УДК 621.396.4

ОГРАНИЧЕНИЯ МОБИЛЬНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАДИОИНТЕРФЕЙСАМИ ОБРАТНЫХ КАНАЛОВ

В. Д. Челышев, профессор Военной академии связи, д. т. н.
В. В. Якимовец, начальник факультета Военной академии связи, к. т. н.; yvv@LP3824.spb.edu

Ключевые слова: *абонентский терминал, мобильность, точка радиодоступа, радиоинтерфейс, прямой/обратный канал радиодоступа.*

Влияние сдерживающих мобильность факторов, обусловленных радиоинтерфейсами обратных каналов, возрастает при массовом внедрении широкополосных услуг в универсальных сетях общего пользования в условиях ограниченного радиоресурса и либерализации его использования.

Введение. Три десятилетия минуло с начала короткого жизненного цикла первого поколения (1G) сотовых систем связи, утвердивших свое главное достижение — *мобильность*, приведшую к новому общественному социуму «человек с трубкой».

Второе поколение (2G) наполнило мобильность *цифрой*, вызвавшей стремление к широкополосности, высокоскоростным услугам и многонаправленности, многофункциональности предоставляемых услуг. И, как следствие, к многообразию толкования мобильности. В результате мобильность не попала в связной слоган: «*связь: любая, всегда, везде*».

Третье (3G) и последующие (NG) поколения сотовых систем связи и беспроводного широкополосного доступа (БШД) входят в обиход и уже манипулируют понятием мобильности. Эти манипуляции обусловлены рядом объективных факторов и ограничений. Среди них наиболее существенными, на наш взгляд, являются совместимость разноскоростных диалогового и потокового режимов и реалии *обратного канала* (ОК) в условиях высокой абонентской плотности мобильных абонентских терминалов, рассматриваемые ниже.

Обратный канал. В мобильном радиосервисе общего пользования (МРС ОП) — это беспроводное соединение «абонентский терминал (АТ) — точка радиодоступа (ТРД) или базовая станция (БС)» (рис. 1, *а*). В условиях ограниченного радиоресурса и высокой абонентской плотности на вход многоканальной ТРД одновременно поступает множество радиосигналов как от обслуживаемых, так и от находящихся в зоне радиовидимости иных разноудаленных и быстроперемещающихся (мобильных) в урбанизированном пространстве АТ (рис. 1, *б*).

В системах 1G использовался множественный доступ с частотным разделением каналов (МДЧР). Число одновременно обслуживаемых АТ определялось числом частотных каналов ТРД и достигало 25—30 без ограничений на мобильность (0—120 км/ч — допустимая по условиям работы хендовера и в зависимости от вида городской застройки). В сетях 2G (например, GSM) при множественном доступе с совместным частотным и временным разделением каналов (МДЧР/МДВР) канальная емкость одновременного обслуживания абонентов в ТРД в дефицитном диапазоне 900 МГц достигала 15 при дополнительном росте территориальной плотности размещения ТРД и ограничениях на мобильность по контуру управления мощностью АТ (2—3 1/с), предельной удаленности от ТРД (порядка 50 км) и невозможности при частотно-территориальном планировании (ЧТП) учесть

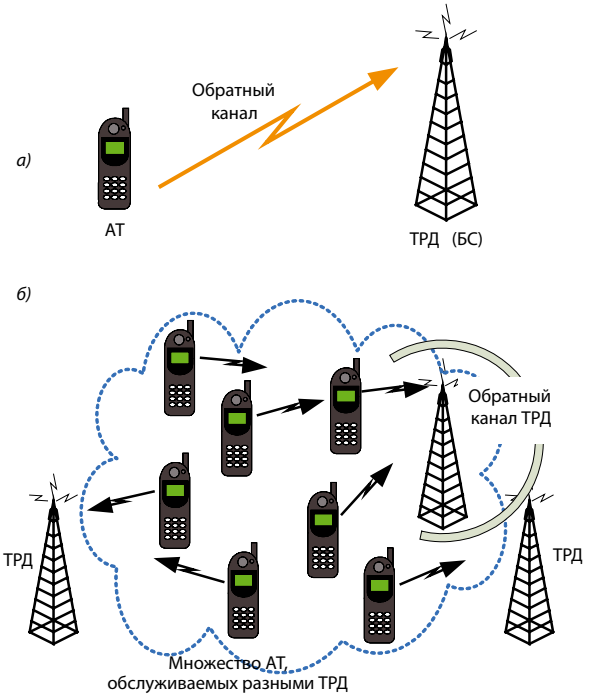

Рис. 1

разновысотное положение АТ перемещающегося по этажам абонента.

Ограниченный общий радиоресурс в виде парных полос (частотный дуплекс) на равноудаленной основе распределен между тремя и более операторами. Получаемый оператором радиоресурс — частотно-канальный кластер (ЧКК) — еще более ограничен. В мегаполисе ЧКК часто используется по типовой схеме: семь трехсекторных ячеек сотовой структуры ($7 \times 3 = 21$ ТРД).

Топология МРС ОП с трехсекторными ТРД показана на рис. 2. В такой схеме при радиусе ячейки (сектора) r дальность до повторного использования той же частоты составляет d при $d/r = \sqrt{3 \cdot 21} \approx 7{,}9$. Исходя из этого формируется энергетика линий радиодоступа в прямом и обратном каналах в пределах сектора обслуживания. АТ разноудалены и непрерывно перемещаются, образуя на входе приемника ТРД множество сигналов разных и постоянно меняющихся уровней. Для их выравнивания вводится контур управления мощностью для каждого АТ.

Влияние соканальных помех на частотах повторяющихся каналов соседних ЧКК (на рис. 2 показаны стрелками) с учетом их удаленности снижается до приемлемых значений. При ЧТП высота АТ принимается $h_2 = 1{,}5$ м, расстояние между АТ и ТРД определяется не максимальной дальностью радиодоступа d_{max}, а территориальной плотностью ТРД, обеспечивающей требуемую абонентскую емкость.

Однако эта выстроенная идиллия на практике не выполняется, так как АТ в урбанизированной городской застройке сплошь и рядом находятся не на земле, а на различных этажах помещений, т. е. значительно выше расчетного значения

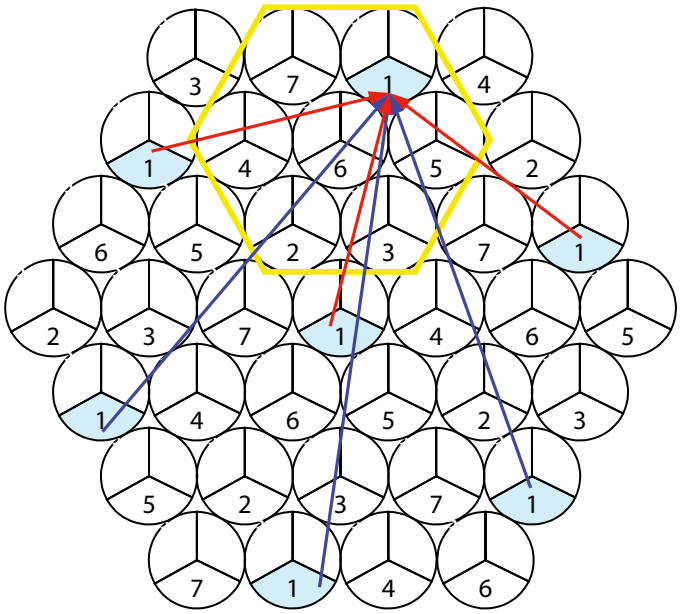

Рис. 2

h_2 (до десятков метров). Соканальные помехи, показанные на рис. 2 стрелками, становятся соизмеримыми с сигналом, а их количество значительно возрастает. В таком случае АТ создает соканальные помехи ТРД на значительно бо́льших дальностях, чем принято в расчетах. Система теряет в помехозащищенности и качестве обслуживания (QoS).

Обратный канал и МДКР. Положение изменилось не в лучшую сторону с началом внедрения в сотовых системах множественного доступа с кодовым разделением каналов (МДКР) в 2G (CDMA IS-95) и 3G (IMT-2000-MC, -DS, -TC). В IMT-DS изначально по стандарту номинировались две крайние градации мобильности: ограниченная (пешая, офисная) ~5 км/ч при скорости трафика до E1 = 2048 кбит/с и полная (авто) мобильность ~120 км/ч по урбанизированной территории при скорости трафика ~384 кбит/с.

При полной мобильности предусматривался контур быстрого управления мощностью (КБУМ) АТ: ~800 1/с в IMT-MC и ~1500 1/с в IMT-DS, позволяющий поддерживать уровень принимаемого в ТРД радиосигнала в заданном достаточно узком (~3 дБ) интервале значений (рис. 3) при одновременном обслуживании множества мобильных и разноудаленных АТ, тогда как передатчик АТ, охваченный КБУМ, излучает «антизамирающий» сигнал.

Рис. 3

Такая схема радиоинтерфейса обеспечивает возможность одновременного обслуживания в ТРД до 20—30 полностью мобильных наземных абонентов (рис. 4), что составляет не более 30—40 % номинальной емкости ТРД по низкоскоростным каналам. ТРД погружена в соканальные помехи не только от обслуживаемых АТ, но и от других АТ (в пределах электромагнитной доступности), работающих через другие ТРД. Образующаяся сложная электромагнитная обстановка охарактеризована в [1, 2] как «*все против каждого*», «*куча мала*» или «*отказал — себе дороже*».

Соканальные помехи существенно снижают QoS и возможности мобильности, особенно в режимах БШД, когда уменьшается длина ортогональной последовательности (минимальная длина всего 4 бита) и помехозащищенность каналов ТРД падает. На рис. 5 приведен пример изменения суточного хода нагрузки (помехозащищенность приема сигналов МДКР) в обратном канале ТРД IMT-MC-450-1x, RC 3,4 для разных условий нагрузки, скоростных режимов, уровня шумов (помех). На рис. 6 приведены экспериментальные данные [8], подтверждающие значительные изменения суточного хода помехозащищенности ОК приема в ТРД.

Обратный канал, мобильность и БШД. Сотовые системы с МДКР в режиме БШД утрачивают возможность одновременного обслуживания множества АТ, передают дорогостоя-

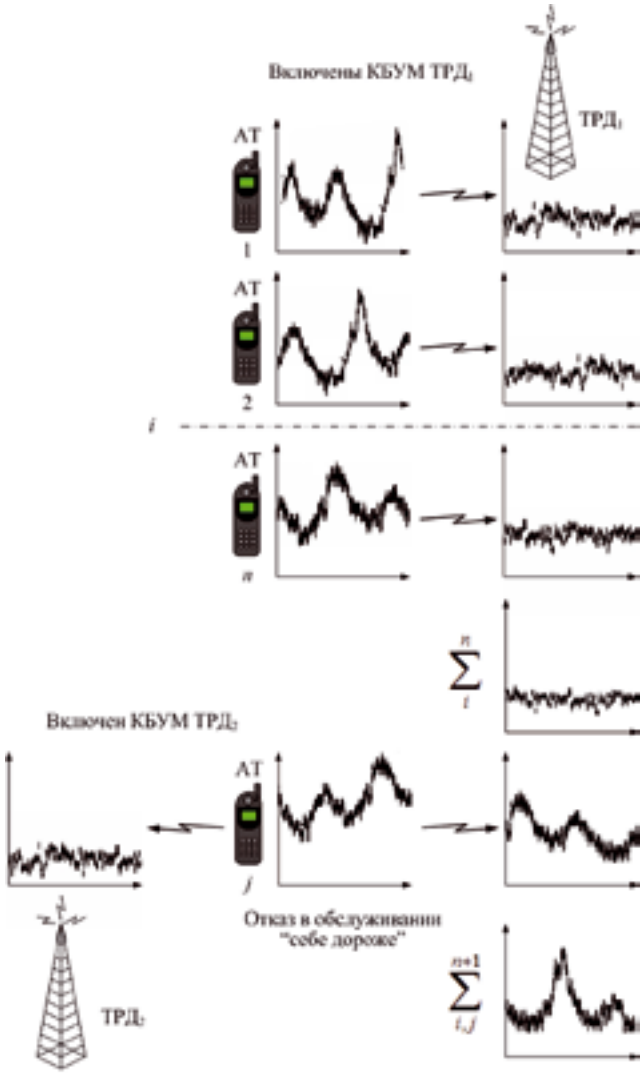

Рис. 4

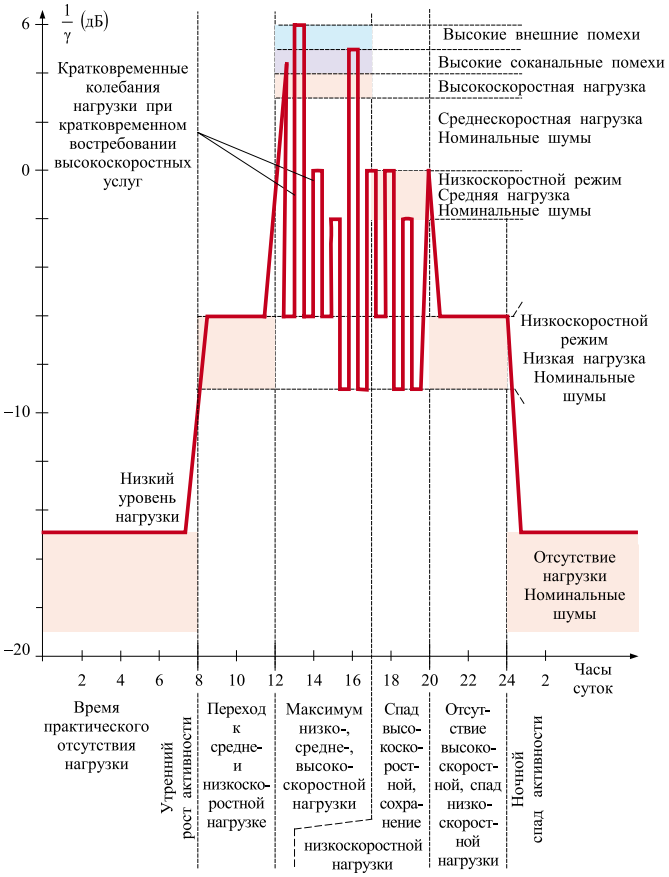

Рис. 5

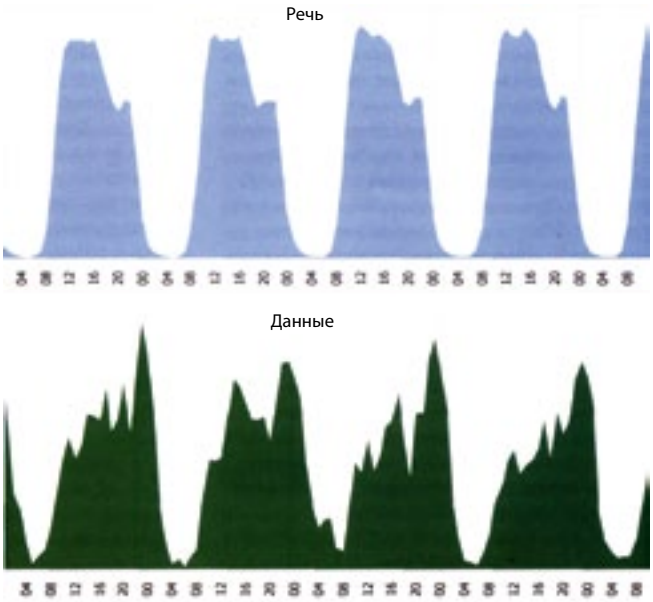

Рис. 6

щий радиоресурс ТРД единичным пользователям и используют его путем поочередного предоставления в потоковом режиме быстрой МДВР (flash TDMA). В этом случае длительное диалоговое обслуживание множества обычных АТ с низкоскоростным трафиком становится невозможным.

Раздельное обслуживание разноскоростных АТ с потоковым и диалоговым трафиками достигается разными путями: применением двух и более несущих (IMT-MC, -DS, -TC), перераспределением нагрузки в радиоинтерфейсе в совместно используемых сетях 2G/3G. Структурная избыточность радиоинтерфейса за счет стремительного роста числа ТРД увеличивается, а внутрисетевая эффективность использования дефицитного радиоресурса в условиях роста интенсивности соканальных помех снижается [1—3, 5].

Интересны в этом плане работы С. В. Бородича [6, 7], предрекавшего непригодность систем с МДКР для эффективного использования радиочастотного спектра (РЧС) при высокой абонентской плотности (предельной расчетной емкости) на примере системы Globalstar, использующей модификацию стандарта IS-95 и включающей 48 низкоорбитальных спутников-ретрансляторов. Потенциальная емкость системы номинирована на одновременное обслуживание до 11 млн. абонентов, порядка 220 тыс. абонентов на каждый спутник с пятном территориального покрытия зоны обслуживания диаметром до 5000 км. На практике система оказалась жизнеспособной только благодаря тому, что реальная абонентская емкость ниже расчетной на несколько порядков, т.е. при ничтожной эффективности использования РЧС (доли процента).

Выявившиеся существенные недостатки ОК сотовых систем с МДКР в условиях весьма высокой абонентской плотности [1, 2] неизбежно вели к появлению конкурирующих систем мобильного радиосервиса. Такие конкурирующие среды появились в образе структур локального беспроводного радиодоступа, не имеющих собственной сетевой инфраструктуры, но использующих высокую территориальную плотность точек локального доступа и соответствующие профили сопряжения, в том числе в виде различных радиомодемов.

Сегодня идет погоня за полосами частот радиоспектра, усугубляемая активной рекламной компанией по навязыванию требований по расширению «необходимой» абоненту битовой скорости в радиоинтерфейсе до сотен Мбит/с (МГц) на одного пользователя. В данных условиях без кардинальных решений по либерализации использования РЧС не обойтись [4].

Интерпретация мобильности вступает в новую фазу, не соответствующую ее первоначальному, истинному значе-

Рис. 7

нию. Вводятся не связанные с полной мобильностью градации в виде микро-, пико- и фемтосот, оправдывающие введение чрезвычайно высокой территориальной плотности ТРД, в рамках которой представить живой радиодоступ при скорости перемещения 120 км/ч в условиях мегаполиса затруднительно, а часто и невозможно. Произошла подмена понятия «мобильность» на «радиосервис на радиоосвещенной территории», т.е. «везде» на радиоосвещенной территории, но без мобильности в его истинном значении. Примерами могут служить иллюстрации, приведенные на рис. 7.

Полная наземная мобильность (~120 км/ч) с живым радиодоступом в диалоговом режиме при одновременном обслуживании ТРД множества АТ отодвигается на задний план, умалчивается (сегодня это проблемы LTE/WiMAX mob.). Не противореча слогану века: «связь: любая, всегда, везде», мобильность становится локальной в насыщенном пространстве фиксированных или фиксируемых точек локального доступа для радиомодемов на время радиодоступа. Проблема ОК при полной мобильности и одновременном обслуживании даже небольшого числа АТ (3—5) в диалоговом режиме пакетной радиосвязи при малых задержках высокоскоростного трафика оказывается трудновыполнимой или полагается решаемой частично лишь для потокового режима.

ТРД высокоподнятых платформ. И снова неизбежно обращение к конкурирующим средам, теперь уже инвариантным к наземной подвижности абонента при предоставлении услуг с разумноскоростным трафиком (не сотни Мбит/с, а сотни кбит/с). Такие конкурирующие среды есть и они базируются на ТРД, находящихся на высокоподнятых платформах [2—4].

1. Высокоскоростной трафик могут обеспечить ТРД, размещенные на стратосферных платформах (~20 км) HAPS (High Altitude Platform Stations), планируемых для обеспечения живым БШД высокоскоростных железнодорожных магистралей и автобанов (рис. 8), урбанизированных территорий и т.п. В Европе в этом направлении ведется проект CAPANINA [10]. На рис. 8 внизу показан пример размещения всего пяти ТРД для обеспечения сверхполной мобильности (до 300 км/ч) на трассе Москва — С.-Петербург, протяженностью около 600 км.

2. Достаточно высокоскоростной трафик (~384 кбит/с) предоставляет наземным мобильным пользователям глобальная система Inmarsat-4 (рис. 9) на базе модифицированного стандарта GSM/GERAN (GMPRS) в режиме B-GAN.

3. В системах спутниковой связи VSAT/Star, обеспечивающих скорость абонентского трафика до сотен кбит/с, топология Star подразумевает соединение всех удаленных, в том числе мобильных, VSAT-терминалов с общей ТРД — центральной станцией. При этом их соединение между собой при взаимных удалениях в сотни километров возможно только через ТРД (рис. 10).

Названные претенденты на предоставление наземным мобильным пользователям услуг БШД используют полосы радиоспектра в диапазонах выше 10 ГГц, выходят за границу его первоочередной либерализации и инвариантны к приемлемым наземным скоростям перемещения абонентов (до 200—300 км/ч), о которых традиционный наземный БШД даже и «не мечтает». Стоит ли «ему» в таком случае скрывать понятие ограниченной мобильности и привязанность к фиксируемым ТРД при их необходимой территориальной

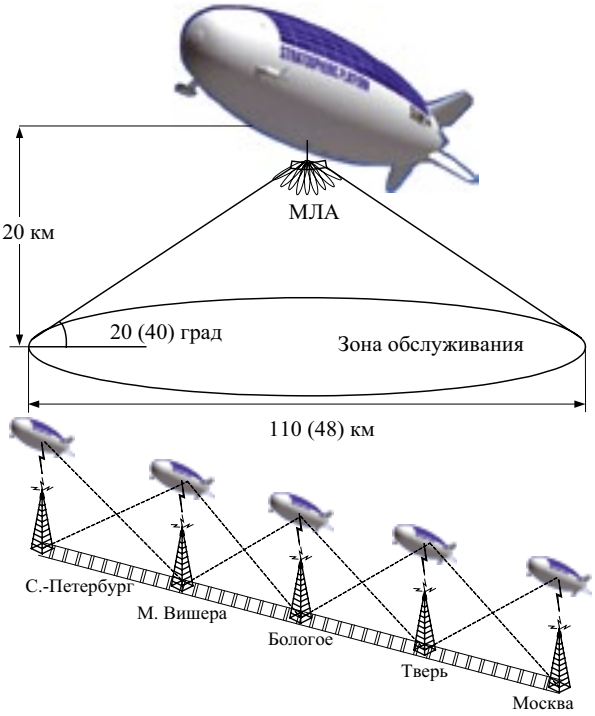

Рис. 8

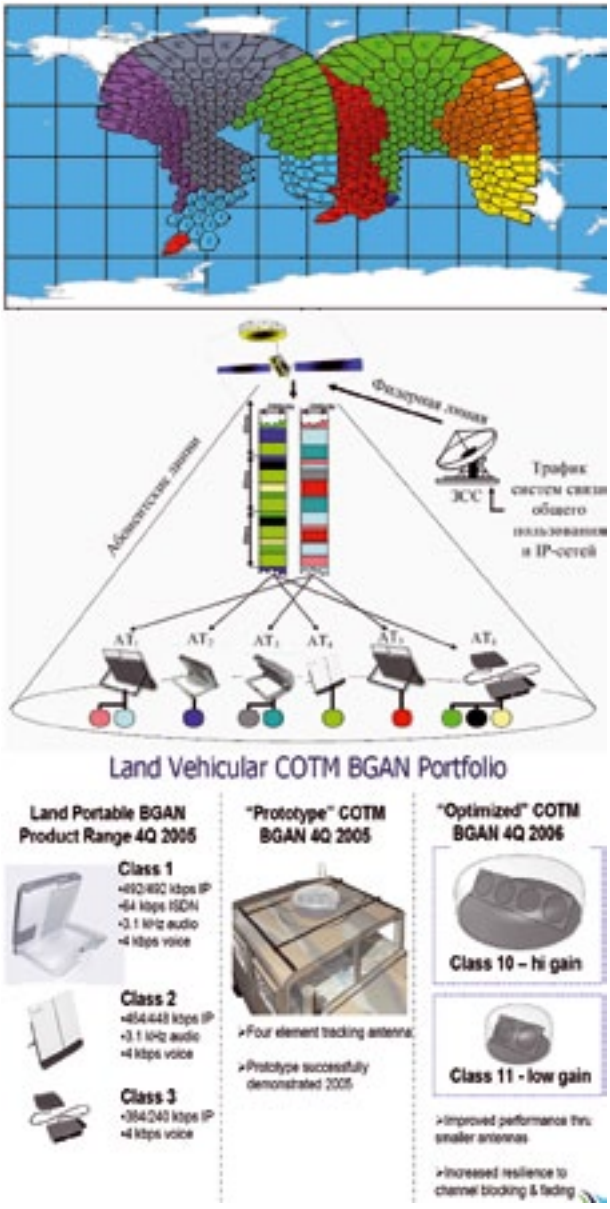

Рис. 9

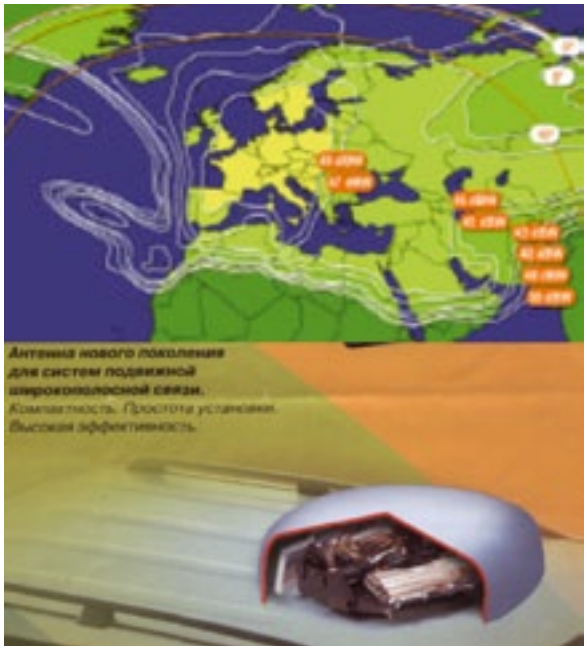

Рис. 10

плотности и разогретой «битовой радиотрубе», требующей либерализации использования дефицитного РЧС?

Парадигма UWB (Ultra Wide Band). С другой стороны маячит новая технология наземного высокоскоростного БШД на основе радиосигналов без несущей, номинированных как UWB [9] (рис. 11). Они занимают всю полосу дефицитного РЧС, подлежащую либерализации.

Информационный радиоресурс UWB-технологии рассматривается не в частотной (*frequency domain*), а во временной (*time domain*) плоскости (делить придется не радиоспектр, а время, пространство в месте приема и форму радиосигнала). При высокой территориальной плотности ТРД для наземного БШД технология UWB становится в ряд достойных

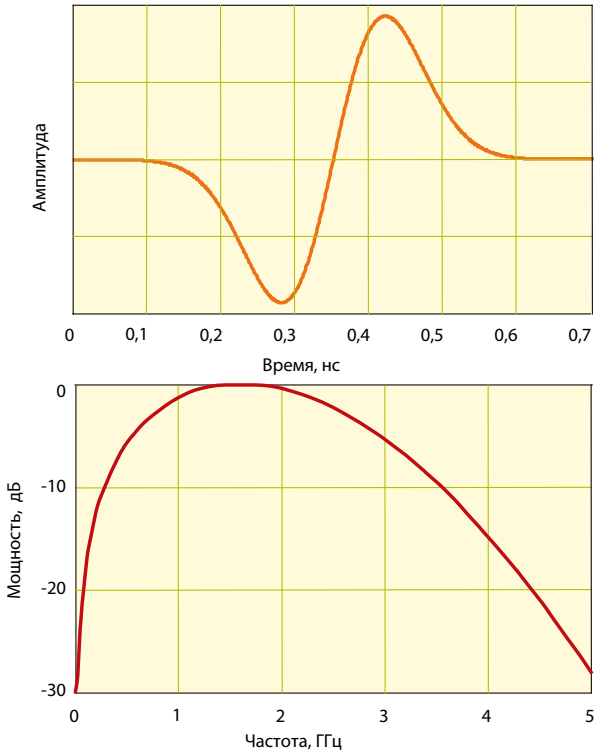

Рис. 11

претендентов, позволяя предоставить трафик в ТРД с высокой территориальной плотностью со скоростью ~100 Мбит/с.

Заключение. Таким образом, наземный МРС ОП в универсальной инфраструктуре электросвязи в условиях массовой востребованности БШД, острого дефицита радиоресурса и неизбежной либерализации его использования успешно развивается, преодолевая трудности, обусловленные рядом объективных факторов и ограничений. В их числе совместимость разноскоростных диалогового и потокового режимов и реалии ОК в условиях высокой абонентской плотности мобильных АТ. Проявляются два взаимодополняющих направления развития, соответствующих девизу «связь: любая, всегда, везде», но разделяемые уровнем мобильности.

Традиционные системы — сотовые и локального беспроводного доступа МРС ОП реализуют БШД с ограниченной мобильностью (за счет предельно высокой территориальной плотности ТРД), сопровождаемый требованиями предоставления новых полос РЧС и непомерного расширения «битовой трубы».

Конкурирующая среда для наземного МРС ОП реализует решения, инвариантные к уровню мобильности, путем размещения ТРД на высокоподнятых платформах, в том числе обеспечивая живой радиодоступ на высокоскоростных магистралях и в условиях мегаполисов. Занимая более высокие участки радиоспектра и не претендуя пока на очень высокоскоростной абонентский трафик в условиях практически неограниченной наземной мобильности, системы этого уровня не предъявляют новых требований к выделению дополнительных полос РЧС и/или его либерализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алексеев С.М., Челышев В.Д., Якимовец В.В.** Особенности использования радиочастотного ресурса системы общего пользования с кодовым разделением каналов — М.: Инфоком. Труды МАС.— 2004. № 2 (29).— С. 27—33.
2. **Челышев В.Д., Якимовец В.В.** Множественный доступ в радиоинтерфейсах сетей мобильного радиосервиса в мегаполисах//Инфокоммуникации информационного общества.— Т. 6.— Кн. 1. Под редакцией **Л.Е. Варакина**.— М.: МАС.— 2006.— С. 506—542.
3. **Потапов С.Г., Челышев В.Д., Якимовец В.В** Территориальное обеспечение беспроводным широкополосным доступом разреженных по плотности абонентов пространств.— М.: Инфоком. Труды МАС.— 2006.— № 3 (38).— С. 14—20.
4. **Минкин В.М., Гуляев А.В.** Перспективы распределения радиочастотного спектра для новых радиотехнологий в России в свете решений ВКР-03 / 4-я международная конференция «Спектр 2003». Тезисы докладов.— М., 2003.— С. 24—28.
5. **Ледовский А.И., Слибуха Е.О., Крикун А.И.** Зачем нужны расчеты зон покрытия // Мобильные системы.— 2004.— № 2.— С. 54—59.
6. **Бородич С.В.** Эффективность частотного и кодового разделения сигналов в системах спутниковой связи // Электросвязь.— 1994.— № 8.— С. 31—34.
7. **Бородич С.В.** О применении систем спутниковой связи со спутниками на низких орбитах // Электросвязь.— 1994.— № 9.— С. 19—24.
8. **Голант Г.З., Коломенский К.Ю.** Стадии подготовки и опыт ввода в эксплуатацию первой в России сети сотовой связи на основе технологии IMT-MC-450//Мобильные системы.— 2003.— № 5.— С. 16—23.
9. **Потапов С.Г., Челышев В.Д.** Совместимость в мире «искровых» сигналов и помех: в ожидании высоких технологий.— М.: Инфоком. Труды МАС.— 2005. № 3 (34).— С. 56—64.
10. FP6-IST-2003-506745 CAPANINA. Deliverable Number D01. Application and Services for Broadband HAP Deliver.

Получено 15.07.10