

ТЕХНОЛОГИЯ НАРАЩИВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЛЕВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ МЕТОДОМ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

И.И. Горай¹, Д.А. Журавлёв^{1*}, Г.А. Прасько¹

¹Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

*Адрес для переписки: ZhuravlevDmitriy84@yandex.ru

Информация о статье

УДК 621.396.4

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Горай И.И., Журавлёв Д.А., Прасько Г.А. Технология наращивания структуры полевой транспортной сети методом развертывания дополнительных линий // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 40–46.

Аннотация: В статье рассмотрена последовательность решения задачи восстановления структуры сети методом добавления ребер. Указаны возможные варианты формирования алгоритмов с учетом целого ряда характеристик сети: числа независимых маршрутов, структурной живучести, времени и вероятности доставки сообщений, суммарного числа остоновых деревьев и др. Приведен пример, поясняющий последовательность решения конкретной задачи восстановления структуры сети.

Ключевые слова: маршрут, корреспондирующие узлы, транспортная сеть, граф, узел, остоновые деревья, вероятность доставки, время доставки, сообщение.

Задача построения структуры полевой транспортной сети связи является важнейшей, поскольку наличие именно структуры позволяет решить и ряд других связанных с ней задач, а именно:

- определение структурной живучести сети;
- определение маршрутов между выделенными корреспондирующими узлами связи и алгоритмов маршрутизации;
- выработка рекомендаций по решению поточковой задачи;
- оценка эффективности применимости той или другой технологии;
- решение задач резервирования и управления.

Все перечисленные и ряд других задач, как правило, задаются в качестве исходных требований. В случае невыполнения одного из требований происходит возврат к задаче построения структуры. В общем случае процесс построения структуры полевой транспортной сети носит итерационный характер и останавливается, когда найдено решение, удовлетворяющее всем требованиям.

Предположим, требуется построить структуру сети, удовлетворяющую требованию по наличию трех независимых маршрутов между корреспондирующими узлами. При этом базовая структура сети (ее основная часть) задана.

Решение задачи включает комплекс оценок по связности сети, времени и вероятности доставки сообщений между корреспондирующими узлами. Данная задача чаще всего может возникнуть в динамике решения по связи, например, при восстановлении сети.

Очевидно, что в условиях, когда часть сети сохраняется, и если она не устраивает заданным требованиям, то улучшение ее структурной надежности может достигаться только за счет введения дополнительных (резервных) линий связи. В самом общем виде решение задачи может формулироваться как введение в заданный на определенный момент сети таких линий, которые обеспечивали бы:

- образование между выделенными корреспондирующими узлами минимум трех независимых маршрутов, $n \geq 3$;
- структурную живучесть и надежность направлений связи не хуже заданной;
- максимизацию (при оценке структурной живучести всей сети через суммарное число) остоновых деревьев.

При этом линии могут иметь ограничения на длину, время развертывания и пропускную способность.

В сетях связи специального назначения, которые строятся с использованием различных телекоммуникационных технологий, важными являются такие характеристики, как пропускная способность направлений связи и время доставки сообщений. Известно, что при большом количестве исходных данных и предъявляемых требований, задача может быть чрезвычайно сложной, и в ряде случаев возникает необходимость вводить временные ограничения на окончание процесса подготовки исходных данных и получение результатов. При этом необходимо оценить сложность используемых расчетных алгоритмов, время, затрачиваемое на подготовку исходных данных, а также наличие пробных вариантов формулировки и решения задач данного класса. Возвращаясь к вопросу построения структуры полевой транспортной сети связи, следует понимать, что сформулированная задача состоит в изменении структуры сети, в ее улучшении за счет добавления линий связи (ребер сети).

Тогда при подготовке исходных данных (особенно при ограниченном времени) заранее должны быть установлены расстояния между ближайшими узлами, между которыми, предположительно, будут разворачиваться линии, а также выполняться требования по оценке параметров сети, которые предстоит улучшить.

Рассмотрим два варианта разработки исходных данных.

Первый вариант. Нетрудно предположить, что при появлении нарушении структуры сети могут появляться корреспондирующие узлы, для которых $n < 3$. В этом случае претендентами для разворачивания дополнительных линий являются именно ребра, инцидентные этим узлам. Если решается задача частичного восстановления структуры и обеспечения для каждой корреспондирующей пары трех независимых маршрутов, то множество конкурентных ребер будет состоять из ребер инцидентных узлам, для которых $n < 3$. Следует заметить, что имеет смысл сравнить структуру сети до повреждения линий и ту, которую предстоит восстановить. Анализ этой ситуации может подсказать наиболее рациональное решение.

Таким образом, множество конкурентных линий будет состоять из тех, которые должны разворачиваться от узлов с $n < 3$. Поскольку решается многокритериальная задача, то в дальнейшем требуется выполнить определенные действия.

1) С помощью алгоритма Дейкстры [1] определить число независимых маршрутов между корреспондирующим узлом с $n < 3$ и всеми другими. Если оно увеличивается, то выполнить такую же процедуру для всех конкурирующих ребер. Алгоритм относится к классу полиномиальных; сложность для различных типов графа не хуже $O(n^2)$.

2) Составить множество ребер, которые позволяют увеличить на единицу число независимых маршрутов от узла с $n < 3$.

3) Для каждого из трех независимых маршрутов (образованных с участием добавленного ребра) рассчитать структурную живучесть всех восстановленных направлений связи. Расчет производить с использованием простейших формул, которые приведены в примере.

4) Оценить улучшение общей связности сети для каждого варианта с помощью суммарного числа остовных деревьев. Существует ряд алгоритмов решения данной задачи. В статье используется алгоритм подсчета числа остовных деревьев с помощью матрицы Кирхгофа [2]; алгоритм имеет полиномиальную сложность $O(n^2)$.

5) Применяя алгоритм многокритериальной оптимизации [3, 4] и используя все принятые в п. 2) варианты введения дополнительных ребер, определить лучший вариант (варианты).

Следует заметить, что в сетях связи специального назначения могут учитываться и ряд других обстоятельств, влияющих на принятие окончательного решения, а именно:

- время разворачивания вводимых в эксплуатацию линий;
- соответствие линии принятой в сети телекоммуникационной технологии;
- необходимая величина пропускной способности и др.

Второй вариант. Структура сети изменяется, но для всех корреспондирующих узлов справедливо условие $n \geq 3$. Для формирования множества заменяемых ребер важно уяснить, какие из ребер сети были повреждены, а также какие из ребер в первоначальном варианте структуры встречались наибольшее число раз в формировании трех независимых маршрутов между всеми корреспондирующими узлами. Если нарушения структуры небольшие и важно восстановить только число независимых маршрутов, то данное множество ребер можно принять за исходное и продолжить решение. Однако если требования по связи изменились (например, сменились места корреспондирующих пар узлов), то задача требует знания ситуации на данный момент, т. е. числа независимых маршрутов между корреспондирующими узлами. В этом случае решение о введении резервных линий должно выполняться в последовательности, изложенной в первом варианте.

Далее, на основе конкурентного множества вариантов x_i размещения дополнительных линий связи на сети формируется множество альтернатив $X = \{x_i\}_{i=1}^N$, где N – количество вариантов размещения. Если число вариантов и, главное, способов их оценки больше двух, то решается задача выбора наилучшего.

Для оценки эффективности той или иной альтернативы, как правило, существует множество показателей качества. Варианты размещения дополнительных линий на сети характеризуются, прежде всего, такими показателями, как:

- максимальное время доставки сообщений между корреспондирующими узлами t_d ;
- вероятность доставки сообщений между корреспондирующими узлами p_d ;
- протяженность формируемых дополнительных маршрутов l ;
- число оставных деревьев A , образуемых после введения дополнительной линии связи.

Выбор наилучшего варианта размещения дополнительной линии связи на сети представляет собой задачу многокритериальной оптимизации. Из множества альтернатив X необходимо выбрать такую x_i , чтобы векторный критерий $F(x_i) = (F_1(x_i) F_2(x_i) F_3(x_i) F_4(x_i))^T$ с частными критериями $F_i(x)$ ($i = \overline{1, 4}$), был оптимальным:

$$F(x_i) = (F_1(x_i) F_2(x_i) F_3(x_i) F_4(x_i))^T \rightarrow \text{optim},$$

где $F_1(x_i)$ – максимальное время доставки сообщений между корреспондирующими узлами; $F_2(x_i)$ – вероятность доставки сообщений между корреспондирующими узлами; $F_3(x_i)$ – структура формируемых дополнительных маршрутов; $F_4(x_i)$ – число оставных деревьев, образуемых после введения дополнительной линии связи.

Для решения задачи многокритериальной оптимизации задаются отношения предпочтений $\succ_X$.

Решение x_j будет доминировать над x_k :

$$(x_j \succ x_k), \text{ если } F(x_j) \succ F(x_k).$$

В противном случае: $(F(x_j) < F(x_k))$ и $x_j < x_k$.

Альтернативы x_j и x_k несравнимы, если не выполняется ни соотношение $F(x_j) \succ F(x_k)$, ни соотношение $F(x_j) < F(x_k)$. При этом считается, что $F(x_j) \succ F(x_k)$, если для всех компонентов вектора $F(x_i) = (F_1(x_i) F_2(x_i) F_3(x_i) F_4(x_i))^T$ выполняются соотношения:

$$\begin{cases} F_1(x_j) \leq F_1(x_k) \\ F_2(x_j) \geq F_2(x_k) \\ F_3(x_j) \leq F_3(x_k) \\ F_4(x_j) \geq F_4(x_k) \end{cases}'$$

и хотя бы одно из них строгое.

Для более удобного представления решения задачи многокритериальной оптимизации локальные критерии $F_1(x_i) \rightarrow \min$ и $F_3(x_i) \rightarrow \min$ сводятся к максимизации обратным знаком: $-F_1(x_i) \rightarrow \max$, $-F_3(x_i) \rightarrow \max$. Тогда оптимальным будет такое решение x_i^* , при котором векторный критерий обращается в максимум:

$$F(x_i^*) = (-F_1(x_i^*) F_2(x_i^*) -F_3(x_i^*) F_4(x_i^*))^T \rightarrow \max.$$

В большинстве случаев в первую и во вторую очередь учитывают время t_d , а также вероятность доставки сообщений p_d между корреспондирующими узлами, а в третью и четвертую соответственно – структуру маршрутов l и связность сети A (число образуемых остовных деревьев).

При решении проблемы выбора наилучшего варианта размещения дополнительных линий в полевой транспортной сети связи установлены следующие условия: $t_d \leq t_d^*$, $p_d \geq p_d^*$, $l \rightarrow \min$ и $A \rightarrow \max$.

Время доставки сообщения зависит от структуры маршрута, выбранной технологии передачи и коммутации сигналов (пакетная, канальная) и определяется как:

$$T_T = T_p + T_{\text{пк}} + T_{\text{пр}} + T_6,$$

где T_T – требуемое время доставки сообщения; T_p – время распространения сигнала по направляющей среде; $T_{\text{пк}}$ – время на преобразование сигнала; $T_{\text{пр}}$ – задержка на прохождение сигнала одного узла коммутации; T_6 – задержка сигнала в буфере джигитере.

Вероятность доставки сообщений на маршруте рассчитывается как $p_n = p_i p_j$, где p_n – вероятность доставки сообщения на n -ом маршруте; p_i – вероятность доставки сообщения по i -ой линии; p_j – вероятность доставки сообщения по j -ой линии.

Вероятность доставки сообщений в сети для трех независимых маршрутов рассчитывается как:

$$p_c = p_1(1-p_2)(1-p_3) + p_2(1-p_1)(1-p_3) + p_3(1-p_1)(1-p_2) + p_1 p_2(1-p_3) + p_1 p_3(1-p_2) + p_2 p_3.$$

Для решения поставленной задачи полевая транспортная сеть связи представляется в виде неориентированного графа G с множеством вершин $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, в качестве которых выступают сетевые узлы и станции, а также ребер $U = \{u_{ik}\}$, в качестве которых выступают линии связи. Каждой линии присваивается вес в виде значения их длины, и составляется матрица смежности $A = \|a_{ik}\|$.

В приведенном ниже примере решение задачи начинается с определения множества линий, которые могут быть развернуты за требуемое время с помощью существующих средств и выбора одного ребра из этого множества. Далее, для заданной пары узлов (для которых $n < 3$) вычисляются маршруты между ними, например, с помощью алгоритма Дейкстры [2]; при этом на каждом этапе расчета из графа исключаются ребра (линии связи) и узлы, задействованные при построении предыдущего маршрута доставки сообщений, и снова вычисляется кратчайший маршрут и т.д.

Если между корреспондирующими узлами число независимых маршрутов n не удовлетворяет условию $n \geq 3$, то производится замена предыдущей линии на другую, соответствующую заданным требованиям и ограничениям, например, по

скорости и затратам сил и средств. Далее процесс повторяется, начиная с работы алгоритма Дейкстры до установления факта $n \geq 3$.

Следует иметь ввиду, что если степень хотя бы одного из корреспондирующих узлов A и B графа сети равна 2, то при условии, что требуется обеспечить $n \geq 3$, развертываемая линия связи должна начинаться с этого узла. Для представленной на рисунке 1 сети таким узлом является корреспондирующий узел x_{16} (B).

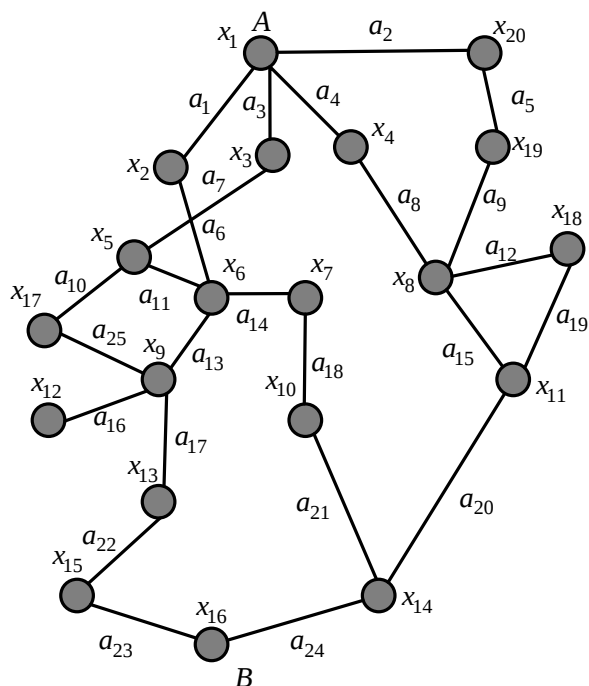


Рис. 1. Вариант полевой транспортной сети связи

В ряде случаев, если позволяет время, то дополнительно можно просмотреть и оценить некоторое множество вариантов введения (использования) развертываемых линий связи. Для этого требуется ввести определенное множество линий, и для каждой из них, при условии $n \geq 3$, сформировать множество конкурентных вариантов.

Решим задачу размещения дополнительных линий связи на конкретном примере.

Пример. На рисунке 1 задана полевая транспортная сеть связи, в которой необходимо обеспечить между корреспондирующими узлами x_1 (A) и x_{16} (B) не менее трех независимых маршрутов доставки сообщений. Исходные данные, ограничения и допущения следующие: время доставки сообщения $p_d \leq 150$ мс; $T_p = 3$ мкс/км; $T_{пк}$ для речепреобразования 40 мс; $T_{пр} = 30$ мс; $T_6 = 20$ мс; ресурс сил и средств позволяет построить линию длиной не более 70 км. Вероятность доставки сообщений по линиям p_d :

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,97; a_2 = a_3 = 0,99; a_4 = 0,98; \\ a_5 &= 0,97; a_6 = 0,98; a_7 = 0,97; \\ a_8 &= 0,99; a_9 = 0,99; a_{10} = 0,98; \\ a_{11} &= 0,97; a_{12} = 0,98; a_{13} = 0,99; \\ a_{14} &= 0,97; a_{15} = 0,97; a_{16} = 0,99; \\ a_{17} &= 0,96; a_{18} = 0,98; a_{19} = 0,99; \\ a_{20} &= 0,98; a_{21} = 0,99; a_{22} = 0,95; \\ a_{23} &= 0,97; a_{24} = 0,99; a_{25} = 0,97; \end{aligned}$$

а для прокладываемых линий:

$$a_{26} = 0,99 \text{ и } a_{27} = 0,99.$$

Длина линий в км, представлена в матрице (1):

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 40 & 20 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 \\ 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 30 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 & 0 & 20 & 0 & 15 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 40 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50 & 0 & 0 & 35 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 30 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 30 & 0 & 0 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 35 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В случае невыполнения условия $n \geq 3$ следует выбрать оптимальный вариант прокладки дополнительной линии. Таблица смежности сети $A = \|a_{ik}\|$ записана в (1). С использованием алгоритма Дейкстры вычисляются маршруты доставки сообщений между корреспондирующими узлами; результаты вычислений представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Характеристика маршрутов

Номер маршрута	Задействованные узлы связи	Задействованные линии связи	Протяженность линий в маршруте, км	Общая протяженность маршрута, км
1	$x_1, x_4, x_8, x_{11}, x_{14}, x_{16}$	$a_4, a_8, a_{15}, a_{20}, a_{24}$	20, 40, 15, 50, 35	160
2	$x_1, x_2, x_6, x_9, x_{13}, x_{15}, x_{16}$	$a_1, a_6, a_{13}, a_{17}, a_{22}, a_{23}$	40, 30, 20, 40, 30, 35	195

На рисунке 2 маршруты доставки сообщений изображены пунктирной линией с соответствующими обозначениями **1** и **2** соответственно.

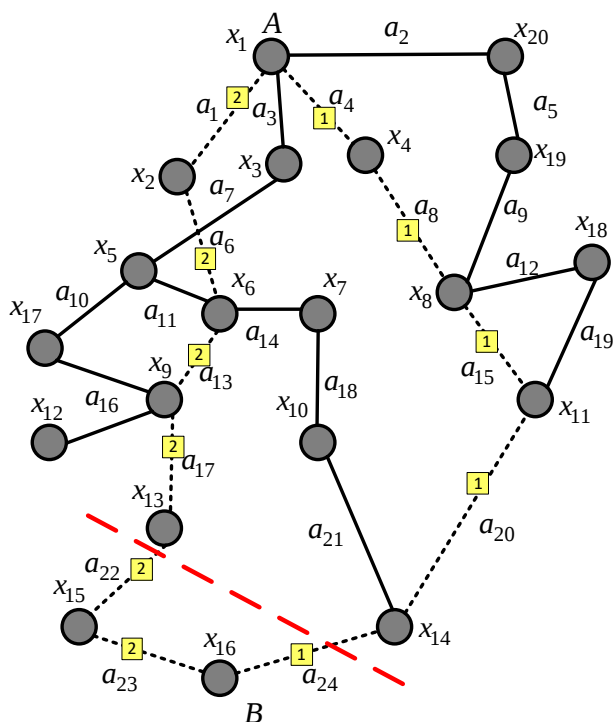


Рис. 2. Маршруты в полевой транспортной сети связи

Из рисунка 2 видно, что «узким» местом (показано пунктирной линией) является сечение сети между узлами x_{13} и x_{14} . Степень узла x_{16} (B) равна двум, что не позволяет удовлетворить требованию $n \geq 3$, поэтому все дополнительные линии связи должны быть инцидентны узлу x_{16} (B) (начинаться с этого узла).

С учетом заданного ограничения на ресурс выбраны возможные 4 варианта прокладки дополнительных линий, которые представлены в таблице 2 и на рисунке 3. Для наглядности линии, задействованные при построении первого и второго маршрута, на рисунке 3 исключены.

ТАБЛИЦА 2. Характеристика вариантов третьего маршрута

Вариант прокладки	Задействованные узлы связи	Задействованные линии связи	Протяженность линий в маршруте, км	Общая протяженность маршрута, км	Дополнительная линия (линии)
1	$x_1, x_3, x_5, x_{17}, x_9, x_{13}, x_{16}$	$a_3, a_7, a_{10}, a_{25}, a_{26}, a_{27}$	20, 40, 20, 20, 40, 30	170	$x_9-x_{13}, x_{13}-x_{16}$ (40, 30 км)
2	$x_1, x_3, x_5, x_6, x_7, x_{10}, x_{16}$	$a_3, a_7, a_{11}, a_{14}, a_{18}, a_{26}$	20, 40, 20, 15, 35, 60	190	$x_{10}-x_{16}$ (60 км)
3	$x_1, x_3, x_5, x_{17}, x_9, x_{12}, x_{16}$	$a_3, a_7, a_{10}, a_{25}, a_{16}, a_{26}$	20, 40, 20, 20, 20, 60	180	$x_{12}-x_{16}$ (60 км)
4	$x_1, x_3, x_5, x_6, x_7, x_{10}, x_{14}, x_{16}$	$a_3, a_7, a_{11}, a_{14}, a_{18}, a_{21}, a_{26}$	20, 40, 20, 15, 35, 40, 35	207	$x_{14}-x_{16}$ (35 км)

Номер маршрута указан на линии в прямоугольнике, а ее вариант – в скобках (см. рисунок 3). Некоторые линии имеют несколько номеров, поскольку используются в различных вариантах.

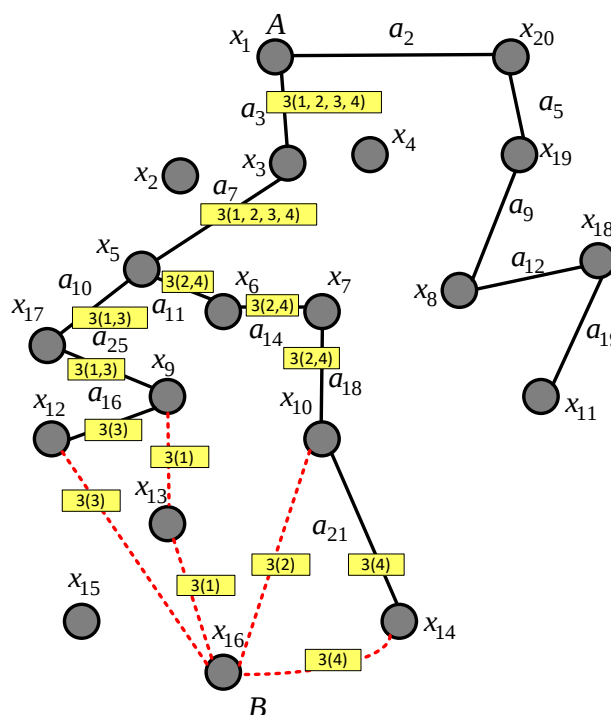


Рис. 3. Варианты прокладки дополнительной линии в полевой транспортной сети связи

Расчет времени доставки сообщений по каждому варианту прокладки дополнительной линии для третьего маршрута представлены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Время доставки сообщений

Номер варианта прокладки	1	2	3	4
t_d , мс	270,51	270,57	270,54	300,62

Будем считать, что условие $t_d \leq t_d^*$ выполняется на всех маршрутах.

Расчет вероятности доставки сообщений по маршрутам и в сети в целом после введения дополнительной линии представлен в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4. Вероятность доставки сообщений

Номер варианта прокладки	1-ый маршрут	2-ой маршрут	3-ий маршрут 1-ый вариант	3-ий маршрут 2-ой вариант	3-ий маршрут 3-ий вариант	3-ий маршрут 4-ый вариант
p_d маршрута	0,885	0,832	0,894	0,876	0,894	0,867
p_c сети	Без дополнительных линий (без 3 маршрута) 0,981		0,996	0,9974	0,996	0,9971

Оценка изменения (улучшения) общей связности сети осуществляется через расчет и оценку величины числа остовных деревьев. Число остовных деревьев для каждого варианта представлено в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5. Число остовных деревьев

Вариант прокладки линии	Число остовных деревьев
Без дополнительной линии	3373
1	218269
2	52872
3	9941
4	93459

Выбор варианта прокладки линии связи в рассматриваемой сети, представленной на рисунке 1, осуществляется путем многокритериальной оценки.

Векторные критерии, полученных альтернатив x_1 , x_2 , x_3 и x_4 в пространстве критериев принимают следующие значения:

$$\begin{cases} F(x_1) = (-270,51 & 0,996 & -170 & 218269)^T, \\ F(x_2) = (-270,57 & 0,9974 & -190 & 52872)^T, \\ F(x_3) = (-270,54 & 0,996 & -180 & 9941)^T, \\ F(x_4) = (-300,62 & 0,9971 & -207 & 93459)^T. \end{cases}$$

Множество возможных вариантов размещения $X_S = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ дискретно и конечно. Таким образом, используя алгоритм попарного сравнения альтернатив в критериальном пространстве и аксиому Парето (в терминах решений) [5], сформировано множество Парето-оптимальных решений X_P .

На первом шаге сравнивается альтернатива x_1 со всеми остальными решениями. Решения x_1 и x_2 несравнимы, также как не сравнимы и решения x_1 и x_4 . Однако решение x_1 доминирует над решением x_3 . Следовательно, решение x_3 исключается из множества возможных решений X_S . Таким образом, X_S преобразуется в $X'_S = \{x_1, x_2, x_4\}$.

На втором шаге сравнивается альтернатива x_2 со всеми остальными решениями. Решения x_2 и x_4 несравнимы, следовательно, из множества возмож-

ных решений X'_S ничего не исключается. Полученное множество возможных решений $\{x_1, x_2, x_4\}$ состоит из недоминируемых альтернатив и является Парето-оптимальным: $X_P = \{x_1, x_2, x_4\}$.

Полученное множество Парето-оптимальных решений X_P состоит из трех альтернатив, из которых необходимо выбрать единственное эффективное решение. Для решения этой задачи используется метод идеальной точки [5], для чего все компоненты векторных критериев $F(x_1)$, $F(x_2)$ и $F(x_4)$ приводятся к нормированным величинам.

Векторные критерии Парето-оптимальных решений X_P с нормированными компонентами принимают следующие значения:

$$\begin{cases} F'(x_1) = (-0,899 & 0,996 & -0,821 & 1)^T \\ F'(x_2) = (-0,9 & 1 & -0,87 & 0,242)^T \\ F'(x_4) = (-1 & 0,999 & -1 & 0,428)^T \end{cases}.$$

Определив идеальную точку как вектор, состоящий из максимальных значений каждого показателя качества, получим:

$$F_{ид} = \left(\max_{x \in X_P} F_1(x) \quad \max_{x \in X_P} F_2(x) \quad \max_{x \in X_P} F_3(x) \quad \max_{x \in X_P} F_4(x) \right)^T.$$

Тогда решением задачи многокритериального выбора будет считаться альтернатива, от которой евклидово расстояние до идеальной точки в пространстве критериев минимально:

$$\|F'(x^*) - F_{ид}\| \rightarrow \min, \quad x^* \in X.$$

Отсюда следует, что евклидовы расстояния между идеальной точкой и векторными критериями оказываются равными:

$$\begin{aligned} \|F'(x_1) - F_{ид}\| &= 0,004 \\ \|F'(x_2) - F_{ид}\| &= 0,7596. \\ \|F'(x_4) - F_{ид}\| &= 0,6078 \end{aligned}$$

Следовательно, решение x_1 , обладающее в пространстве критериев наименьшим расстоянием до идеальной точки, является оптимальным.

Таким образом, для представленной на рисунке 1 полевой транспортной сети, дополнительную линию в соответствии с выбранными критериями целесообразно проложить между узлами $x_9 - x_{13}$ (40 км) и $x_{13} - x_{16}$ (30 км), что удовлетворяет заявленным ограничениям на ресурс сил и средств (70 км).

На последнем этапе следует определить требуемую величину пропускной способности направлений связи с узлом B , а также канальную емкость развертываемой линии связи.

Заключение

Рассмотренная в статье технология наращивания структуры полевых транспортных сетей методом развертывания дополнительных линий является актуальной, так как задача обеспечения их структурной живучести, совместно с обеспечением

трех независимых маршрутов между выделенными узлами, является одной из важнейшей. Это продиктовано целым рядом обстоятельств.

Во-первых, структура сети является динамичным объектом, который подвергается изменениям и наряду с перераспределением потоков должна решаться задача восстановления сети.

Во-вторых, полевая транспортная сеть связи характеризуется частыми изменениями мест расположения корреспондентов, что требует постоянного мониторинга ее параметров и особенно проверки обеспечения трех независимых маршрутов при любом изменении корреспондирующих пар узлов.

И в-третьих, сеть может строиться с использованием различных телекоммуникационных технологий (с коммутацией пакетов и каналов). Наличие в структуре сети трех независимых маршрутов является дополнительной гарантией

того, что при любой из выбранных технологий время доставки сообщений будет уменьшено.

Кроме того, как показывает практика эксплуатации полевых транспортных сетей, наиболее эффективным способом решения заявленной в статье задачи является введение (построение) дополнительных линий.

Предложенная в статье технология наращивания структуры полевых транспортных сетей методом развертывания дополнительных линий, как показывает приведенный пример, может использоваться в сетях связи специального назначения, динамика функционирования которых в наибольшей степени приводит к смене топологии, а, следовательно, и к смене маршрутов доставки сообщений между корреспондирующими узлами. Кроме того, учет в технологии дополнительных параметров позволяет сформировать набор конкурентных вариантов и с использованием методов многокритериальной оптимизации выбрать наилучший.

Список используемых источников

1. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Издательство «Мир», 1978. 432 с.
2. Алексеев В.Е., Таланов А.В. Графы и алгоритмы. М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 154 с.
3. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: Физматлит, 2002. 144 с.
4. Ланнэ А.А., Улахович Д.А. Многокритериальная оптимизация. Л.: ВАС, 1984. 94 с.
5. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 288 с.

* * *

TECHNOLOGY OF THE FIELD TRANSPORT NETWORK BUILDING BY METHOD OF ADDITIONAL LINES'S DEPLOYING

I. Gorai¹, D. Zhuravlev¹, G. Prasko¹

¹Telecommunications Military Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Gorai I., Zhuravlev D., Prasko G. Technology of the Field Transport Network Building by Method of Additional Lines's Deploying // Proceedings of Telecommunication Universities. 2018. Vol. 4. Iss. 1. PP. 40-46.

Abstract: *The sequence of solving the problem of restoring the network structure by adding edges article are described. Possible variants of the algorithms taking into account a number of characteristics of a network: the number of independent routes, structural survivability, timing and certainty of message delivery, the total number of spanning trees - are specified. An example illustrating the sequence of a specific task restore the network structure is given.*

Keywords: *route, corresponding nodes, communication network, graph, node, spanning trees, delivery probability, delivery time, message.*