

Жуков И.А., д-р техн. наук
Ластовченко М.М., канд. техн. наук
Искренко Ю.Ю.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ РАДИОСПЕКТРА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА ШУМОПОДОБНЫМИ СИГНАЛАМИ

Институт компьютерных технологий
Национального авиационного университета

Предложен метод передачи мультимедийного трафика шумоподобными сигналами. Метод обеспечивает высокую помехозащищённость от воздействия мощных помех. Проведён анализ сигналов Баркера, которые лежат в основе принципа применения шумоподобных сигналов, с целью совместного использования этих технологий для обеспечения высокой точности передачи информации подвижным объектам

Введение

Одними из основных проблем создания и развития интеллектуального информационного пространства, базирующегося на глобальной телекоммуникационной сети, составляющими которой являются широкополосные оптические (ATM/DWDM) и беспроводные (WATM/WIMAX) технологии, являются [1, 5]:

- интеграция широкополосных сетей различных технологий ATM/DWDM и WATM/WIMAX;

- повышение пропускной способности каждой составляющей для передачи мультимедийного трафика (MMT) в режимах видеоконференцсвязи (ВС).

Если задачи второй проблемы для оптических сетей уже практически решены, то для беспроводных они находятся в начальной стадии.

В основу технологии WIMAX положена сотовая топология передачи информации, где каждая базовая станция (БС) соты должна обеспечивать в рамках соты передачу MMT с заданным качеством обслуживания QoS [2].

Основными преимуществами сотовых топологий широкополосной беспроводной сети (технология WIMAX) являются следующие [5, 7, 8]:

- высокая пропускная способность, которая обеспечивает передачу MMT в режиме видеоконференцсвязи;

- малая мощность передатчика шумоподобных сигналов (ШПС);

- достаточная помехоустойчивость, т.к. в зоне соты могут быть только местные помехи;

- достаточная надёжность передачи, поскольку есть возможность управления перераспределением сетевых ресурсов.

Недостатком сотовых топологий является создание сложных систем управления маршрутизацией MMT с переключением его по БС.

Рассмотрим возможные пути решения задачи адаптивной коррекции радиоспектра для передачи MMT.

Анализируются возможности модификации технологии WIMAX с использованием метода передачи MMT шумоподобными сигналами.

Анализ особенностей передачи MMT в беспроводной сети типа HIPERLAN

Рассмотрим технологию *Wi-Fi*, как наиболее приемлемую при передаче MMT [9 – 11]. В отличие от существующих сетей HIPERLAN в рассматриваемой сети (соте WIMAX) осуществляется передача ШПС. Следует отметить, что при этом, протоколы передачи остаются без изменений.

Параметры основного типа сетей HIPERLAN, который можно положить в основу сотовой топологии WIMAX [5, 7], приведены в табл. 1.

Таблиця 1. Технологические параметры беспроводных сетей *HIPERLAN*

Тип сети	<i>HIPERLAN</i>
Топология	Децентрализованная сотовая каждый с каждым
Антенна	Ненаправленная СА
QoS ATM	Статическое
Скорость	50 Мбит/с
Интерфейс	<i>Ethernet, ATM</i>

Необходимо отметить, что параметры по скорости приведены для случаев, когда в соте сети *WIMAX* в отличие от *HIPERLAN* выделяется достаточный радиоспектр (РС) для каждой взаимодействующей пары пользователей.

Технология ШПС (стандарт передачи шумоподобными сигналами) охватывает только часть канального и физического уровней эталонной модели *OSI* [4].

Службы управления доступом к среде (*MAC*) уровня *HIPERLAN* совместимы с определением служб *ISO 15802-1* [*ISO, 1995*] и архитектурой института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (*IEEE*) *802.11a* [*IEEE, 1990*]. Логический уровень (*LLC*) в настоящее время является только частью стандартизированной сети *HIPERLAN*. В то же время в этом стандарте уровень *MAC*, определённый *IEEE* стандартом, разделен на подуровни собственно управления доступом к среде (*MAC*) и управления доступом к каналу (*CAC*). Значение физического уровня (*PHY*) одинаково во всех названных эталонных моделях.

Архитектура, поясняющая взаимодействие модулей данных, протоколов и служб всех трёх уровней, специфицированных в стандарте *HIPERLAN* представлена на рис. 1 [10].

Уровень *MAC* предлагает свою службу следующему высшему уровню (обычно *LLC*) в точке доступа к службе *MSAP*. Данная служба включает службу соединения по одной сети *HIPERLAN*, транспорт модуля данных протокола *MAC* (*MSDU*) и изучение до

ступных сетей *HIPERLAN* на предмет динамического доступа. Объекты уровня *MAC* используют протокол *MAC* для обмена *PDU* уровня *MAC* (*HMPDU*) и предоставляют услуги *MAC*.

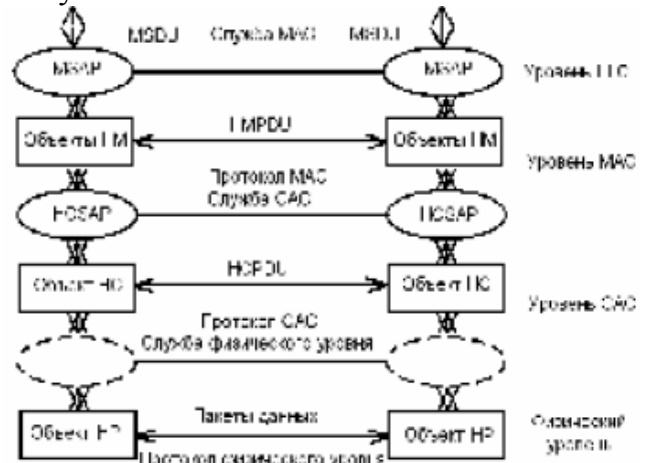


Рис. 1. Схема соты сети *WIMAX*: протоколы, службы и модули данных, реализуемые в рамках *Wi-Fi*

Уровень *CAC* в сети *HIPERLAN* предназначен специально для обеспечения приоритетного доступа к каналу и снятия с высших уровней необходимости слежения за характеристиками беспроводных каналов связи.

Физический уровень (*PHY*) предлагает механизмы передачи потоков битов и задаёт радиоканалы, методы модуляции, схемы энергопотребления. Стандарт *HIPERLAN* не даёт подобного описания точки *SAP* физического уровня. Информация передаётся в формате пакетов различной величины и с разной скоростью. Самый нижний, физический уровень сети стандарта *HIPERLAN* отвечает за модуляцию/демодуляцию радионесущей потока битов, синхронизацию передатчиков и приемников, а также предоставление механизмов прямой коррекции ошибок, измерение интенсивности сигнала и прослушивание канала (рис. 1).

В существующей технологии *Wi-Fi* корректируемая ширина полосы при использовании данных несущих составляет 23 мГц. Постоянное поддержание высокой скорости передачи 23,5294 Мбит/сек (± 235 бит/сек) не всегда оправданно и целесообразно для беспроводных клиентов, так как требует повышенного энергопотребления.

В связи с этим *HIPERLAN* задаёт два типа информационных пакетов (рис. 2) [10]

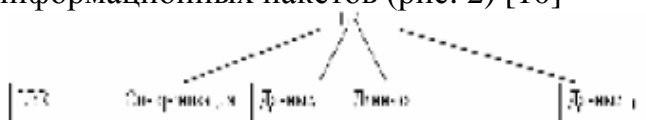


Рис. 2. Структура пакетов *LBR-HBR* ММТ

- информационный пакет *LBRHBR*. Состоит из низкоскоростного (*LBR*) потока, синхронизирующей и настроечной последовательностей и нескольких высокоскоростных (*HBR*) информационных блоков. Разрешено от одного до 47 информационных блоков, содержащих по 496 бит каждый. В то же время для высоких скоростей беспроводного терминала необходимо снижать максимальное число информационных блоков. Синхронизирующая и настроечная последовательности включают по 450 бит и строго определены в стандарт *HIPERLAN*;

- информационный пакет *LBR*. Блоки данных этого типа состоят исключительно из низкоскоростной (*LBR*) части, содержащей идентификатор получателя. Часть *LBR* используется только при скорости передачи 1,4705875 Мбит/с (± 15 бит/с). Высокоскоростные блоки в пакете *LBR-HBR* кодируются с использованием схемы прямой коррекции ошибок, кода БХЧ (*Bose-Chadhuri-Nocquenghem, BCH*, кода Боуза-Чоудхури-Хоквенгема), чередования битов, периодической инверсии битов и дифференциального предварительного кодирования. Низкоскоростная часть модулируется с использованием простой частотной манипуляции (*FSK*), причём частота $F_0 = (F(i) - 386)$ кГц представляет - логический нуль, а частота $F_1 = (F(i) + 386)$ кГц - логическую единицу, где $F(i)$ - центральная частота, определённая стандартом. Для высокочастотной части используется Гауссова манипуляция с минимальным сдвигом (*GMSK*). Мощность передатчиков *HIPERLAN* может принимать значения 1Вт, 100 мВт либо 10мВт.

Подуровень *SAC* предлагает вышестоящему уровню *MAC* службу передачи данных без установления соединения. Передаваемые компоненты ММТ называются модулями данных службы уровня

SAC(HCSDU). Передача начинается в точке доступа к службе уровня *SAC (HCSAP)* источника и заканчивается в *HCSAP* адресата (или нескольких адресатов). При передаче данных (компонентов ММТ) максимальная длина блока составляет 2 422 байта. Кроме того, уровень *MAC*, использующий данную службу, может задать приоритет качества обслуживания *SAC (HCQoS)*, определяющий приоритет доступа к каналу, подобно тому, как это реализовано в механизме *EYNPMA* [2].

Адрес *HCSAP* может быть индивидуальным, определяющим одну точку *HCSAP*, или групповым, определяющим группу точек *HCSAP*. Отдельные адреса *HCSAP* могут использоваться как исходные или целевые, тогда как групповой адрес может использоваться только как целевой адрес (точнее, адреса). Данные адреса соответствуют спецификации 48битовых *MAC* - адресов сетей *IEEE 802.x*.

Для передачи ММТ подуровень *SAC* использует два примитива службы:

- *HC-UNITDATA.req* (адрес *HCSAP* отправителя, адрес *HCSAP* назначения, модуль *HCSDU*, идентификатор сети *HIPERLAN*, приоритет доступа к каналу). Этот примитив используется для передачи данных [7];

- *HC-UNITDATA.ind* (адрес *HCSAP* отправителя, адрес *HCSAP* назначения, модуль *HCSDU*, идентификатор сети *HIPERLAN*). Данный примитив службы указывает входящие данные.

Идентификатор сети *HIPERLAN* служит для разграничения нескольких сот в сети. Значение идентификатора может быть установлено на 0 (указывая на любую сеть *HIPERLAN*) и определяться *MAC* уровнем. Название *EY-NPMA (elimination yield non-preemptive priority multiple access* - исключение, порождающее приоритетный множественный доступ) - это не просто сложный акроним, но также и суть доступа к каналу с использованием схемы приоритетов ММТ и разных схем доступа. Доступ к коммуникационной среде различных состоящих узлов делится *EY-NPMA* на следующие три фазы:

- установление приоритетов. При этом осуществляется определение наивысшего приоритета компоненте ММТ, готовой к передаче на состязающихся узлах;

- состязание. На этой фазе выполняется устранение всех конкурентов за исключением одного (если наивысший приоритет имеет более одного узла);

- передача. Выполняется передача ММТ оставшимися узлами.

Если за право доступа к среде соты состязаются несколько каналов с приоритетными компонентами, то необходимыми являются все три этапа передачи

ММТ. Если же канал не занят (по крайней мере, в течение 2 000 периодов высокоскоростной передачи плюс некоторый динамический промежуток времени), то требуется только третья фаза, т.е. передача. Упомянутый динамический промежуток времени случайно (и с равной вероятностью) выбирается из диапазона от 0 до 3 периодов высокоскоростной передачи 200 бит. Данное расширение времени далее минимизирует вероятность конфликтов при доступе к свободному каналу станций, синхронизированных на высших уровнях и пытающихся одновременно получить доступ к свободному каналу. Помимо двух названных состояний *HIPERLAN* поддерживает «доступ к каналу в состоянии устранения скрытых терминалов», название которого говорит само за себя [ETSI, 1998].

Фаза состязания в свою очередь подразделяется на два этапа – фазу исключения и фазу выпуска. Целью фазы исключения является отсеивание как можно большего числа (разумеется, не всех) узлов из состязающихся за доступ к каналу. Результатом фазы исключения является относительно постоянное количество узлов, почти независимое от исходного количества состязающихся узлов. Фаза выпуска завершает фазу исключения таким образом, чтобы остался всего один «победивший» узел.

Фаза передачи не требует введения специальных протоколов. Вышерассмотренные три основные фазы представлены на рис. 3. Для каждой БС, готовой передавать

данные, цикл доступа начинается с синхронизации текущего отправления компоненты ММТ. Далее следует первая фаза (установление приоритетов). После этого идут фазы обеспечивающие исключение и выпуск. В завершение оставшийся БС может передавать свои данные.

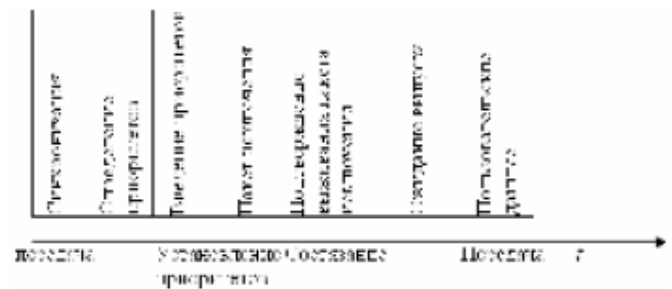


Рис. 3. Схема фаз доступа EY-NPMA

Каждая фаза имеет определённую продолжительность, измеряемую числом слотов и обозначенную переменными *IPS*, *IPA*, *IFS*, *IESV*, и *IYS*.

Анализ процессов передачи ММТ шумоподобными сигналами: сигналами Баркера

В основу передачи ШПС с высокой помехоустойчивостью положена кодовая последовательность сигнала Баркера [9, 10]. Эта последовательность состоит из символов $a_n = \pm 1$ и характеризуется автокорреляционной функцией (АКФ) вида [9]:

$$R(\mu) = \begin{cases} 1 & \text{для } \mu = 0 \\ 0 & \text{для } \mu = 2l + 1, \\ \pm \frac{1}{N} & \text{для } \mu = 2l, \end{cases} \quad (1)$$

где $l = 0, 1, \dots, (N - 1)/2$.

Основные кодовые последовательности Баркера приведены в табл. 2. Значения уровня боковых пиков АКФ (1) даны в последнем столбце таблицы 2. Знак в последней строке (1) зависит от величины *N*.

Таблица 2. Кодовые последовательности Баркера и значения АКФ

$n \backslash N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	R_{2l}
	a_n													
3	1	1	-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-1/3
4	1	1	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+1/4
5	1	1	1	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1/5
7	1	1	1	-1	-1	1	-1	-	-	-	-	-	-	-1/7
11	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-	-	-1/11
13	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1/13

Комплексные огибающие сигнала Баркера для $N = 7, 11, 13$ показаны на рис. 4.

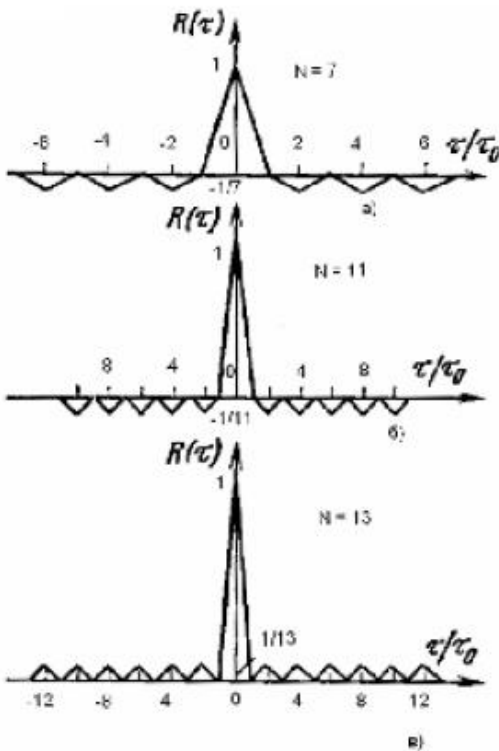


Рис. 4. АКФ огибающих сигналов Баркера с $N = 7, 11, 13$

Для числа $N \geq 13$ кодовые последовательности, обладающие свойством (1), не найдены.

Энергетический спектр кодовой последовательности Баркера $|H(x)|$ при $R(\mu) = 1/N$ характеризуется выражением:

$$|H(x)|^2 = N \left(1 - \frac{1}{N} + \frac{1}{N} \frac{\sin Nx}{\sin x} \right), \quad (2)$$

при $R(\mu) = -1/N$

$$|H(x)|^2 = N \left(1 + \frac{1}{N} - \frac{1}{N} \frac{\sin Nx}{\sin x} \right), \quad (3)$$

где $x = \omega\tau_0$. Зависимости $|H(x)| / \sqrt{N}$, рассчитанные по формулам (3), (4) для $N = 11; 13$ представлены на рис. 5а.

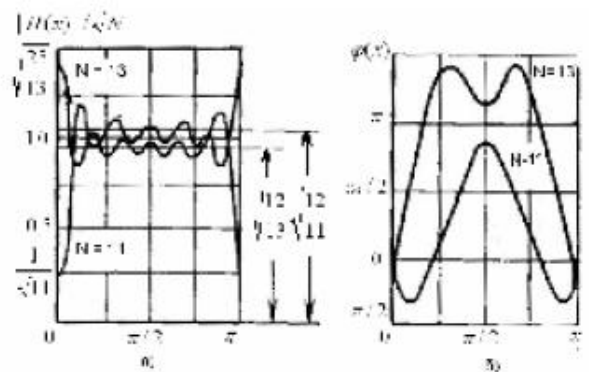


Рис. 5. Амплитудный и фазовый спектры кодовых последовательностей Баркера с $N = 11$ и $N = 13$

Амплитудные спектры при $x = \{0; \pi\}$ соответствуют провалу или пику (рис. 5 а). Фазовые спектры сигналов Баркера были численно рассчитаны для тех же значений N , что и для амплитудных спектров и изображены на рис. 5 б. Также, как и произвольные фазоманипулированные сигналы, сигналы Баркера способны формироваться несколькими способами. Поскольку сигналы Баркера были первыми ШПС, причем с наилучшими АКФ, рассмотрим один из возможных способов формирования и обработки сигналов Баркера [9, 10].

Генератор сигнала Баркера с $N = 7$ показан на рис. 6. Генератором формируются узкие прямоугольные синхроимпульсы

(рис 7 а), период которых равняется длительности сигнала Баркера $T=7\tau_0$, где τ_0 – длительность единичного прямоугольного импульса.

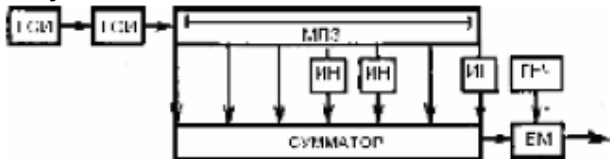


Рис. 6. Генератор сигнала Баркера с $N = 7$

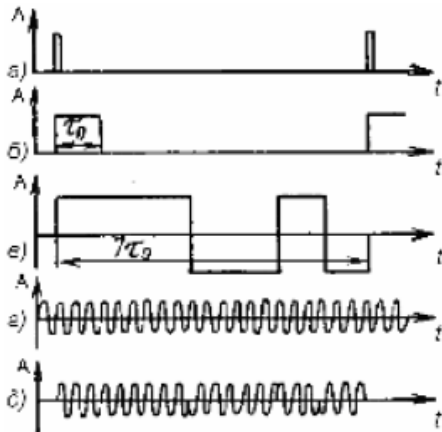


Рис. 7. Диаграммы формирования сигнала Баркера с $N = 7$ с периодом $T=7\tau_0$

Для формирования одиночных прямоугольных импульсов длительностью равной τ_0 и периодом T (рис. 7 б), генератор синхроимпульсов (ГСИ) использует генератор одиночных импульсов (ГОИ). Одиночные прямоугольные импульсы поступают на вход многоотводной линии задержки (МЛЗ). МЛЗ имеет $N-1=6$ секций, содержащих отводы. Отвод импульсов осуществляется через определённые промежутки времени, равные τ_0 . Количество отводов, включая начало каждой линии, равно 7. При числе $N=7$ последовательность Баркера имеет следующий вид 111 – 1 – 11 – 1. В этом случае импульсы с первого, второго, третьего и шестого отводов от начала линии, напрямую поступают на вход сумматора (СМ). Импульсы четвертого, пятого и седьмого отводов поступают на вход сумматора, проходя инверторы (ИН). Задачей ИН является преобразование положительных одиночных импульсов в отрицательные. Таким образом осуществляется изменение фазы на π . Видеосигнал Баркера, получаемый при выходе

СМ изображён на рис. 7 в. Далее видеосигнал поступает на вход балансного модулятора (БМ), на другой вход которого подается радиочастотное колебание (рис. 7 г) на несущей частоте, формируемой генератором несущей частоты (ГНЧ). В рамках кодовой последовательности Баркера, фазовая манипуляция радиочастотного колебания ГНЧ также выполняется БМ, при этом видеоимпульсу с амплитудой равной 1 соответствует радиоимпульс с фазой 0, а видеоимпульсу с амплитудой равной 1– радиоимпульс с фазой π . Следовательно, на выходе БМ имеет место радиочастотный сигнал Баркера (рис. 7 д). В генераторе сигнала Баркера многоотводная линия задержки (рис. б) является видеочастотой.

Для достижения оптимальной обработки различных шумоподобных сигналов используются согласованные фильтры, либо корреляторы [8]. Существует несколько методов формирования согласованных фильтров и корреляторов. Фильтры имеют различное техническое исполнение, но при этом на выходе обеспечивается одно максимальное отношение сигнал/помеха. Схема фильтра для сигнала Баркера с $N = 7$ представлена на рис. 8.

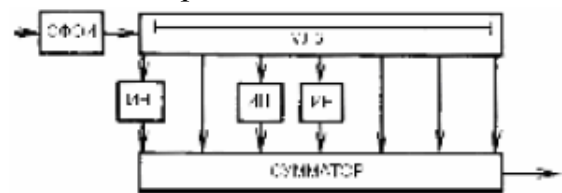


Рис. 8. Согласованный фильтр сигнала Баркера с $N = 7$

С выхода усилителя сигнал поступает на согласованный фильтр одиночного импульса (СФОИ). В фильтре производится фильтрация одиночного прямоугольного радиоимпульса с центральной частотой, которая равна промежуточной частоте приемника. На выходе фильтра одиночного сигнала радиоимпульс имеет треугольную огибающую. Треугольные радиоимпульсы с длительностью по основанию $2\tau_0$ поступают на МЛЗ, которая имеет 6 секций и 7 отводов от начала линии. Благодаря совпадению импульсной характеристики согласованного фильтра с зеркально отраженным сигналом,

импульсную характеристику фільтра для сигнала Баркера с $N = 7$ целесообразно устанавливать в соответствии с последовательностью $-1\ 1\ -1\ -1\ 1\ 1\ 1$. Это приводит к тому, что, в отличие от радиоимпульсов с первого, третьего и четвертого отводов, радиоимпульсы со второго, пятого, шестого и седьмого отводов МЛЗ напрямую поступают в СМ. Радиоимпульсы с первого, третьего и четвертого отводов поступают через ИН, меняющие фазу на π . На выходе сумматора формируется АКФ сигнала Баркера, огибающая которой изображена на рис 4.

Для оптимальной обработки радиочастотного сигнала Баркера СФОИ, МЛЗ, ИН и СМ должны работать на промежуточной частоте и иметь необходимую полосу пропускания, которая определяется шириной спектра сигнала Баркера [11].

Анализ адаптивной коррекции радиоспектра в беспроводной соте под заданные режимы передачи ММТ

После составления регламента взаимодействия абонентов сети формируются требования к числу и параметрам взаимодействующих пар (точка–точка, точка–много точек [10]). Затем, в соответствии с обоснованными требованиями, реализуется коррекция РС [10, 11]. Технология передачи ШПС позволяет иметь в РС несколько реконфигурируемых каналов связи (КС), каждый из которых состоит из различного числа радиоканалов.

Для определения пропускной способности как скорости передачи шумоподобных сигналов в единицу времени (W) можно воспользоваться формулой [10]:

$$W = (aGe^{\frac{aG}{K}} [K(1 + a - e^{\frac{aG}{K}}) + a + b - (aK + b)e^{-aG}]^{-1},$$

где a , b , K – параметры протокола: такт поиска, такт синхронизации, число импульсов. В свою очередь $a = 2N\lambda N$, где размер области неопределённости, в которой выполняется поиск, равен времени передачи N элементарных служебных сигналов.

Суммарная интенсивность трафика G определяется по формуле:

$$G = \sum_{i=1}^D \lambda_i,$$

где λ_i – интенсивность передачи сигналов у пары абонентов, D – число взаимодействующих пар в сети (число КС в РС и соответственно число каналов) [10].

Среднее время выполнения синхронизации при использовании последовательного поиска определяется по формуле:

$$\bar{T} = \frac{(2 - P_d)(1 + kP_{da})}{P_d} N\lambda N\lambda,$$

где λT – интервал поиска, P_d – вероятность правильного детектирования, P_{da} – вероятность ошибочной тревоги.

Зависимости пропускной способности каналов передачи трафика представлены графиками на рис. 9.

Исходя из анализа этих зависимостей можно сделать вывод, что для каждой пары абонентов соты необходимо выделить такие размеры радиоспектра F и такую модуляцию, которые бы обеспечили необходимую скорость W для передачи ММТ.

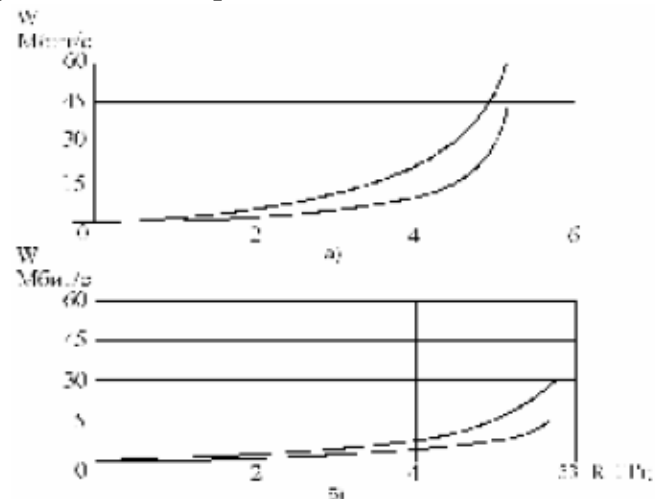


Рис. 9. Графики зависимости скорости передачи трафика от размера радиоспектра F : для одной пары: точка–точка (а) при $\kappa = 7$, $\kappa = 11$, для трех пар – точка–много точек при $\kappa = 7$, $\kappa = 11$ (б)

Радиоспектр соты меняется в зависимости от характера ММТ и числа взаимодействующих в каждом промежутке времени пар ВС. Таким образом соответствующая режиму ВС динамика радиоспектра у соты сети определяется заданными скоростями взаимодействия, которые требуют необходимых

об'ємів виділеного РС. Наприклад, для роботи трьох пар (точка–много точок) со скоростями передачі 50 Мбит/с необхідно виділити 5.3 ГГц частоти полоси спектра при модуляції МФ с $\kappa = 11$ (рис. 10) [11].

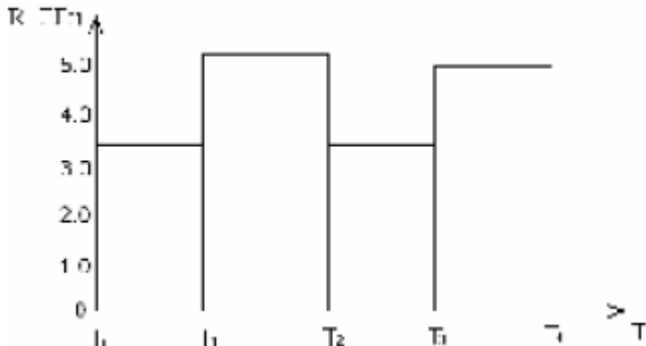


Рис. 10. Временная диаграмма динамики выделяемого радиоспектра для соты сети в зависимости от заданных режимов взаимодействия: точка-точка (T_0-T_1 и T_2-T_3) и точка-много точек (T_1-T_2 и T_3-T_4)

По данным диаграммы (рис. 10), как результатам анализа (рис. 9), были рассмотрены параметры каждого сценария ВС для заданной динамики радиоспектра:

- время t_2 : работает одна пара (точка-точка), задана скорость – $W_{\text{зад}} = 50$ Мбит/с, при этом необходима модуляция $\kappa = 11$ в спектре $\Delta F = 5.3$;

- время t_3 : работают три пары (точка-многоточие), скорость – $W_{\text{зад}} = 30$ Мбит/с, при этом необходима модуляция $\kappa = 11$ в спектре $\Delta F = 5.0$.

Выводы

Предложена методология передачи ММТ в соте сети с заданной помехозащищённостью и скоростью передачи. Проведён анализ особенностей и требований, которым должна удовлетворять беспроводная сеть и её топология выбранного класса *HIPERLAN*. В соответствии с детально проработанным регламентом взаимодействия, в рамках предлагаемого метода сформирована среда беспроводного взаимодействия (передачи ММТ) как для каждой пары пользователей точка-точка, так и для ширококвещательного режима точкамного точек (рис. 9, 10).

Список литературы

1. Lastovchenko M.M., Doroshenko A.E., Yegipko G.E., Rashnik T.V. «A control system for distributed process of reconfiguration of heterogeneous networks» // III ISTC "Prob. Dis. Telecom. Net" – 1997 – P. 84–90.
2. Жуков И.А., Клименко И.А. Обеспечение заданного управления качества обслуживания в объединенных сетях // Проблемы інформатизації та управління: Зб. наук. пр. – К.: НАУ 2005. – Вип. 13 – С. 5–14.
3. Жуков И.А., Ластовченко М.М. Основы сетевых технологий // К.: МК-«Пресс» – 2007. – 402 с.
4. Шиллер И. Мобильные коммуникации // Вильямс, – 2002. – 474 с.
5. Andrews G., Chosh A., Muhamed R. Fundamentals of WIMAX // Understanding broadband Wireless Networking. – 2004, 712 p.
6. Viterbi A. CDMA: principles of spread spectrum communication // Addison Wesley Longman. – 1995. – 381 p.
7. ET ST. High Performance Radio Local Area Network(HIPERLAN), Tgni-ETS, 300. – 1998. – 211 p.
8. Ластовченко М.М., Будишевский А.И. Программное обеспечение ИТК программирования средств передачи шумоподобными сигналами // Проблемы программирования. – 2002. – №1/2. – С. 28–39.
9. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами // М.: «Радио и связь» – 1985. – 386 с.
10. Горбунов И.Э. Методология анализа и синтеза реконфигурируемых топологий мобильных сетей связи // Математичні машини і системи. – 2006. – №3. – С. 87–98.
11. Ластовченко М.М., Биляк В.И., Горбунов И.Э., Русецкий В.Е. Концепция формирования программной среды описания и моделирования для спецификации требований к проектам беспроводных сетей // Проблемы программирования. – 2006. – №2/3. – С. 82–96.