

**ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ  
С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ  
В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ  
НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

к.т.н. П.А. Будко, В.А. Рачков, Д.Л. Осипов, В.А. Миронов, А.В. Дорошев  
(представил д.т.н., проф. В.В. Федоренко)

*Разработана методика формирования топологического ресурса радиосети подвижных объектов при изменяющихся условиях ведения связи с использованием геоинформационных систем.*

**Введение.** Современные сети связи, и особенно радиосети, относятся к классу антропогенных систем большого масштаба, размерности и наивысшей сложности [1]. Такая специфика радиосетей как ярко выраженная нестационарность среды распространения радиоволн, подверженность сигнала значительному числу дестабилизирующих факторов естественного и искусственного характера, нечетко (или противоречиво) заданные параметры анализируемой сети в условиях обеспечения радиосвязи с подвижными объектами на пересеченной местности и в городских условиях, на деградирующей сети предполагает динамичность и непредсказуемость изменений связности радиосети [2].

В последние годы все шире используются современные компьютерные технологии, позволяющие значительно снизить временные и вычислительные затраты при проектировании радиосетей. Нового качественного уровня методология синтеза современных телекоммуникационных сетей смогла достичь, опираясь на широкие возможности современных ЭВМ, позволяющие резко снизить вычислительные трудозатраты и сделать доступными и популярными среди исследователей даже такие громоздкие (с точки зрения вычислительной емкости) методы, как динамическая и многокритериальная оценка эффективности – пошаговый анализ интегрального показателя эффективности, учитывающего все (или почти все) многообразие свойств радиосвязи [1]. На начальном этапе синтеза радиосети проектировщик зачастую сталкивается с трудностями в определении топологии будущей сети при нечетко заданных исходных данных и местоположении подвижных модулей корреспондентов сети, распределенных (перемещающихся) на значительной территории. В этом случае при планировании связи наряду с другими параметрами будущей

сети необходимо задаться и топологическими ресурсами возможных (доступных) мест стоянок, маршрутов перемещения подвижных модулей абонентов.

**Цель статьи** – разработка методики формирования топологического ресурса сети подвижных объектов при изменяющихся условиях ведения связи.

**1. Анализ возможностей геоинформационных систем при формировании топологии сетей связи.** По сравнению с существующими методами формирования топологии сетей связи поставленная цель достигается путем использования математического аппарата более полного учета дестабилизирующих факторов, воздействующих на радиосигнал (комплексное воздействие аппаратурных искажений, шумов и сосредоточенных по спектру помех [3 – 5]), а также путем применения в качестве инструмента решения данной задачи геоинформационных систем (ГИС) и технологий в виде цифровых карт местности (ЦКМ) [6]. Современные ГИС позволяют наряду со вводом в базу данных географических координат радиоэлектронных средств и измерениями на топографических картах проводить анализ рельефа местности с построением сечения рельефа между выбранными точками на карте; многофункциональный анализ напряженности электромагнитных полей с построением зон уверенного радиоприема и радиосвязи, в том числе с учетом десятков, сотен и тысяч мешающих источников излучений; расчет электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (РЭС), с ведением соответствующих баз данных; выдачей рекомендаций по частотным присвоениям и использованию частотного, энергетического, аппаратного и других видов ресурсов радиосетей.

Решение задачи формирования топологического ресурса радиосети рассмотрим с использованием ЦКМ Ставропольского края с масштабом 1:200000 на примере двух способов размещения Базовой РЭС (БРЭС): при нахождении ее на стационаре, либо при перемещении на определенной территории (БРЭС на подвижных модулях). Подвижные модули абонентов могут также перемещаться и занимать определенные места стоянок на значительной территории, определяемой зоной радиовидимости метрового диапазона или зоной действия земной волны при использовании декаметровой радиосвязи.

Пусть координаты стационарной БРЭС заданы по широте –  $45^{\circ} 41' 55''$ , по долготе –  $42^{\circ} 58' 36''$  (рис. 1). Подвижные радиомодули абонентов сети, функционирующие в административно-территориальных образованиях края (АТО), могут иметь по нескольку мест стоянок по всей территории выделенного АТО. При первом способе использования стационарной БРЭС расчет формируемых радиолиний необходимо производить между БРЭС и по маршруту движения (по основным автомагистралям) к каждой стоянке абонентов радиосети. На рисунке приведены расчеты уровня сигнала в точка приема при высоте подъема антенны БРЭС на 20 метров, мобильных РЭС

на 5 метров и выходной мощности радиопередающих устройств 50 Вт. Зона уверенного радиоприема для этих условий ведения связи на рисунке показана ломаной линией и заливкой. При использовании мобильного варианта БРЭС необходим расчет радиолиний для каждого варианта размещения на стоянках БРЭС и всеми вариантами размещения абонентов как на стоянках, так и на маршрутах их перемещения в рамках выделенного ресурса.

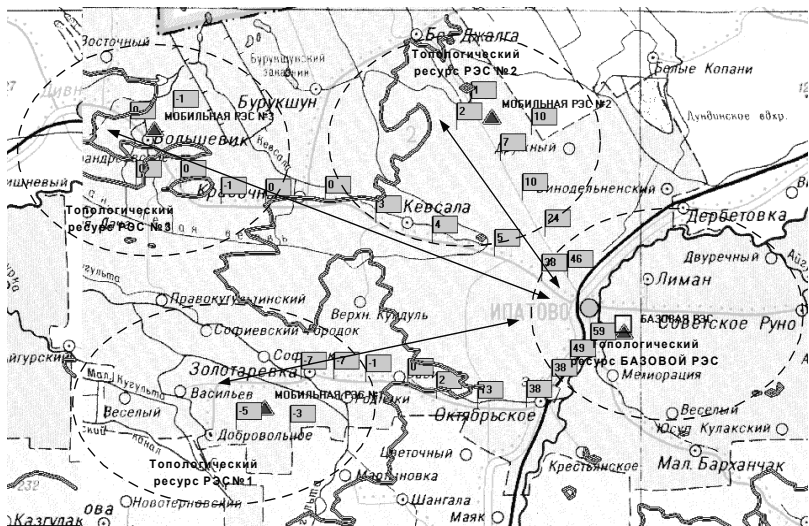


Рис. 1. Пример построения топологии сети радиосвязи с использованием ГИС

Число рассчитываемых радиолиний математически можно выразить для первого способа как  $S_1 = \sum_{i=1}^p m_i$ , а для второго как  $S_2 = \sum_{i=1}^p m_i \cdot n$ , где  $m$  – число мест стоянок (ресурс стоянок) абонентов;  $n$  – число мест стоянок (ресурс стоянок) БРЭС;  $i$  – номер абонента;  $p$  – количество абонентов.

Задача оптимального распределения топологического ресурса стоянок БРЭС в общей постановке формируется следующим образом. Требуется найти вектор распределения ресурса  $\xi^* = \{\xi_1, \dots, \xi_A\}$  между  $A$  стоянками, при котором будет обеспечено максимально возможное качество связи во всех радиолиниях. При этом показателем качества радиолинии выступает вероятность ошибочного приема элемента сигнала  $p_{ош}$ , а критерием эффективности – вероятность приема с заданными требованиями ( $p_{ош тр.}$ ), т.е.  $P_{пр}(p_{ош} < p_{ош тр.})$ .

Анализ известных работ по децентрализованному использованию топологических ресурсов системы связи [7, 8] показывает, что такие задачи решались с целью максимизации среднего числа радиолиний, обслуживае-

мых с требуемым качеством. Оптимизация качества связи осуществлялась по аддитивным критериям, что может привести к тому, что в одни радиолинии выделяется топологический, аппаратурный и другие виды ресурсов, обеспечивающие достоверность передачи сообщений, значительно превышающую требуемое значение, а в другие – необеспечивающий качество связи. Поэтому оптимальное распределение топологического, частотного и аппаратурного ресурсов на сети радиосвязи необходимо осуществлять по критерию гарантированной надежности связи, который обеспечит равномерность распределения качества в радиолиниях между БРЭС и абонентами на различных стоянках. При этом размещение БРЭС на каждой из своих стоянок предполагает подбор оптимальной топологии размещения абонентов сети из выделенных топологических ресурсов стоянок для каждого АТО. Смена стоянки БРЭС влечет за собой выбор другой оптимальной топологии размещения абонентов сети, поскольку использование старых стоянок абонентов может привести не только к потере оптимальности (максимума показателя качества) связи в радиолинии, но даже и выхода ее из множества пригодных радиолиний по допустимому значению показателя качества. Если ни одна из стоянок абонента какого-либо АТО не удовлетворяет требованию по показателю качества при формировании радиолинии, то для возвращения в множество пригодных линий связи необходимо задействовать все имеющиеся ресурсы корреспондирующих станций (аппаратурный, энергетический, частотный, сигнальный и др. [3 – 5]). Если управление всеми имеющимися в распоряжении сети ресурсами не обеспечивает требуемых значений качества связи, то необходимо изменить топологию путем замены мест стоянок абонентов (перемещение подвижного модуля БРЭС) на такие, которые обеспечат данные требования к связи в формируемых радиолиниях, т.е. занять одну из стоянок, принадлежащих множеству  $S_2$ , или расширить топологический ресурс новыми стоянками.

При рассмотрении варианта выбора оптимальной топологической структуры сети связи, на которой каждый абонент и БРЭС имеет по несколько доступных стоянок в рамках выделенных топологических ресурсов, смена места стоянки БРЭС не обязательно повлечет смену мест стоянок корреспондентов. Некоторые стоянки абонентов сети могут в этом случае продолжать обеспечивать допустимые значения показателя качества радиосвязи, какие-то обеспечат максимальные значения показателя качества, и только те места стоянок, с которых невозможно обеспечить требуемое качество связи, необходимо заменить. Использование методик повышения эффективности радиолиний за счет учета таких дестабилизирующих факторов как шумов, сосредоточенных по спектру помех, замираний сигнала, аппаратурных искажений [3 – 5] позволяет сформировать

рекомендации по использованию различных видов ресурсов сети, необходимых для формирования топологии, обеспечивающей как наилучшие, так и допустимые значения показателя качества на сети. Для этого могут изменяться частоты, типы и высоты антенн, виды и способы передачи радиосигналов, методы кодирования, энергетические характеристики и т.д.

**2. Алгоритм выбора оптимальной стоянки подвижного модуля БРЭС.** В целях повышения живучести сети в АТО могут выделяться несколько стоянок БРЭС. Формирование радиолиний осуществляется между данными  $N$  стоянками БРЭС и  $M$  стоянками из состава топологического ресурса абонентов при размещении на них РЭС. Задача заключается в следующем: из заданного ресурса стоянок БРЭС требуется выбрать такую (для организации связи с абонентами), при использовании которой качество связи для абонента, находящегося в наихудших условиях ведения связи, оказывается наилучшим. В данной постановке решения задачи в качестве критерия оптимальности принимаем максиминный критерий. Обозначим через  $P_{ij}$  – значение уровня сигнала на входе приемного устройства РЭС, размещенной на  $j$ -й стоянке абонента при организации связи с  $i$ -й стоянкой БРЭС. Для выбора оптимальной стоянки абонента из полученных значений  $P_{ij}$  построим матрицу (1), где  $i$ -я строка соответствует  $i$ -й стоянке абонента,  $j$ -й столбец –  $j$ -й стоянке БРЭС:

$$\|P_{ij}\|_{N,M} = \begin{array}{c|cccc} & Q_1 & \dots & Q_{j_i} & \dots & Q_M \\ \hline S_1 & P_{11} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1M} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_i & P_{i1} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{jM} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_N & P_{N1} & \dots & P_{Nj} & \dots & P_{NM} \end{array}, \quad (1)$$

Математически задача формулируется следующим образом: требуется выбрать такую стоянку подвижного модуля абонента  $S^*$ , при использовании которой в сформированной радиолинии обеспечивается максимальное  $P_{ij}$ , т.е.

$$P^*(S^*) = \max_{S_i} \min_{Q_j} P_{ij}. \quad (2)$$

Номер оптимальной стоянки абонента определяем следующим образом:

– в каждой строке матрицы (1) отыскивается минимальный элемент  $P_i^* = \min_j P_{ij}$ , который записывается справа от исходной матрицы;

– среди найденных в разделе 1 значений уровня сигнала на входе

приемного устройства выбирается наибольшее  $P^* = \max_i P_i^*$ ;

– номер стоянки абонента, использование которой в сформированной радиолинии обеспечивает максимальное  $P_i^*$ , выбираем в качестве оптимальной для организации радиосвязи между абонентом АТО и БРЭС.

Таким образом, при обеспечении связи между БРЭС и абонентом их подвижные модули должны находиться на оптимальных стоянках (из возможного топологического ресурса).

**3. Алгоритм формирования топологического ресурса сети.** Рассмотрим задачу оптимального распределения топологических ресурсов БРЭС и абонентов с одинаковыми требованиями к качеству связи. Учитывая, что между БРЭС и каждым абонентом сети при нахождения их на своих стоянках может быть организована только одна радиолиния, а некоторые стоянки могут оказаться наилучшими одновременно для нескольких радиолиний, обеспечение максимально возможного качества связи в каждой радиолинии путем распределения позиций  $C_N^M$  в большинстве случаев оказывается невозможным из-за топографических особенностей местности и иных факторов, влияющих на качество связи. В этом случае формирование топологии сети целесообразно осуществлять по максиминному критерию венгерским методом [8]. В качестве цели оптимального распределения принимается максимум качества связи в радиолинии, работающей в наихудших условиях

$$\Phi(S^0) = \max_{\{S\}} \min_i P_i(s_{ij}), \quad (3)$$

где  $S^0$  – оптимальный план распределения топологических ресурсов сети,  $P_i(s_{ij})$  – уровень сигнала на входе приемного устройства РЭС в радиолинии, образованной между  $i$ -й стоянкой БРЭС и  $j$ -й позицией абонента.

Пусть имеется  $M$  стоянок абонента и  $N$  стоянок БРЭС, причем  $M \leq N$ . При построении радиотрассы между  $i$ -й стоянкой БРЭС и  $j$ -й стоянкой абонента в ней обеспечивается уровень сигнала на входе приемного устройства  $P_{ij}$ . Задача заключается в таком выборе мест стоянок корреспондентов, при котором обеспечивается максимальное значение уровня сигнала на входе приемного устройства в радиолинии, находящейся в наихудших условиях.

Для решения задачи оптимального распределения топологического ресурса необходимо предварительно рассчитать значение уровня сигнала на входе приемника  $P_{ij}$  в каждой радиолинии при всех возможных вариантах выбора позиции  $C_N^M$ , которые представим в виде матрицы (1). При этом расчет  $P_{ij}$  производится с учетом технического состояния радиосредств [3 – 5]. Для сокращения вычислительных затрат можно использовать ПИАР – 4.5 [6].

Обозначим через  $\aleph_{ij}$  – индикатор выбора  $j$ -й стоянки абонентом и  $i$ -й стоянки БРЭС при построении радиолинии, при этом

$$\aleph_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я стоянка назначается в паре с } i\text{-й стоянкой;} \\ 0, & \text{если } j\text{-я стоянка не назначается в паре с } i\text{-й стоянкой.} \end{cases}$$

Задача оптимального распределения топологического ресурса при этом сводится к отысканию такой матрицы  $S^0$  выбора мест стоянок корреспондентов, при которой  $\min_i P_i(\aleph_{ij}) \Rightarrow \max_{[S]}$ , при условии, что  $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \aleph_{ij}^0 = M$ .

$$S = \begin{bmatrix} \aleph_{11}^0 & \aleph_{12}^0 & \dots & \aleph_{1j}^0 & \dots & \aleph_{1M}^0 \\ \aleph_{21}^0 & \aleph_{22}^0 & \dots & \aleph_{2j}^0 & \dots & \aleph_{2M}^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \aleph_{i1}^0 & \aleph_{i2}^0 & \dots & \aleph_{ij}^0 & \dots & \aleph_{jM}^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \aleph_{N1}^0 & \aleph_{N2}^0 & \dots & \aleph_{Nj}^0 & \dots & \aleph_{NM}^0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Алгоритм решения задачи выбора мест стоянок корреспондентов (распределения топологического ресурса) представим в виде последовательности следующих операций:

1. Из элементов матрицы  $[P_{ij}]$  построить вариационный ряд

$$P_{ij}^{(1)} > P_{ke}^{(2)} > \dots > P_{pq}^{(\gamma)} > \dots > P_{rf}^{(v\gamma)},$$

где  $p \leq M \cdot N$ ;  $i, k, \dots, r = \overline{1, N}$ ;  $j, e, \dots, f = \overline{1, M}$ .

2. На первом шаге принять  $\gamma = N$ .

3. Составить матрицу  $S^{(\gamma)} = [ \aleph_{ij}^{(\gamma)} ]$ , полагая

$$\aleph_{ij}^{(\gamma)} = \begin{cases} 1, & \text{если } (P_{ij} - P_{ij}^{(\gamma)}) \geq 0; \\ 0, & \text{если } (P_{ij} - P_{ij}^{(\gamma)}) < 0. \end{cases} \quad (5)$$

4. Определить число  $M^*$  независимых единичных элементов матрицы  $S^{(\gamma)}$ , т.е. таких, что никакие два из указанных элементов не лежат в одной и той же строке и в одном и том же столбце этой матрицы: если  $M^* < M$ , то  $\gamma = \gamma + (M^* - M)$  и перейти к пункту 3; если  $M^* = M$ , то перейти к пункту 5.

5. Составить матрицу назначений выбора мест стоянок корреспондентов  $S^0 = [ \aleph_{ik}^0 ]$ , в которой значения  $\aleph_{ij}^0 = 1$  должны соответствовать положениям независимых единичных элементов матрицы  $S^{(\gamma)}$ , остальные

значения  $\chi_{ij}^0$  положить равными нулю. Очевидно, что процесс поиска оптимального решения содержит не более, чем  $M$  итераций.

Блок-схема алгоритма нахождения выбора оптимальных мест стоянок корреспондентов сети представлена на рис. 2.

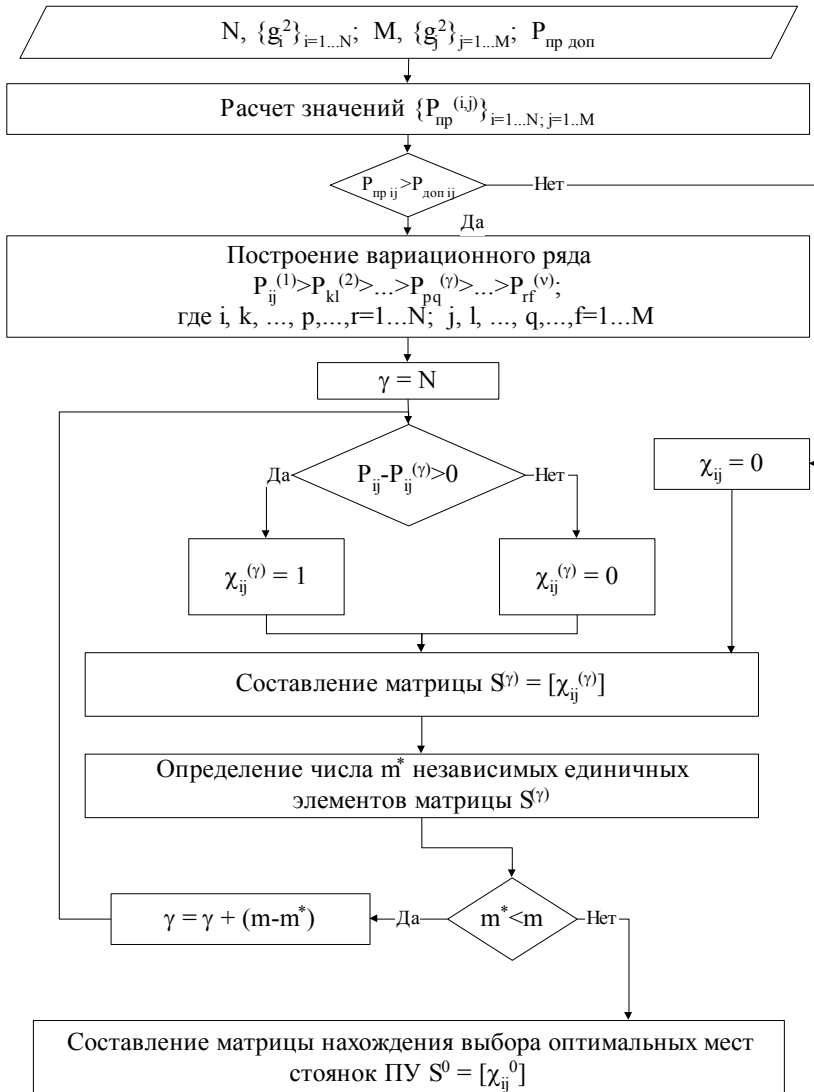


Рис. 2. Блок-схема алгоритма нахождения выбора оптимальных мест стоянок корреспондентов радиосети



**Выводы.** Использование ГИС значительно снижает временные затраты при расчетах проектируемых радиосетей, позволяет осуществлять моделирование синтезируемых сетей с построением зон уверенного приема, что обеспечивает наглядность проекта. Такие возможности ГИС как анализ рельефа местности, напряженности электромагнитных полей, построение зон уверенного радиоприема, в том числе с учетом дестабилизирующих факторов, оценка влияния среды распространения радиоволн, учет метеоусловий на радиотрассах значительно упрощает проектировщику решение задачи моделирования радиосетей. Автоматизация трудоемких вычислений на существующих радиосетях позволит лицу, принимающему решение по связи, в кратчайшие сроки формировать и изменять топологию сети без проведения контрольных измерений, что немаловажно в условиях динамично изменяющейся обстановки по связи, деградации сети, при обеспечении связи с подвижными объектами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Томский В.С. Новые подходы к проектированию телекоммуникационных сетей // *Электросвязь*. – 2000. – № 5. – С. 20 – 22.
2. Коффман А. Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Наука, 1990. – 432 с.
3. Будко П.А. Повышение эффективности радиолиний при адаптивном управлении аппаратурным и частотным ресурсами на узлах связи // *Радиотехника*. – 2001. – № 8. – С. 28 – 31.
4. Федоренко В.В., Будко П.А. Помехоустойчивость некогерентного приема искаженных в аппаратуре сигналов при воздействии сосредоточенной помехи // *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. – 1997. – № 3. – С. 69 – 73.
5. Fedorenko V.V., Budko P.A., N.A. Vershkov. *Mathematical Model of Discrete Communication Channel under the Influence of Destabilizing Factors // Engineering Simulation/* – 1998. – V. 15. – P. 77 – 83 (in India).
6. Программа исследования и анализа радиосетей. – Ярославль: ЯГУ, 1999. – 92 с.
7. Прохоров В.К., Шаров А.Н. Расчет показателей эффективности радиосвязи. – Л.: ВАС, 1990. – 132 с.
8. Постюшков В.П. Прикладные задачи оптимизации и принятия решений в системах связи. – Л.: ВАС, 1989. – 132 с.

Поступила 16.05.2003

**БУДКО Павел Анатольевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИО филиала Ростовского военного института РВ (Ставрополь). Окончил в 1988 году Ставропольское высшее военное инженерное училище связи. Область научных интересов – сети передачи данных.

**РАЧКОВ В.А., МИРОНОВ В.А., ДОРОШЕВ А.В.** – сотрудники филиала Ростовского

военного института РВ (Ставрополь).

**ОСИПОВ Дмитрий Леонидович**, научный сотрудник НИЛ филиала Ростовского военного института РВ (Ставрополь). Область научных интересов – сети передачи данных.

---