

М.М. Ластовченко, Е.А. Зубарева, В.О. Саченко

Метод анализа эффективности реконфигурации топологии построения беспроводных мультисервисных сетей повышенной помехозащищенности

Предложена реконфигурация топологии беспроводных мультисервисных сетей для повышения помехозащищенности. Обоснованы требования к интенсивности реконфигурации.

A topology reconfiguration on wireless multiservice networks for raising the protection from hindrances is suggested. The requirements to reconfiguration intensity are grounded.

Запропоновано реконфігурацію топології бездротових мультисервісних мереж для підвищення перешкодозахищеності. Обґрунтовано вимоги до інтенсивності реконфігурації.

Введение. В настоящее время актуальна проблема построения глобальных интеллектуальных сетей, обеспечивающих мультимедийный сервис (ММС) представления различных информационных услуг (ИУ) в любое время из любой точки информационного пространства [1, 2]. Транспортные платформы (ТП) таких сетей базируются на интеграции оптических (*ATM*, *DWDM*) и беспроводных (*WATM*, *WIMAX*) технологий [3, 4]. При этом необходимо обеспечение требуемого качества обслуживания *QoS* [5, 6]. Если оптические тракты передачи мультимедийного трафика (ММТ) сегодня удовлетворяют данному требованию, то даже наиболее перспективные широкополосные беспроводные мультисервисные сети (БМСС) на основе вышеуказанных технологий *WATM* и *WIMAX* заданному качеству обслуживания не соответствуют по причине низкого уровня помехозащищенности.

Создание и развитие широкополосных БМСС напрямую зависит от эффективности адаптивной реконфигурации диаграмм направленности антенн (ДНА) базовых станций (БС). Применение реконфигурации обеспечивает увеличение дальности связи, снижение уровня интерференции антенн, повышение помехозащищенности в каждой соте с одновременным увеличением пропускной способности сети для передачи ММТ [5–8].

Из обширного перечня задач, существующих в решении этой глобальной проблемы, в статье анализируется эффективность реконфигурации топологии БМСС для обеспечения ее помехозащищенности.

Цель проводимых исследований – обоснование требований к интенсивности реконфигурации сотовой топологии для обеспечения заданного уровня помехозащищенности сети (т.е. обоснование требований к связности БС) [9]. Для ее достижения рассматриваются четыре взаимосвязанных направления исследований:

- анализ формирования помехоустойчивых топологий для поддержания заданной связности БС в соте БМСС;
- анализ процесса деградации соты БМСС при недостаточном уровне ее помехозащищенности;
- метод анализа эффективности реконфигурации ДНА;
- обоснование требований к интенсивности реконфигурации ДНА, поддерживающей заданный уровень помехозащищенности.

Анализ формирования помехоустойчивых топологий БМСС за счет реконфигурации ДНА

Помехозащищенность соты характеризуется, в первую очередь, степенью *связи* БС с сотой, определяемой заданным числом линий

связи (ЛС) l_i (в виде ДНА, реализуемых цифровыми антенными решетками (ЦАР)) [9, 10].

Исходя из этого при формировании сотовых топологий (например, *WIMAX* – соты) главными условиями являются [7, 10–12]:

- обеспечение необходимой связности каждой БС как с другими БС соты, так и с БС БМСС в целом;
- обеспечение заданной интенсивности реконфигурации ДНА каждой БС в случае появления помех.

Для решения этих задач в статье анализируется помехозащищенное функционирование соты БМСС путем проведения эффективной реконфигурации ДНА.

Помехозащищенное функционирование каждой соты сети $P_{пф}(t, \Delta t)$ рассчитывается по формуле [10, 12]:

$$P_{пф}(t, \Delta t) = K_{пс} * e^{-\lambda_n \Delta t}, \quad (1)$$

где $P_{пф}(t, \Delta t)$ – вероятность помехозащищенного функционирования каждой соты, обеспечивающая заданную связность; $K_{пс}$ – коэффициент помехозащищенности соты в условиях передачи ММТ; λ_n – интенсивность помех.

Вероятность $K_{пс}$ определяется следующим образом:

$$K_{пс} = \frac{T_{пф}}{T_{пф} + T_{пр}}, \lambda_n = \frac{1}{T_{пф}}, \mu = \frac{1}{T_{пр}}, \quad (2)$$

где $T_{пф}$ – среднее время помехоустойчивого функционирования; $T_{пр}$ – среднее время простоя, связанное с реконфигурацией системы; μ – интенсивность реконфигурации ДНА.

Сотовые топологии БМСС определяются топологией каждой отдельно взятой соты. Из трех реализуемых в настоящее время вариантов топологии соты (четырёхгранговая, пятигранговая и шестигранговая) наибольшее применение получила сота с шестигранговой топологией (рис. 1) [6, 7].

Это объясняется тем, что данная топология в сравнении с остальными имеет большую степень связности (число ЛС между БС в соте). В работах [10, 12] приведены данные количественного анализа помехоустойчивости функ-

ционирования ЛС БМСС, но без учета реконфигурации ДНА для каждой топологии соты.

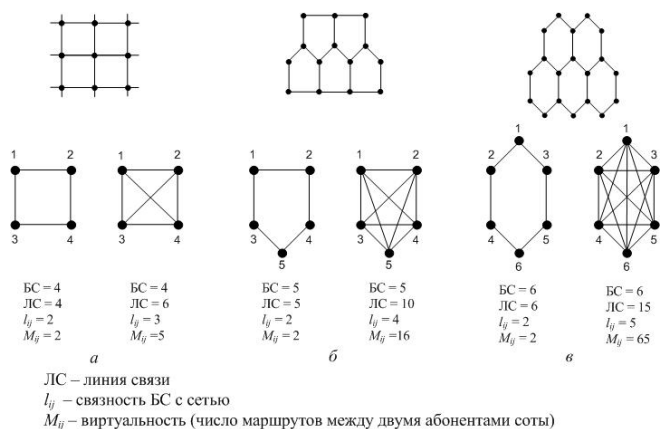


Рис. 1. Варианты топологии каждой соты сети (для случаев «кольцо» и «полная сетка»): а – четырехгранговая, б – пятигранговая, в – шестигранговая

Изменяя диаграммы направленности антенн каждой БС (рис. 2), можно формировать различные топологии соты, начиная от кольцевой и заканчивая топологией «полная сетка» [6, 7].

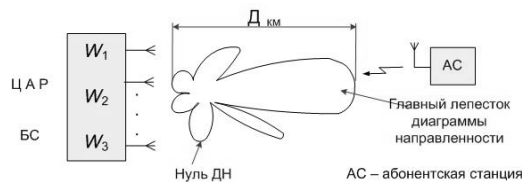


Рис. 2. Принцип ухода от помех с помощью управляемых нулей ДНА

В работах [6, 11] предложен алгоритм формирования ДНА с помощью ЦАР, установленных на БС соты с кодовым разделением каналов при наличии в зоне соты только общего пилот-сигнала. Для формирования такой многолучевой диаграммы, отдельные приемопередатчики антенны БС передают и принимают сигнал через ЦАР. При этом каждый элемент такой решетки в определенный момент имеет относительный фазовый сдвиг касательно остальных. В результате реконфигурации ДНА каждого излучателя в составе антенной решетки формируется интегральная диаграмма, имеющая улучшенные свойства – более узкий главный лепесток с более высоким коэффициентом усиления и, соответственно, помехозащищенности (рис. 2).

Алгоритм адаптивной реконфигурации ДНА и, соответственно, реконфигурации топологии соты основан на эвристическом анализе направления прихода сигнала, а также угловой области сигнала абонента. Кроме того, обеспечивает необходимую когерентность между общим пилот-сигналом БС и информационным сигналом, передаваемым абоненту. Компьютерное моделирование показало высокую эффективность предложенного алгоритма реконфигурации ДНА в случайные моменты появления мощных помех в режимах высокоскоростной передачи ММТ (в том числе при больших величинах угловой области сигнала) [6, 11].

Антенны, представляющие собой ЦАР, способны синтезировать узкий луч ДНА для каждого абонента в момент его обслуживания (приема–передачи тайм-слота). Применение данной технологии повышает мощность радиосигнала в *downlink* – канале на 12 dB (в *uplink* – канале на 6 dB), что позволяет увеличить дальность обслуживания абонентов на несколько километров, снизить уровень межканальной интерференции, а также повысить скорость передачи данных путем увеличения уровня модуляции, например с 16 QAM до 64 QAM [6, 7, 11].

В данном случае применяется ЦАР с коммутируемыми узкими лучами. Для достижения максимальной помехозащищенности необходимо изначально сформировать широкий луч (чтобы найти абонента), а затем «сузить» этот луч и провести сеанс связи. Применение многолучевых антенн позволяет одновременно обнаруживать и обслуживать множество абонентов. ЦАР данного типа, а также системы управления их реконфигурацией должны обеспечивать требуемую помехозащищенность соты [6, 11].

Анализ процесса деградации соты БМСС при недостаточном уровне ее помехозащищенности

Каналы беспроводной передачи в виде ДНА можно рассматривать как ЛС, соединяющие БС в беспроводной мультисервисной сети. При этом, если в соте для каждой БС рассматривать ДНА как многоканальные линии связи между БС, то помехоустойчивость каждой соты будет зави-

сеть как от интенсивности появления помех, так и от скорости реконфигурации ДНА. Интенсивность реконфигурации ДНА в этом случае должна быть значительно выше интенсивности появления помех. Если это требование не выполняется, то происходит процесс деградации соты.

На рис. 3 представлена пятиранговая ячеистая топология соты с основными параметрами, характеризующими ее структуру и процесс функционирования [10]. К главным параметрам соты относятся:

- матрица тяготения, определяющая передачу ММТ между конкретными БС (рис. 3,б);
- матрица связности, отображающая наличие ЛС (точнее ДНА) между БС на момент передачи ММТ (рис. 3,в);
- маршрутно-адресная таблица, показывающая основные и запасные маршруты передачи ММТ между базовыми станциями (рис. 3,г).

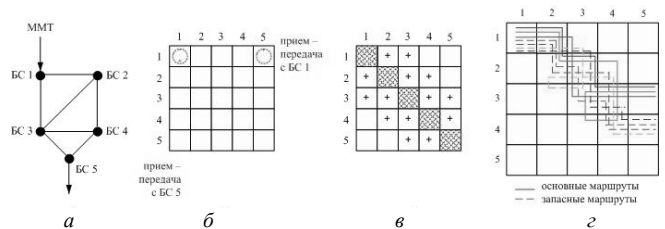


Рис. 3. Функциональная структура соты БМСС и ее параметры: а – топология, б – матрица тяготения, в – матрица связности, г – маршрутно-адресная таблица

Выделив два стохастических процесса, определяющих эффективность функционирования БМСС (поступление ММТ в различные моменты времени на разные БС и блокирование помехами ЛС между БС), можно применить следующее выражение для оценки эффективности функционирования соты $P_{эф}(t, \Delta t)$ [10]:

$$P_{эф}(t, \Delta t) = P_{пф}(t, \Delta t) * P_{эф}(t, \Delta t_{пер}), \quad (3)$$

где $P_{эф}(t, \Delta t)$ – вероятность эффективного функционирования соты; $P_{пф}(t, \Delta t)$ – вероятность помехозащищенного функционирования БС соты в течение времени Δt ; $P_{эф}(t, \Delta t_{пер})$ – вероятность эффективной передачи ММТ в течение времени $\Delta t_{пер}$.

$$P_{эф} = e^{-\frac{\Delta t}{T_{бн}}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{бп}}$ – среднее время безошибочной передачи.

Исходя из требований поддержания заданной помехозащищенности соты $P_{\text{пф}}(t, \Delta t)$, каждый раз после появления помех формируется новая топология соты, обеспечивающая необходимую связность БС и представленная в виде поля виртуальных каналов (ПВК) [11, 12]. При таком подходе можно дать оценку помехозащищенности с учетом обеспечения своевременности передачи ММТ (т.е. оценить эффективность функционирования соты). При этом степень связности l_{ij} каждой БС с сетью характеризует связность БМСС в целом. Например, если все БС соты имеют не менее двух связей с сетью ($l_{ij} \geq 2$), то считается, что такая сота находится в режиме нормального функционирования. Если же имеется базовая станция, у которой осталась только одна связь с сетью ($l_{ij} = 1$), то наступает режим критического функционирования.

Рассматривая появление помех и реконфигурацию каждой ДНА как не зависящие друг от друга процессы, а деградацию всей соты – как критический случай, возникший в процессе передачи ММТ, можно дать оценку всем состояниям помехоустойчивости соты; они делятся на события нормального, критического и ненормального функционирования. Располагая временем нахождения в каждом из этих состояний, можно определить вероятность помехоустойчивого функционирования по следующей формуле:

$$P_{\text{пф}}(t, \Delta t) = K_{\text{пс}}(t) * P_{\text{пн}}(\Delta t), \quad (5)$$

где $K_{\text{пс}}(t)$ – коэффициент помехозащищенности соты, т.е. вероятность застать соту в любой момент времени в состояниях с заданной связностью БС (например, $l_{ij} \geq 2$); $P_{\text{пн}}(\Delta t)$ – вероятность помехоустойчивой передачи ММТ в соте в течение времени Δt .

Рассматривая случай, когда $1 \ll \frac{\mu}{n\lambda}$, (n – число ДНА в соте, λ – интенсивность помех в каждой ДНА и μ – интенсивность реконфигурации ДНА), можно предположить, что $P_{\text{пн}}(\Delta t) \approx 1$. Тогда выражение (5) принимает вид $P_{\text{пф}}(t, \Delta t) \approx$

$\approx K_{\text{пс}}(t)$. Сущность процесса деградации соты, т.е. потери ее помехоустойчивости, можно рассмотреть на следующем примере. На рис. 4 в виде графов переходов представлены две базовые формальные модели для соты БМСС: поярусная (а), «гибели и размножения» (б) [10, 13].

Ярусы – это состояния помехоустойчивости соты, объединенные в соответствующие группы по признаку блокируемых помехами ДНА, уменьшающих для каждой БС количество связей с сетью l_{ij} [10].

В комбинаторике C_n^m (число сочетаний из n элементов по m) определяется по формуле [14]:

$$C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!m!}, \quad (6)$$

где n – общее число линий связи в соте; m – число отказавших линий связи на k -м ярусе.

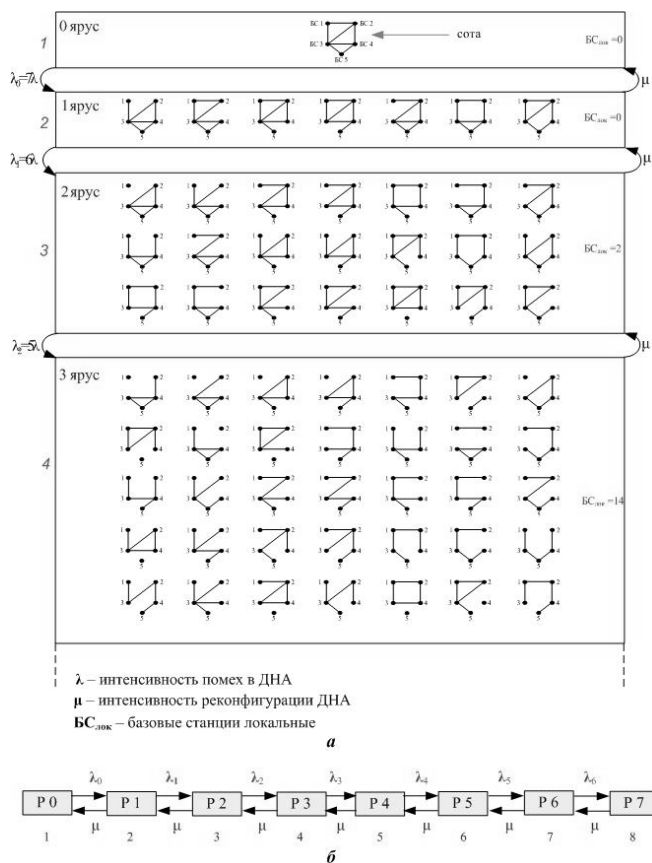


Рис. 4. Формальные модели процесса функционирования соты с учетом помехоустойчивой передачи: а – поярусная, б – «гибели и размножения»

На нулевом ярусе все диаграммы направленности БС помехоустойчивы (т.е. имеют од-

но состояние помехоустойчивости $C_7^0 = 1$, $l_{ij} \geq 2$ для каждой ДНА БС).

Первый ярус – блокирована помехами одна ДНА, а остальные помехоустойчивы (число состояний $C_7^1 = 7$, связность $\min l_{ij} \geq 1$). Это режим нормальной помехоустойчивости.

Второй ярус – блокированы помехами две ДНА (число состояний $C_7^2 = 21$, из них 19 состояний соответствуют условию $\min l_{ij} \geq 1$, а две БС стали локальными. Это режим критического функционирования с точки зрения обеспечения связности, так как есть БС, у которых $\min l_{ij} = 0$, хотя вероятность локализации БС относительно мала ($P_{лок} = 0,095$).

Третий ярус – блокировано три ДНА (число состояний $C_7^3 = 35$, из них два состояния не представляют собой целостной соты (являются кусочными), а 12 БС стали локальными со связностью $\min l_{ij} = 0$). Для данного яруса коэффициент связности $K_{св}$ (при $l_{ij} \geq 1$) можно рассчитать по формуле [10, 15]:

$$K_{св}^{l \geq 1} = \frac{M_{я} - M_{лок}}{M_{я}} = \frac{35 - 14}{35} = 0,6, \quad (7)$$

где $M_{я}$ – общее число состояний яруса; $M_{лок}$ – число состояний на ярусе с локальными БС или состояний, которые не являются целостной сотой.

Соответственно, коэффициент потери связности третьего яруса $K_{нсв}^{l \geq 1}$ будет равен:

$$K_{нсв}^{l \geq 1} = \frac{M_{лок}}{M_{я}} = \frac{14}{35} = 0,4. \quad (8)$$

Таким образом, на третьем ярусе вероятность локализации БС составляет $P_{лок} = 0,4$. Это режим ненормального функционирования соты, т.е. срыв передачи ММТ.

Метод анализа эффективности реконфигурации ДНА

Вероятность нахождения соты в определенном i -м состоянии P_{k_i} k -го яруса характеризуется моделью «гибели и размножения» (рис. 4,б)

и определяется в соответствии с системой уравнений Колмогорова–Чепмена [13].

Для повышения помехозащищенности соты БМСС анализу эффективности реконфигурации ДНА отводится существенная роль. В настоящее время можно рассматривать два метода анализа эффективности реконфигурации.

Первый заключается в том, что по данным «быстрого» мониторинга числа блокируемых помехами ЛС оценивается помехозащищенность соты с учетом только помехоустойчивых ярусов (т.е. ярусов, любое состояние которых представляет собой целостную соту без локализации БС). Другими словами, определяется вероятность работы соты БМСС в режиме нормального функционирования. Если в результате анализа выясняется, что готовность соты ниже требуемого уровня помехозащищенности, то сразу увеличивается интенсивность реконфигурации.

Основа второго метода – анализ данных «детального» мониторинга по всем ярусам деградации соты. В этом случае коэффициент помехозащищенности соты – сумма вероятностей нахождения соты во всех P_{k_i} состояниях ярусов, где выполняется условие $l_{ij} \geq l_{мп}$, и эти состояния представляют собой целостную соту (т.е. не являются кусочными).

Рассмотрим методы анализа реконфигурации ДНА на примере соты с пятианговой ячеистой топологией (рис. 4,а).

Коэффициент помехозащищенности соты $K_{нс}$ для режима нормального функционирования (когда на каждом ярусе нет ни одного состояния с локальными БС, т.е. выполняется условие $l_{ij} \geq l_{мп}$) определяется вероятностью нахождения соты в области помехоустойчивых состояний и оценивается следующим выражением [10, 15]:

$$K_{нс}^{l \geq l_{мп}} = \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{i=1}^{M_k} P_{k_i}, \quad (9)$$

где P_{k_i} – вероятность нахождения соты в i -м состоянии k -го яруса; k – номер яруса с удовлетворяющими требованию связности $l_{ij} \geq l_{мп}$ состояниями P_{k_i} ; M_k – общее число состояний k -го

яруса; m – число ярусов с состояниями, удовлетворяющими заданному критерию ($l_{ij} \geq l_{mp}$).

Предположив, что ДНА одноплетные, одинаково блокируются помехами с интенсивностью λ_n и обладают одинаковой для всех ДНА интенсивностью реконфигурации μ_p , можно рассчитать вероятности нахождения сети в состояниях помехоустойчивости P_k отдельно для каждого яруса в соответствии с системой уравнений Колмогорова–Чепмена (рис. 4,б) с учетом нормирующего условия:

$$\sum_{k=0}^{n-1} P_k = 1, \quad (10)$$

где n – общее число ярусов.

Тогда, подставляя вычисленные вероятности P_k в формулу (9), получим коэффициенты помехоустойчивости соты $K_{пс}$ для заданного критерия связности БС в соте $l_{ij} \geq l_{mp}$.

Из рассмотренного выше примера коэффициент помехозащищенности соты для режима нормальной помехоустойчивости при условии $l_{ij} \geq 1$ будет равен сумме вероятностей нулевого и первого ярусов $K_{пс} = P_0 + P_1$ (второй ярус мы уже не учитываем, так как на нем есть два состояния с локальными БС).

При использовании метода «детального» мониторинга для вычисления $K_{пс}$ выражение (9) принимает следующий вид:

$$K_{пс} = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{i=1}^{M_k} P_{k_i}, \quad (11)$$

где P_{k_i} – вероятность нахождения соты в i -м состоянии каждого k -го яруса; k – номер яруса с состояниями P_{k_i} ; M_k – общее число состояний k -го яруса; n – общее число ярусов.

Обоснование требований к интенсивности реконфигурации ДНА, поддерживающей заданный уровень помехозащищенности

Для обоснования требований к реконфигурации ДНА необходимо провести анализ процесса функционирования соты БМСС [6].

В качестве примера для анализа эффективности реконфигурации ДНА по методу «детального» мониторинга рассмотрим две самые простые топологии соты БМСС (рис. 1,а и 1,б):

- четырехгранговая топология (кольцевая и ячеистая);
- пятигранговая топология (кольцевая и ячеистая).

Интенсивность появления помех λ_n , а также интенсивность реконфигурации ДНА μ_p – базовые параметры, характеризующие помехозащищенность каждой БС рассматриваемых топологий соты.

На рис. 5 приведены результаты анализа эффективности реконфигурации топологий в виде графиков зависимости коэффициента помехозащищенности соты $K_{пс}$ от интенсивности появления помех в зоне соты с четырехгранговой топологией при двух заданных критериях связности $l_{ij} \geq 1$ и $l_{ij} \geq 2$.

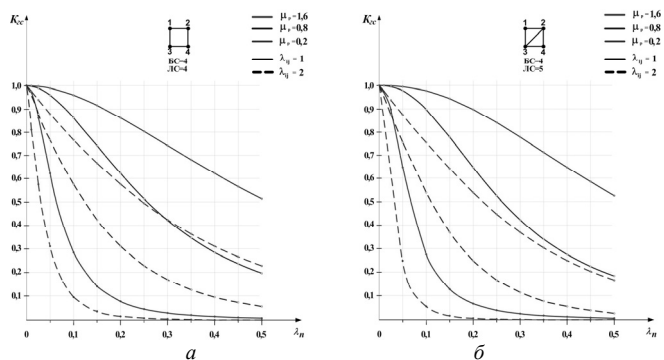


Рис. 5. Зависимость помехозащищенности соты с четырехгранговой топологией от интенсивности появления помех для трех режимов реконфигурации $\mu_p = 0,2$; $\mu_p = 0,8$; $\mu_p = 1,6$ и двух критериев связности БС $l_{ij} \geq 1$ и $l_{ij} \geq 2$: а – кольцевая топология, б – ячеистая топология

Проанализировав графики (рис. 5,а), можно сделать вывод о том, что помехоустойчивость сети всецело зависит от интенсивности реконфигурации ДНА, обеспечивающей необходимую помехозащищенность (например, для случая $K_{пс} \geq 0,95$) при должной связности $l_{ij} \geq 1$ в пределах относительно малой интенсивности помех при $\lambda_n = 0 \div 0,11$.

При повышении степени связности БС соты (рис. 5,б) и том же значении $\mu_p = 1,6$ для условия $l_{ij} = 1$ удается поддержать помехозащищенность соты уже для больших значений интенсивности помех до $\lambda_n = 0,14$.

Критический анализ влияния повышенной интенсивности реконфигурации диаграмм на

правленности антенн на соты с ячеистой топологией (рис. 5,б) позволяет выделить еще один фактор повышения помехозащищенности соты – это степень ее связности l_{ij} :

- число ЛС = 4 (рис. 5,а);
- число ЛС = 5 (рис. 5,б).

Данные сравнительного анализа помехозащищенности соты для рассматриваемых случаев при прочих равных условиях приведены в табл. 1.

Аналогичные результаты получены для анализа помехозащищенности соты с пятигранговой топологией для двух критериев связности $l_{ij} \geq 1$, $l_{ij} \geq 2$ (рис. 6).

Таблица 1. Диапазоны допустимых помех при $K_{пс} \geq 0,95$ для режимов реконфигурации ДНА соты с четырехгранговой топологией (кольцевая и ячеистая)

Топология соты		Диапазон допустимой интенсивности помех для $\mu_p = 1,6$	Диапазон допустимой интенсивности помех для $\mu_p = 0,8$	Диапазон допустимой интенсивности помех для $\mu_p = 0,2$
Кольцевая	$l_{ij} = 1$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,11$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,065$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,08$
	$l_{ij} = 2$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,015$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,012$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,0025$
Ячеистая	$l_{ij} = 1$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,14$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,075$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,10$
	$l_{ij} = 2$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,02$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,015$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,003$

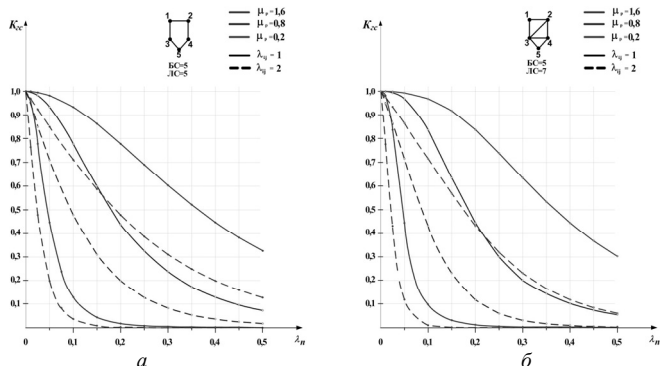


Рис. 6. Зависимость помехозащищенности соты с пятигранговой топологией от интенсивности появления помех для трех режимов реконфигурации $\mu_p = 0,2$; $\mu_p = 0,8$; $\mu_p = 1,6$ и двух критериев связности БС $l_{ij} \geq 1$, $l_{ij} \geq 2$: а – кольцевая топология, б – ячеистая

Результаты сравнительного анализа помехозащищенности БС соты с пятигранговой топологией (кольцевая и ячеистая) при равных условиях приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 позволяет сделать вывод о том, что наибольший диапазон допустимой интенсивности помех обеспечивается при

более высокой интенсивности реконфигурации диаграмм направленности антенн базовых станций и минимально допустимой связности.

Таблица 2. Диапазоны допустимых помех при $K_{пс} \geq 0,95$ для режимов реконфигурации ДНА соты с пятигранговой топологией (кольцевая и ячеистая)

Топология соты		Диапазон допустимой интенсивности помех для $\mu_p = 1,6$	Диапазон допустимой интенсивности помех для $\mu_p = 0,8$	Диапазон допустимой интенсивности помех для $\mu_p = 0,2$
Кольцевая	$l_{ij} = 1$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,085$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,045$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,011$
	$l_{ij} = 2$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,017$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,01$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,018$
Ячеистая	$l_{ij} = 1$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,12$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,058$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,015$
	$l_{ij} = 2$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,02$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,012$	$\lambda_{п1} = 0 \div 0,02$

Для сравнения эффективности введения многогранговых топологий соты с повышенной связностью (ячеистые топологии) в табл. 3 представлены результаты анализа $K_{пс} = f(\mu_p^{max}, l_{ij}^{min})$ для четырех- и пятигранговой топологии.

Таблица 3. Сравнительный анализ коэффициентов помехозащищенности $K_{пс}$ соты с ячеистой топологией (четырёхгранговая и пятигранговая)

Топология соты		$K_{пс}$ при интенсивности помех $\lambda_{п1} \leq 0,025$
Четырёхгранговая	$l_{ij} = 1$	$K_{пс} = 0,9986$
	$l_{ij} = 2$	$K_{пс} = 0,9344$
Пятигранговая	$l_{ij} = 1$	$K_{пс} = 0,9987$
	$l_{ij} = 2$	$K_{пс} = 0,9347$

В табл. 3 показано, что пятигранговая ячеистая топология при относительно малых значениях интенсивности помех $\lambda_{п1} \leq 0,025$ обеспечивает лучший коэффициент помехозащищенности $K_{пс}$ для связности $l_{ij} = 1$ и $l_{ij} = 2$. Из вышесказанного следует – пятигранговая топология соты лучше четырёхгранговой.

По такой же методике может быть проведен анализ процесса помехозащищенности соты с шестигранговой топологией. В этом случае высокая интенсивность появления помех $\lambda_{п1}$ будет снижать помехозащищенность БС быстрее, но с учетом более эффективной связности и увеличения интенсивности реконфигурации ДНА μ_p общая помехозащищенность соты (как число БС с повышенной связностью) возрастет.

Анализируя графики (рис. 5 и 6) можно сделать вывод о том, что эффективная реконфигурация позволяет обеспечить помехозащищен-

ность соты для заданных критериев связности l_{ij} благодаря подбору наиболее рациональных топологий соты. При этом учитываются требования к интенсивности реконфигурации ($\mu_p \geq \mu_{\text{задан}}$). Кроме того, на реконфигурацию существенно влияют требования к связности БС: более высокую связность $l_{ij} \geq 2$ поддержать намного сложнее. Следовательно, готовность соты в этом случае также значительно снижается. Поэтому, задавая l_{ij} , необходимо исходить из режима передачи ММТ, оставляя возможность поддержания $l_{ij} = 1$.

Таким образом, проведенный анализ свидетельствует о том, что в рассматриваемых условиях функционирования наилучшая топология – пятиранговая ячеистая, так как чем больше ЛС, тем выше степень связности, и соответственно, помехозащищенность соты.

Заключение. Метод анализа позволяет обосновать требования к базовому процессу функционирования БМСС – процессу реконфигурации ДНА соты. Введение методов анализа эффективности реконфигурации сотовых топологий для повышения помехозащищенности является сегодня наиболее важным аспектом в этой проблеме. Их применение в зависимости от конкретных условий передачи ММТ позволит в дальнейшем обеспечить режимы коллегиального управления территориально-распределенными объектами в реальном масштабе времени для подвижных командных пунктов.

1. *The Next Generation Networks Laboratories (NGN-LAB)* // Belgium EC. – 2002. – P. 51–56.
2. *Standart ITU-T: Y 2001 (12/ 2004). General overview at NGN* // Belgium EC – 2002. – 82 p.
3. *A control system for distributed process of reconfiguration of heterogeneous networks* / M.M. Lastovchenko, A.E. Doroshenko G.E. Yegipko et al. // III ISTC «Prob. Dis. Telecom. Net», 1997. – P. 84 – 90.

4. *Cherry S. The Wireless Last Mile* // IEEE Spectrum. – 2003. – P. 12–23.
5. *Жуков И.А., Ластовченко М.М., Искренко Ю.Ю.* Анализ процессов адаптивной коррекции радиоспектра при передаче мультимедийного трафика шумоподобными сигналами // Проблемы информатизації та управління. – 2008. – № 2 (24). – С. 57–64.
6. *Широкополосные беспроводные сети передачи информации* / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной и др. – М.: Техносфера. – 2005. – 592 с.
7. *Andrews G., Chosh A., Muhamed R. Fundamentals of WIMAX* // Understanding broadband Wireless Networking. – 2004. – 712 p.
8. *Безвершченко Е.В., Зубарева Е.А., Шевцова Е.В.* Интеллектуальные технологии моделирования процессов передачи мультимедийного трафика // Проблемы информатизації та управління. – 2008. – № 2 (24). – С. 18–23.
9. *Зубарева О.О.* Аналіз реконфігурації топології бездротових мереж для підвищення їх перешкодозахищеності // Міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерні системи та мережні технології». Тези доповідей. 10–12 черв. 2009 р. – С. 42.
10. *Ластовченко М.М., Русецкий В.Е.* Введение критериев интегрального оценивания в системный анализ надежности функционирования широкополосной сети связи // УСИМ. – 2005. – № 2. – С. 86–95.
11. *Principles of Communication System Simulation with Wireless Applications* / W.H. Tranter, K.S. Shanmugam, T.S. Rappaport et al. // Prentice Hall. – 2002. – 116 p.
12. *Ластовченко М.М., Русецкий В.Е., Ярошенко В.Н.* Системный анализ эффективности функционирования широкополосных транспортных платформ интеллектуальных сетей // Математичні машини і системи. – 2006. – № 1. – С. 28–39.
13. *Вентцель Е.С.* Введение в исследование операций. – М.: Сов. радио, 1964. – 388 с.
14. *Баврин И.И., Матросов В.Л.* Краткий курс теории вероятностей и математическая статистика. – М.: Прометей, 1989. – 136 с.
15. *Ченцов В.М.* Системы распределения информации. Синтез структуры и управления. – М.: Связь, 1980. – 144 с.

Поступила 02.03.2009

Тел. для справок: (044) 526-1175, 440-4343 (Киев)

© М.М. Ластовченко, Е.А. Зубарева, В.О. Саченко, 2009