

динамической кодовой адаптации, которая вносит при этом больше избыточности в трафик.

## 7.2. Координатная маршрутизация в I-UWB сетях

Возможность получения в сети IR-UWB координат местоположения узлов с высокой точностью (до сантиметров) позволяет использовать в данных сетях методы координатной маршрутизации [50, 51]. Основным преимуществом данных методов маршрутизации по сравнению с методами, не использующими координатную информацию, является значительное уменьшение объема служебного трафика.

Однако при отсутствии в узлах оборудования позиционирования, например GPS (Global Position System), необходимо будет учитывать *особенности построения системы позиционирования в самоорганизующихся сверхширокополосных радиосетях*:

- наличие определенной задержки построения на построение узлами “карты сети” (время на работу алгоритмов определения местоположения узлов [52] плюс время на распространение координатной информации в сети);
- возможность ошибок в информации позиционирования из-за временного отсутствия связности или изменения топологии сети — поэтому алгоритм маршрутизации должен быть способен строить и поддерживать маршруты в условиях неполной (неточной) координатной информации или ее отсутствия;
- недоступность информации об абсолютной скорости перемещения абонентов, чего требуют некоторые алгоритмы координатной маршрутизации.

При этом методы маршрутизации должны [53]:

- соответствовать особенностям СРС;
- удовлетворять ряду обязательных и/или опционных требований  $\{TP_q\}$ ,  $1, \dots, Q$ , где, например,  $TP_1$  — децентрализованное функционирование (обязательно);  $TP_2$  — быстрая сходимость и отсутствие заикливания маршрутов (обязательно);  $TP_3$  — минимальная загрузка сети служебной информацией (может выступать целевой функцией);  $TP_4$  — получение маршрута по мере необходимости (режим “молчания” сети);  $TP_5$  — обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату;  $TP_6$  — обеспечение маршрутов заданного качества (по производительности, задержке и др.);  $TP_7$  — поддержка однонаправленных каналов;  $TP_8$  — минимизация расходуемой мощности узлов, оснащенных батареями;  $TP_9$  — безопасность процессов маршрутизации и др.

При синтезе (выборе) метода координатной маршрутизации необходимо реализовать выполнение данных требований и обеспечить следующие функции (рис. 7.43) [53]: сбор информации о состоянии сети; хранение маршрутов; вычисление маршрута передачи пакета (определение правил выбора одного или нескольких узлов-ретрансляторов). Раскроем данную классификацию более подробно.



Рис. 7.43. Функции методов координатной маршрутизации

**Сбор информации о состоянии сети.** По охвату контроля состояния сети сбор информации может осуществляться *глобально* (информация о состоянии всей сети) или *локально* в пределах определенного расстояния, выраженного числом  $(1, 2, \dots, R)$  ретрансляционных участков.

*Тип* и *способ* сбора информации о состоянии сети находятся в тесной взаимосвязи.

**Волновой** (поточковый, (flooding)) способ применяется при сборе всей информации о состоянии сети и вызывает значительный объем служебного трафика, например метод OLSR [53].

**Зондовый** (reactive) способ осуществляет нахождение маршрута по мере необходимости (обеспечивает “режим молчания”) и предполагает волновую рассылку в сети специальных пакетов (зондов-запросов) и сбор зондов-ответов, содержащих информацию о маршрутах к адресатам (для координатной маршрутизации – информацию о координатах узлов). Представителями методов зондовой некоординатной маршрутизации являются DSR, AODV, ABR, SSR, TORA [53] и другие, среди методов координатной – LAR (Located-Aided Routing) [50, 51].

**Проактивный** (proactive) или табличный (table-drive) способ предполагает обмен маршрутными сообщениями между соседними узлами (по аналогии с некоординатными табличными методами маршрутизации DARPA PRNET, DSDV, WRP [53]). Каждый узел периодически (или по событиям) информирует (рассылает маршрутные сообщения, содержащие измененные входы маршрутных таблиц) своих соседей о координатах своих соседних узлов. Приняв маршрутное сообщение, узел модифицирует свои входы маршрутных таблиц. Период рассылки ( $t_{пр}$ ) координатных сообщений определяется каждым узлом в зависимости от его мобильности – координатный метод DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility) [50, 51]: ближайшим узлам –  $t_{пр} = R_n / (kv)$ , где  $R_n$  – радиус передачи узла;  $k$  – коэффициент;  $v$  – скорость перемещения; дальним узлам –  $t_{пр} = \text{const}$ .

*Гибридный* способ предполагает, что каждый узел сети собирает информацию о координатах соседних узлов на глубину  $R_{мз}$  (маршрутная зона) проактивно, за пределами  $R_{мз}$  — зондовым способом [53]. Величина  $R_{мз} = f(v)$  варьируется в зависимости от динамики сетевой топологии  $v$ . Процесс построения зоны базируется на знании узлом координат своих соседей. Так как корректировка маршрутных таблиц осуществляется локально (в пределах  $R_{мз}$ ), то объем служебного трафика внутри зоны не зависит от размерности сети  $N$ , а зависит от размера зоны  $N_z$ , степени связности узлов  $S$  и интенсивности изменения топологии внутри зоны.

**Хранение маршрутов.** Общий подход к хранению информации о сети при координатной маршрутизации заключается в поддержании каждым узлом таблицы местоположения следующего формата: идентификатор адресата —  $j$ , его координаты —  $(x, y)_j$ , скорость —  $v_j$ , направление перемещения —  $\gamma_j$ , время генерирования данной информации —  $t_j$ .

Информация о местоположении узлов может храниться двумя способами: *автономным* или *распределенным*. Первый способ заключается в том, что каждый узел инициирует процесс сбора информации о состоянии сети и хранит ее в своей маршрутной таблице, второй — предполагает назначение определенных узлов, называемых домашними агентами НА (Home Agent), хранящих информацию о местоположении того или иного узла [51]. Роль домашнего агента может выполнять один узел или их совокупность.

В первом случае при изменении своего местоположения узел  $d$  информирует узел НА ( $НА_d$ ) о новых координатах (на рис. 7.44 показано пунктирной линией). Передача пакета от узла  $s$  к узлу  $d$  может осуществляться следующим образом:

- посылка запроса домашнему агенту о местоположении  $d$  ( $s \rightarrow НА_d$ ), получение его координат ( $НА_d \rightarrow s$ ), пересылка пакета адресату ( $s \rightarrow d$ ) (рис. 7.44, а);
- пересылка пакета домашнему агенту ( $s \rightarrow НА_d$ ) и он далее адресату ( $НА_d \rightarrow d$ ) (рис. 7.44, б).

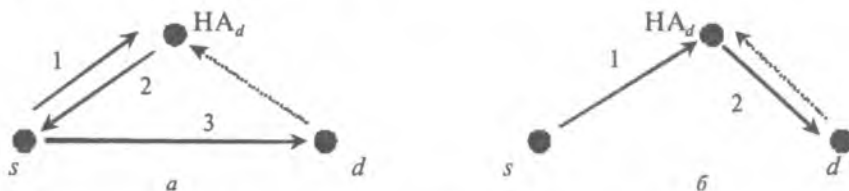


Рис. 7.44. Передача пакетов с использованием узлов-НА

Однако в СРС узлы НА также мобильны и каждый из них может оказаться в несвязной подсети. Поэтому каждому узлу необходимо выбирать несколько узлов НА, причем, желательно, в различных участках сети. С этой целью сеть разбивается на фиксированные географические квадраты (размер квадрата равен примерно

двойному радиусу передачи узла), известные всем узлам сети. Каждому узлу присваивается уникальный идентификационный номер. Информацию о своем местоположении каждый узел хранит в трех узлах НА, которые находятся в смежных одно-, двух- и четырехкратных и далее двухкратных квадратах – метод GLS (Grid Location Service) [52]. Выбор узлов НА для  $i$ -го узла (например, узла 17 на рис. 7.45) осуществляется по следующему правилу: узел, имеющий больший идентификационный номер, но ближайший к  $i$  в данном двухкратном квадрате, становится домашним агентом. Если такового нет (левый квадрат относительно рассматриваемого), то узел 17 хешируется и в этом случае выбирается узел 2, а не 7. На рис. 7.45 относительно узла 17 домашними агентами будут выбраны следующие узлы: в смежных квадратах – 2, 23, 63; в смежных 2-х кратных квадратах – 26, 31, 43; в смежных 4-х кратных квадратах – 37, 19, 20. Интервал рассылки узлом координатных сообщений своим домашним агентам зависит его скорости и взаимного расстояния (далее НА – реже рассылка).

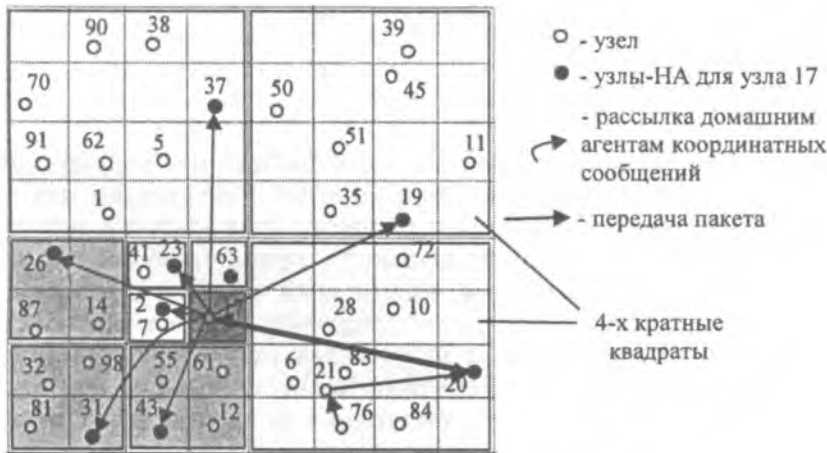


Рис. 7.45. Пример реализации метода GLS

Каждый узел поддерживает две таблицы: координатную таблицу – с информацией об узлах своего однократного квадрата (формируется путем периодического обмена координатными сообщениями с соседними узлами) и таблицу своих домашних агентов (содержит идентификатор НА и его координаты). При необходимости передать пакет узлу 76 для узла 17 (и отсутствии информации о нем в координатной таблице) НА пошлет запрос узлу, находящемуся в смежных квадратах и имеющему идентификационный номер, ближайший к номеру 17, т.е. узел 76 передаст запрос узлу 21 (см. рис. 7.44). Далее аналогично: узел 21 передаст запрос узлу с наименьшим номером в смежные квадраты высшего уровня иерархии (т.е. двухкратные квадраты): 21 → 20. Узел 20 является домашним агентом узла 17 и поэтому

он (согласно рис. 7.44) непосредственно перенаправит пакет узлу 17 или сообщит координаты адресата узлу 76 для его дальнейшей передачи.

К преимуществам метода GLS также можно отнести: распределенность функционирования, отсутствие волновой рассылки сообщений и уменьшение объема служебного трафика (с увеличением расстояния от узла число домашних агентов уменьшается). К недостаткам — снижение эффективности при увеличении мобильности узлов.

**Выбор ретранслятора (вычисление маршрутов).** Выбор ретранслятора при координатной маршрутизации заключается в определении направления поиска адресата и размерами области его предполагаемого нахождения. Рассмотрим предложенные правила выбора ретрансляторов (или одного ретранслятора) [50, 51], которые можно разбить на две группы: *случайный* выбор ретранслятора (“направленная волна” или “направленное зондирование”) и *фиксированный* выбор (рис. 7.46–7.49). Будем использовать следующие допущения и обозначения: узлы знают координаты соседей на расстоянии  $1-R$  ретрансляционных участков, каждый узел может изменять мощность передачи, узел  $s$  — отправитель, узел  $d$  — адресат,  $N_i$  — множество узлов-соседей узла  $i$ . В заголовке передаваемого пакета содержится информация о координатах узлов отправителя, адресата и уникальный номер, позволяющий различать дубликаты пакета.

**Случайный выбор ретрансляторов.** На этапе построения маршрута при координатной маршрутизации используется координатная информация для ограничения зоны рассылки зонда-запроса (33). Зона рассылки зонда-запроса задается в его поле и может определяться в виде полуокружности, прямоугольника или сектора.

**Случайный выбор ретрансляторов, находящихся ближе к адресату.** Формат 33 содержит координаты передающего узла, координаты адресата и время получения данной информации. Передача 33 от отправителя  $s$  адресату  $d$  происходит по следующему алгоритму. Каждый узел  $i$  (первоначально  $s$ ) передает 33 своим соседним узлам  $j \in N_i$ . Если  $r_j < r_i - \delta$ , где  $r$  — расстояние до адресата  $d$  и  $\delta = \text{const}$  (определяется погрешностью системы позиционирования), то  $j$  ретранслирует пакет, иначе — он его стирает. Узел  $s$  передает пакет всем своим соседним узлам  $N_s$ . Каждый узел на пути к адресату выполняет аналогичные действия (рис. 7.46).

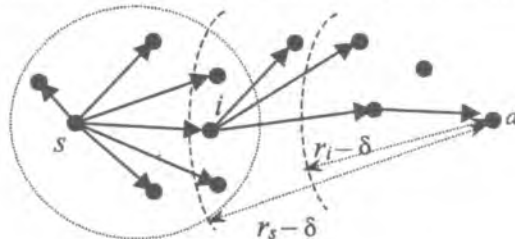


Рис. 7.46. Случайный выбор ближайшего к адресату ретранслятора



Для сокращения числа передач можно предложить следующие правила:

- введение задержки передачи пакета  $t_{\text{зп}}$ , определяемую расстоянием до адресата:  $t_{\text{зп}i} < t_{\text{зп}j}$ , если  $r_j < r_i$  (узел, приняв передачу соседа находящегося ближе к адресату, не передает данный пакет);
- введение параметра  $\delta$ , ограничивающего количество ретрансляторов; если значение  $\delta$  определяется при каждой ретрансляции пакета, то говорят о динамическом изменении размеров области поиска адресата.

Случайный выбор ретрансляторов в прямоугольной области, определенной отправителем. В передаваемом 33 отправитель  $s$  задает область поиска адресата  $d$  в виде круга с центром в точке  $(x_d, y_d)$  и радиусом  $R = v_d(t_1 - t_0)$ , где  $v_d$  — максимальная скорость перемещения адресата;  $t_0$  — время получения последней корректировки его координат;  $t_1$  — текущее время. Зона рассылки (множество ретрансляторов 33) определяется в виде прямоугольника  $sabc$  (рис. 7.47, а) при расположении  $s$  за пределами предполагаемого местоположения  $d$  или  $abcf$  (рис. 7.47, б), когда  $s$  находится внутри данной области с координатами  $(x_s, y_s)$  в одном углу и координатами круга, определяемого  $d$ , в другом.

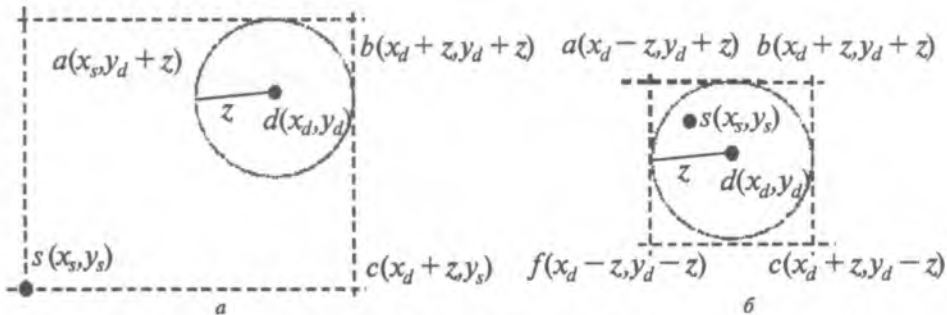


Рис. 7.47. Область выбора ретранслятора задается в виде прямоугольника

Случайный выбор ретрансляторов, находящихся в секторе по направлению к адресату (рис. 7.48). Направление (сектор) передачи определяется следующим образом. Если узлу  $s$  известно расстояние  $r_d$  до адресата  $d$  и максимальная скорость его перемещения  $v_d$ , то он может вычислить возможную область его нахождения. Направление поиска задается углом  $\alpha = \arcsin(v_d)(t_1 - t_0) / r_d$ , где  $t_1, t_0$  — текущее время и время получения координатной информации. Если  $z = v_d(t_1 - t_0) > r_d$ , то узел может находиться в любом направлении и  $\alpha = \pi$ . Если известна функция плотности распределения скорости перемещения узла, то можно вычислить заданную вероятность  $P_H$  нахождения адресата  $d$  в направлении  $[\gamma - \alpha, \gamma + \alpha]$ :

$$P_H \leq P(z \leq v(t_1 - t_0)) = P(r \sin \alpha \leq v(t_1 - t_0)) = P(v \geq r \sin \alpha / (t_1 - t_0)) = \int_{r \sin \alpha / (t_1 - t_0)}^{\infty} (v) dv.$$

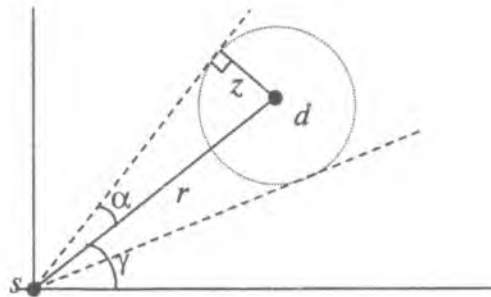


Рис. 7.48. Ретранслятор выбирается в секторе  $[\gamma - \alpha, \gamma + \alpha]$

В передаваемом пакете (кроме координат отправителя и адресата) содержится предполагаемое направление нахождения адресата. Если при передаче пакета от узла  $s$  к узлу  $d$  ретранслятор  $N_s$  принадлежит сектору  $[\gamma - \alpha, \gamma + \alpha]$ , то пакет ретранслируется далее, иначе — он стирается. Каждый узел на пути к адресату определяет новое направление его нахождения ( $\alpha$  и  $\gamma$ ) и выполняет аналогичные действия.

*Фиксированный выбор ретранслятора.* Рассмотрим различные правила выбора  $RT$  ретранслятора(ов) узлом  $s$ ,  $RT \in N_s$  (рис. 7.49, а) [50, 51]:

- ближайший к адресату GEDIR (GEographical DIstance Routing)

$$RT = \min(|N_s, d|) = h;$$

- в направлении адресата с максимальным продвижением к нему MFR (Most Forward within Radius)

$$RT = \min(|N'_s, d|) = |a', d| = a,$$

где  $a'$  — проекция узла  $a$ ;

- ближайший к передающему узлу с продвижением к адресату NFR (Nearest Forward within Radius)

$$RT = \min(|s, N_s|) \text{ и } (|s, d| > |N_s, d|) = c;$$

- с минимальным углом в направлении адресата (Compass)

$$RT = \min \langle N_s, s, d \rangle = \langle f, s, d \rangle = f;$$

- выбор двух ретрансляторов, расположенных по внешней стороне направленного сектора и ближайших к адресату (V-GEDIR) и др.

В зависимости от объема сбора информации о состоянии сети правила выбора ретранслятора будут аналогичны для узлов, находящихся на расстоянии двух, трех и  $R$  ретрансляционных участков. Доказано, что правила выбора ретрансляторов, основанные на уменьшении расстояния к адресату, не вызывают закливания маршрутов передачи информации.

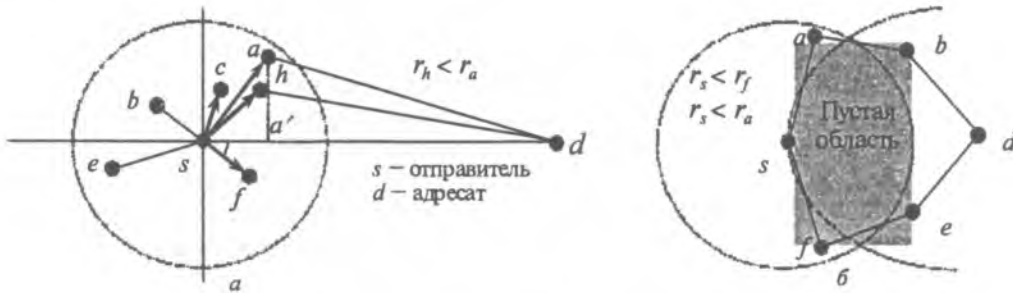


Рис. 7.49. Иллюстрация правил выбора ретранслятора

Однако возможен ряд структур сети, не позволяющих рассмотренным правилам гарантировать доставку пакета адресату. На рис. 7.49, б узел-отправитель  $s$  расположен ближе к адресату  $d$ , чем узлы  $a$  и  $f$ . В этом случае применение любого правила, основанного на уменьшении расстояния к адресату, не позволит найти маршрут даже при его наличии:  $s-a-b-d$  и  $s-f-e-d$ . Поэтому для данной ситуации используется правило обхода области без узлов по ее периметру: *при отсутствии ретранслятора, сокращающего расстояние до адресата, выбрать узел  $f(a)$ , находящийся справа (слева) по (против) часовой стрелке на расстоянии большем, чем отправитель; отметить в передаваемом пакете данный режим передачи (передача по периметру, установив флаг  $P = 1$ ) и передать узлу  $f(a)$  пакет*. Согласно данному правилу узел  $s$  передаст пакет узлу  $f$ , который затем установит флаг  $P = 0$  и передаст пакет далее по ранее рассмотренным правилам выбора ретранслятора.

Применение того или иного правила выбора ретранслятора должно определяться целевой функцией управления данного узла (минимизация времени доставки пакета – стратегия GEDIR, минимизация мощности передач узлов – NFR и т.д.) и реальной ситуацией на сети (динамика топологии, уровень нагрузки и др.) [57].

**Многопараметрическая маршрутизация.** Кроме данных, определяющих местоположение узлов сети, может потребоваться и ряд других параметров (пропускная способность, время задержки передачи, расход энергии на передачу и др.), определяющих построение маршрута по заданным требованиям к качеству передачи (QoS).

В ряде работ [54–56] предлагается использовать многопараметрическую маршрутизацию с использованием следующих метрик  $c_i, i = 1, \dots, I$ , выбора маршрутов:  $c_1$  – мощность передачи узла;  $c_2$  – наличие синхронизации между узлами;  $c_3$  – уровень взаимных помех (MUI);  $c_4$  – надежность доставки информации;  $c_5$  – уровень трафика;  $c_6$  – задержка передачи и др.

Стоимость маршрута представляется аддитивной сверткой из данных метрик.

Однако необходимо отметить, что вычисление кратчайшего маршрута табличными методами маршрутизации при использовании уже двух метрик относится к



классу  $NP$ -полных задач. Поэтому использование множества метрик при табличной маршрутизации будет требовать значительной вычислительной производительности процессора узла, поэтому множество метрик целесообразно использовать при зондовой маршрутизации. При этом для минимизации объема собираемой информации и, соответственно, объема служебного трафика необходимо учитывать состояние сети, внешней среды и самого узла. В этой ситуации целесообразно использовать интеллект — знания о правилах выбора метрик и способах сбора информации о состоянии сети и использовать новый интеллектуальный метод маршрутизации, предложенный в [57].

**Ретрансляция пакетов по маршруту.** Ретрансляция пакетов по маршруту может осуществляться следующими способами: последовательно (каждый узел имеет право изменять маршрут по своему усмотрению), отправителем (маршрут жестко определяется и фиксируется отправителем), по нескольким маршрутам и направленной волной (при построении маршрутов или для повышения надежности доставки пакетов). Решение по выбору способа ретрансляции должно приниматься соответствующей системой управления каждым узлом сети в зависимости от ситуации на сети и требований трафика [57].

**Дополнительные функции.** Исследования СРС большой размерности показали, что даже незначительное повышение динамики топологии сети приводит к значительному росту служебного трафика. Интенсивность потока служебной информации возрастает квадратично (произведение числа узлов на величину топологических изменений). Очевидно, что для решения этой задачи необходимо ввести иерархическое управление СРС — провести разбиение сети на отдельные зоны (кластеры) с выделением главных узлов зоны, узлов-шлюзов и внутренних узлов [54]. Множество главных узлов и выделенные узлы-шлюзы образуют в сети виртуальную магистраль, которая может использоваться как для распространения маршрутной информации, так и для передачи полезной информации.

В методе GRID [51] предполагается введение иерархии управления в сети, логически разделенной на квадраты, каждый из которых пронумерован (рис. 7.50). Координаты узла находятся в соответствии с координатами квадрата. В каждом квадрате один из узлов становится главным. На него возлагаются функции сбора координатной информации сети, распространения ее в квадрате и функции ретрансляции пакета. Каждый вход координатной таблицы узла содержит номер следующего квадрата к адресату, т.е. маршрут представляет собой последовательность квадратов, а не узлов. Данный способ позволяет уменьшить объем обмена служебным трафиком, но требует реализации алгоритма нахождения и поддержания главных узлов квадратов сети. На рис. 7.50, *a* показано исходное состояние сети, на рис. 7.50, *b* — перемещение узлов *a* и *s* в другие квадраты, выбор новых главных узлов и, соответственно, изменение маршрута передачи пакета.

Эффективность методов координатной маршрутизации может быть проведена по двум группам показателей [53].

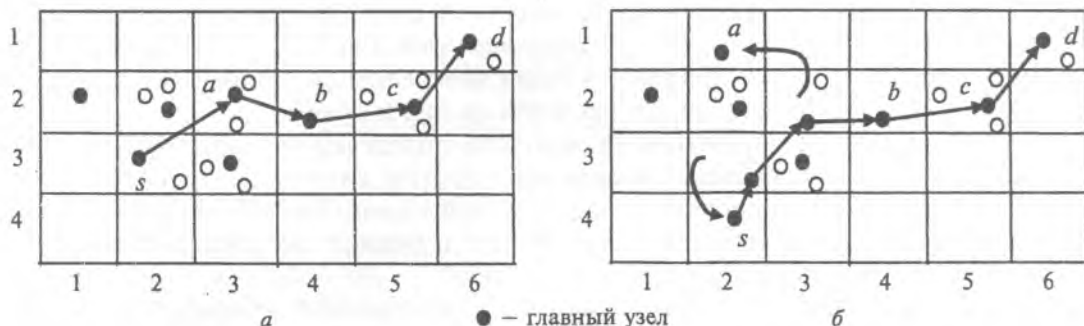


Рис. 7.50. Передача пакета при методе GRID

До сих пор рассматривалось, что топология сети неизменна и маршруты строятся на имеющейся топологии. Однако управление топологией часто дает бóльший выигрыш по сравнению с маршрутизацией. В [58] сделан вывод, что для СРС целесообразно на сетевом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем ввести специальный подуровень управления топологией, работающий совместно с подуровнем маршрутизации.

### 7.3. Выводы

1. Уникальные свойства импульсных сверхширокополосных сигналов требуют специального подхода к проектированию МАС-уровня, в котором должны быть учтены: невозможность определения известными методами занятого состояния радиоканала и естественная способность сигналов в обеспечении параллельной во времени передачи определенным количеством абонентов в общем радиоканале.

2. Количество одновременных передач в радиоканале ограничено системной интерференцией, а также уровнем шумов многопользовательской интерференции — MUI. Для устранения системной интерференции на МАС-уровне предусмотрены процедуры динамического назначения кодов расширения в условиях превышения количества абонентов в сети над количеством доступных ортогональных кодов. Для снижения MUI используются механизмы ее локального измерения и децентрализованного ограничения на уровне, обеспечивающем заданную вероятность успешной передачи.

3. Использование специального канала управления и процедур резервирования позволяет оценивать параметры радиоканала между корреспондирующими абонентами, отслеживать количество активных абонентов по соседству, уведомлять принимающим терминалом соседние с ним узлы о значении дополнительной шумовой мощности, которую каждый из них может добавить к суммарной MUI, не разрушая текущий прием данных этого терминала, что в итоге повышает пропускную способность сети.