

М.М. Ластовченко, Е.А. Зубарева, Н.Ю. Шевченко

Алгоритм поярусного отбора критических состояний в процессе деградации соты беспроводной мультисервисной сети для оценки ее помехоустойчивости

Рассмотрен метод количественного анализа эффективности реконфигурации топологии соты. Дана оценка помехоустойчивости соты и обоснованы требования к процессу реконфигурации ее топологии.

A method of the quantitative analysis of the efficiency of the reconfiguration of a cell topology is considered. The estimation of anti-interference of the cell is given and the requirements to the reconfiguration topology process are grounded.

Розглянуто метод кількісного аналізу ефективності реконфігурації топології стільника. Надано оцінку перешкодостійкості стільника та обґрунтовано вимоги до процесу реконфігурації його топології.

Введение. На современном этапе интенсивного развития и внедрения широкополосных беспроводных мультисервисных сетей (БМСС) самые перспективные – сети, реализуемые в рамках стандарта 802.16 технологии *WIMAX* [1–3]. Проблема анализа помехоустойчивости функционирования данных сетей играет важную роль при их разработке. Решение задач анализа на первых стадиях проектирования беспроводных сетей позволит существенно снизить затраты на проведение полунатурных испытаний на последующих этапах [4, 5].

В связи с этим задача разработки программного модуля моделирования (ПММ), обеспечивающего количественный анализ эффективности реконфигурации топологии соты БМСС для поддержания заданного уровня помехоустойчивости, является актуальной.

Постановка задачи

Цель статьи – создание ПММ, который в рамках разработанной аналитической модели обеспечивал бы количественный анализ помехоустойчивости БМСС с учетом следующих параметров [6, 7]:

- интенсивности снижения помехоустойчивости линий связи (ЛС) между базовыми станциями (БС) соты λ_n ; (т. е. уменьшения главного лепестка диаграммы направленности антенн (ДНА));

- интенсивности коррекции топологии с использованием реконфигурации ДНА μ_p ;

- заданной степени связности БС с сотой $l \geq l_{mp}$.

Вначале необходимо провести анализ причин, приводящих к снижению помехоустойчивости сети. В радиотехнике помехоустойчивость характеризуется соотношением мощности передаваемых сигналов S к мощности помех (шумов) N [7–9]:

$$K_n \approx \frac{S}{N}. \quad (1)$$

На основании этого критерия можно выделить две основные причины потери помехоустойчивости:

- снижение мощности сигнала S и увеличение мощности шума (помех) N ;

- отказы различных компонент приемопередающих трактов цифровых антенных решеток (ЦАР). В этом случае ДНА деформируется (главный лепесток меняет форму и появляются лишние боковые лепестки), соответственно снижается дальность передачи. Это явление приводит к появлению так называемых *внутренних помех* – основного фактора снижения помехоустойчивости БМСС при отсутствии метео- и электромагнитных помех [7].

Для восстановления необходимой конфигурации ДНА используются резервные компоненты трактов ЦАР (при необходимости с дополнительным расширением спектра сигналов) [9].

Определяющее условие поддержания заданной помехоустойчивости – обеспечение необходимой связности БС с сотой БМСС за счет быстрого восстановления конфигурации ДНА. Другими словами, необходимо, чтобы интенсивность «распада» ДНА была ниже интенсивности ее восстановления [6].

В работах [10, 11] в качестве критерия надежности применялся коэффициент готовности сети $K_{гс}$, определяющий вероятность заставить сеть в работоспособном состоянии при поддержании заданной связности узлов коммутации (УК) с сетью при наличии необходимого числа ЛС. В отличие от вышеуказанных работ в данной статье в качестве критерия помехоустойчивости выбран коэффициент помехоустойчивости соты $K_{пс}$ – вероятность заставить соту в любой момент времени в состоянии с заданной связностью БС с сотой $l \geq l_{mp}$ (т.е. способность соты функционировать в заданных режимах помехоустойчивости) [6].

Анализ процесса деградации пятиранговой топологии соты БМСС при недостаточном уровне ее помехоустойчивости был проведен в [6]. Однако там не затрагивался вопрос об инструментари (ПММ) процесса функционирования соты. Поэтому в статье рассматривается практическая реализация модели, предложенной в [6]. Кроме того, проведен сравнительный анализ процессов деградации пяти- и шестиранговой соты. Результаты этого анализа позволяют обосновать выбор наиболее помехоустойчивой топологии как базовой основы для построения БМСС [5].

Для достижения поставленной цели рассматриваются три взаимосвязанных направления исследований:

- построение формальной модели процесса деградации соты с шестиранговой топологией;
- формирование алгоритма для ПММ с выделением циклов поярусного отбора критических состояний в процессе деградации соты;
- моделирование процесса функционирования соты в условиях недостаточной помехоустойчивости.

Формальная модель процесса деградации соты с шестиранговой топологией

В качестве ЛС, соединяющих БС с беспроводной мультисервисной сетью, рассматриваются ДНА. Помехоустойчивость каждой отдельной соты зависит как от интенсивности появления помех (в работе рассматриваются только внутренние помехи), так и от интенсивности

реконфигурации ДНА. В этом случае указанный параметр должен быть значительно выше интенсивности появления внутренних помех. Если это требование не выполняется, то происходит процесс полной деградации соты [6].

Под *вероятностью эффективного функционирования соты* будем понимать вероятность заставить соту в работоспособном состоянии (с заданным числом связей БС с сотой), т.е. сота должна быть целой, а не распадаться на отдельные сегменты [6].

Выделив два стохастических процесса, (поступление мультимедийного трафика (ММТ) в различные моменты времени на разные БС и блокирование внутренними помехами ЛС между БС), можно использовать следующее выражение для оценки эффективности функционирования соты $P_{эф}(t, \Delta t)$ [10–12]:

$$P_{эф}(t, \Delta t) = P_{пф}(t, \Delta t) * P_{эф}(t, \Delta t_{пер}), \quad (2)$$

где $P_{эф}(t, \Delta t)$ – вероятность эффективного функционирования соты; $P_{пф}(t, \Delta t)$ – вероятность помехоустойчивого (безошибочного) функционирования БС соты в течение времени Δt ; $P_{эф}(t, \Delta t_{пер})$ – вероятность передачи ММТ с заданным качеством обслуживания в течение времени $\Delta t_{пер}$.

$$P_{эф} = e^{-\frac{\Delta t}{T_{бп}}}, \quad (3)$$

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

Исходя из требований поддержания заданной помехоустойчивости функционирования соты $P_{пф}(t, \Delta t)$, каждый раз после возникновения внутренних помех формируется новая топология соты, обеспечивающая необходимую связность БС. При таком подходе можно дать оценку помехоустойчивости с учетом обеспечения своевременности передачи ММТ (т.е. оценить эффективность функционирования соты при передаче ММТ) [13, 14]. При этом степень связности l каждой БС с сотой характеризует связность БМСС в целом. Например, если все БС каждой соты имеют не менее двух связей с сотой ($l \geq 2$), то считается, что такая сота находится в режиме нормального функционирования.

ния. Если же имеется БС, у которой осталась только одна связь с сотой ($l = 1$), то наступает режим критического функционирования.

Считая появление внутренних помех и реконфигурацию каждой ДНА как не зависящие друг от друга процессы, а деградацию 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 соты, используя следующую формулу [10, 11]:

$$P_{\text{пф}}(t, \Delta t) = K_{\text{пс}}(t) * P_{\text{пн}}(\Delta t), \quad (4)$$

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

Рассматривая случай, когда $1 \ll \frac{\mu_p}{n\lambda_n}$, (n –

число ДНА в соте, λ_n – интенсивность появления внутренних помех в каждой ДНА и μ_p – интенсивность реконфигурации ДНА), можно предположить, что $P_{\text{пн}}(\Delta t) \approx 1$. Тогда выражение (4) принимает вид:

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

Сущность процесса деградации (потери помехоустойчивости) рассматривается на примере соты с шестиранговой топологией и девятью ДНА, выступающих в роли ЛС соты. На рис. 1 в виде графов переходов представлены две базовые формальные модели деградации соты БМСС: поярусная (а) [10, 15], «гибели и размножения» (б) [12].

Ярусы – это состояния помехоустойчивости соты, которые объединены в соответствующие группы по признаку блокируемых внутренними помехами ДНА, уменьшающих для каждой БС количество связей с сотой [10].

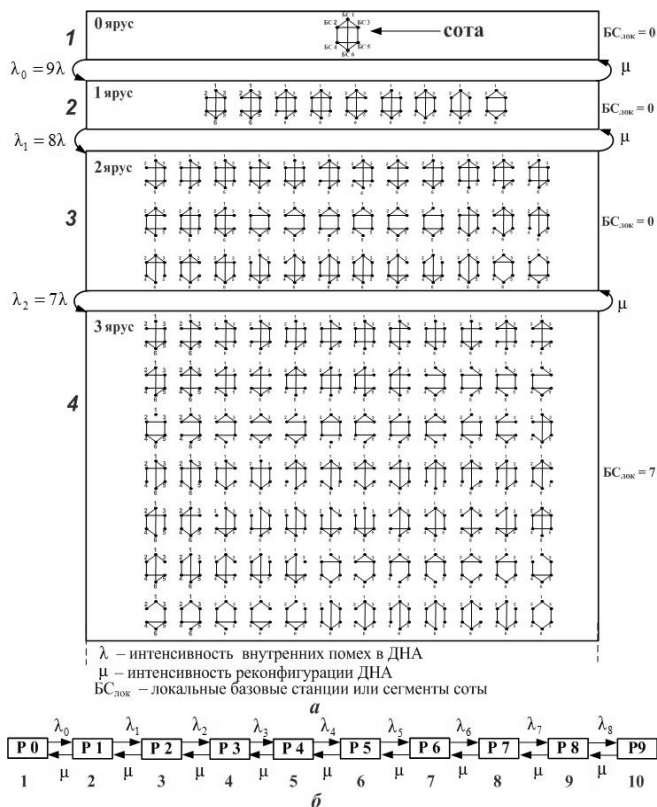


Рис. 1. Формальные модели процесса функционирования шестиранговой соты с учетом недостаточной помехоустойчивости при передаче ММТ: а – поярусная, б – «гибели и размножения»

В комбинаторике C_n^m (число сочетаний из n элементов по m) определяется по формуле [16]:

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

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

На нулевом ярусе все диаграммы направленности БС помехоустойчивы (т.е. имеют одно состояние помехоустойчивости $C_9^0 = 1$, $\min l \geq 2$, для каждой ДНА).

На первом ярусе все ДНА помехоустойчивы ($C_9^1 = 1$, связность $\min l \geq 2$). Это режим нормальной помехоустойчивости.

У второго яруса, так же как и у предыдущих, все ДНА являются помехоустойчивыми (число состояний $C_9^2 = 36$ при связности $\min l \geq 1$). Это режим нормального функционирования соты.

Третий ярус – заблокировано семь ДНА (число состояний $C_9^3 = 84$, из них одно состояние представляет собой отдельные сегменты соты, а шесть БС стали локальными с минимальной связностью $l = 0$). Для данного яруса коэффициент связности $K_{с\grave{я}}$ (при $\min l \geq 1$) можно рассчитать по формуле [10]:

$$K_{с\grave{я}}^{l \geq 1} = \frac{M_{\text{я}} - M_{\text{лок}}}{M_{\text{я}}} = \frac{84 - 7}{84} = 0,917, \quad (7)$$

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

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

$$K_{пс\grave{я}}^{l \geq 1} = \frac{M_{\text{лок}}}{M_{\text{я}}} = \frac{7}{84} = 0,083. \quad (8)$$

Это режим критического функционирования с точки зрения обеспечения связности, так как существуют БС, у которых минимальная связность $l = 0$, хотя вероятность локализации БС относительно мала ($P_{\text{лок}} = 0,083$).

Четвертый ярус – заблокировано пятьдесят две ДН (число состояний $C_9^4 = 126$, из них шестнадцать состояний не являются целостной сотой, а тридцать шесть БС стали локальными с минимальной связностью $l = 0$). Для данного яруса коэффициент связности $K_{с\grave{я}}$ (при $l \geq 1$)

будет равен $K_{с\grave{я}}^{l \geq 1} = \frac{126 - 52}{126} = 0,587$. Соответственно, коэффициент потери связности этого

яруса $K_{пс\grave{я}}^{l \geq 1}$ составит: $K_{пс\grave{я}}^{l \geq 1} = \frac{52}{126} = 0,413$. Таким

образом, на четвертом ярусе вероятность локализации БС составляет $P_{\text{лок}} = 0,413$. Это режим ненормального функционирования соты, т.е. срыв передачи ММТ.

Алгоритм поярусного отбора критических состояний в процессе деградации соты беспроводной мультисервисной сети

Вторая задача исследований – формирование алгоритма поярусного отбора критических состояний, который служит основой разрабатываемого программного модуля моделирова-

ния процесса функционирования соты для анализа ее помехоустойчивости.

В основу алгоритма поярусного отбора положен принцип циклического формирования значений $K_{пс}$ для получения графика зависимости коэффициента помехоустойчивости соты от интенсивности внутренних помех [17, 18]. Анализ помехоустойчивости соты проводится с учетом следующих параметров:

- топологии соты (с определенным количеством базовых станций $N_{БС}$ и заданным количеством ЛС $N_{ЛС}$, в роли которых выступают ДНА);

- степени связности БС с сотой $l \geq l_{mp}$;

- интенсивности снижения помехоустойчивости ЛС между базовыми станциями соты за счет влияния внутренних помех λ_n ;

- интенсивности реконфигурации ДНА μ_p .

Чем выше интенсивность реконфигурации ДНА, тем сложнее и, соответственно, дороже по стоимости будет ЦАР [2].

Далее для каждого типа топологии соты, интенсивности внутренних помех λ_n и требуемой степени связности БС с сотой ($l = 1$ или $l = 2$) производится расчет $K_{пс}$ для выбранных трех опорных значений интенсивности реконфигурации ДНА: $\mu_{p_{\min}}$, $\mu_{p_{\text{ср}}}$ и $\mu_{p_{\max}}$. Затем формируется таблица рассчитанных данных, после чего отбираются значения параметров μ_p , при которых выполняется условие $K_{пс} \geq K_{\text{треб}}$. Например, для $K_{пс} \geq 0,95$ по результатам сравнительного анализа выбирается наиболее приемлемая топология соты с учетом степени связности l_{mp} , а также значения μ_p , соответствующие вышеуказанному условию. Затем отобранные значения параметров μ_p , при которых выполняется условие $K_{пс} \geq K_{\text{треб}}$, по каждому типу топологии соты сводятся в обобщенную таблицу для обоснования требований по помехоустойчивости, предъявляемых к ЦАР.

На рис. 2 представлена алгоритмическая схема реализации вычислений на основе аналитической модели анализа помехоустойчивости соты по методу циклического отбора критических состояний [18].

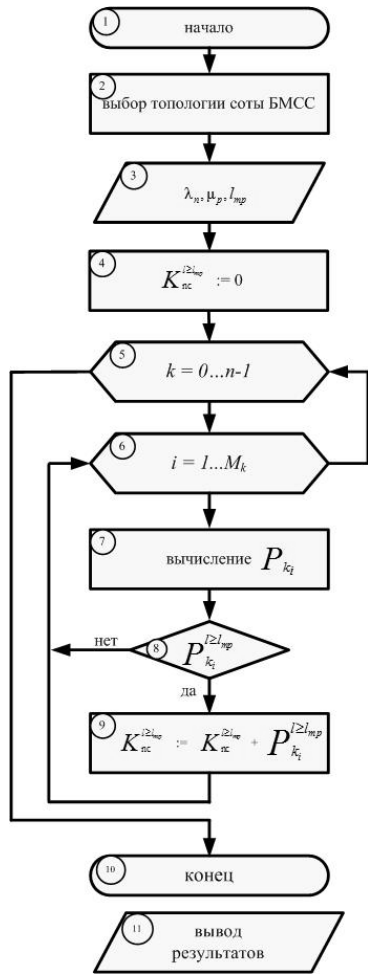


Рис. 2. Алгоритмическая схема обработки данных для анализа помехоустойчивости соты по методу циклического отбора критических состояний

Далее приведено описание основных операторов данного алгоритма:

- 1, 10 – начальный и конечный операторы;
- 2 – выбор пользователем топологии соты БМСС;
- 3 – оператор засылки значений λ_n , μ_p и l ;
- 4 – оператор присваивания начального (нулевого) значения коэффициенту помехоустойчивости соты K_{nc} ;
- 5 – оператор цикла для всех ярусов соты $k = 0 \dots n - 1$, данный цикл используется для имитации полной деградации соты БМСС при нарушении помехоустойчивости;
- 6 – оператор цикла для всех состояний $i = 1 \dots M_k$ – цикл перебора всех значений вероятностей P_{k_i} для k -го яруса;
- 7 – вычисление значения P_{k_i} для k -го яруса;

8 – условный оператор, проверяющий выполнение заданного критерия связности $l \geq l_{mp}$ для вычисленного значения P_{k_i} ;

9 – увеличение значения K_{nc} на величину вероятности рассчитанного помехоустойчивого состояния P_{k_i} в случае выполнения условия $l \geq l_{mp}$;

11 – вывод результатов моделирования процесса функционирования соты БМСС в условиях потери помехоустойчивости.

Программные средства моделирования представлены в виде программного модуля, реализованного в среде *Delphi*. Данная среда выбрана потому, что проста и удобна при создании системы моделирования, базирующейся на нескольких взаимосвязанных модулях, а также обладает необходимым набором средств для реализации поэтапного процесса моделирования [5].

Моделирование процесса функционирования базовых станций соты беспроводной мультисервисной сети в условиях недостаточной помехоустойчивости

На рис. 3 представлены исходные данные для моделирования процесса полной деградации сот с различными топологиями для анализа помехоустойчивости беспроводной мультисервисной сети технологии *WIMAX*.

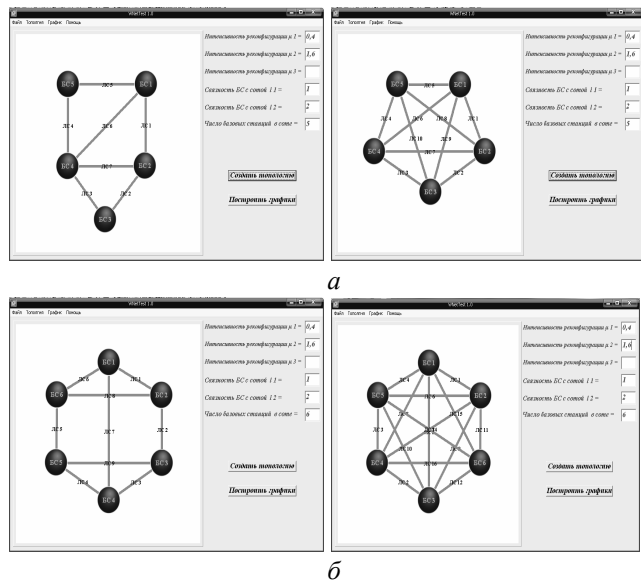
В рассматриваемых случаях внутренние помехи влияют на передаваемую информацию с определенной интенсивностью, измеряемой в мсек [19].

Вначале исследуем пятиланговую топологию соты БМСС (ячеистую и «полную сетку»).

Ниже приведены результаты сравнительного анализа эффективности реконфигурации топологии в виде графиков зависимости коэффициента помехоустойчивости соты K_{nc} от интенсивности появления внутренних помех в зоне соты с пятиланговой топологией для заданных критериев связности $l \geq 1$, $l \geq 2$ и двух режимов реконфигурации $\mu_p = 0,4$, $\mu_p = 1,6$ (рис. 4).

Аналогичные исследования были проведены для соты с шестиланговой топологией, задан-

ных критериев связности $l \geq 1$ и $l \geq 2$ и двух режимов реконфигурации $\mu_p = 0,4$; $\mu_p = 1,6$ (рис. 5).



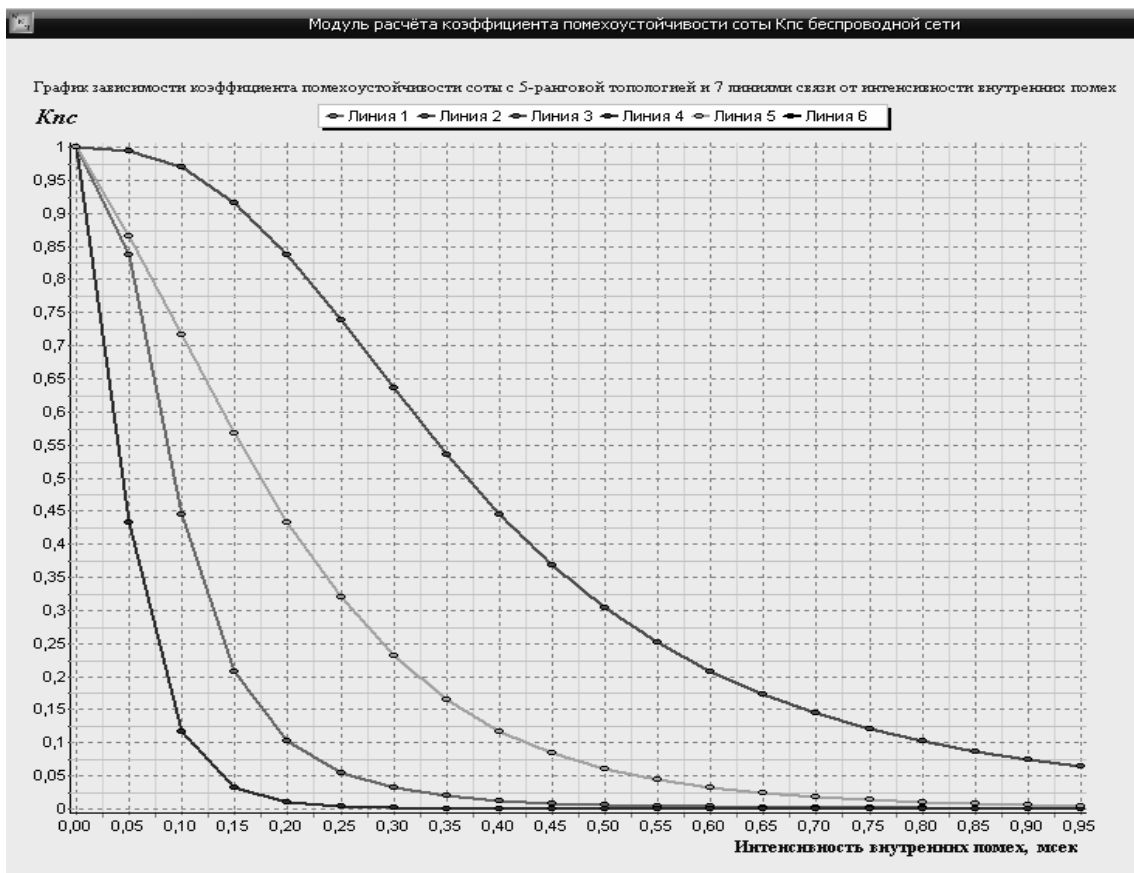
а

б

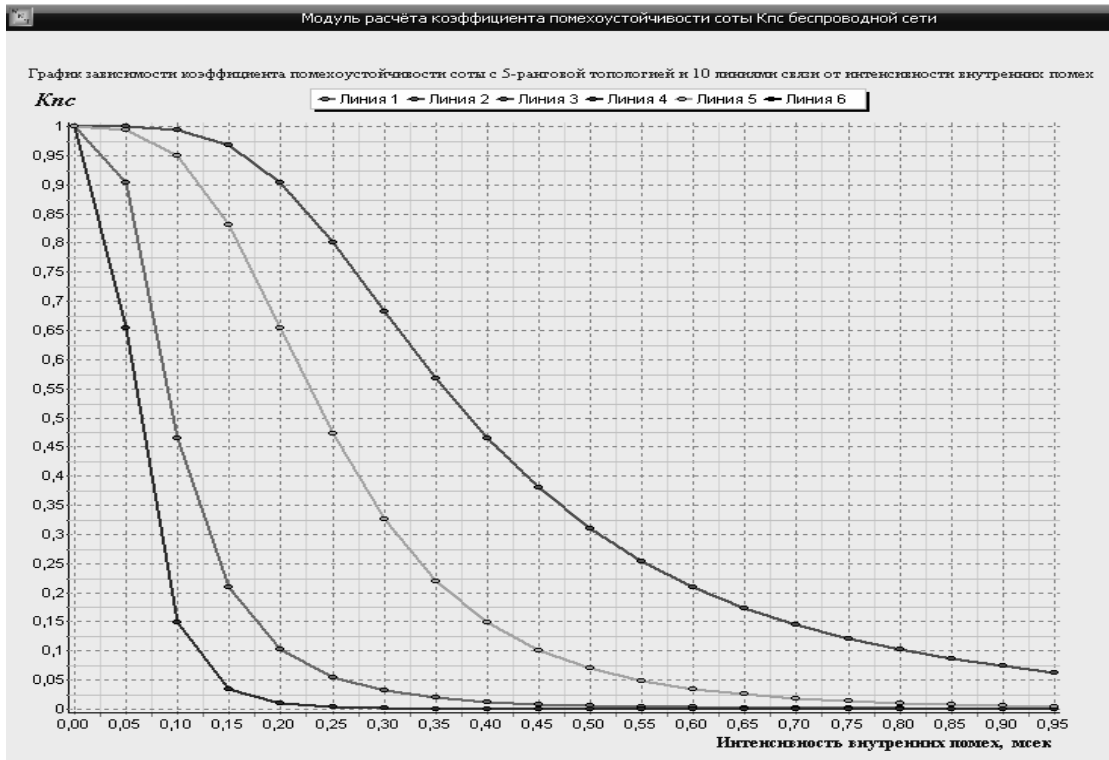
Рис. 3. Топология соты БМСС: а – пятигранная ячеистая топология и «полная сетка», б – шестигранная ячеистая топология и «полная сетка»

Заключение. На основании полученных результатов проанализированы различные режимы функционирования сот БМСС в условиях недостаточной помехоустойчивости и обоснованы требования к реконфигурации топологии исходя из того, что помехоустойчивость соты и, соответственно, сети всецело зависит от интенсивности реконфигурации ДНА, а также от степени связности БС с сетью. Чем больше значения этих двух критериев, тем более высокий коэффициент $K_{пс}$ удается поддерживать.

Отметим, что по предложенному алгоритму поурядного отбора на основе принципа циклического формирования значений $K_{пс}$, проводится анализ по всем ярусам деградации соты, что позволяет учитывать вероятности нахождения соты во всех состояниях P_{k_i} , где выполняется условие $l \geq l_{mp}$ (т.е. учитываются абсолютно все помехоустойчивые состояния), поэтому высокая точность оценки $K_{пс}$ обеспечивается полностью.

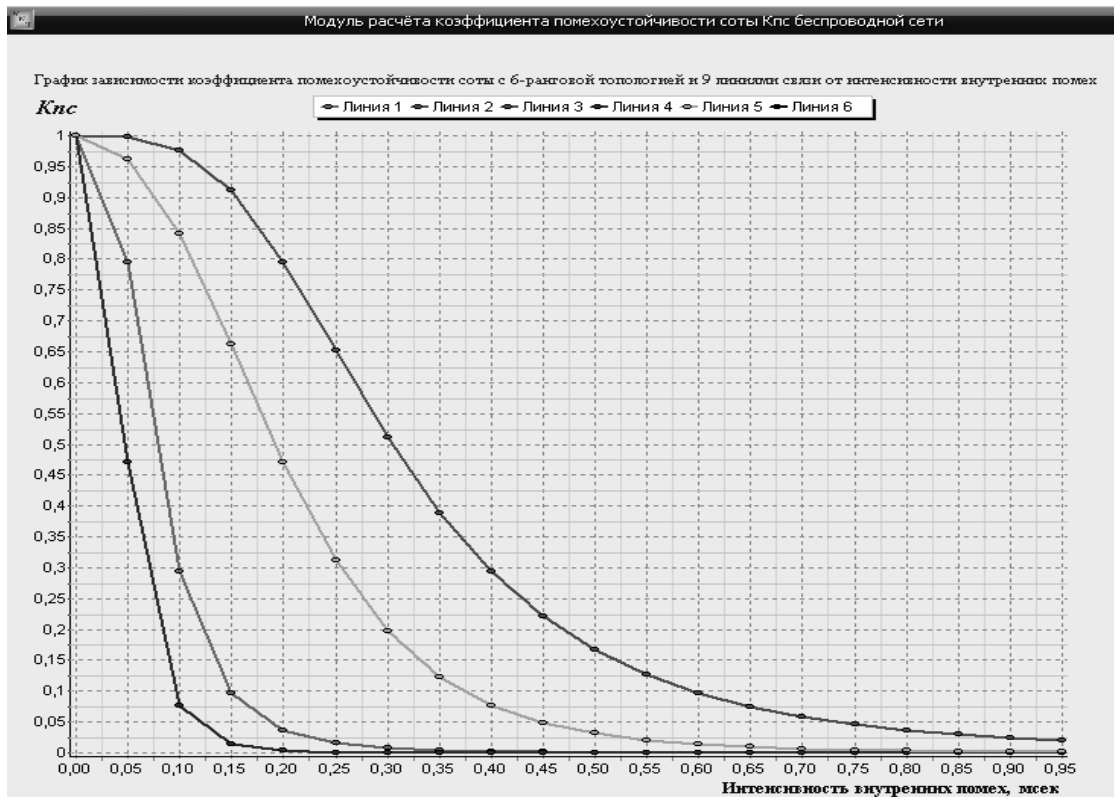


а

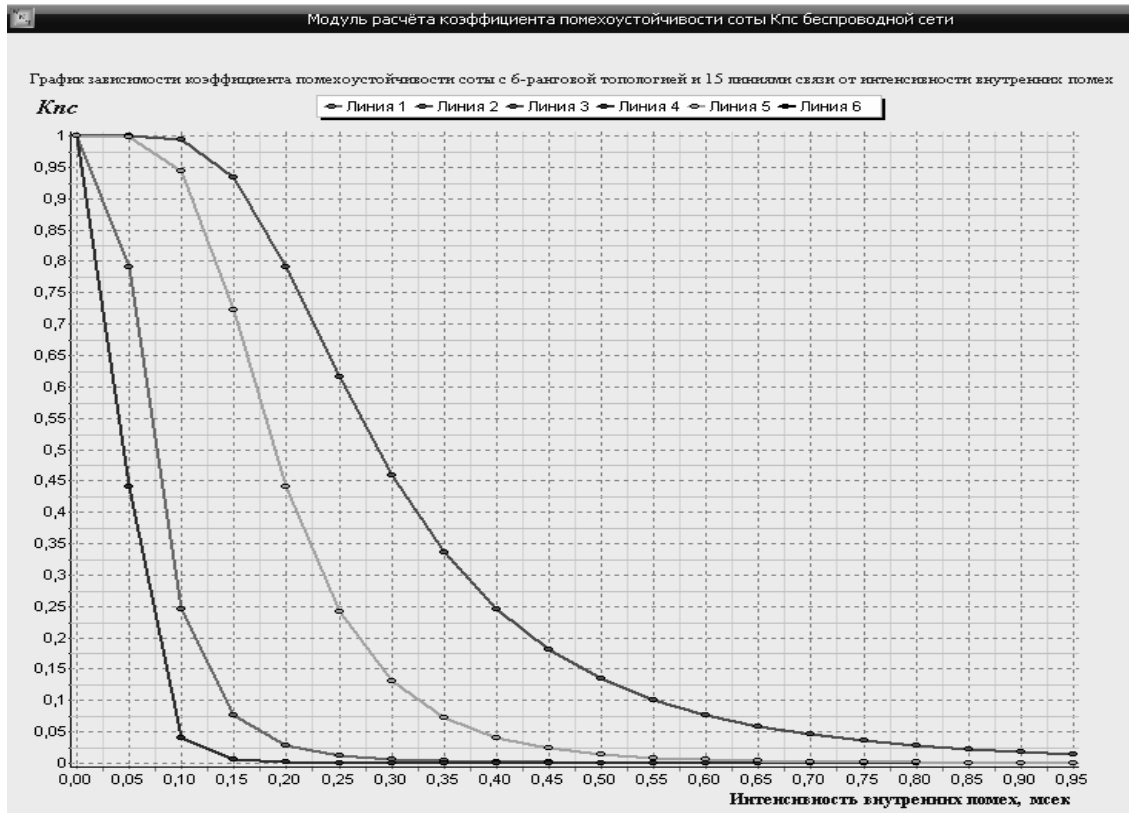


б

Рис. 4. График зависимости коэффициента помехоустойчивости соты с пятиранговой топологией от интенсивности появления внутренних помех $\lambda_n = 0,05$ для режимов реконфигурации $\mu_p = 0,4$, $\mu_p = 1,6$ и двух критериев связности БС с сотой $l \geq 1$ и $l \geq 2$: а – ячеистая топология; б – топология «полная сетка»



а



б

Рис. 5. График зависимости коэффициента помехоустойчивости соты с шестиранговой топологией от интенсивности появления внутренних помех $\lambda_n = 0,05$ для режимов реконфигурации $\mu_p = 0,4$, $\mu_p = 1,6$ и двух критериев связности БС с сотой $l \geq 1$ и $l \geq 2$: а – ячеистая топология; б – топология «полная сетка»

Итак, результаты сравнительного анализа эффективности реконфигурации топологии сот (пятиранговой и шестиранговой) позволяют утверждать, что шестиранговая топология наиболее эффективна с точки зрения поддержания помехоустойчивости.

1. *The Next Generation Networks Laboratories (NGN-LAB) // Belgium EC. – 2002. – P. 51–56.*
2. *Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.*
3. *Andrews G., Chosh A., Muhamed R. Fundamentals of WIMAX // Understanding broadband Wireless Networking. – 2004. – 712 p.*
4. *Principles of Communication System Simulation with Wireless Applications / W.H. Tranter, K.S. Shanmugam, T.S. Rappaport et al. // Prentice Hall. – 2002. – 116 p.*
5. *Ластовченко М.М., Марущак В.И. Программная среда итеративного моделирования процессов функционирования телекоммуникационных сетей // НАУ «Проблеми інформатизації та управління». – 2005. – № 13. – С. 53–62.*

6. *Ластовченко М.М., Зубарева Е.А., Саченко В.О. Метод анализа эффективности реконфигурации топологии беспроводных мультисервисных сетей повышенной помехозащищенности // УСИМ. – 2009. – № 6. – С. 79–86.*
7. *Невдяев Л.М. CDMA: борьба с помехами. – <http://aist.osp.ru/nets/2000/10/141420>*
8. *Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. – Спб.: Наука и Техника, 2005. – 400 с.*
9. *Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.*
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. *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.*

12. Жуков И.А., Ластовченко М.М., Искренко Ю.Ю. Анализ процессов адаптивной коррекции радиоспектра при передаче мультимедийного трафика шумоподобными сигналами // Проблемы інформатизації та управління. – 2008. – 24, № 2. – С. 57–64.
13. Безвершенко Е.В., Зубарева Е.А., Шевцова Е.В. Интеллектуальные технологии моделирования процессов передачи мультимедийного трафика // Там же. – С. 18–23.
14. Зубарева Е.А. Метод передачи мультимедийного трафика в беспроводных мультисервисных сетях // Міжнар. наук-техн. конф. «Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу». Тези доповідей. 21–22 жовтн. 2009 р. - С. 51.
15. Вентцель Е.С. Введение в исследование операций. – М.: Сов. радио, 1964. – 388 с.
16. Баврин И.И., Матросов В.Л. Краткий курс теории вероятностей и математическая статистика. - М.: Прометей, 1989. – 136 с.
17. Шевченко Н.Ю. Формирование циклических алгоритмов многопараметрического анализа процессов функционирования сети // Проблемы інформатизації та управління. – 2010. – 29, № 1. – С. 153–158.
18. Вольфенгаген В.Э. Конструкция языков программирования. Приемы описания. – М.: АО «Центр ЮрИнфор», 2001. – 276 с.
19. Вишневский В., Красилов А., Шахнович И. Технология сотовой связи LTE – почти 4G // Первая милья. – 2009. – № 2. – С. 2–13.

Поступила 14.04.2010

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

© М.М. Ластовченко, Е.А. Зубарева, Н.Ю. Шевченко, 2010



Внимание !
Оформление подписки для желающих
опубликовать статьи в нашем журнале обязательно.
В розничную продажу журнал не поступает.
Подписной индекс 71008