

УДК 621.396.49

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ФИКСИРОВАННЫХ СЕТЯХ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОДОСТУПА С УЧЁТОМ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ПОМЕХ

Е. А. Спирина

**Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева**

Статья получена 7 сентября 2015 г.

Аннотация. В работе предложен и исследован новый метод маршрутизации, обеспечивающий повышение пропускной способности фиксированных сетей широкополосного радиодоступа за счёт снижения потока внутрисистемных помех.

Ключевые слова: сети широкополосного радиодоступа, маршрутизация, внутрисистемные помехи, оптимизация распределения информации.

Abstract. In this paper the new routing method is proposed and researched; it provides increase of broadband wireless access fixed networks capacity by multiuser interference reduction.

Key words: Broadband wireless access networks, routing, multiuser interference, information distribution optimization.

Введение

Сети широкополосного радиодоступа широко применяются для оказания услуг доступа к сети Internet для физических и юридических лиц, а также для обеспечения работы других систем связи, в том числе и специального назначения. Поэтому к сетям широкополосного радиодоступа предъявляются высокие требования в плане пропускной способности, системной емкости, надежности, помехоустойчивости, стоимости и т.д.

В работе [1] решается задача повышения пропускной способности фиксированных сетей широкополосного радиодоступа за счёт снижения

внутрисистемных помех путем оптимизации параметров сети. Однако в работе не учитываются особенности пакетной передачи данных, заключающиеся в том, что помехи определяются не только параметрами физического уровня, но и передаваемой информацией. Следовательно, дополнительным резервом повышения пропускной способности сетей является оптимизация распределения информации за счёт предсказания потока внутрисистемных помех, возникающего при передаче данных [2].

Существующие методы маршрутизации не учитывают взаимосвязь характеристик каналов систем, что не позволяет использовать их для оптимизации распределения информации. Таким образом, актуальной задачей является разработка нового метода маршрутизации в сетях широкополосного радиодоступа, учитывающего внутрисистемные помехи.

1. Постановка задачи

Рассмотрим сеть широкополосного радиодоступа, состоящую из $m = \overline{1, M}$ базовых станций (БС) и $l = \overline{1, L}$ абонентских комплектов (АК) ($M < L$) (рис.1).

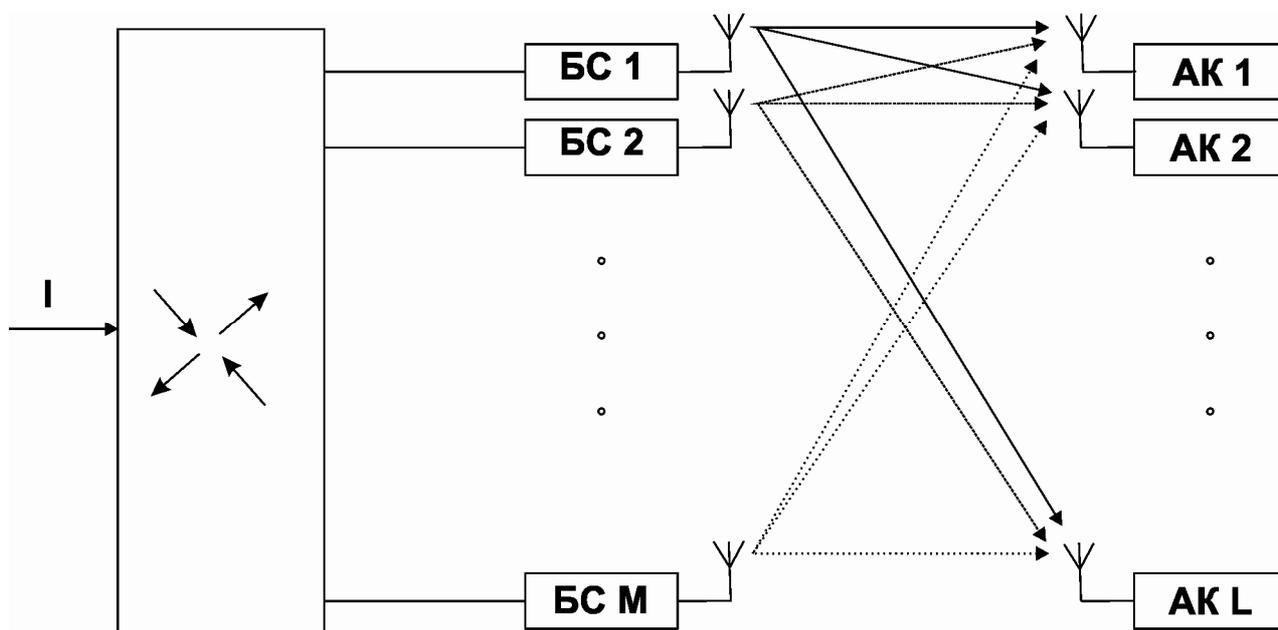


Рис.1. Сеть широкополосного радиодоступа

Предположим, что в некоторый момент времени на интервале жизни пакета на вход маршрутизатора поступает вектор информации $\vec{I} = (I_1, \dots, I_L)$,

где I_l - это объём информации для l -ого АК, состоящий из Np_l пакетов длиной Lp_l .

Согласно рассматриваемой структуре сети, возможно счётное множество вариантов доставки пакетов до АК. Обозначим за B количество элементов в этом множестве, а за $\vec{N} = (N^1, \dots, N^B)$ - вектор кратности использования вариантов. Тогда число пакетов доставленных на l -ый АК может быть определено

$$\begin{cases} Np_l = \sum_{b=1}^B N^b \cdot Np_l^b, & l = \overline{1, L} \\ N^b \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

где Np_l^b - количество пакетов, доставляемых l -му АК для варианта b .

Таким образом, выражение (1) показывает взаимосвязь N^b и I_l . Так как $B > L$, то существует бесконечное множество решений системы (1) относительно вектора \vec{N} . Каждое полученное значение \vec{N} является одним из частных случаев решения задачи маршрутизации.

Для поиска оптимального маршрута доставки информации необходимо выбрать показатель эффективности. Одним из распространённых показателей эффективности в задачах маршрутизации является время доставки пакетов. Тогда оптимальное, с точки зрения выбранного критерия, решение задачи маршрутизации будет иметь вид:

$$\vec{N}_{opt} = \arg \min_{\vec{N}} (\tau(\vec{N})), \quad (2)$$

где $\tau(\vec{N})$ - время доставки вектора информации \vec{I} для вектора кратности использования вариантов \vec{N} .

2. Решение задачи

Время доставки вектора \vec{I} будет определяться суммарным временем доставки пакетов по всем B вариантам с учётом кратности их использования:

$$\tau(\vec{N}) = \sum_{b=1}^B N^b \cdot \tau^b, \quad (3)$$

где τ^b - время доставки пакетов по варианту b .

Тогда критерий маршрутизации может быть записан в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{N}_{opt} = \arg \min_{\vec{N}} \left(\sum_{b=1}^B N^b \cdot \tau^b \right) \\ Np_l = \sum_{b=1}^B N^b \cdot Np_l^b, \quad l = \overline{1, L}. \\ N^b \geq 0, \quad b = \overline{1, B} \end{array} \right. \quad (4)$$

Полученная задача относится к задачам линейного программирования, которая может быть решена симплекс методом.

Для синхронной сети величина τ^b определяется как максимальное значение среди времён доставки всех пакетов для варианта b :

$$\tau^b = \max_{l=\overline{1, L}} (Np_l^b \cdot \tau_{lm}^b), \quad (5)$$

где τ_{lm}^b - время доставки одного пакета от m -ой БС до l -ого АК для варианта b . Для каждого из вариантов величина m является однозначно связанной с номером АК l , так как АК может в фиксированный момент времени принимать данные только от одной БС.

Время доставки одного пакета τ_{lm}^b зависит от длины пакета Lp_l и информационной скорости передачи данных V_{lm}^{AK} .

$$\tau_{lm}^b = \frac{Lp_l}{V_{lm}^{AK}}. \quad (6)$$

Информационная скорость передачи данных зависит от сигнально-помеховой обстановки и в силу наличия внутрисистемных помех будет различна для каждого варианта b .

Время доставки пакетов до разных АК $(Np_l^b \cdot \tau_{lm}^b)$ в рамках одного варианта b может сильно отличаться из-за различия параметров выражения (6) для различных АК, что приводит к «простою» канала связи. Для повышения эффективности использования канала связи необходимо снизить максимальное

время доставки пакетов путём перераспределения ресурсов между БС, участвующих в передаче данных по варианту b (энергетические ресурсы, число передаваемых пакетов Np_l^b и т.д.).

Предложенный метод маршрутизации содержит два этапа:

1. Этап анализа, осуществляемый в процессе планирования сети и заключающийся в определении множества вариантов доставки и параметров сети для каждого варианта;
2. Этап маршрутизации, заключающийся в нахождении для поступившего вектора информации \vec{I} оптимального вектора кратности использования вариантов \vec{N}_{opt} , определяющего правило работы маршрутизатора.

На этапе анализа необходимо:

1. определить множество возможных вариантов доставки информации до АК и количество пакетов Np_l^b , доставляемых до всех АК для каждого из вариантов $b = \overline{1, B}$;
2. рассчитать информационные скорости передачи данных всех АК для каждого из вариантов $b = \overline{1, B}$;
3. рассчитать время доставки одного пакета τ_{lm}^b , провести перераспределение ресурсов между БС для снижения максимального значения τ_{lm}^b и вычислить время доставки пакетов по варианту b - τ^b .

На этапе маршрутизации, с использованием информации, полученной при анализе сети, определяется \vec{N}_{opt} путём решения системы (4).

3. Пример решения

Рассмотрим данный подход для решения задачи, приведённой в работе [1]. В ней была рассмотрена задача оптимизации параметров фрагмента действующей сети широкополосного радиодоступа стандарта 802.11n, развёрнутой в городе Казани. В этой сети, исходя из стандарта 802.11n, каждая БС в фиксированный момент времени может передавать информацию только

одному АК.

Для расчёта информационных скоростей передачи данных воспользуемся выражением из работы [1]:

$$V_{lm}^{AK} \approx k_{\lambda} \cdot \frac{v_c}{2} \cdot \sum_{r=1}^{I^u} \log_2(\gamma_{rm}^l) - k_{\lambda} \cdot \frac{v_c}{2} \cdot I^u \cdot \log_2(\Gamma). \quad (7)$$

Однако при расчёте отношения сигнал/помеха γ_{rm}^l будем учитывать мощности только тех БС, которые используются в варианте доставки пакетов b . В этом случае его значение может быть определено по формуле:

$$\gamma_{rm}^l = \frac{P_m^{BC} \cdot K_{lm}^L}{\sum_{\substack{m'=1 \\ m' \neq m \\ Np_l^b=1}}^M K(f_{m'} - f_{im}) \cdot P_{m'}^{BC} \cdot K_{lm'}^L + \sigma_n^2}, \quad (8)$$

Рассмотренный в [1] фрагмент содержит 6 БС, три из которых являются радиорелейными линиями передачи данных (РРЛ), и 15 АК, три из которых являются РРЛ. В этом случае число вариантов доставки пакетов

$$B = 2^3 \cdot \sum_{m=1}^3 C_3^m \cdot A_{12}^m = 8 \cdot (36 + 396 + 1320) = 14016. \text{ Далее для каждого варианта } b$$

проведём расчёт информационных скоростей передачи данных V_{lm}^{AK} по формуле (7) и времён доставки одного пакета от m -ой БС до l -ого АК τ_{lm}^b по формуле (6). Для снижения максимального времени доставки пакетов проведём процедуру оптимизации мощностей БС на основе следующего критерия:

$$\bar{P}_{opt} = \arg \max_{\bar{P}} \min_{l=1, L} \sum_{r=1}^{I^u} \log_2 \left(\frac{P_m^{BC} \cdot K_{lm}^L}{\sum_{\substack{m'=1 \\ m' \neq m \\ Np_l^b=1}}^M K(f_{m'} - f_{im}) \cdot P_{m'}^{BC} \cdot K_{lm'}^L + \sigma_n^2} \right). \quad (9)$$

Тогда τ^b может быть определено как:

$$\tau^b = \frac{Lp}{k_\lambda \cdot \frac{v_c}{2} \cdot \sum_{r=1}^{I^u} \log_2 \left(\frac{Pop_{lm}^{BC} \cdot K_{lm}^L}{\sum_{\substack{m'=1 \\ m' \neq m \\ Np_l^b=1}}^M K(f_{m'} - f_{im}) \cdot Pop_{m'}^{BC} \cdot K_{lm'}^L + \sigma_n^2} \right)} - k_\lambda \cdot \frac{v_c}{2} \cdot I^u \cdot \log_2(\Gamma)}. \quad (10)$$

Для минимизации «простоёв» в сети будем использовать пакеты переменной длины. Минимальная длина пакета составляет $Lp_{\min} = 576$ байт и используется при минимальной информационной скорости передачи данных. С увеличением скорости длина пакета возрастает пропорционально. В этом случае:

$$Np_l^b = \begin{cases} 1, & \text{если данные на } l\text{-ый АК передаются для варианта } b \\ 0, & \text{если данные на } l\text{-ый АК не передаются для варианта } b \end{cases}. \quad (11)$$

На основе приведённых выражений с использованием программного комплекса «NT_21Vek» были определены значения Lp_l^b и τ^b для всех вариантов доставки пакетов. Таким образом, был выполнен этап анализа.

Объём информации для l -ого АК I_l будем определять на интервале в 1 с, исходя из заданной скорости V_{lm}^{zad} [1].

Далее симплекс методом была решена задача маршрутизации (4) и определен \vec{N}_{opt} . Параметры для используемых маршрутов, имеющих не нулевые значения в \vec{N}_{opt} приведены в табл.1-2.

Общее время доставки всех пакетов составило $\tau(\vec{N}) = 0.97$ с, что соответствует нагрузке $C = 0.97$. В работе [1] максимальная нагрузка на БС для этого случая составляла 1.69. Таким образом, предложенный метод маршрутизации для неоптимизированной сети обеспечивает снижение нагрузки на 42%, что, как отмечено в [1] приводит к повышению пропускной способности сети.

Таблица 1. Общее время доставки пакетов по варианту b для неоптимизированной сети

b	N^b	Время доставки одного пакета по варианту b τ^b , мкс	Общее время доставки пакетов по варианту b , с
1283	561	56.41	0.03
1415	645	56.41	0.04
2865	388	65.23	0.03
2867	1136	56.54	0.06
3030	244	65.23	0.02
3058	277	66.21	0.02
9981	75	198.60	0.01
11332	1154	71.70	0.08
11352	1689	70.35	0.12
12619	338	198.60	0.07
13938	524	198.74	0.10
13967	235	99.11	0.02
13982	2310	70.39	0.16
13988	2594	75.13	0.19
13992	174	70.39	0.01
Общее время доставки всех пакетов $\tau(\vec{N})$			0.97

Таблица 2. Номер БС, с которой осуществляется передача данных и длина пакета по варианту b для неоптимизированной сети

b	m Лр, бит														
	AK1	AK2	AK3	AK4	AK5	AK6	AK7	AK8	AK9	AK10	AK11	AK12	AK13	AK14	AK15
1283					1 4480		2 5851							5 6270	
1415					1 4480						2 4878			5 6270	
2865			1 4480				2 6548						6 6285	5 7244	
2867					1 4480		2 5675						6 5447	5 6278	
3030			1 4480									2 6253	6 6285	5 7244	
3058										2 7584		3 4480	6 6125	5 7363	
9981				2 4480		1 16216						3 12647	6 18375		
11332						1 5851	2 4480					3 4566	6 6620		4 6460
11352						1 5741				2 4754		3 4480	6 6495		4 6338
12619			1 10252	2 4480								3 12639	6 18370	5 22051	
13938		1 11851		2 4480								3 12648	6 18344	5 22055	4 17905
13967	1 4480						2 6192					3 6307	6 9148	5 10999	4 8929
13982						1 5561		2 4541				3 4480	6 6497	5 7812	4 6342
13988		1 4480								2 5077		3 4781	6 6934	5 8337	4 6768
13992						1 5561				2 4757		3 4480	6 6497	5 7812	4 6342

Далее решим аналогичную задачу маршрутизации для оптимизированной сети. Параметры для используемых маршрутов, имеющих не нулевые значения в \vec{N}_{opt} приведены в табл.3-4.

Таблица 3. Общее время доставки пакетов по варианту по варианту b для оптимизированной сети

b	N^b	Время доставки одного пакета по варианту b τ^b , мкс	Общее время доставки пакетов по варианту b , с
172	409	44.92	0.02
220	3238	47.93	0.16
256	711	50.23	0.04
3402	15	168.69	0.00
3435	85	125.08	0.01
11342	1712	57.09	0.10
11352	87	57.09	0.00
13911	130	113.27	0.01
13941	705	138.12	0.10
13971	2341	67.18	0.16
13972	476	57.13	0.03
13989	1405	71.89	0.10
13990	232	179.53	0.04
13992	1149	57.13	0.07
14012	688	72.52	0.05
Общее время доставки всех пакетов $\tau(\vec{N})$			0.88

Таблица 4. Номер БС, с которой осуществляется передача данных и длина пакета по варианту b для оптимизированной сети

b	m Lp, бит														
	AK1	AK2	AK3	AK4	AK5	AK6	AK7	AK8	AK9	AK10	AK11	AK12	AK13	AK14	AK15
172										1 5129			6 4480		
220		1 4480											6 4778	5 5307	
256		1 4674											6 4998	5 5561	4 4480
3402	1 6042										3 4480		6 16760	5 18654	4 15044
3435	1 4480											3 10656	6 12427	5 13832	4 11155
11342						1 5098		2 6126				3 4480	6 5365		4 5089
11352						1 5098			2 5903			3 4480	6 5365		4 5089
13911	2 4480					1 9917						3 8882	6 10642	5 12525	4 10095
13941			2 4480			1 12093						3 10830	6 12977	5 15273	4 12311
13971				1 4480			2 6876					3 5268	6 6312	5 7429	4 5988
13972						1 5002	2 5847					3 4480	6 5367	5 6317	4 5092
13989		1 4480						2 7429				3 5637	6 6754	5 7949	4 6407
13990			1 4480					2 18554				3 14078	6 16868	5 19852	4 16002
13992						1 5002		2 5904				3 4480	6 5367	5 6317	4 5092
14012						1 6349				2 4480		3 5686	6 6813	5 8019	4 6463

Общее время доставки всех пакетов для оптимизированной сети составило $\tau(\vec{N}) = 0.88$ с, что соответствует нагрузке $C = 0.88$. В работе [1] максимальная нагрузка на БС в этом случае составляла 0.89. Учёт предложенного метода маршрутизации для оптимизированной сети позволяет снизить нагрузку на 1%.

Снижение выигрыша в оптимизированной сети обусловлено снижением уровня внутрисистемных помех. Кроме того, детальный анализ причин настолько малого выигрыша на основе таблицы 4 показал, что наиболее нагруженным элементом сети является радиорелейная линия связи, содержащая АК 13, так как этот комплект используется во всех вариантах доставки информации. При работе этого АК в отсутствии внутрисистемных помех время доставки информации до него составляет 0,84 с, при скорости 95 Мбит/с. Таким образом, АК 13 определяет максимальное время доставки, а следовательно и максимальную нагрузку на сеть, ограничивая эффект от применения разработанного метода маршрутизации. Для сетей имеющих более равномерное распределение нагрузки на сеть эффект может быть больше.

Заключение

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

- использование разработанного метода маршрутизации позволяет снизить время доставки информации и нагрузку на сеть;
- степень выигрыша зависит от уровня внутрисистемных помех (меньший выигрыш для оптимизированной сети обуславливается снижением уровня внутрисистемных помех за счёт проведённой оптимизации);
- потенциальный результат определяется реальными характеристиками сети.

Следовательно, разработанный метод маршрутизации позволяет оптимизировать распределение информации путём предсказания потока внутрисистемных помех и повысить эффективность сетей широкополосного радиодоступа.

Литература

1. Петрова Е.А. Оптимизация параметров фиксированных сетей широкополосного радиодоступа с учётом внутрисистемных помех: Автореф. дис... кандидата техн. наук. Казань, 2014. 20 с.

2. Е.А. Спирина, С.В. Козлов, Ю.С. Винтенкова. Разработка единого алгоритма приема, планирования, оптимизации, адаптивного использования ресурсов и маршрутизации в сетях широкополосного радиодоступа// Нелинейный мир. -2014. - №10, т.12.С.9-12.