

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 004.724

В.П. Корячко, А.П. Шибанов, А.Н. Сапрыкин, О.В. Лукьянов **ПЛАНИРОВАНИЕ ПОТОКОВ В СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ** **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Предложен генетический алгоритм планирования потоков в физических каналах сети передачи данных опτικο-электронных средств в сети с двухфазной маршрутизацией с полной логической сеткой. Рассмотрена методика нахождения оптимальных значений вероятности мутации и числа полезных особей в популяции генетического алгоритма.

Ключевые слова: *оптико-электронные средства, двухфазная маршрутизация, вероятность мутации, популяция генетического алгоритма, функция полезности.*

Введение. При проектировании сети передачи данных (СПД) опτικο-электронных средств (ОЭС) полигонного измерительного комплекса (ПИК) для минимизации задержек и потерь пакетов большое значение имеет планирование сеансовых потоков трафика между множеством пар конечных абонентов, прокладываемых в физических каналах оптоволоконной магистральной сети. Трафик от ОЭС характеризуется большими объемами видеoinформации, передаваемой в реальном масштабе времени. Профили трафика в определенный интервал времени характеризуются матрицами трафика, которые определяются потребностями активных сеансов связи между измерительными системами (ИС) и центрами обработки данных и управления ОЭС.

Передаваемые потоки трафика от ОЭС могут резко изменяться во времени. Такие изменения не являются случайными. Они зависят от перемещений многих объектов летных испытаний (ОЛИ) по трассе полета. При этом летательные аппараты «уходят» за пределы видимости ОЭС. Поэтому ИС, расположенные далее вдоль трассы полета, заранее готовятся к захвату и сопровождению таких ОЛИ, получая траекторную информацию от соседних измерительных средств, которые их еще «видят». В процессе сопровождения многих ОЛИ многими ОЭС происходят значительные изменения трафика в отдельных каналах и трактах СПД.

Траектории ОЛИ в определенной степени

предсказуемы, особенно тогда, когда скорости их полета становятся все большими. При разработке алгоритмов управления трафиком следует учитывать, что имеется время для прогнозирования временных интервалов, в которых выполняется передача сопровождения ОЛИ от одних ОЭС к другим с изменением профилей трафика. Прогнозирование моментов смены профилей потоков можно осуществить в двух случаях: 1) когда вероятность нештатных ситуаций, связанных с существенным отклонением от заданной траектории, мала; 2) нештатные ситуации могут возникать, но программно-аппаратные средства СПД успевают в реальном времени переключиться на работу с новыми профилями трафика.

Для обеспечения связи между конечными абонентами в каждом задействованном канале выделяется часть общей полосы пропускания физического канала – виртуальный канал. Отдельные виртуальные каналы образуют заранее устанавливаемое виртуальное соединение между конечными маршрутизаторами. Разные физические каналы отличаются друг от друга предельным значением (емкостью) полосы пропускания. Через сеть могут быть проложены необходимые виртуальные соединения различными способами, отличающимися между собой как числом параллельных путей, используемых для сеанса связи, так и числом звеньев (каналов) в пути «из конца в конец» [1-5]. При этом разные способы реализации будут иметь свои «узкие места», на-

пример в некоторых каналах (или путях) будет недостаточен запас полосы пропускания, какие-то каналы могут оказаться перегруженными, а какие-то – недогруженными. При распределении трафика по параллельным путям необходимо стремиться к лучшим решениям, соответствующим некоторому критерию оптимальности.

Каждому профилю трафика в идеале должна соответствовать наиболее подходящая структура базовых магистральных каналов. Но на практике возможны случаи, когда физические магистрали не могут передать трафик данного профиля, несмотря на проведенную оптимизацию виртуальных каналов сети. В таких случаях приходится прокладывать дополнительные связи. Если профили трафика меняются часто, то необходимо иметь такую структуру физических каналов СПД ОЭС, которая была бы инвариантна к их смене. В этих условиях представляется оправданной передача больших потоков оптоэлектронной информации по двухфазным и двухпутевым трактам между оконечными маршрутизаторами через выбранный промежуточный узел [6]. Такие сети получили название VLB-сетей. Они могут поддерживать широкий диапазон профилей трафика при практическом отсутствии перегрузок. Сети с двухфазной и двухпутевой маршрутизацией, имеющие множество связей и разнообразие путей, весьма устойчивы к сбоям, что обуславливает их применение в наиболее ответственных участках сетей. Это свойство в совокупности с высокой производительностью делает их весьма перспективными для построения базовых магистралей СПД при проведении испытаний летательных аппаратов.

Пример сети VLB показан на рисунке 1.

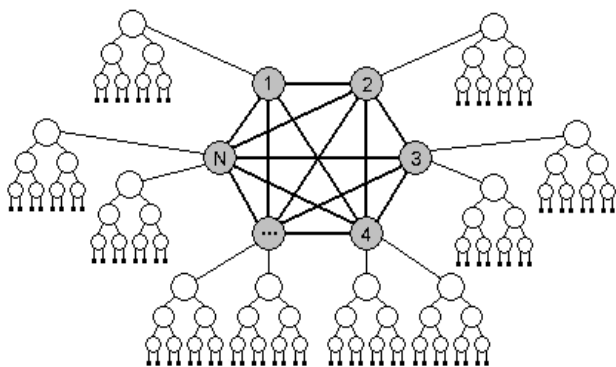


Рисунок 1 – Пример VLB-сети

По каждому пути поток передается через промежуточный узел. Каждый входной поток сети может распределяться между двумя промежуточными узлами. Если между входным и выходным узлами имеется прямой путь, то он также используется для передачи вместе с одним из путей, включающим промежуточный узел.

Приведенная структура инвариантна к любым профилям трафика. На практике полное число связей может быть избыточным и некоторые из них могут быть исключены. При проектировании СПД ПИК может использоваться соединение нескольких VLB-сетей с пиринговыми связями (*peering* – соседний), добавляться древообразные структуры, соединения «точка-точка» (в частности, для космических линий связи) и т. п. Важно лишь, чтобы физические линии обладали достаточной совокупной емкостью для укладки большого числа виртуальных каналов.

Использование генетического алгоритма для оптимизации информационных потоков в СПД ОЭС обусловлено неэффективностью применения стандартных методов поиска из-за неприемлемо большого числа комбинаций исходных данных. В простейшем варианте через маршрутизатор соединяется два физических канала. Тогда, если в каждом из них может быть соединено между собой n виртуальных каналов, то число возможных соединений равно $n!$ Это нижняя оценка числа возможных соединений для любой анализируемой структуры: пары соединенных через маршрутизатор каналов, дерева, ядра сети VLB, показанной на рисунке 1 и т. п.

Цель работы. Нахождение наилучшего решения задачи планирования потоков оптоэлектронной информации ПИК существенно зависит от выбора начальных параметров генетического алгоритма. Сходимость функции полезности к наилучшему решению зависит от правильно выбранных значений величины мутации и начальной популяции алгоритма для решения конкретной задачи. Выбору этих параметров применительно к решению задачи наилучшего распределения полосы пропускания каналов и путей СПД ОЭС ПИК и посвящена данная статья. Исследования проводились для ядра СПД ОЭС, построенного по сетевой технологии VLB с числом узлов $N = 8, 16, 32$.

Экспериментальные исследования. *Нахождение вероятностей мутации.* Слишком большое значение вероятности мутации может привести к быстрой смене потомков без использования их полного потенциала, в то время как правильная настройка данного параметра может позволить быстрее и точнее решать поставленные задачи. В работах [7-9] показано, что вероятность мутации P_c , как правило, колеблется в пределах от 2 до 5 %. Для определения влияния вероятности мутации на значения функции полезности генетического алгоритма оптимизации СПД ОЭС рассмотрим его функционирование при различных входных данных. Поиск особей с

наилучшими значениями функции полезности производится по следующему алгоритму.

Шаг 1. Запуск алгоритма. Создание начальной популяции.

Шаг 2. Определение функции полезности особей.

Шаг 3. Достигнуто ли необходимое значение функции полезности? Если да, то переходим к шагу 5. Иначе – переходим к шагу 4.

Шаг 4. Новый отбор. Скрещивание и мутации особей. Создание новой популяции. Переход к шагу 2.

Шаг 5. Выбор наилучшей особи. Конец поиска.

Используется следующий алгоритм оптимизации сети [10]. Каждая линия l имеет предельную скорость передачи c_l . Пусть $\rho_l^{(j,k)}$ – доля трафика от маршрутизатора j к маршрутизатору k по линии l . В процессе многопутевой маршрутизации находятся значения переменных $x^{(j,k)}$, представляющих собой скорость передачи трафика из маршрутизатора j в маршрутизатор k , который суммируется по всем парам вход-выход. Целью оптимизации сети является минимизация $\sum_l g(y_l/c_l)$, где $y_l = \sum_{j,k} x^{(j,k)} \rho_l^{(j,k)}$ –

объем трафика по каждой линии. Вводится выпуклая, неубывающая и дважды дифференцируемая экспоненциальная штрафная функция g , которая возрастает при увеличении нагрузки линии. Тогда формально задача оптимизации при предельно допустимых значениях средней задержки передачи потока \bar{t}_{np} и ее вариации σ_{np} в пути l представляется как:

$$\left. \begin{aligned} &\text{минимизировать } \sum_l \exp \left[\left(\frac{\sum_{j,k} x^{(j,k)} \rho_l^{(j,k)}}{c_l} \right) \right] \\ &\text{при условии } \sum_{j,k} x^{(j,k)} \rho_l^{(j,k)} \leq c_l, \mathbf{x} \geq 0, \\ &\bar{t}_l \leq \bar{t}_{np}, \sigma_l \leq \sigma_{np}. \end{aligned} \right\}$$

Были проведены симуляции нескольких тестовых сценариев. Эксперименты проводились на компьютере со следующими характеристиками: Intel Core i7 2,0 GHz, RAM 8Gb. Параметры генетического алгоритма были определены следующим образом: размер популяции – 40 особей, вероятность скрещивания – 0,8, число поколений – 100. Процент мутации варьировался от 0,01 до 0,5, причем для каждой отдельно взятой

серии экспериментов вероятность мутации оставалась постоянной. Таким образом, были использованы 10 возможных значений вероятности мутации:

0,01/0,03/0,05/0,07/0,1/0,15/0,2/0,3/0,4/0,5.

Были рассмотрены сети с двухфазной маршрутизацией, состоящие из 8, 16 и 32 узлов. Для каждого варианта было проведено 30 экспериментов. Значения функции полезности от вероятности мутации в сетях с двухфазной маршрутизацией из 8 узлов приведены в таблице 1. Зависимость среднего значения функции полезности от вероятности мутации изображена на рисунке 2. При изменении вероятности мутации в диапазоне от 0,03 до 0,1 значения функции полезности минимальны, а ее колебания находятся в пределах от 5 до 10 процентов для сетей с двухфазной маршрутизацией, состоящих не более чем из 32 узлов. Отклонение значений вероятности мутации в большую или меньшую сторону приводит к ухудшению результатов.

Таблица 1 – Значения функции полезности от вероятности мутации ($N = 8$)

Вероятность мутации	Функция полезности, условные единицы		
	Средний результат	Лучший результат	Худший результат
0,01	339,1	285	409
0,03	275,5	243	313
0,05	272,4	243	320
0,07	270,6	221	350
0,1	268,9	245	306
0,15	280,2	247	325
0,2	299,8	263	325
0,3	305,9	263	370
0,4	322,6	267	380



Рисунок 2 – Зависимость функции полезности от вероятности мутации при $N = 8$

Нахождение числа полезных особей в популяции. Не существует однозначного мнения, каким именно должен быть размер популяции. Выбор слишком маленького размера популяции

может не привести к решениям, находящимся вблизи оптимума или равным ему, в то время как слишком большой размер популяции может значительно увеличить расчетное время. Таким образом, следует более подробно рассмотреть вопрос определения размера начальной популяции применительно к задаче планирования полос пропускания виртуальных каналов СПД опико-электронной информации.

В процессе исследований были рассмотрены сети с двухфазной маршрутизацией, состоящие из 8, 16 и 32 узлов. Размер популяции варьировался от 10 до 200 особей. Для всех популяций было сгенерировано фиксированное число поколений – 100. Для каждого варианта было проведено 10 экспериментов. В таблице 2 содержатся средние, лучшие и худшие результаты функции полезности для различных размеров популяции при числе узлов VLB-сети, равном 8.

Таблица 2 – Зависимость функции полезности от размеров популяции при $N = 8$

Размер популяции, особи	Функция полезности, условные единицы		
	Средний результат	Худший результат	Лучший результат
10	382	457	296
20	334	390	278
30	323	378	277
40	301	432	269
50	287	392	229
60	278	391	235
70	282	375	245
80	268	354	211
90	269	296	223
100	271	328	249
110	262	291	229
120	260	278	245
130	256	274	233
140	252	273	227
150	249	285	219
160	249	265	231
170	251	315	219
180	249	267	221
190	261	325	213
200	261	320	228

На рисунке 3 приведены графики изменения средних значений функции полезности в зависимости от размера популяции при $n = 8$.

Изменение размера популяции с 10 до 100 особей уменьшает средние значения функции полезности. Дальнейшее увеличение размера популяции нецелесообразно, так как не дает су-

щественного выигрыша, но приводит к дополнительным затратам машинного времени.

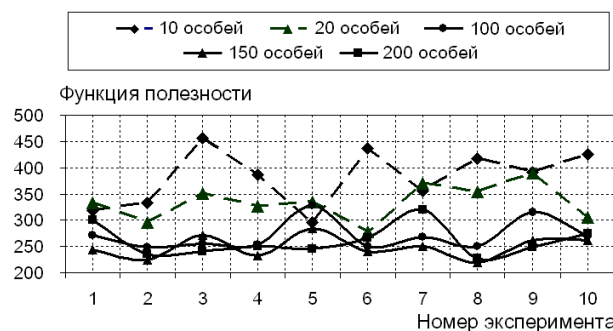


Рисунок 3 – Графики средних значений функции полезности от размера популяции при $N = 8$

Результаты эксперимента показывают, что генетический алгоритм, как правило, не может найти решение, достаточно близкое к оптимальному, при размере популяции – от 10 до 20 особей. Для этого ему требуется как минимум популяция из 40 особей. Таким образом, правильный отбор размера популяции генетического алгоритма значительно улучшает его сходимость. Оптимальным значением размера популяции для сетей с двухфазной маршрутизацией, состоящих не более чем из 32 узлов, является 100 особей.

Заключение. Предложена методика планирования потоков в виртуальных каналах двухфазной сети передачи данных опико-электронных средств полигонного измерительного комплекса с нахождением значений вероятности мутации и числа полезных особей в популяции генетического алгоритма, обеспечивающих решения, близкие к оптимальному. Уменьшение значения функции полезности в разных экспериментах при $N = 8$ составляет примерно 25 % при варьировании значений мутации и 40 % при изменении начальной популяции с 20 до 100 особей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и Российского Фонда фундаментальных исследований, грант № 14-07-00106-а.

Библиографический список

1. Перепелкин Д.А. Алгоритм ускоренной адаптивной маршрутизации на базе протокола OSPF при динамическом добавлении элементов корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 34. С. 65 – 71.
2. Перепелкин Д.А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола OSPF при динамическом отказе элементов корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 37. С. 53 – 58.

3. *Перепелкин Д.А.* Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом подключении узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-1 (46). С. 67 – 75.

4. *Перепелкин Д.А.* Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 84 – 91.

5. *Шибанов А.П.* Метод эквивалентных упрощающих преобразований GERT-сетей и его приложения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 76 – 83.

6. *Valiant L.G.* A scheme for fast parallel communication. SIAM Journal on Computing, 1982. - 11(2): - P. 350-361.

7. *Diaz-Gomez P.A., Hougen D.F.* Initial Population for Genetic Algorithms: A Metric Approach // International Conference on Genetic and Evolutionary Methods. GEM 2007. - P. 43 - 49.

8. *Hesser J. and Männer R.*, "Towards on optimal mutation probability for genetic algorithms," in Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature Conference, 1990. - P. 23 - 32.

9. *Bäck T.*, "Optimal mutation rates in genetic search," in Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, 1993. - P. 2 - 8.

10. *Ижванов Ю.Л., Корячко В.П., Шибанов А.П., Сапрыкин А.Н., Лукьянов О.В.* Оптимизация сетей с дозированной балансировкой нагрузки и пиринговыми каналами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 43. С. 67 – 74.

УДК 004.73:519.2

Д.А. Перепелкин

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУР СЕГМЕНТОВ КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ДАННЫХ О СТРУКТУРЕ БАЗОВОЙ СЕТИ И СВЯЗНОСТИ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Предложены математическая модель и алгоритм формирования оптимальных структур сегментов корпоративных сетей по критерию минимальной стоимости, повышающие эффективность их функционирования за счет использования дополнительной информации о структуре базовой сети и связности каналов связи.

Ключевые слова: корпоративные сети, каналы связи, базовая сеть, сегментация, сегменты, оптимальные структуры.

Введение. В настоящее время распределенные сетевые структуры оптимально строить на основе базовых (опорных) сетей. Такие задачи актуальны при формировании региональной телекоммуникационной инфраструктуры с учетом особенностей действующих на территории региона операторов связи. Это дает возможность сократить общие затраты на создание высокоскоростных каналов связи, построить устойчивую сетевую структуру, к которой легко подключать новые сегменты с учетом специфики предприятия.

Необходимость организации структуры корпоративных сетей вызвана целым рядом причин, среди которых усовершенствование маршрутов передачи данных, возможность эффективного обмена информацией, повышение надежности, безопасности и защищенности сети. Одним из способов построения эффективной структуры корпоративной сети по критерию минимальной

стоимости является ее сегментация на отдельные оптимальные структуры.

Применение новых перспективных подходов для решения задачи формирования оптимальных структур корпоративных сетей позволяет повысить эффективность процессов маршрутизации, надежность и безопасность передачи данных.

Цель работы – разработка математической модели и нового эффективного алгоритма формирования оптимальных структур сегментов корпоративных сетей по критерию минимальной стоимости, повышающих эффективность их функционирования за счет использования дополнительной информации о структуре базовой сети и связности каналов связи.

Постановка задачи. В общем случае корпоративная сеть состоит из множества базовых (коммуникационных) узлов, к которым подключаются пользователи сети, соединенных скоростными каналами связи. Стоимость, или цена,

маршрута складывается из стоимости используемых каналов связи и базовых узлов.

В настоящее время для решения задачи сегментации структур корпоративных сетей широко используются графо-комбинаторные алгоритмы.

Так, в [1-4] приводятся алгоритмы декомпозиции и разбиения графов, применяемые для решения задач параллельной обработки информации и оптимизации топологической структуры компьютерной сети. К наиболее известным и часто применяемым на практике алгоритмам сегментации компьютерных структур относят: алгоритм рекурсивного деления пополам, «жадный» алгоритм разбиения графов, алгоритм Гирвана – Ньюмана, спектральный алгоритм Ньюмана. Исследование и анализ данных алгоритмов

подробно рассмотрены в работах [5-7]. Однако к недостаткам данных алгоритмов стоит отнести либо малую степень связности каналов связи в отдельных сегментах, либо высокую трудоемкость реализации представленных алгоритмов. Сравнительная характеристика алгоритмов сегментации графовых структур компьютерных сетей приведена в таблице. В таблице используются следующие обозначения: N – число узлов связи или маршрутизаторов в сети, M – число каналов или линий связи в сети, k – число полученных сегментов при разбиении.

Задача формирования оптимальных структур корпоративных сетей часто формулируется как задача построения минимального покрывающего дерева.

Сравнительная характеристика алгоритмов сегментации графов по трудоемкости

№ п/п	Алгоритм	Наименование этапа работы алгоритма	Трудоемкость этапа	Общая трудоемкость алгоритма
1	Алгоритм рекурсивного деления пополам	1.1. Нахождение диаметра графа	$O(N)$	$O(N)$
		1.2. Рекурсивная процедура деления графа пополам	$O(kN)$	
2	«Жадный» алгоритм разбиения графов	2.1. Нахождение вершины с минимальной степенью	$O(N)$	$O(N)$
		2.2. Рекурсивная процедура деления графа на подграфы	$O(kN)$	
3	Алгоритм Кернигана – Лина	3.1. Сегментация графа на подграфы	$O(N^3)$	$O(N^3)$
4	Алгоритм Гирвана – Ньюмана	4.1. Вычисление смежности всех ребер графа	$O(NM^2)$ или $O(N^2 \log_2 N + NM)$	$O(NM^2)$
		4.2. Рекурсивная процедура удаления ребер с наивысшим показателем смежности и пересчет смежности ребер графа	$O(NM)$	
5	Спектральный алгоритм Ньюмана	5.1. Выполнение операций по разрезу графа	$O(N^2)$	$O(N^2)$
		5.2. Нахождение собственных векторов	$O((k-1)N \log_2 N)$	

Вершинами графа являются базовые узлы, а ребрами – каналы связи, соединяющие эти базовые узлы. В настоящее время известно большое число алгоритмов построения минимального покрывающего дерева корпоративной сети.

Для решения задачи формирования оптимальной структуры корпоративных сетей по критерию минимальной стоимости широко используется алгоритм Прима. Трудоемкость построения оптимальных структур корпоративных сетей с использованием алгоритма Прима составляет величину $O(N)$, где N – число маршрутизаторов корпоративной сети.

На практике данный алгоритм используется для построения оптимальной базовой сети региона при наличии нескольких операторов связи с различными зонами покрытия [8-11]. Развитие

данного подхода предложено в работах [12, 13] для решения задачи маршрутизации в корпоративных сетях нескольких провайдеров связи.

В связи с этим целесообразно использовать информацию о базовой структуре корпоративной сети и связности каналов связи для формирования отдельных оптимальных сегментов для более эффективного обмена информацией между взаимодействующими устройствами или отдельными подсетями.

Разработка новых моделей и алгоритмов сегментации структур корпоративных сетей позволяет повысить эффективность их функционирования за счет оптимальности итогового разбиения и высокой производительности при распределении трафика между полученными сегментами.

Разработка алгоритма. Для повышения эффективности функционирования корпоративных сетей предлагаются математическая модель и алгоритм формирования оптимальных структур сегментов, которые позволяют уменьшить трудоемкость их построения за счет использования дополнительной информации о структуре базовой сети и связности каналов связи. В общем случае для решения данной задачи применяется графовая модель корпоративной сети, в которой множество вершин графа соответствует множеству узлов связи или маршрутизаторов в сети, а множество ребер соответствует возможным каналам связи между этими узлами. Каждое ребро, соответствующее каналу связи, имеет свой вес. На практике весу ребра могут соответствовать стоимость аренды канала связи, затраты на оплату единицы трафика, передаваемого по каналу связи, соответствующему данному ребру, либо более сложная функция, учитывающая большее число параметров корпоративной сети.

Математическую модель корпоративной сети представим в виде неориентированного взвешенного связного графа $G = (V, E, W)$, где V – множество вершин (узлов связи или маршрутизаторов), $|V| = N$, E – множество ребер (каналов или линий связи), $|E| = M$, W – множество весов ребер (стоимость каналов связи между узлами).

Задача формирования оптимальных структур корпоративных сетей решается путем разбиения множества вершин графа на непересекающиеся подмножества вершин с максимально связанными между собой каналами и минимальным суммарным весом ребер, проходящих между подмножествами полученных вершин. Следует отметить возможную противоречивость критериев разбиения графа – максимальная связность подмножеств вершин может не соответствовать минимальности весов граничных ребер и наоборот. В данной ситуации необходимо принятие того или иного компромиссного решения.

Для решения поставленной задачи введем следующие понятия. Обозначим через G_1 такой связный подграф графа G , для которого $G_1 = (V, E_1, W_1)$, где V – множество вершин подграфа (узлов связи или маршрутизаторов), $|V| = N$, E_1 – множество ребер подграфа (каналов или линий связи), $|E_1| = M_1$, W_1 – множество весов ребер подграфа (стоимость каналов связи между узлами). Степень узла связи $\deg(v_i)$ подграфа $G_1 \subset G$ – число неповторяющихся каналов связи $e_{ij} \in E$, инцидентных узлу v_i . Узел связи v_i называется листом дерева (подграфа G_1), если его степень $\deg(v_i) = 1$. Потомком называется часть минимального покрывающего дерева,

имеющая узел-предок. Предком называется узел связи, имеющий одного и более потомков. Величиной связности сегментов Q называется отношение количества связей внутри сегмента к числу внешних связей у данного сегмента

$$Q = \frac{M_{in}}{M_{out}}.$$

На основе предложенной математической модели разработан алгоритм формирования оптимальных структур сегментов корпоративных сетей с учетом данных о структуре базовой сети и связности каналов связи. Укрупненно алгоритм имеет следующий вид.

Шаг 1. В графе G корпоративной сети найти минимальное покрывающее дерево с помощью алгоритма Прима. В качестве критерия оптимальности канала связи выбрать минимальную стоимость его использования.

На данном этапе необходимо найти такой связный подграф $G_1 \subset G$, для которого суммарный вес $w(G_1)$ входящих в него ребер минимален.

Шаг 2. Выделить в полученной структуре отдельные сегменты.

Объединение в отдельные сегменты происходит последовательным объединением потомков с их предками. Вначале рассматривается в качестве предка произвольный узел связи v_i подграфа $G_1 \subset G$. Далее оценивается степень данного узла $\deg(v_i)$. Если $\deg(v_i) = 1$, то данный узел объединяется с узлом, с которым имеет связь, если нет – перейти к следующему узлу (потомку). Данное действие производить до тех пор, пока не будут рассмотрены все узлы связи. Заметим, что в первую очередь рассматриваются связи искомого узла с узлами, которые еще не вошли в какой-либо из сегментов. При отсутствии связи со свободным узлом связи произвести присоединение его к одному из сегментов по следующему принципу. Сначала просмотреть связи данного узла со всеми сегментами G_i . Определить сегменты G_i , с которыми имеется связь, принадлежащая минимальному покрывающему дереву $G_1 \subset G$. Далее с данными сегментами просмотреть все множество связей. Если у узла с каким-то из сегментов количество связей больше, чем у другого сегмента, то отнести узел в этот сегмент. Если количество связей одинаково для всех сегментов, то принадлежность узла к сегменту определить связью с минимальным весом.

Шаг 3. Оценка полученной структуры с помощью величины связности сегментов Q .

Заметим, что чем больше сегментов получе-

но в результате разбиения, тем меньше величина связности. Минимальная величина связности, при которой полученные сегменты являются оптимальными, имеет значение $Q = 0,3$.

Шаг 4. Получение сегментов с минимальной или заданной величиной связности.

Для получения сегментов выполняется объединение соседних сегментов с наименьшими весами между собой. Данную операцию целесообразно производить до тех пор, пока величина связности получаемых сегментов не будет больше или равна минимальному или заданному значению данной величины.

Пример работы алгоритма. Представим корпоративную сеть в виде неориентированного взвешенного связного графа $G = (V, E, W)$, показанного на рисунке 1. Далее перейдем к нахождению минимального покрывающего дерева. В качестве начального узла связи выберем узел V_1 . Результат нахождения минимального покрывающего дерева приведен на рисунке 2.

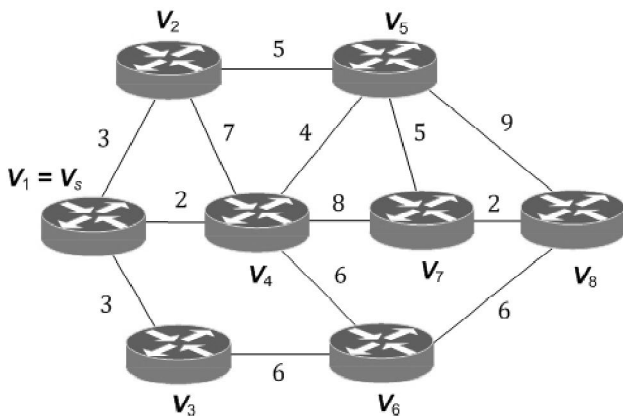


Рисунок 1 – Граф G корпоративной сети

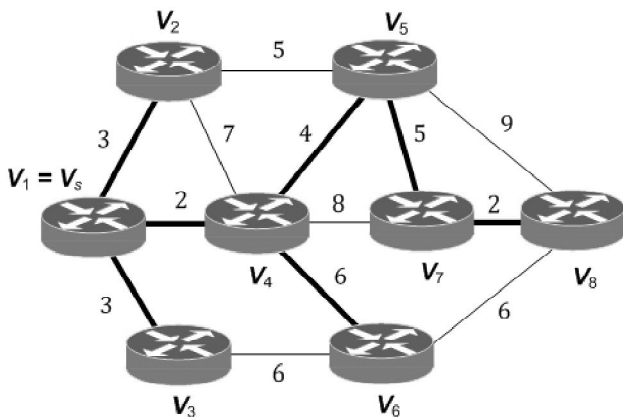


Рисунок 2 – Результат построения минимального покрывающего дерева графа G

На основе полученной структуры произведем выделение сегментов $G_i \subset G_1$. Для начального узла связи V_1 значение степени составляет

величину $deg(V_1) = 3$ (он является предком для узлов V_2, V_3 и V_4). Потомков имеет только узел связи V_4 ($deg(V_4) = 3$). Так как значения маршрутных степеней узлов V_2 и V_3 равны единице, следовательно, они объединяются в один сегмент с узлом V_1 . Образование первого сегмента дерева корпоративной сети приведено на рисунке 3.

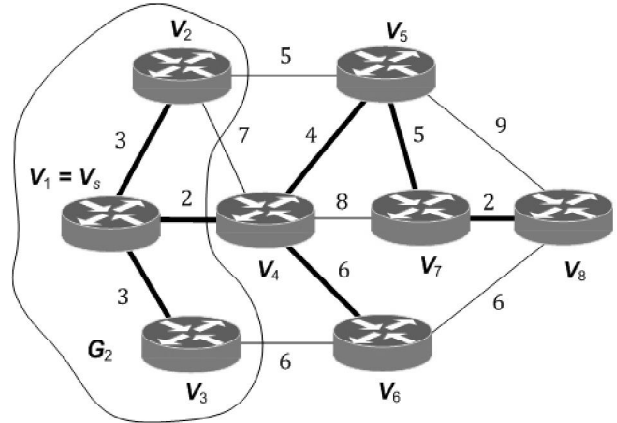


Рисунок 3 – Образование первого сегмента G2

С учетом того, что узлы V_2 и V_3 рассмотрены, переходим к узлу V_4 . Узел связи V_4 является предком для узлов V_5 и V_6 . Узел связи V_6 не имеет потомков ($deg(V_6) = 1$), следовательно, выделяем его и узел V_4 в отдельный сегмент. Образование второго сегмента дерева корпоративной сети приведено на рисунке 4.

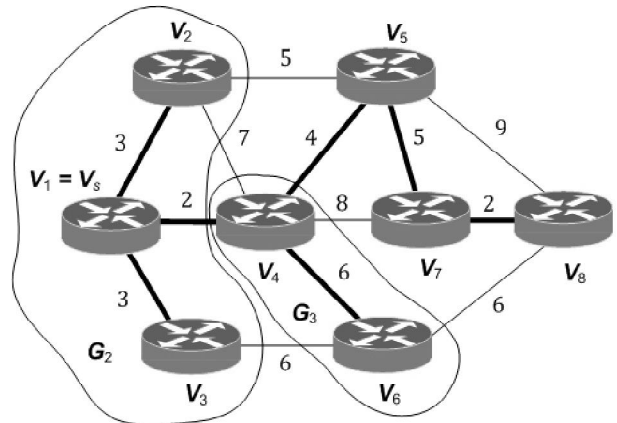
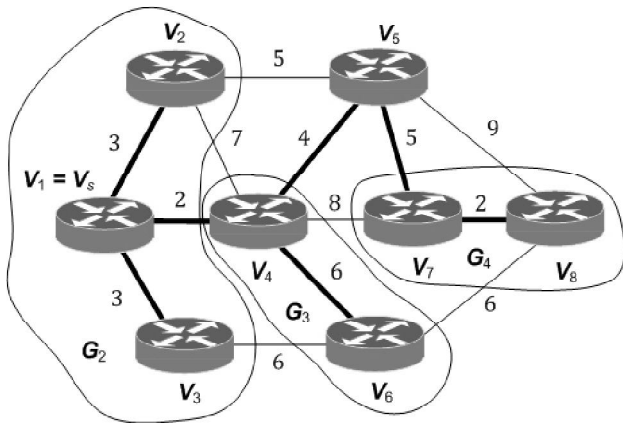
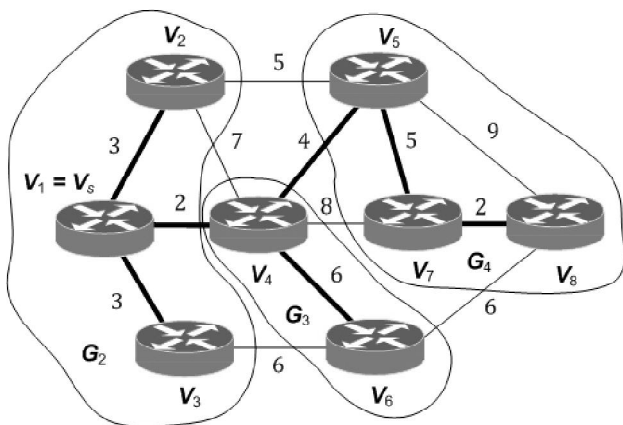


Рисунок 4 – Образование второго сегмента G3

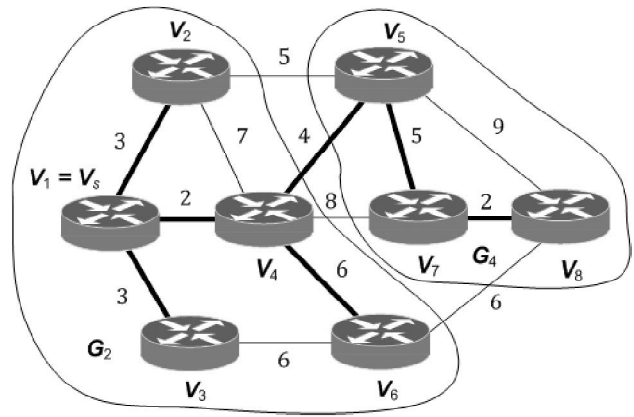
Переходим к следующему потомку узла связи V_4 – узлу V_5 . Рассматриваем узел V_5 в качестве предка. Он имеет потомка – узел связи V_7 . Следовательно, его нельзя отнести во второй сегмент. Рассматриваем в качестве предка узел связи V_7 . Он имеет потомка – узел V_8 . Узел связи V_8 не имеет потомков ($deg(V_8) = 1$), следовательно, объединяем данный узел с узлом V_7 в отдельный сегмент. Образование третьего сегмента приведено на рисунке 5.

Рисунок 5 – Образование третьего сегмента G_4

Далее возвращаемся к узлу связи V_5 и проверяем его на наличие связей со свободными узлами. Узел V_5 не имеет таких связей, следовательно, рассмотрим его на принадлежность к другим сегментам. Применительно к взятому графу G узел V_5 имеет связи со всеми тремя полученными сегментами. С первым сегментом данный узел не имеет связи, принадлежащей остову минимального веса, следовательно, отнести его к данному сегменту нельзя. Со вторым и третьим сегментами узел V_5 имеет связь, принадлежащую остову минимального дерева. Далее рассматривается все множество связей узла с этими сегментами. Видно, что с третьим сегментом узел V_5 имеет две связи, а со вторым – одну. Следовательно, узел связи V_5 добавляем к третьему сегменту. Полученный результат приведен на рисунке 6.

Рисунок 6 – Результат предварительной сегментации графа G

Проанализируем полученное разбиение с точки зрения величины связности сегментов. Очевидно, что для сегмента G_3 данная величина меньше, чем минимально допустимое значение. Для получения значения, удовлетворяющего условию, произведем объединение сегментов G_2 и G_3 в отдельный сегмент. Конечный результат сегментации графа G приведен на рисунке 7.

Рисунок 7 – Результат итогового разбиения графа G на сегменты с учетом величины Q

Стоит отметить, что полученное разбиение характеризуется высокой величиной связности сегментов, а также позволяет получить информацию о внутренней структуре отдельных сегментов и связях между ними.

Анализ трудоемкости предложенного алгоритма характеризует его эффективность по сравнению с известными алгоритмами и составляет величину $O(kN \log N)$, где k – число полученных сегментов корпоративной сети при разбиении.

Таким образом, разработанный алгоритм является эффективным при построении оптимальных структур сегментов корпоративных сетей за счет использования дополнительной информации о структуре базовой сети и связности каналов связи.

В дальнейшем предполагается усовершенствование предложенного алгоритма с целью его применения для решения задачи адаптивной маршрутизации [14-24].

Заключение. Предложенные в работе математическая модель и алгоритм формирования оптимальных структур сегментов корпоративных сетей позволяют повысить эффективность их функционирования за счет оптимальности итогового разбиения и высокой производительности при распределении трафика между полученными сегментами, а также уменьшения трудоемкости их построения до значения $O(kN \log N)$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и гранта Президента РФ для молодых ученых - кандидатов наук МК-819.2014.9.

Библиографический список

1. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ, 3-е изд. – М.: Вильямс, 2013. – 1328 с.
2. Дасгунта С., Пападимитриу Х., Вазирани У. Алгоритмы. – М.: МЦМНО, 2014. – 320 с.

3. Иващенко В.А., Лопаткин Р.Ю., Куприенко В.В. Способ выбора алгоритма разбиения графа для распределенных вычислений // Математические машины и системы. 2011. № 4. С. 31-38.
4. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
5. Newman M.E.J. Modularity and community structure in networks // PNAS. Vol. 103. № 23. 2006. P. 8577-8582.
6. Hendrickson B., Kolda T.G. Graph partitioning models for parallel computing // Parallel Computing. 2000. No 26 (12). P. 1519-1534.
7. Мирошин В.М., Перепелкин Д.А. Анализ алгоритмов сегментации структур компьютерных сетей // Информационные технологии в научных исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет. 2012. С. 96-105.
8. Бурков С.М. Алгоритмы и методы поэтапного формирования телекоммуникационных сетей региона. Математическая модель // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2008. № 1. С. 91-100.
9. Бурков С.М., Бертенев В.А. Концептуальный подход к созданию телекоммуникационных систем с поэтапным развитием // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. Т. 4. № 82. С. 7-15.
10. Бурков С.М., Бертенев В.А. Постановка задачи формирования базовой сети регионального уровня // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. Т. 4. № 82. С. 22-27.
11. Горшков С.Г., Никитин Е.В., Саксонов Е.А. Задача формирования структуры базовой сети // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. № 2. С. 59-66.
12. Корячко В.П., Перепелкин Д.А., Иванчикова М.А. Алгоритм адаптивной маршрутизации в корпоративных сетях нескольких провайдеров связи // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 2 (44). С. 52-56.
13. Корячко В.П., Перепелкин Д.А., Иванчикова М.А. Алгоритм парных переходов каналов связи при динамическом изменении нагрузки в корпоративных сетях нескольких провайдеров связи с различными зонами покрытия // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 48. С. 68-76.
14. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Анализ и проектирование маршрутов передачи данных в корпоративных сетях. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 235 с.
15. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Разработка алгоритмов адаптивной маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2006. № 19. С. 114-116.
16. Перепелкин А.И., Перепелкин Д.А. Разработка алгоритма динамической маршрутизации на базе протокола OSPF в корпоративных вычислительных сетях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 28. С. 68-72.
17. Перепелкин Д.А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола OSPF при динамическом добавлении элементов корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 34. С. 65-71.
18. Перепелкин Д.А. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации на базе протокола OSPF при динамическом отказе элементов корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 37. С. 53-58.
19. Корячко В.П., Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Алгоритм парных перестановок маршрутов в корпоративных сетях // Системы управления и информационные технологии. 2010. Т. 40. № 2. С. 51-56.
20. Корячко В.П., Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Повышение эффективности функционирования корпоративных сетей при динамических изменениях в их структуре и нагрузках на линии связи // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 33. С. 49-55.
21. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации в условиях динамически изменяющихся нагрузок на линиях связи в корпоративной сети // Информационные технологии. 2011. № 3. С. 2-7.
22. Перепелкин Д.А. Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом подключении узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-1 (46). С. 67-75.
23. Перепелкин Д.А. Алгоритм парных перестановок маршрутов на базе протокола OSPF при динамическом отказе узлов и линий связи корпоративной сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 84-91.
24. Перепелкин Д.А. Динамическое формирование структуры и параметров линий связи корпоративной сети на основе данных о парных перестановках маршрутов // Информационные технологии. 2014. № 4. С. 52-60.

УДК 621.396.74

Ю.И. Меняева, С.П. Варсеев, А.В. Егоров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА ДЛЯ РЕШЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ГОРОДА РЯЗАНИ

Рассмотрены перспективы и возможности развертывания беспроводной широкополосной сети передачи данных для обеспечения современными телекоммуникационными услугами населения и учреждений г. Рязани, при оптимальных сроках развертывания, минимальных капитальных затратах и максимальном охвате населения.

Ключевые слова: беспроводные широкополосные сети передачи данных.

Введение. Видимой тенденцией развития города является повышение комфортности проживания граждан. Тенденция развития рынка такова, что практически все граждане хотят иметь постоянный доступ к информационным ресурсам. Данная технология будет описываться применительно к городу Рязани. Рязань готовится отпраздновать своё 920-летие, отсюда следует, что город с богатой архитектурой и эстетикой должен не только хорошо выглядеть, но и обладать богатой инфраструктурой. В городе, по данным на 2013 год, проживает более 520 тыс. человек. Ведётся активное строительство жилья, что способствует росту спроса на услуги доступа к сети интернет. Поскольку застройка ведётся разнохарактерная: многоэтажная и малоэтажная, то требуется применение различных технологий предоставления доступа к телекоммуникационным сетям. В настоящее время такой доступ к Сети решается с использованием технологий мобильной связи 3G и 4G, однако их ёмкость ограничена и не выдерживает существующих потребностей абонентов, не говоря уже о запасе на будущее. Существенной задачей оператора связи является предоставление постоянного широкополосного доступа всем абонентам, находящимся в городе, вне зависимости от их местонахождения – дома, в магазине, поликлинике, кафе и т.д. Для упрощения жизни, снижения очередей через онлайн доступ граждане смогут осуществлять необходимые им действия:

- покупки;
- платежи;
- гос. услуги.

Также важной проблемой города сейчас является его безопасность. Беспроводной ШПД позволит вести контроль безопасности города в онлайн режиме, без задержек и в хорошем качестве, что немаловажно.

Организация сбалансированного образова-

тельного процесса для детей с ограниченными возможностями, который имеет многоуровневое значение и способствует разностороннему развитию ребенка, позволит всем детям, даже из отдалённых уголков, получить достойное образование.

Снятие телеметрических показаний с датчиков позволит уменьшить число аварий и катастроф, а также своевременно оповещать жителей о случившемся, что, в свою очередь, будет способствовать уменьшению чрезвычайных ситуаций. Также сбор информации со счетчиков электроэнергии и водоснабжения и теплоснабжения позволит контролировать текущие показатели потребления ресурсов в городе.

Актуальной задачей является покрытие «исторического» частного сектора внутри города. Особенностью многих российских городов является наличие районов одноэтажной застройки, в том числе и с деревянными строениями. В таких районах отсутствует или слабо развита кабельная инфраструктура, нет канализации для прокладки кабелей связи. А платёжеспособность и плотность абонентов в таком «историческом» частном секторе затрудняют использование любых решений по экономическим причинам, тем не менее, это тысячи, а иногда и десятки тысяч абонентов в городе, которых необходимо обеспечить современными услугами связи с помощью недорогих беспроводных решений.

Современной тенденцией является активное строительство малоэтажного жилья и индивидуальных коттеджей повышенной комфортности как за пределами городов (коттеджные посёлки), так и в пределах города. Покрытие «современного» частного сектора скоростными телекоммуникационными сетями также одна из задач. Это премиум-группа абонентов, которая готова платить за услуги связи больше, чем остальные абоненты. Однако низкая плотность таких строений

в городской черте и удалённость их за городом не позволяют быстро подключать их с использованием проводных технологий

Также следует отметить эстетические показатели применимости данного метода предоставления услуг к городу Рязани. Прокладка коммуникаций способом подвеса на опорах сети освещения, как она ведется в настоящее время, ухудшает общее восприятие от внешнего вида улиц, зданий, памятников архитектуры. Переход к беспроводным технологиям позволит максимально избавиться от кабелей связи, изменить опоры освещения на облегченные, эстетичные, современные.

Задачи. Важной тенденцией телекоммуникационного рынка является тот факт, что каналы связи становятся универсальными. Оператору связи важно, дойдя до клиента, предоставить все необходимые услуги, а также обеспечить запас на будущее. За последние 15 лет типовые скорости передачи данных выросли с 10 Мбит/с до 10 Гбит/с и более. Потребности клиентов растут, а новые виды сервисов появляются чуть ли не каждый месяц. Но помимо скорости критически важна оперативность создания таких каналов связи. Именно беспроводные технологии позволяют быстро организовать высокоскоростные каналы связи, просто наращивать емкость Сети, расширять географию охвата [3,4,5].

Сеть беспроводного широкополосного доступа (далее – Сеть) планируется к развертыванию на территории г. Рязани как транспортная информационная инфраструктура для предоставления услуг доступа в интернет, передачи речи по VoIP и мультимедийного трафика, а также для снижения нагрузки на радиointерфейсе мобильных сетей 3G и LTE.

Планируемая к развертыванию Сеть должна функционировать в соответствии со следующими техническими требованиями:

- подключение стационарных и мобильных абонентов к сети интернет должно выполняться через централизованный сервер доступа;
- в Сети должна обеспечиваться возможность организации VoIP-телефонии с использованием номерной емкости;
- в Сети должен обеспечиваться беспроводной роуминг для мобильных абонентов;
- в Сети должна обеспечиваться возможность доступа абонентов к сети по паролю и доступа с шифрованием на основе протоколов WPA и EAP;
- возможность централизованного мониторинга и управления Сетью с использованием WEB GUI и SNMP;
- возможность использования «умных» ан-

тенн Wi-Fi, позволяющих изменять диаграмму направленности сигнала в направлении клиента.

Принципы построения Сети. Основными факторами, определяющими выбор системного решения по развертыванию Сети, являются:

- доступность транспортной инфраструктуры;
- зона покрытия;
- мобильность абонентов;
- качество обслуживания (QoS);
- безопасность;
- частотное регулирование.

Существует две разновидности архитектуры Сети: распределенная и централизованная.

Распределенная архитектура предполагает вынос всего необходимого функционала на точки доступа: средства шифрования, качества обслуживания (VLAN, WMM, ToS/DSCP), маршрутизации, сетевого администрирования.

Централизованная архитектура предполагает минимальную функциональную загрузку точек доступа. При такой архитектуре точки доступа обеспечивают только зону радиопокрытия на физическом уровне и прозрачно агрегируют беспроводной трафик. Все основные функции в такой сети по обеспечению безопасности, качества обслуживания, мобильности выполняет контроллер точек доступа, находящийся в опорной сети оператора.

Выбор оптимального варианта архитектуры Сети зависит в каждом конкретном случае от того, какой из перечисленных выше факторов является наиболее существенным [6].

Зона покрытия. Зона покрытия - максимальная зона радиопокрытия при наилучшей схеме модуляции-кодирования (MCS), минимальном уровне интерференции и минимальной плотности точек доступа.

Перечисленные требования удовлетворяются при максимальном использовании радиоспектра (использовании двухдиапазонных точек доступа), а также адаптивных антенных систем, в которых реализованы решения по пространственному мультиплексированию радиосигналов (MIMO) и адаптивному формированию радиолуча (Beamforming) [7,8]. Однако использование двухдиапазонных точек доступа не всегда возможно, в основном из-за отсутствия свободных номиналов частот в диапазоне 5 ГГц, особенно в крупных городах.

Обе технологии обеспечивают устойчивость связи в условиях многолучевых отражений, технология MIMO позволяет значительно увеличить информационную емкость точки доступа, а технология Beamforming обеспечи-

вает наибольшую дальность связи за счет использования динамической пространственной селекции, когда диаграмма направленности антенны формируется индивидуально для каждого активного в данный момент абонента.

Таким образом, если зона покрытия является наиболее существенным фактором при проектировании Сети, то рекомендуется использовать точки доступа с адаптивными антенными системами.

Особенности расчета сети доступа. Основываясь на современных принципах построения сетей операторов связи, можно выделить наличие в Сети мощных опорных узлов, где размещается оборудование ядра сети, оборудование агрегации трафика, системы биллинга и аутентификации пользователей, там же находятся центры управления транспортными сетями и сетями доступа. Данные узлы связаны высокоскоростными транспортными сетями (для г. Рязани 80 Гбит/с на узел и потоки федеральной транспортной сети М9 и М10 – 100 Гбит/с).

Исходные данные к проектированию сети включают в себя адресный список домов, находящихся в зоне охвата проводной сети оператора связи. Для обеспечения бесшовного предоставления услуг в домах и на прилегающих к ним территориях планируется оснастить здания точками БШПД (например, по технологии Wi-Fi подобные проекты уже реализованы в соседних областях – Липецкой и Владимирской). Расчет ведется методом группирования адресного списка пообъектно с учетом привязки к опорным станциям. Для удаленных районов города или частной застройки предполагается установка точек БШПД для группы зданий.

Мобильность. Основным показателем мобильности в Сети является длительность роуминга, которая определяется временем переключения:

- между точками доступа, находящимися в одной IP-подсети (домена роуминга), – L2-роуминг;
- между точками доступа, находящимися в разных IP-подсетях, – L3-роуминг.

Длительность роуминга складывается из длительностей процедур:

- сканирования Сети с целью поиска оптимальной точки доступа;
- аутентификации и ассоциации абонента с найденной точкой доступа;
- прохождения AAA (процедура аутентификации, авторизации и учета (Authentication, Authorization, Accounting) процедуры в сети

оператора.

Качество обслуживания. Фактически качество обслуживания определяется возможностью работы с трафиком реального времени. В централизованной архитектуре точки доступа прозрачны для трафика, а все средства управления QoS сконцентрированы в контроллере. При этом снижается влияние коллизий, свойственных протоколу IEEE 802.11. То есть контроллер, подключенный к точкам доступа с помощью протоколов туннелирования, выполняет арбитраж трафика от каждой из точек доступа, что эквивалентно уменьшению количества коллизионных сегментов.

Таким образом, с точки зрения качества обслуживания при системном проектировании Сети предпочтительна централизованная архитектура.

Безопасность. С точки зрения безопасности Сети централизованная архитектура в отличие от распределенной исключает возможность кражи ключей шифрования WPA, поскольку эти ключи хранятся в контроллере и злоумышленник не сможет получить их из точек доступа. Кроме того, централизованная замена ключей шифрования в Сети занимает намного меньшее время, чем в каждой точке доступа в отдельности в распределенной архитектуре.

Таким образом, централизованная архитектура является предпочтительной с точки зрения обеспечения требований по мобильности, качеству обслуживания и безопасности по сравнению с наземными технологиями развёртывания сети передачи данных. С точки зрения обеспечения наилучшей зоны радиопокрытия предпочтительно использовать точки доступа с адаптивными антенными системами [7,9].

Заключение. В данный момент перед департаментом развития инфраструктурных проектов ОАО «Ростелеком» как ведущим оператором связи РФ поставлен вопрос о реализации проектов по данной технологии в Центральном регионе РФ, который уже успешно реализован в некоторых регионах страны.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что данная технология развёртывания Сети применима к городу Рязани. Технология беспроводного широкополосного доступа позволит жителям города использовать интернет-ресурсы в любых удобных для них местах, что приведёт к решению всех вышеописанных проблем. Оператор связи ОАО «Ростелеком» уже применил данный подход развёртывания Сети на примере Липецкой и Владимирской областей [10]. При этом город Рязань условно разби-

вается на пять районов, где находятся опорные станции оператора, от которых будет происходить развёртывание Сети, в каждом районе производится расчёт массового и корпоративного сектора, а также выделяются преобладающие виды застройки, характерные для конкретного района.

В центральном районе города совмещены все виды застроек, такие как многоэтажная и малоэтажная, историческая часть города, торгово-развлекательные центры, парки, предприятия малого и среднего бизнеса. Количество строений в данном районе составляет 1920 зданий. Анализируя особенности района, специфику застройки, социальный состав населения и другие вышперечисленные факторы, можно прийти к выводу, что БШПД технология будет востребована не только жителями города, но и социальными службами, такими как: полиция, «Скорая помощь», детские сады, школы, поликлиники, пожарные части и т.д. Развёртывание технологии в городе Рязани позволит вести онлайн съёмку данных, что поможет сократить количество правонарушений, вести съём телеметрических показателей.

Также немаловажным фактором является платежеспособность и ориентированность к данному виду услуг клиентов, так как плата за потребление услуги будет взиматься не с пользователя, а со структуры, которая развернула точку доступа.

Библиографический список

1. Egorov A.V., Boudzine Chameeva T., Thion B. Comparative Analysis of Several Models of Price Indices in Real Estate Transactions// Cahiers de recherche. CEREFI, № 26-01, Bordeaux, France, 2001

2. Егоров А.В. Реализация методов регрессионного анализа индекса цен применительно к данным о повторных продажах недвижимости// Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. 2004. № 14. С. 33-41.

3. Беспроводной широкополосный доступ: перспективы для операторов и потребителей // Connect! Мир Связи. 2007. – №6 <http://www.connect.ru/article.asp?id=7869>.

4. Бакажинская Т. Мобильный интернет – насколько хватит потенциала?// <http://www.cnews.ru/reviews/free/telecom2011/articles/articles13.shtml>

5. Дюсенова О.С., Пищин О.Н., Павленко Г.С. Исследование использования новых стандартов сотовой связи и широкополосного доступа LTE и WIGIG для предоставления услуг Triple Play // Молодой ученый. 2013. №5. С. 45-49.

6. Положение о типовых технических решениях для подключения клиентов сегмента В2В/ В2G к сети связи ОАО «Ростелеком» (Редакция 1).

7. Широкополосные беспроводные сети передачи информации/ В.М. Вишневикий. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

8. Богомолова Н.Е., Усманов П.Ю. Особенности построения сетей широкополосного доступа формата WIMAX // Спецтехника и связь. 2009. №3. С. 52-56.

9. Материалы сайта http://www.comptek.ru/wireless/solution_.html

10. Материалы сайта <http://id.admlip.ru/economy/industry/svyaz/>