

А. И. МИНОЧКИН, В. А. РОМАНЮК

# УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОМ МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТЕЙ

*Рассмотрено управление электропитанием узлов мобильных радиосетей (МР), имеющее целью минимизировать потребляемую мощность узлами, обеспечив заданное качество передачи информации.*

Узлы мобильной радиосети (МР) должны быстро адаптироваться к частым изменениям топологии и эффективно использовать ограниченные сетевые ресурсы. При этом обеспечить информационный обмен с заданным качеством невозможно без эффективной системы управления сетью. Так как электропитание узлов осуществляется от батарей (их емкость определяет не только параметры процессора, памяти и устройства отображения, но и мощность приемопередатчика), то в системе управления МР выделяется подсистема управления энергоресурсом [3], минимизирующая мощность, потребляемую узлами сети, и максимизирующая время ее жизни  $T_{ж}$  — время работы сети до момента отказа узла из-за нулевой емкости его батарей.

Отметим, что функциональные подсистемы (отображения, вычисления, хранения и связи) узла сети расходуют различное количество энергии батарей. **Цель статьи — рассмотреть задачи управления энергоресурсом узлов сети при функционировании их подсистемы связи.**

**Управление энергоресурсом** может быть реализовано на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем — физическом (Ф), канальном (К), сетевом (С) — соответствующими методами управления мощностью передачи и сохранения энергии батарей (рис. 1).

## Методы управления мощностью передачи

• **Уменьшение мощностей передач между соседними узлами** с сохранением необходимых параметров радиоканала: требуемого уровня отношения сигнал/помеха, нормированного на бит  $SINR = E_b/N_0$  ( $E_b$  — энергия сигнала;  $N_0$  — спектральная мощность шума), вероятности битовой ошибки (BER). Каждый узел хранит «историю» принимаемых сигналов от соседних узлов.

Пусть сеть представляет собой  $N$  случайно расположенных узлов, максимальная мощность передатчика  $i$ -го узла  $P_i^{max}$ . Тогда для успешной передачи сообщения от узла  $i$  к узлу  $j$  необходимо, чтобы отношение  $SINR$  было больше определенного порога  $\beta$ , определяющего BER [4]:

$$SINR = \frac{P_i G_{ij}}{\sum_{k \neq j} P_k G_{kj} + \eta_j} \geq \beta, \quad (1)$$

где  $i, j, k \in N$ ;  $P_{ij}$  — мощность передачи  $i$ -го узла;  $G_{ij} = k_a F d_{ij}^{-\alpha}$  — затухание между узлами  $i$  и  $j$  ( $k_a$  — коэффициент, учитывающий характеристики антенн;  $F$  — множитель ослабления;  $d$  — расстояние;  $\alpha = 2, \dots, 4$  — степень потери мощности),  $\eta_j$  — спектральная мощность шума приемника  $j$ -го узла.

Цикл управления мощностью передачи аналогичен регулированию мощности, применяемому в сотовой сети с кодовым разделением каналов. Если уровень сигнала превышает порог, то мощность передачи уменьшается. Если время ожидания сообщения для протокола канального уровня превышено, то передача осуществляется с большей мощностью. Регулировка мощности передачи в канале  $ij$  осуществляется по следующему итерационному правилу [4]:

$$P_{ij}(n+1) = \min(P_{ij}^{max}, \frac{\beta}{SINR_{ij}(n)} P_{ij}(n)),$$

где  $n$  — номер итерации.

Например, протокол РСМ (Power Control MAC) предполагает, что мощность, с которой отправитель передает запрос на передачу (RTS), а получатель — согласие (CTS), одна и та же, тогда как информация (DATA) и квитанция (ACK) передаются с минимальной мощностью, необходимой для безошибочного приема [5]. Но при этом для избежания возможных столкновений в зоне обнаружения во время передачи DATA мощность передачи увеличивается до максимального значения. Результаты моделирования показали: *регулируя мощность передачи, можно уменьшить расход энергии на 10–20%, увеличив пропускную способность до 15%* [5].

• **Управление топологией радиосети** предполагает перераспределение мощностей передач узлов  $P_i$  и/или коэффициента направленности их антенн  $\gamma_i$  [6; 7]. Увеличение мощностей передач узлов позволяет повысить вероятность успешной передачи пакетов (за счет увеличения SINR), сократить время их доставки и объем служебной маршрутной информации (вследствие уменьшения диаметра сети), требуя, однако, большего расхода энергии батарей и обуславливая высокий уровень взаимных помех (что приводит



Рис. 1

к резкому снижению пропускной способности сети). С уменьшением мощности передачи пропускная способность сети увеличивается (за счет пространственного разнесения каналов и снижения уровня взаимных помех), а время доставки сообщения и объема служебного трафика возрастает.

Одна из многих целей управления топологией радиосети  $Z_y, y = \overline{1, Y}$ , — минимизировать мощность передач узлами сети, сохранив ее связность и заданный уровень SINR [5]:

$$\min_{P_{ij}} \sum_{\forall (i,j)} P_{ij}, \forall \text{ SINR}_{ij} > \beta, i, j \in N, i \neq j.$$

В сущности речь идет о коллективной работе узлов, направленной на согласование количества соседей по определенным критериям. Предложен ряд децентрализованных алгоритмов построения энергоэффективных топологий BPS (planar power efficient structure) [7], COMPOW (COMmon POWer) [8].

Например, протокол BSP, используя систему позиционирования, строит планарный граф, имеющий минимальную суммарную мощность передачи по всем маршрутам сети. Протокол COMPOW предполагает оптимизацию общей мощности передачи в сети посредством изменения ее связности (меньшая мощность передачи — меньшая связность).

**Таблично-ориентированные методы маршрутизации** позволяют вычислять кратчайший путь с помощью известных алгоритмов Дейкстры или Беллмана—Форда. Например, в децентрализованной версии алгоритма Беллмана—Форда каждый узел периодически информирует (рассылает маршрутные сообщения, содержащие измененные входы маршрутных таблиц) своих соседей о собственных маршрутах к адресату. Приняв маршрутное сообщение, узел  $i$  модифицирует свои входы маршрутных таблиц, используя формулу [16]  $C_{ab} = \arg \min_{k \in N_i} (C_{ak} + C_{kb})$ , где  $C_{ab}$  ( $C_{kb}$ ) — стоимость

кратчайшего пути от узла  $a$  ( $k$ ) к адресату  $b$ ;  $C_{ak}$  — стоимость передачи непосредственно от узла  $a$  к узлу  $k$  ( $k$  — сосед узла  $a$ ). После корректировки маршрутных таблиц узел рассылает маршрутные сообщения своим соседям.

**Зондовые методы маршрутизации** предполагают сбор информации о состоянии сети на основе ее зондирования с дальнейшим построением маршрута и его поддержанием. В отличие от известных зондовых методов маршрутизации (например, DSR — Dynamic Source Routing) зонд-запрос будет включать в себя рассматриваемые далее энергозависимые метрики маршрутов.

**Групповая маршрутизация** означает построение группового дерева (от отправителя к получателям) минимальной стоимости по критерию минимум расходуемой мощности [17; 19].

**Волновая (широковещательная) передача сообщений** является одним из основных способов передачи в МР [18]. Управление энергоресурсом при волновой передаче заключается в построении минимального связного доминирующего множества (МСДМ) по одному или нескольким критериям, таким как минимальная мощность передачи узлов, максимальная оставшаяся емкость батарей, минимальное количество передающих узлов (остальные узлы могут находиться в состоянии приема или сна). При этом в метриках выбора узлов МСДМ необходимо учитывать их мобильность и интенсивность отказов, а также то, что узлы, не принадлежащие МСДМ, постоянно будут находиться в состоянии приема, что предполагает значительно больший расход энергии в сравнении с режимом сна.

Данная задача относится к классу NP-полных, поэтому для ее решения необходимо использовать эвристики, которые по способу выбора ретрансляторов пакетов можно разбить на две группы [18]:

- случайный выбор ретранслятора (например, вероятность ретрансляции пакета узлом определяется оставшейся энергией батарей [20]);

- детерминированный — строится виртуальная магистраль передачи информации, удовлетворяющая одному из перечисленных критериев. Для сети, представленной на рис. 2, виртуальная магистраль построена по критерию минимума числа передающих узлов — 4, 7, 11, 13.

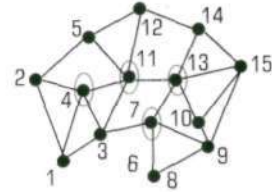


Рис. 2

- **Применение направленных антенн и системы позиционирования** позволяет снизить уровень взаимных помех и увеличить энергетику радиоканалов (при этом уменьшение расходуемой мощности может достигать 90%) [9].

#### Методы сохранения энергии батарей

- **Временное отключение приемопередатчика узла (так называемый пассивный режим, или режим «сон»)**. Для современных радиотехнологий уменьшение расходуемой мощности при различных режимах работы узла достигает 95% (например, для Lucent IEEE 802.11 WarePC Card расход энергии для режимов «сон», поиск, прием и передача составляет соответственно 0,06; 0,84; 0,97 и 1,33 Вт [10]). Отметим, что пассивный режим уже стандартизирован для полностью связанных (каждый с каждым) беспроводных сетей в протоколе IEEE 802.11 PCF (Power Save Mode). Однако он предполагает централизованное управление отключением узлов и поэтому не применим для МР.

Децентрализованный протокол PAMAS (Power Aware Multiple-Access Protocol) [11], реализующий пассивный режим между соседними узлами, заключается в следующем. Узел, обнаружив, что передаваемый пакет предназначен не ему, отключается на время передачи данного пакета, сообщаемого в его заголовке. Этот протокол весьма эффективен при высоком трафике и плотности узлов (позволяет уменьшить расход энергоресурса на 10–70%) и менее эффективен в высокоскоростных сетях (из-за малого времени передачи сообщений выигрыш в применении пассивного режима уменьшается за счет частого переключения режимов). Кроме того, его недостатками являются наличие отдельного управляющего канала для передачи служебной информации, а также непредсказуемость задержки передачи информации.

- **Временное отключение приемопередатчиков узлов в масштабах сети или ее зоны** может происходить синхронно или асинхронно, периодически или по возможности.

**Синхронный пассивный режим** предполагает глобальную синхронизацию узлов сети. Синхронизация отключения узлов может быть достигнута совмещением с зондовой маршрутизацией (волновой рассылкой управляющей информации, например протокол Puls [12]) или кластеризацией сети

(разбиением сети на зоны с выделением главных узлов зоны с присвоением им функций управления). Так, протокол GAF (Geographical Adaptive Fidelity), предполагающий использование системы позиционирования, разбивает сеть на географические квадраты с выделением главных узлов, управляющих режимами узлов в каждом квадрате [13]. К недостаткам данного метода относятся необходимость фазы синхронизации (что довольно проблематично в условиях динамичной сети), а также дополнительный служебный трафик и возможность задержки передачи данных. Кроме этого заметим, что фаза синхронизации пассивного режима отличается от временной синхронизации сети, которую можно осуществить, воспользовавшись оборудованием позиционирования (GPS-приемников).

*Асинхронный режим* может быть реализован независимо каждым узлом сети при согласовании времени отключения с соседними узлами. Его недостаток — значительное влияние на процесс построения маршрута и на время доставки пакета.

• **Уменьшение числа повторных передач, вызванных столкновениями пакетов.** Соответствующие методы канального доступа обеспечивают минимум столкновений пакетов, уменьшая расходуемую энергию. Поэтому методы временного разделения каналов (TDMA) или даже гибридные (TDMA/CDMA) с позиций энергосбережения предпочтительней случайных методов доступа.

• **Применение энергозависимых метрик вывода маршрутов [14; 15].**

1. **Метрика — мощность, расходуемая на передачу/прием узлом.** Идея данного метода заключается в следующем: зависимость необходимой мощности передачи от расстояния носит нелинейный характер и, следовательно, маршрут, состоящий из нескольких «коротких» ретрансляций, расходует меньше энергии, чем тот, который образован из «длинных» ретрансляций:  $P_{ab} > P_{ac} + P_{cb}$  (рис. 3). Поэтому в качестве метрики стоимости радиоканала  $C_{ij}^p$  можно взять минимальный уровень мощности передачи  $P_{ij}^{\min}$  между узлами  $i$  и  $j$ , обеспечивающий заданное значение вероятности битовой ошибки (1).

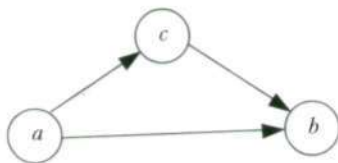


Рис. 3

ки (1).

Кроме того, стоимость  $C_{ij}^p$  должна учитывать мощность  $P^{no}$ , расходуемую на прием и обработку сообщений (в том числе служебных, например для протокола случайного доступа — это пакеты «запрос на передачу» CTS, «согласие» RTS, «квитанция» ACK), а также их размер  $L$ :

$$C_{ij}^p = (P_{ij}^{\min} + P_j^{no})(L_c + L_{CTS}) + (P_{ij}^{\min} + P_i^{no})(L_{ACK} + L_{RTS}), j \in N_i. \quad (2)$$

Тогда общая стоимость передачи по маршруту  $m$  представляется в виде

$$C_m^p = \sum_{i=1}^{r-1} C_{ij}^p, \forall i, j \in m, i \neq j, j \in N_i,$$

где  $r$  — число узлов в маршруте  $m$ . Поэтому маршрут с минимальной мощностью передачи/приема между отправителем  $a$  и адресатом  $b$  определяется так:

$$m_{ab}^* = \arg \min_{m \in M_{ab}} C_m^p,$$

где  $M_{ab}$  — множество всех возможных маршрутов между  $a$  и  $b$ .

Однако поскольку мощность передачи зависит от расстояния  $d^{-\alpha}$ , предложенный метод будет выбирать маршрут с большим (по сравнению с критерием минимума ретрансляций) числом ретрансляций. Это приведет к увеличению времени доставки пакета, числа столкновений (для протоколов случайного доступа), объема служебного трафика и вероятности нестабильности маршрута (из-за перемещения узлов). Следовательно, использование данной метрики целесообразно в случае значительной разности расхода энергии при режимах передача/прием. Возможным решением является также ограничение числа ретрансляций предельным значением  $r^{\max}$ , которое можно определить на этапе проектирования сети.

2. **Метрика — емкость батарей узлов.** Маршрутизация с использованием метрики (2) позволяет уменьшить энергопотребление узлов, однако она не учитывает их энергетические возможности. Пусть  $e_i^t$  — емкость батареи  $i$ -го узла в момент времени  $t$ . Определим  $f_i(e_i^t) = 1/e_i^t = 0, \dots, 100$  как функцию стоимости емкости его батарей (уменьшение емкости — увеличение стоимости). Для маршрута  $m$ , состоящего из  $r$  узлов, стоимость емкости батарей

$$C_m^6 = \sum_{i=1}^{r-1} f_i(e_i^t), \forall i \in m. \quad (3)$$

Тогда между узлами  $a$  и  $b$  маршрут с максимальной емкостью батарей

$$m_{ab}^* = \arg \min_{m \in M_{ab}} C_m^6 = \arg \min_{m \in M_{ab}} \sum_{i=1}^{r-1} f_i(e_i^t),$$

где  $M_{ab}$  — множество всех возможных маршрутов между узлами  $a$  и  $b$ .

3. **Многopараметрическая метрика — мощность передачи узлов, емкость батарей.** Недостаток рассмотренной метрики (3) заключается в том, что суммирование стоимостей батарей узлов не позволяет отследить их критические емкости. Например, на рис. 4 показаны два возможных маршрута между отправителем и адресатом. Хотя узел 3 имеет наименьшую емкость батареи, общая стоимость первого маршрута меньше, чем второго ( $80 < 90$ ), и, соответственно, для маршрутизации пакетов будет выбран первый маршрут.

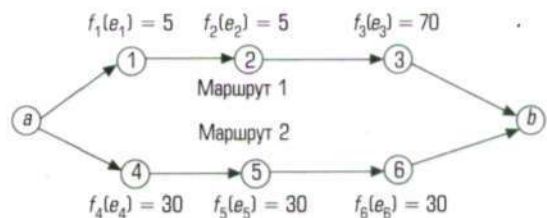


Рис. 4

Учитывая сказанное, стоимость маршрута  $m$  можно определить как минимальную емкость батареи узла (максимальная стоимость) в данном маршруте:

$$C_m^6 = \max_{i \in m} f_i(e_i^t). \quad (4)$$

Однако (4) не гарантирует получения маршрута с минимальной мощностью передачи. Обозначим  $M_{ab}^c$  множество всех маршрутов между отправителем  $a$  и адресатом  $b$ , удовлетворяющих следующему условию: все узлы в момент времени  $t$  имеют стоимость емкости батарей, превышающую допустимое значение, т. е.  $f_i(e_i^t) \geq f_i(e_i^0)$ .

Получить свертку метрик (по мощности передачи и емкости батарей) из-за их разнородности представляется затруднительным, и поэтому, **в зависимости от емкости батарей узлов, маршрут  $m_{ab}^*$  необходимо выбирать по одной из метрик:**

$$m_{ab}^* = \begin{cases} \arg \min_{m \in M_{ab}} \sum_{i=1}^{r-1} C_{ij}^p; \\ \arg \min_{m \in M_{ab}} (\max_{m \in M_{ab}} f_i(e_i^r)). \end{cases}$$

где  $i, j \in m$ ,  $i \neq j$ ,  $j \in N_i$  — соседи узла  $i$ . При функционировании сети порог  $f_i(e_i^0) = 1, \dots, 100$  должен постепенно уменьшаться для установления баланса емкостей батарей в узлах сети.

Предложенный метод маршрутизации функционирует следующим образом. На начальном этапе инициализации сети каждый узел использует максимальную мощность передачи или реализует топологию, спланированную центром управления сетью. После обмена служебной информацией (время инициализации сети зависит от принятого базового метода [16]) каждый узел располагает необходимой информацией для маршрутизации пакетов по предложенным метрикам.

Отметим, что сбор информации о состоянии сети по выбранным метрикам, построение и вычисление маршрута могут быть ориентированы на табличный, зондовый или гибридный метод маршрутизации, а также на количество адресатов (методы однопользовательской, групповой, волновой маршрутизации) и маршрутов передачи (методы одно- и многопутевой маршрутизации) [16–20].

• **Уменьшение служебного трафика** за счет сокращения числа служебных сообщений:

• на канальном уровне — исключение части служебных сообщений RTS, CTS или ACK, например применение эхо-квирования (узел, передавший пакет, «слышит» его ретрансляцию соседом [21]);

• на сетевом уровне — применение  $R$ -зонного гибридного метода маршрутизации, аккумулирующего преимущества двух основных методов построения маршрутов (табличного и зондового). Данный метод предполагает выделение каждым  $i$ -м узлом так называемой маршрутной  $R_i$ -зоны, где  $R$  — число ретрансляций [22]. Построение маршрутов внутри  $R_i$  осуществляется табличным способом (обмен служебной информацией периодический и по событиям), а за ее пределами — зондовым (по мере необходимости при наличии трафика). Адаптация размеров  $R_i$  к ситуации на сети позволяет минимизировать объем служебного трафика и тем самым уменьшить расход энергоресурса [3].

\*\*\*

Управление энергопотреблением должно осуществляться по функциям управления на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем. Проведенные исследования показали, что применение рассмотренных ме-

тодов позволяет увеличить «время жизни» сети в среднем в 1,5–2 раза и уменьшить среднюю мощность передачи на один ретрансляционный участок на 15–20%. Синтез оптимального метода управления энергоресурсом (или их совокупности) будет определяться характеристиками конкретной сети и принятыми решениями по реализации других функций управления сетью.

#### Литература

1. Романюк В. А. Мобильные радиосети — перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. — 2003. — № 12. — С. 62–68.
2. Шиллер Й. Мобильные коммуникации: Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2002. — 384 с.
3. Миночкин А. И., Романюк В. А. Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок. — 2004. — № 5.
4. ElBatt T., Ephremides A. Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad Hoc Networks // IEEE Transaction on Wireless Communication. — 2004. — Vol. 3, no. 1.
5. Jung E. S., Vaidya N. H. A power control MAC protocol for ad hoc networks // In Proceedings of MOBICOM'02, 2002.
6. Миночкин А. И., Романюк В. А. Управление топологией мобильной радиосети // Зв'язок. — 2003. — № 2. — С. 28–33.
7. Song W.-Z., Wang Y., Li X.-Y., Frider O. Localized Algorithms for Energy Efficient Topology in Wireless Ad Hoc Networks // In Proceedings of MOBIHOC'04, 2004.
8. Narayanaswamy S., Kawadia V., Sreenivas R. S., Kumar P. R. Power control in ad-hoc networks: Theory, Architecture, algorithm and implementation of the COMROW protocol // In Proceedings of EuroWireless'02, 2002. — P. 156–162.
9. Nasipuri A., Li K., Sappidi U. R. Power Consumption and Throughput in Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas // In Proceedings IEEE ICCCN'02, 2002.
10. Feeney L. M., Nilsson M. Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in Ad Hoc Networking Environment // In Proceedings IEEE INFOCOM'01, 2001.
11. Singh S., Raghavendra C. S. PAMAS — power aware multi-access protocol with signaling for ad-hoc networks // ACM Computer Communications Review, 1998.
12. Awerbuch B., Holmer D., Rubens H. The Pulse Protocol Energy Efficient Infrastructure Access // In Proceedings IEEE INFOCOM'04, 2004.
13. Xu Y., Heideman J., Estin D. Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing // In Proceedings IEEE MOBICOM'01, 2001.
14. Toh C.-K. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks // IEEE Communication. — 2001. — V. 39, no. 6.
15. Zhu J., Qiao C., Wang X. A Comprehensive Minimum Energy Routing Scheme for Wireless Ad hoc Networks // In Proceedings of IEEE INFOCOM'04, 2004.
16. Миночкин А. И., Романюк В. А. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок. — № 1. — 2001. — С. 31–36.
17. Романюк В. А. Групповая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2001. — № 6. — С. 36–41.
18. Романюк В. А. Волновая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2003. — № 4. — С. 27–30.
19. Wang B., Gupta K. S. S-Remit: A Distributed Algorithm for Source-based Energy Efficient Multicast in Wireless Ad Hoc Networks // In Proceedings of GLOBECOM'03, 2003.
20. Sheu J.-P., Chang Y.-C., Tsai H.-P. Power-Balance Broadcast in Wireless Mobile Ad Hoc Networks // In Proceedings of EuroWireless'04, 2004.
21. Миночкин А. И., Романюк В. А. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2004. — № 2. — С. 46–50.
22. Романюк В. А. R-зонный метод маршрутизації в автоматизованих мережах радіозв'язку // Збірник наук. праць. — К.: КВІУЗ. — № 3. — 2001. — С. 182–186.