T) D_R U_R$. В

этом случае оптимальные в смысле минимизации $\varepsilon_t^2(U_T, U_R)$ управления могут определяться из соответствующих условий: $M\{\varepsilon_{1t}^2(U_T, U_R)\} \rightarrow 0$ и $M\{\varepsilon_{2t}^2(U_R)\} \rightarrow 0$.

Методы оптимизации многоантенной связи в условиях неопределенности помеховых ситуаций. Воспользуемся хорошо разработанными вероятностными алгоритмическими методами оптимизации, оперирующими с реализациями функционалов, получаемых в ходе наблюдений, для которых определены условия вероятностной устойчивости и сходимости по вероятности, сходимости в среднеквадратическом и сходимости почти наверное [5]. Такие методы позволяют находить оптимальные решения на основе информации, получаемой в ходе самих наблюдений. Они являются теоретической базой для разработки методов и процедур адаптации (самонастройки) реальных систем к неизвестным заранее и изменяющимся условиям. В рассматриваемом случае для разработки методов адаптации многоантенной связи воспользуемся известными реализациями функционалов $\varepsilon_t^2(U_T, U_R)$, $\varepsilon_{1t}^2(U_T, U_R)$, $\varepsilon_{2t}^2(U_R)$ или их соответствующих градиентов.

Методы раздельной адаптации ММО передающей (приемной) антенной системы. Применяя данный подход к функционалу $\varepsilon_{1t}^2(U_T, U_R)$, получим метод адаптации управления произвольным пространственным каналом в ММО передающей антенной системе, который в случае непрерывного и дискретного времени будет определяться соответствующими процедурами:

$$dU_T(t)/dt = -2\mu(U_T^T(t) D_T T_M D_R U_R x_\lambda - s_0) D_T T_M D_R U_R x_\lambda, \quad (7)$$

$$U_T(k+1) = U_T(k) - 2\mu(U_T^T(k) D_T T_M D_R U_R x_\lambda - s_0) D_T T_M D_R U_R x_\lambda, \quad (8)$$

где μ – в общем случае матрица, удовлетворяющая условиям устойчивости для непрерывной и сходимости для дискретной процедур адаптации.

Реализация процедур (7) и (8) предполагает известной структуру и характеристики пространственных каналов используемых ММО антенных систем на передающей и приемной сторонах, матрицу T_M преобразований сигнала в среде передачи (канальную матрицу), а также реализации передаваемого и опорного сигналов.

Другая возможная разновидность процедур адаптации пространственных каналов имеет вид:

$$dU_T(t)/dt = -2\mu(y_\lambda(t) - s_0(t)) D_T T_M D_R U_R x_\lambda(t), \quad (9)$$

$$U_T(k+1) = U_T(k) - 2\mu(y_\lambda(k) - s_0(k)) D_T T_M D_R U_R x_\lambda(k). \quad (10)$$

В этом случае, как следует из (9) и (10), необходима информация о текущей невязке $y_\lambda(t) - s_0(t)$ в отсутствие помех, структуре и характеристиках пространственных каналов на передающей и приемной сторонах, канальной матрице и реализациях передаваемого и опорного сигналов.

Процедура адаптации управлений в ММО антенных системах может быть реализована на передающей или приемной стороне. Если процедура реализуется на приемной стороне, то необходима информация о передаваемых сигналах и канал связи для управления соответствующими пространственными

каналами на передающей стороне. Если процедура реализуется на передающей стороне, то необходим обратный канал связи для передачи информации о текущей невязке. В беспроводных телекоммуникациях такие каналы обычно имеются. Следуя процедурам (7) и (8), и полагая, что $s_0 = x_\lambda$ получим:

$$dU_T(t)/dt = -2\mu(U_T^T(t)D_T T_M D_R U_R - 1)D_T T_M D_R U_R P_{x_\lambda}, \quad (11)$$

$$U_T(k+1) = U_T(k) - 2\mu(U_T^T(k)D_T T_M D_R U_R - 1)D_T T_M D_R U_R P_{x_\lambda}, \quad (12)$$

где P_{x_λ} – средняя мощность сигнала на выходе передатчика соответствующего пространственного канала. При этом процедуры (11) и (12) реализуются на передающей стороне без использования обратного канала.

В условиях нестационарного пространственного положения источника сигнала матрица T_M в (11) и (12) будет изменяться. Поэтому адаптация должна производиться с учетом изменений указанной канальной матрицы. В ряде случаев эти изменения могут быть определены с помощью имеющихся на подвижных объектах навигационных измерителей.

Рассмотренные процедуры адаптации могут использоваться и в случаях, когда адаптация на приемной стороне по тем или иным соображениям не представляется возможной или целесообразной. Кроме этого существует ряд задач, когда адаптация на приемной стороне возможна, а на передающей стороне такая возможность отсутствует. В этом случае процедуры адаптации управлений на приемной стороне при использовании функционала $\varepsilon_l^2(U_T, U_R)$ оказываются аналогичными процедурам для передающей стороны при условии, что вектор $D_T T_M D_R U_R$ заменяется вектором $D_R^T T_M^T D_T^T U_T$.

Методы согласованной адаптации ММО передающей и приемной антенных систем. В случае, когда существует возможность адаптации на обеих сторонах, должны рассматриваться методы согласованной адаптации управлений соответствующими пространственными каналами в ММО передающих и приемных антенных системах. Следует заметить, что процедуры адаптации на приемной стороне, обеспечивающие экстремум функционала $\varepsilon_l^2(U_T, U_R)$, получены без учета помеховой ситуации. В реальных условиях неопределенность помеховой ситуации является основным фактором, обуславливающим необходимость адаптации пространственных каналов ММО антенных систем.

Общие методы адаптации могут быть получены на основе функционала $\varepsilon_l^2(U_T, U_R)$. Рассмотрим вектор сигналов $Y(U_T)$, действующих на выходе апертуры ММО приемной антенной системы. Представим функционал $\varepsilon_l^2(U_T, U_R)$ в виде:

$$\varepsilon_l^2(U_T, U_R) = s_0^2 - 2s_0 U_R^T D_R^T Y(U_T) + U_R^T D_R^T Y(U_T) Y^T(U_T) D_R U_R. \quad (13)$$

Учитывая (13), метод адаптации управлений пространственных каналов ММО приемной антенной системы в непрерывном времени будет определяться следующей процедурой:

$$dU_R(t)/dt = -2\mu'(D_R^T Y(t) Y^T(t) D_R U_R - s_0(t) D_R^T Y(t)). \quad (14)$$

Поскольку $Y^T(t) D_R U_R = y_\lambda(t)$, вместо (14) можно использовать процедуру вида:

$$dU_R(t)/dt = -2\mu'(y_\lambda(t) - s_0(t)) D_R^T Y(t). \quad (15)$$

В процедуре (15) выходной процесс $y_\lambda(t)$, в отличие от (9) и (10), соответствует случаю приема сигнала, помех и шумов. Определяя градиент (13) по вектору управлений U_T , получим метод и процедуру адаптации управлений пространственными каналами ММО передающей антенной системы в виде:

$$dU_T(t)/dt = -2\mu(y_\lambda(t) - s_0(t)) D_T T_M D_R U_R x_\lambda(t). \quad (16)$$

Матричные коэффициенты μ' и μ в процедурах (15) и (16) определяют устойчивость и скорость соответствующих процессов адаптации. Процедура (16) оказывается универсальной, поскольку позволяет осуществлять адаптацию управлений ММО передающей антенной системы в темпе передачи данных. В случае пауз в передаче данных процедура адаптации автоматически прерывается с сохранением текущих управлений. При этом (16) обеспечивает адаптацию ММО передающих антенных систем независимо от наличия или отсутствия помех в среде передачи. Для реализации процедуры (16) необходима информация о невязке $y_\lambda(t) - s_0(t)$, структуре пространственных каналов и характеристиках апертуры на передающей стороне, направлении связи и передаваемом сигнале. При этом процедуры адаптации ММО передающих и ММО приемных антенных систем оказываются связанными между собой.

Структурная схема адаптивной (самонастраиваемой) многоантенной связи на основе ММО передающих и ММО приемных антенных систем, реализующих методы совместной их адаптации к помеховой ситуационной неопределенности приведена на рис. 1.

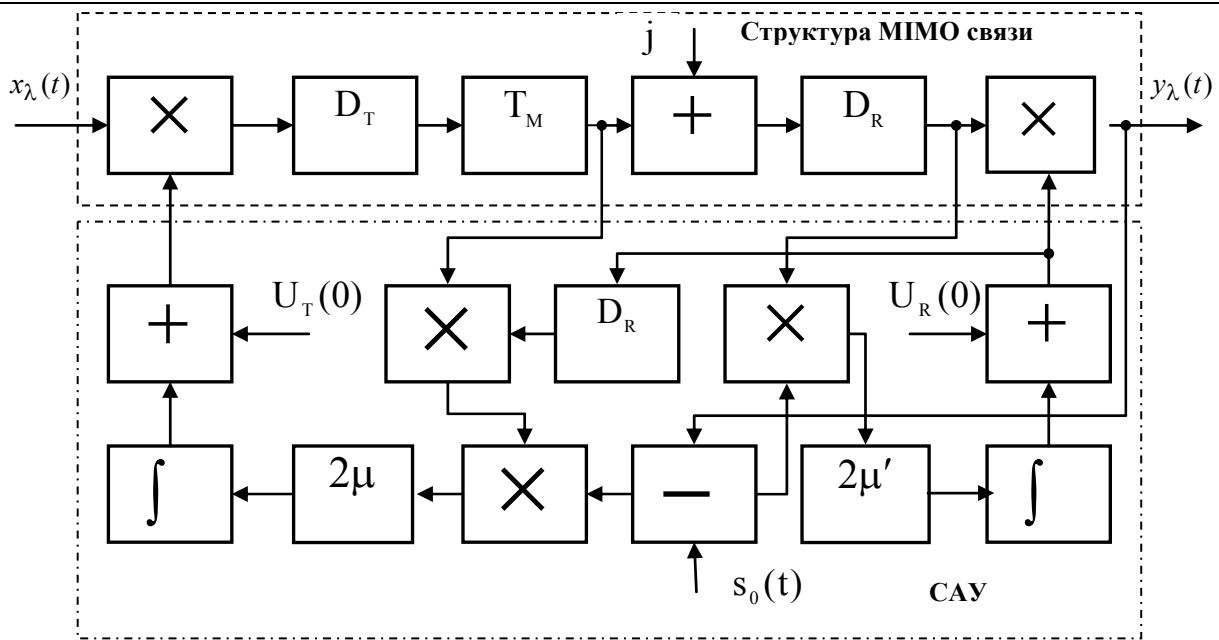


Рис. 1. Структура багатоантенної зв'язу на основі МІМО антенних систем і системи адаптації управлінь (САУ)

Случай подвижности источников и получателей информации. В условиях пространственной подвижности источников и получателей информации соответствующие каналные матрицы T_M оказываются нестационарными. В этом случае удобно рассматривать два независимых процесса. Первый из них характеризует нестационарную динамику матрицы $T_M(t')$ во времени t' , а второй – динамику процесса адаптации управлений в МІМО передающих и МІМО приемных антенных системах во времени t .

Тогда рассмотренные методы адаптации управлений на передающей и приемной сторонах для нестационарных условий можно представить в виде процедур:

$$dU_T(t)/dt = -2\mu(y_\lambda(t, t') - s_0(t))D_T T_M(t, t')D_R U_R(t)x_\lambda(t), \quad (17)$$

$$dU_R(t)/dt = -2\mu'(y_\lambda(t, t') - s_0(t))D_R^T Y(t, t'). \quad (18)$$

Такое представление позволяет рассматривать непрерывные процедуры отдельно во времени t' и t протекания соответствующих процессов. Так, например, адаптация может производиться в непрерывном времени t для отдельных выборок нестационарного процесса, взятых в дискретный момент t'_i или для непрерывной реализации при условии $t = t'$.

Возможна адаптация в дискретные моменты времени $t_k = \Delta tk$, где Δt является интервалом следования дискретных отсчетов, при условии непрерывности наблюдения нестационарного процесса. В этом случае процедуры адаптации представимы в виде:

$$U_T(k+1) = U_T(k) - 2\mu(y_\lambda(k, t') - s_0(k))D_T T_M(k, t')D_R U_R(k)x_\lambda(k), \quad (19)$$

$$U_R(k+1) = U_R(k) - 2\mu'(y_\lambda(k, t') - s_0(k))D_R^T Y(k, t'). \quad (20)$$

Соотношения (17)– (20) определяют общие процедуры метода согласованной адаптации управлений в МІМО передающих и МІМО приемных антенных системах в непрерывном и дискретном времени.

В общем случае возможности адаптации в соответствии с методами (17)– (20) в динамических условиях будут определяться соотношением скоростей изменения процессов, рассматриваемых в соответствующих временных измерениях. Для успешной адаптации необходимо, чтобы скорость процесса адаптации во времени t была выше скорости процесса нестационарных изменений во времени t' .

Заключение. Главным достоинством предложенных методов многоантенной связи является возможность создания «сквозных» интегрированных пространственно-временных структур формирования, излучения, приема и обработки информации. При этом появляется возможность реализации многофункциональной передачи в сочетании с динамическим управлением пространственно-временными характеристиками с целью их адаптации к ситуационной неопределенности и быстро изменяющейся электромагнитной обстановке, а также экономного использования частотного и энергетического ресурса в беспроводных телекоммуникациях.

Использование управляемых МІМО передающих и МІМО приемных антенных систем гарантирует совместимость новых «сквозных» интегрированных пространственно-временных технологий с уже существующими технологиями беспроводной передачи. В условиях ограниченного частотного ресурса и существенной «загрязненности» среды использование технологии интегрированных МІМО передающих и

приемных антенных структур может стать единственной возможностью решения проблемы обеспечения высокоскоростной и надежной передачи данных не только в системах беспроводного доступа, но и в системах и сетях связи с подвижными и высокоподвижными объектами.

Литература

1. Вишнеvский В. М. Энциклопедия WiMAX: путь к 4G / Вишнеvский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.
2. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / [Сюваткин В. С. и др.]; под ред. В. В. Крылова. – СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – 368 с.
3. Поспелов Б. Б. Реализация концепции адаптируемого канала связи в авиационных радиоперелиниях / Б. Б. Поспелов // Радиотехника. – 2002. – Вып. 128. – С. 197– 205.
4. Поспелов Б. Б. Комплексная оптимизация беспроводных каналов связи / Б. Б. Поспелов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010. – № 2. – С. 162– 167.
5. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Цыпкин Я. З. – М.: Наука, 1968. – 400 с.

Надійшла 21.11.2010 р.

УДК 621.317.73

В.В. МІШАН, Ю.М. БОЙКО
Хмельницький національний університет

ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНТРОЛЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ В CDMA МЕРЕЖАХ

Розглянуто особливості формування мереж стільникового зв'язку на основі технології CDMA. Описані переваги реалізації мереж на основі технології CDMA. Досліджені питання енергетичного контролю в мережах CDMA з метою ефективного регулювання переданої енергії базової і мобільної станції. Представлений алгоритм роботи логіки системної станції у випадку енергетичного контролю, приведені результати симуляції алгоритму тестування енергетичного контролю в середовищі Matlab.

In the article the conducted analysis and the features of realization of networks are considered on the basis of technology of CDMA. The considered advantages of realization of networks are with the help of technology of CDMA. Probed question of the effective adjusting by procedure of power control in CDMA networks, with the purpose of management and providing of the equivalent smoothing of distances power from mobile terminals to the base station in the conditions of action of hindrances. Presented results of simulation of algorithm of power control of logic of the system station.

Ключові слова: мережа, енергетичний контроль, трафік.

Вступ. В даний час доречно говорити про прорив на ринку телекомунікацій – розгортання нової мережі стільникового зв'язку на основі технології CDMA (Code Division Multiple Access). CDMA-система використовує для передачі даних складні (шумоподібні) широкосмугові цифрові сигнали. Цей перспективний напрямок в техніці прийому і передачі інформації – застосування шумоподібних сигналів (ШПС) – систематично вивчався російським професором Д. В. Агеевим ще в 30-х роках, а саме в 1935 р., пізніше була опублікована перша робота присвячена обробці складних сигналів – "Основи теорії лінійної селекції. Кодове розділення каналів". А уже в 1942 р. з'явилися роботи "Математична теорія зв'язку" Клода Шеннона і "Теорія потенційної завадостійкості" В.О. Котельникова. Шеннон і Котельников по суті створили наукову базу для розробки технології CDMA. 1956 р. – лабораторією Лінкольна Массачусетського технологічного інституту розроблена і випробувана в реальних умовах система телеграфного короткохвильового радіозв'язку "Rake" з розділенням променів і підсумовуванням їх енергій. Паралельно в нашій країні був створений радіолокатор з лінійно-частотною модуляцією. 1960 р. – в США випущена система зв'язку ARC-50, та система телефонного зв'язку з використанням ШПС RASER, що забезпечує зв'язок з рухомими наземними абонентами. У міру розвитку методів аналого-цифрового перетворення мовних сигналів з'явилися перші пропозиції використовувати ШПС в комерційних системах зв'язку. В цей же час фірмою "Motorola" запропонована широкосмугова система передачі мови з використанням дельта-функції. 70– 80 роки – в США активно впроваджувалися системи супутникового зв'язку, авіаційні, сухопутного рухомого зв'язку. Були створені такі супутникові системи як MIL-STAR для потреб стратегічного і тактичного зв'язку, FLEITSATCOM для потреб тактичного зв'язку. Кінець 80-х років – в США розгорнена перша супутникова система зв'язку комерційного призначення за технологією CDMA Omni TRACKS. 1991 р. – компанією "Qualcomm" розроблений проект стандарту IS-95. На сьогодні вже багато фахівців у сфері телекомунікацій вважають, що технологія стільникового зв'язку з кодовим розділенням каналів CDMA складе серйозну конкуренцію цифровим технологіям на базі технології часового ущільнення каналів TDMA [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. CDMA забезпечує істотне збільшення ємності мережі. Як і метод множинного доступу [1, 2], він має на увазі передачу голосової інформації тільки в