



# Повышение емкости сотовых систем связи, поддерживающих режим «МЯГКОГО» ХЭНДОВЕРА

**О. А. Шорин, М. И. Косинов**  
МТУСИ

**Б**урный рост сотовых сетей связи в последнее десятилетие predetermined повышенный интерес к ним как со стороны ученых-теоретиков, так и со стороны технических служб операторских компаний. Рост емкости сотовых систем связи за счет простого наращивания системного ресурса — увеличения обслуживаемой территории и числа каналов — практически исчерпан, и на первое место вышла проблема эффективного использования уже созданных сетей. Остро обозначилась необходимость решения задачи оптимизации системы на

уровне радиointерфейса с целью максимально возможного увеличения пропускной способности по обслуживаемой нагрузке (трафику). Главными отличительными принципами сотовых систем связи, обеспечивающими их функционирование, являются: непрерывность связи в процессе движения мобильного абонента (режим хэндовера или «эстафетной передачи»), повторное использование канального ресурса на обслуживаемой территории и определение местоположения мобильного абонента с целью «привязки» его к базовой станции

В работах [1, 2] исследовался вопрос оптимизации режима доступа и организации процедуры хэндовера для сотовых систем связи. Было предложено использовать резерв радиоканала, связанный с многократным перекрытием зон отдельных сот/секторов. На основе такого подхода был синтезирован алгоритм, отличающийся от стандартного тем, что в зонах многократных перекрытий выбор базовой станции подключения формировался по признаку наименьшей загруженности. Был проведен анализ, результаты которого показали, что при такой организации выиг-



рыш по характеристике предельной нагрузки будет тем выше, чем большее перекрытие зон в сети. В частности, для систем стандарта GSM оцениваемый выигрыш оказался порядка 25%, а для систем стандарта CDMA — 40%. Однако в работах [1, 2] исследовался только режим «жесткого» хэндовера, хотя в сетях стандарта CDMA и системах 3-го поколения наиболее характерным является режим «мягкого» хэндовера, т. е. сопровождение мобильного абонента при переходе из зоны в зону сразу несколькими базовыми станциями. Настоящая работа посвящена вопросам повышения пропускной способности сотовых систем связи, поддерживающих режим «мягкого» хэндовера, путем оптимизации доступа к каналным ресурсам в зонах «перекрытия» соседних сот. Полученные результаты непосредственно применимы к системам подвижной связи, работающим по стандарту CDMA, а также к системам мобильной связи третьего поколения (3G).

В работе рассматриваются системы с режимом «мягкого» хэндовера, использующего два канала (разнесенный прием по двум лучам). Хотя все полученные результаты, при определенных усилиях, можно распространить и на случаи с тремя и большим числом каналов на соединение.

Для стабильной связи в режиме «мягкого» хэндовера (разнесенного приема) по двум каналам необходимо организовать двукратное перекрытие лучами диаграмм антенн базовых станций всей или почти всей территории обслуживания. Указанный результат достигается, когда радиус связи отдельной БС ( $R_{cov}$ ) (радиус зоны покрытия) пре-

восходит примерно в 2 раза радиус области, территориально наиболее близкой к указанной базовой станции ( $R_{cell}$ ) (радиус соты).

С другой стороны, системы с кодовым разделением каналов обладают повышенной чувствительностью к помехам от соседних БС. Поэтому чрезмерное увеличение радиуса покрытия для таких систем приводит к резкому снижению качества связи, росту потерь и обрывов соединений. В результате задача частотно-территориального покрытия заметно усложняется, поскольку требуется удержание отношения  $R_{cov}/R_{cell}$  по всей территории обслуживания в узком диапазоне значений: от 1,8 до 2,6.

Чтобы можно было работать на территориях с однократным покрытием, в системе должен допускаться режим сопровождения абонентов одним лучом в тех случаях, когда для поддержки второго луча нет ресурса. В принципе, это стандартная схема работы, используемая в сетях с «мягким» режимом хэндовера. Будем ориентироваться на нее в дальнейшем. При этом необходимо отметить, что в случаях с отношением  $(R_{cov}/R_{cell}) > 2$ , когда территорий с однократным покрытием нет, разрешение или запрещение подключений абонентов по одному каналу в условиях дефицита ресурса мало сказывается на предельных характеристиках работы сети, что было подтверждено при проведении моделирования.

Оговоренные ограничения являются существенными, поскольку при отношениях  $(R_{cov}/R_{cell}) > 2,6$  взаимовлияние сот (или секторов) увеличивается, и статистическое поведение нагрузки соседних БС становится зависимым.

Последнее обстоятельство означает, что анализ перегрузок в условиях сильного перекрытия сот выделяется в самостоятельную задачу. Поскольку на практике такие условия не являются характерными и, более того, их пытаются устранить, то в первом приближении эту задачу можно не рассматривать.

Для составления системы уравнений баланса фаз для соты (сектора), работающей в режиме «мягкого» хэндовера по двум каналам, необходимо расписать вероятности переходов между состояниями, определяемыми количеством загруженных каналов. Сравняются два алгоритма управления доступом:

1) стандартная процедура, которая предполагает на каждый запрос подключения выделение двух каналов. Указанные каналы организуются между абонентскими станциями (АС) и двумя наименее удаленными от АС трансиверами базовых станций. На практике такой алгоритм реализуется по признаку выбора БС с наибольшими уровнями сигнала, что в большинстве случаев приводит к выбору наименее протяженных трасс;

2) оригинальная процедура, предложенная в работах [1, 2]. Согласно этой процедуре, для подключения выбираются такие базовые станции из числа доступных, у которых на текущий момент наблюдается наименьшая нагрузка. В данном случае предлагается выбирать сразу два или более (когда в системе используется хэндовер по большому числу каналов) канала, на основе принципа наименьшей загруженности базовой станции.

Предполагается, что территориальное распределение плотности потока абонентских требований на подключение к сети является рав-

номерным с удельной плотностью  $\lambda_c/S_c$ , где  $\lambda_c$  — общая суммарная интенсивность пуассоновского потока требований на территории одной соты,  $S_c$  — площадь одной соты. При этом, если площадь зоны многократного перекрытия с индексом  $k$  составляет  $S_k$ , то интенсивность входящих требований из нее составит  $\lambda_k = \frac{\lambda_c}{S_c} S_k$ . В результате интенсивность требований на подключение, возникающих в области  $k$ -кратного перекрытия на территории выделенной соты, будет  $\frac{\lambda_k}{k} = \frac{\lambda_c}{S_c} \frac{S_k}{k}$ . И так как  $S_c = \sum_{k=1}^K \frac{S_k}{k}$ , то

$$\lambda_c = \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k}. \quad (1)$$

Каждое требование на подключение производит два запроса к выбранному БС. В результате интенсивность входящего потока запросов будет в 2 раза выше интенсивности возникновения требований пользователей. Это учитывается при теоретических расчетах и анализе полученных результатов.

Для обслуживания отдельных вызовов рассматривается модель с экспоненциальным распределением длительности  $F(t) = 1 - \exp(-\mu t)$ , где  $\mu$  — параметр интенсивности обслуживания. Рассматривается бесконечно короткий интервал времени  $(t, t + \Delta t)$  и состояние БС (сектора) с  $i$  занятыми каналами. Вероятность наблюдения  $i$  занятых каналов в момент времени  $t$  будем обозначать  $P_i(t)$ . За бесконечно короткий интервал времени  $\Delta t$  ряд процессов будет воздействовать на указанную вероятность, приводя к ее увеличению, а ряд — к уменьшению.

Рост вероятности  $P_i(t)$  обеспечивают события, связанные:

1) с завершением обслуживания соединения, при исходном состоянии с  $(i + 1)$  занятыми каналами на рассматриваемой БС (при этом предполагается, что  $i < N$ , где  $N$  — максимально возможное число каналов, поддерживаемое одной БС);

2) возникновением нового запроса на соединение с последующим выбором для организации канала рассматриваемой БС, при условии, что в исходный момент времени  $t$  на рассматриваемой БС был занят  $(i - 1)$  канал.

Уменьшение вероятности  $P_i(t)$  обеспечивают события, связанные:

1) с завершением обслуживания соединения, при исходном состоянии с  $i$  занятыми каналами на рассматриваемой БС (при этом предполагается, что  $i > 0$ );

2) возникновением нового запроса на соединение с последующим выбором для его организации рассматриваемой БС, при условии, что в исходный момент времени  $t$  на рассматриваемой БС было занято  $i$  каналов.

В аналитическом представлении вероятность первого из событий, обеспечивающего рост  $P_i(t)$ :

$$\Delta P_i^+(1) = (i + 1) \cdot P_{i+1} \cdot \mu \Delta t, \quad (2)$$

где  $P_{i+1}$  — вероятность наблюдения состояния с  $(i + 1)$  занятым каналом.

Вероятность второго события, обеспечивающего рост  $P_i(t)$ :

$$\Delta P_i^+(2) = \sum_{k=1}^K \Delta P_i^+(2, k), \quad (3)$$

где  $k$  — кратность покрытия территории в точке возникновения требования подключения, а

$$\begin{aligned} \Delta P_i^+(2, k) = & \lambda_k \Delta t \cdot \left( \sum_{j=2}^k \left( P_{i-1}^j \frac{2}{j} \times \right. \right. \\ & \times \left. \left. \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1} C_{k-1}^{j-1} \right) + P_{i-1} \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1} + \right. \\ & \left. + \sum_{m=0}^{i-2} P_m \cdot (k-1) \cdot \sum_{l=1}^{k-1} \left( P_{i-1}^l \frac{1}{l} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1-l} C_{k-2}^{l-1} \right) \right). \quad (4) \end{aligned}$$

Переходя к рассмотрению событий, уменьшающих вероятность  $P_i(t)$ , можно получить следующие зависимости.

Вероятность первого из таких событий, оговоренного выше, равна

$$\Delta P_i^-(1) = i \cdot P_i \cdot \mu \Delta t, \quad (5)$$

где  $P_i$  — вероятность наблюдения состояния с  $i$  занятыми каналами.

Вероятность второго события, уменьшающего  $P_i(t)$ , равна

$$\Delta P_i^-(2) = \sum_{k=1}^K \Delta P_i^-(2, k), \quad (6)$$

где  $k$  — кратность покрытия территории в точке возникновения требования подключения, а

$$\begin{aligned} \Delta P_i^-(2, k) = & \lambda_k \Delta t \cdot \left( \sum_{j=2}^k \left( P_i^j \frac{2}{j} \times \right. \right. \\ & \times \left. \left. \left( \sum_{j=i+1}^N P_j \right)^{k-1} C_{k-1}^{j-1} \right) + P_i \left( \sum_{j=i+1}^N P_j \right)^{k-1} + \right. \\ & \left. + \sum_{m=0}^{i-1} P_m \cdot (k-1) \cdot \sum_{l=1}^{k-1} \left( P_i^l \frac{1}{l} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1-l} C_{k-2}^{l-1} \right) \right). \quad (7) \end{aligned}$$

Складывая (2), (3) и вычитая из результата (5), (6), получаем соотношение, определяющее изменение вероятности  $P_i$  на малом интервале времени  $(t, t + \Delta t)$ :

$$\begin{aligned} \Delta P_i = & (i + 1) \cdot P_{i+1} \cdot \mu \Delta t - i \cdot P_i \times \\ & \times \mu \Delta t + \sum_{k=1}^K \lambda_k \Delta t \cdot \left[ \sum_{j=2}^k \left( P_{i-1}^j \frac{2}{j} \times \right. \right. \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} & \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1} C_{k-1}^{i-1} + P_{i-1} \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1} + \\ & + \sum_{m=0}^{i-2} P_m \cdot (k-1) \cdot \sum_{l=1}^{k-1} \left( P_{i-1}^l \frac{1}{l} \times \right. \\ & \times \left. \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1-l} C_{k-2}^{l-1} \right) - \sum_{k=1}^k \lambda_k \Delta t \times \\ & \times \left[ \sum_{l=2}^k \left( P_{i-1}^l \frac{2}{l} \left( \sum_{j=i+1}^N P_j \right)^{k-l} C_{k-1}^{l-1} \right) + \right. \\ & + P_i \left( \sum_{j=i+1}^N P_j \right)^{k-1} + \sum_{m=0}^{i-1} P_m \cdot (k-1) \times \\ & \times \left. \sum_{l=1}^{k-1} \left( P_{i-1}^l \frac{1}{l} \left( \sum_{j=i+1}^N P_j \right)^{k-1-l} C_{k-2}^{l-1} \right) \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

В установившемся режиме изменение вероятностей должно отсутствовать и  $\Delta P_i = 0$  для  $i = 0, 1, \dots, N$ .

Тогда уравнение баланса фаз запишется в виде:

$$\begin{aligned} & iP_i \mu - \sum_{k=1}^K \lambda_k \left[ \sum_{l=2}^k \left( P_{i-1}^l \frac{2}{l} \times \right. \right. \\ & \times \left. \left. \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-l} C_{k-1}^{l-1} \right) + P_{i-1} \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1} + \right. \\ & + \sum_{m=0}^{i-2} P_m \cdot (k-1) \sum_{l=1}^{k-1} \left( P_{i-1}^l \frac{1}{l} \times \right. \\ & \times \left. \left. \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1-l} C_{k-2}^{l-1} \right) \right] = 0, \quad (9) \end{aligned}$$

где  $i = 0, 1, \dots, N$ .

А после математических преобразований (9) можно преобразовать к виду:

$$\begin{aligned} & iP_i \mu - \sum_{k=1}^K \frac{2\lambda_k}{k} \left[ \left( \sum_{j=i-1}^N P_j \right)^k - \frac{k}{2} P_{i-1} \times \right. \\ & \times \left. \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1} - \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^k \right] - \left( \sum_{m=0}^{i-2} P_m \right) \sum_{k=1}^K \lambda_k \times \\ & \times \left[ \left( \sum_{j=i-1}^N P_j \right)^{k-1} - \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1} \right] = 0, \quad (10) \end{aligned}$$

где  $i = 0, 1, \dots, N$ .

Точного решения системы (10), к сожалению, получить не удается. Аналогичная ситуация отмечена и в работах [1, 2] для более простых с аналитической точки зрения ситуаций с системами свя-

зи без «мягкого» хэндовера. Поэтому для решения (10) были использованы приближенные методы решения, при характерных для сотовых систем условиях пиковых выбросов нагрузки ( $i \approx N$ ) и при не превышающих нескольких процентов вероятностей перегрузки.

В этих условиях аналитические соотношения для вероятности перегрузки  $P_i = N$  можно после соответствующих преобразований записать в виде:

$$\begin{aligned} \text{GoS} &= P_N = \\ &= \frac{1}{N!} \left[ \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{\mu} (k-1) (x_{H2}/2)^{k-2} \right]^N \\ &= x_{H2} \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{i!} \left[ \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{\mu} (k-1) (x_{H2}/2)^{k-2} \right]^i}{(11)} \end{aligned}$$

где  $x_{H2}$  — решение уравнения  $\sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} \cdot k(k-1)x^{k-2} - 2 \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} = 0$ , в котором  $x = \sum_{i=\lfloor(i)\rfloor}^N P_i$  обозначает операцию выделения целой части числа.

Следует отметить, что (11) совпадает с законом Эрланга В, в котором специфическим образом рассчитывается интенсивность потока входящих запросов.

Для проверки полученного соотношения (11) вероятности отказа обслуживания (GoS) по причине перегрузки в системе с «мягким» хэндовером, использующей алгоритм доступа по критерию минимума текущей нагрузки, была написана соответствующая программа моделирования. С ее помощью оператор может в интерактивном режиме устанавливать такие параметры, как:

1) отношение радиуса связи к радиусу соты  $R_{cov}/R_{cell}$ ;

2) эквивалентное время работы моделируемого фрагмента сети;

3) емкость отдельной соты, или число информационных каналов, которое может поддерживать сота (параметр  $N$ );

4) средняя длительность отдельного соединения во фрагменте сети (параметр, обратный  $\mu$ ).

Также поддерживается возможность моделирования работы при секторном покрытии с тремя сотами на БС. При этом используется угловой размер секторов  $120^\circ$ .

Результаты моделирования выводятся графически в виде зависимостей вероятности отказов из-за перегрузки (GoS) от средней нагрузки, приходящейся на БС (сектор). По горизонтальной оси откладывается указанная средняя нагрузка. Ее величина формируется экспериментально, путем вычисления среднего числа активных абонентов, работающих на территории выделенной БС (или сектора, в режиме секторного покрытия). По вертикальной оси в логарифмическом масштабе откладывается вероятность отказов GoS.

Нужно отметить следующее. Поскольку каждый активный абонент в режиме с «мягким» хэндовером по двум лучам занимает в системе два логических (информационных) канала, то предельные нагрузки будут концентрироваться в окрестности значения половины емкости отдельной БС (сектора). Этим объясняется отличительная особенность приведенных ниже результатов от традиционных. Действительно, в стандартных ситуациях, исследуемых классической теорией массового обслуживания, предполагается, что каждое требование обслуживается одним логическим каналом (уст-

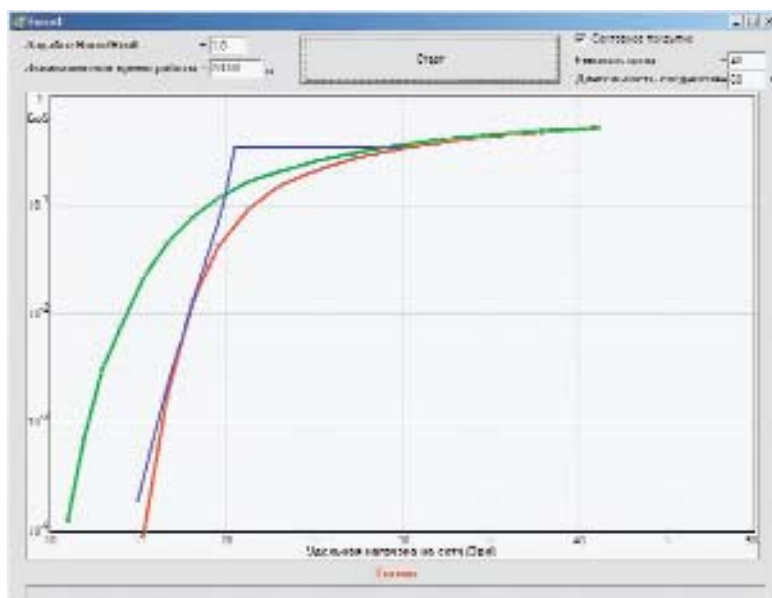


Рис. 1. Зависимости вероятности отказов обслуживания (GoS) по причине перегрузки от уровня средней нагрузки, приходящейся на соту, для системы с «мягким» хэндовером по двум лучам, в условиях покрытия с  $R_{cov}/R_{cell} = 1,8$

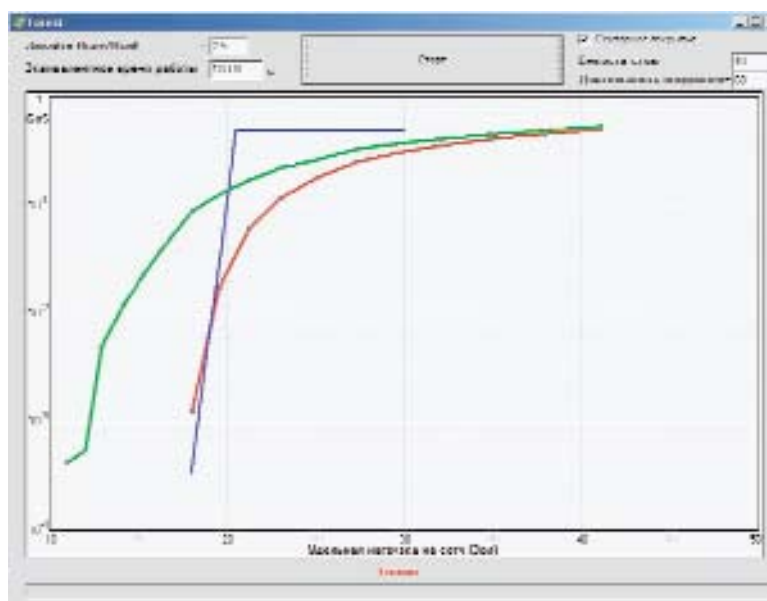
по критерию минимума текущей нагрузки, показаны красным. Теоретические расчеты по (11) показаны синим.

Как можно видеть, при отношениях  $R_{cov}/R_{cell}$ , не превосходящих 2,5, теоретические результаты согласуются с экспериментом вплоть до вероятностей отказов (GoS) порядка 0,03—0,04. При более высоких значениях GoS использованное приближение малых значений  $P_i$  перестает быть справедливым и возникают расхождения между результатами формулы (11) и экспериментальными данными. Поскольку нормативно установленным предельным уровнем GoS в локальные ЧНН соты у разных производителей принято считать значения от 0,02 до 0,04, то мож-

ройством). Поэтому в известных законах распределения нагрузки, например Эрланга, предельные уровни концентрируются в окрестности значения емкости отдельных БС (сот).

Программа одновременно с результатами, полученными в режиме управления доступом по критерию выбора из доступных БС (секторов) с наименьшей текущей нагрузкой, выводит и результаты для случая использования традиционного режима доступа по критерию ближайшего расположения БС (наибольшего уровня сигнала). На рис. 1—2 результаты, полученные в режиме традиционного управления доступом, показаны как кривые зеленого цвета. Результаты, полученные в режиме с предлагаемым алгоритмом управления доступом

Рис. 2. Зависимости вероятности отказов обслуживания (GoS) от уровня средней нагрузки, приходящейся на соту, для системы с «мягким» хэндовером по двум лучам, в условиях покрытия с  $R_{cov}/R_{cell} = 2,5$





но заключить, что полученное соотношение (11) вполне допустимо для использования.

Одновременно с этим полученные результаты показывают, что начиная с уровня отношений  $R_{cov}/R_{cell} = 2,7$  и выше нарушается условие статистической независимости поведения нагрузки соседних сот. Это обстоятельство, возникающее в режиме управления доступом по критерию минимума нагрузки, уже упоминалось выше. Относительно него можно сказать лишь то, что на практике частотно-территориальные покрытия с  $R_{cov}/R_{cell} \geq 2,7$  считаются недопустимыми, особенно в сетях с кодовым разделением каналов.

При изменении параметра емкости соты (параметр  $N$ ) удалось выявить слабую зависимость от него граничных значений отношения  $R_{cov}/R_{cell}$ , определяющих пригодность аналитических расчетов по (11). Так, например, уменьшение  $N$  до 30 приводит к росту граничного уровня  $R_{cov}/R_{cell}$  примерно на 0,1 (достигало 2,6). А при увеличении  $N$  до 50 граничное  $R_{cov}/R_{cell}$  уменьшалось примерно на то же значение 0,1 (снижалось до 2,4).

Сопоставление результатов нагрузки на уровне GoS порядка 0,02—0,03, как можно видеть из графиков, показывает, что предлагаемый вариант управления доступом по критерию минимума нагрузки обеспечивает выигрыш относительно традиционного варианта порядка 33—38%. Это довольно хорошо согласуется с результатами работ [1, 2], полученными для систем без «мягкого» хэндовера.

Моделирование показало, что характерные особенности работы,

которые присущи хэндоверу, не оказали заметного влияния на характеристики перегрузок.

### Выводы

Теоретические и экспериментальные результаты показали, что оптимизация алгоритма доступа в режиме хэндовера по критерию минимальной загруженности БС позволяет: в режиме «жесткого» хэндовера для систем стандарта GSM получить выигрыш по предельной нагрузке порядка 25%, для систем стандарта CDMA — 40%; в режиме «мягкого» хэндовера порядка 33—38% по сравнению с традиционной организацией управления доступом по критерию максимума уровня радиосигнала. Уровень вероятности отказов при этом выбирался в пределах значений, допустимых по эксплуатационным нормам, — 0,02—0,04. Вместе с тем остается еще широкий круг вопросов, связанных с организацией «мягкого» хэндовера: исследование влияния на перегрузки управления хэндовером по признаку контрастности нагрузок соседних сот; возможность сочетания управления хэндовером по характеристикам радиолиний и по характеристикам распределения нагрузки и т. д. ■

### Литература

1. Шорин О. А., Косинов М. И. Повышение емкости сотовой системы связи при использовании зон перекрытия // Электросвязь. 2003. № 3.
2. Шорин О. А. Методы оптимального распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи: Дисс. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. М.: МТУСИ, 2005.

## КОРОТКО

**19 марта 2007 г.**

корпорация Microsoft анонсировала новое телефонное решение на основе IP-технологии для малого бизнеса под кодовым названием **Response Point**. Новое решение, удобное для внедрения, использования и управления, совместимо как с традиционными телефонными линиями, так и с линиями на базе технологии **VoIP (Voice over Internet Protocol)** и оснащено голосовым меню. В данный момент новое решение проходит бета-тестирование, а выход трех версий **D-Link DVX-2000**, **Quanta Syspine** и **Uniden EvoIo** запланирован позднее в 2007 г.

**16 марта 2007 г.**

группа компаний **Softline** объявила о заключении партнерского соглашения с корпорацией **Nokia** в сфере продвижения корпоративных мобильных решений на базе пакета **Intellisync Mobile Suite 8.0** и IP-платформ, обеспечивающих безопасность сети компании. Пакет **Nokia Intellisync Mobile Suite** предлагает мобильную электронную почту, мобильную синхронизацию файлов и данных, надежные средства безопасности и возможности управления для широкого ряда устройств и платформ, представленных на рынке. Последняя версия **Nokia Intellisync Mobile Suite 8.0** включает новые варианты развертывания, новый пользовательский интерфейс, расширенную совместимость с корпоративными приложениями.