

## К ВОПРОСАМ ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Смирнов Константин Алексеевич, окончил факультет радиосвязи Санкт-Петербургского военного университета связи им. С.М. Буденного. Ведущий научный сотрудник ОАО «НИИ «Рубин». Имеет статьи в области построения, анализа и управления сетями подвижной радиосвязи специального назначения. [e-mail: inforubin@rubin-spb.ru].*

### Аннотация

Жизненный цикл сетей подвижной радиосвязи включает в себя планирование сети, выбор ее технологической основы, последующее управление эксплуатационными параметрами сети и их оптимизацию, свертывание сети. Одной из основополагающих задач, влияющих на качество предоставляемых услуг сетью подвижной радиосвязи специального назначения, является ее планирование.

Ключевые слова: сети подвижной радиосвязи, частотно-территориальное планирование (ЧТП), зоны покрытия, нагрузка.

Современные системы управления характеризуются, прежде всего, тем, что отличительной чертой процесса управления является его информационная сущность. Для каждого уровня управления характерно как взаимодействие между должностными лицами, так и доступ к базам данных. Соответственно, для систем управления в чрезвычайной ситуации (ЧС) растут требования к качеству связи. При этом одной из отличительных особенностей ЧС является то, что связь в большинстве случаев может быть обеспечена только на основе мобильных систем связи.

Сети мобильной связи предоставляют обширный перечень услуг (передача речи, данных), дают возможность общего доступа к сети связи независимо от ведомственной принадлежности. При этом сети транкинговой связи наиболее полно удовлетворяют органы управления в части вопросов по обеспечению информационного обмена: они позволяют предоставлять соединение абонентов между собой и с абонентами сети связи общего пользования, объединять пользователей в группы, оперативно конфигурировать эти группы, обеспечивать установление соединения за минимальное время.

На рисунке 1 показана обобщенная модель процесса функционирования сетей подвижной связи специального назначения (СПС СН) с учетом оптимизируемых внутренних и контролируемых внешних управляющих воздействий.

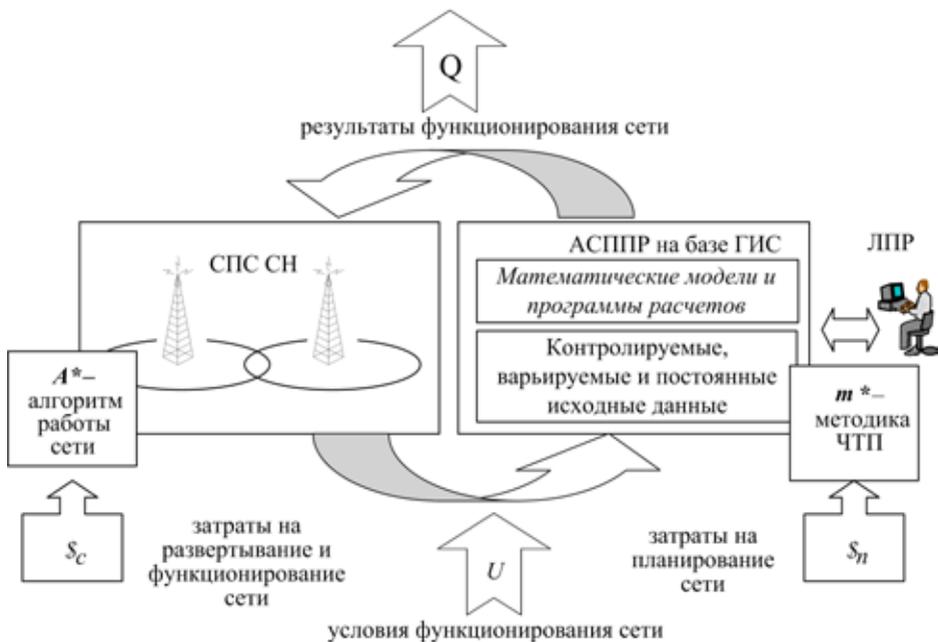


Рис. 1. Обобщенная модель процесса функционирования СПС СН

На основе данной модели решаемая задача может быть формально представлена в виде совокупности двух вложенных задач оптимизации следующим образом:

$$m^* = \arg \min S_n(m) \mid A^*(m) = \arg \min S_c(A(m)) \mid Q(A(m), U) \mid Q_{mp}. \quad (1)$$

Другими словами, необходимо разработать методику  $m^*$ , позволяющую при минимальных затратах на планирование  $S_n$  разработать проект сети  $A^*$ , на развертывание и дальнейшее функционирование которой потребуются минимальные затраты  $S_c$ , и при этом сеть сможет выполнить требования к качеству связи  $Q \mid Q_{mp}$  в заданных условиях  $U$ .

Постановка задачи (1) является декомпозицией более общей задачи минимизации суммарных затрат на процессы планирования  $S_n$  и развертывания сети  $S_c$ . Различная структура данных затрат затрудняет строгое решение совместной оптимизационной задачи по критерию минимума  $S_n + S_c$ . В данном случае предполагается, что методика  $m^*$  должна включать упорядоченный набор алгоритмов  $\{m_i\}$  с различным соотношением минимальных затрат  $S_c(S_n(m_i))$ , а окончательный выбор осуществляет лицо, принимающее решение (ЛПР). При этом в качестве показателя затрат на планирование предлагается использовать параметр сложности

$O(u)$ , отражающий минимально необходимое количество вычислительных операций (время расчетов) для разработки экономичного проекта сети  $A^*$ .

Показателем затрат на развертывание и функционирование сети служит суммарная стоимость закупки, установки и обслуживания оборудования базовых станций (БС)  $\$_{BC\ cym}$ , включая затраты на коммутационное оборудование и линии привязки, пересчитанные к стоимости отдельных каналов  $\$_k$ :

$$\$_c \approx \$_{BC\ cym} = \sum_{i=1}^{n_{BC}} (\$_{III} (B_i) n_{fi} + \$_k n_{fi} n_{ti} + \$_a (H_i, G_i)) + \$_f n_f, \quad (2)$$

где  $\$_{III}(B_i)$  – стоимость одного приемопередатчика (ПП)  $i$ -й БС, зависящая от его энергетического потенциала  $B_i$  (отношения максимальной мощности передатчика к минимально допустимой мощности принимаемых сигналов);

$n_{fi}$  – количество частотных каналов  $i$ -й БС, равное количеству ПП;

$n_{ti}$  – количество временных каналов;

$\$_a(H_i, G_i)$  – стоимость антенны высотой  $H_i$  с коэффициентом усиления  $G_i$  в месте развертывания  $i$ -й БС;

$\$_f$  – стоимость одного частотного канала;

$n_f$  – суммарное количество частотных каналов, используемых в СПС СН.

В случае использования  $n_{BC}$  БС с примерно одинаковыми количественными характеристиками выражение (2) можно упростить:

$$\$_c = n_{BC} (\$_{кПП} n_k + \$_a) + n_k K_f \$_f, \quad (3)$$

где  $\$_{кПП}$  – эквивалентная стоимость одного ПП и оборудования одного частотного канала;

$K_f$  – средняя размерность кластера, отражающая минимальное количество неповторяющихся частотных групп по  $n_k$  частотных каналов.

Как следует из выражения (3), вторую оптимизационную задачу в выражении (1) можно свести к трем взаимосвязанным задачам минимизации количества БС  $n_{BC}$ , количества частотных каналов на каждой станции  $n_k$  и размерности частотного кластера  $K_f$ .

Указанным задачам соответствуют три типовые задачи, последовательно решаемые на трех этапах ЧТП, отличающихся целевой направленностью на выполнение различных составляющих требований пользователей ( $Q_{mp}$ ):

1. Определение координат  $\{x_p, y_i\}$  минимального количества БС  $n_{*BC}$ , обеспечивающих необходимое энергетическое покрытие заданной территории  $\{X^*, Y^*\}$  с вероятностью  $P_c^*$ , предоставление каналов связи с вероятностью ошибки не более  $P_{*ош}$ .

2. Определение минимального количества каналов БС  $n_k^*$ , обеспечивающих в зоне обслуживания БС площадью  $S_{BC}$  (зависящей от результатов решения

задачи 1) заданную вероятность  $P_k^*$  предоставления каналов связи в течение времени, не превышающего допустимую величину  $t_{ож}^*$  при заданном распределении нагрузки  $\mathbf{p}(x, y)$ ,  $\{x, y\} \in \{X^*, Y^*\}$ .

3. Определение распределения  $\mathbf{F}^* = \{F_i^*\}$ ,  $i = 1, \dots, n_{BC}$  минимального количества частотных каналов  $n_f^* = n_k^* K_f^*$  между всеми БС, обеспечивающих отсутствие взаимных помех, нарушающих заданное энергетическое покрытие (результаты решения задачи 1) и требуемую пропускную способность (результаты решения задачи 2).

Обобщенным показателем качества энергетического покрытия выступает коэффициент покрытия  $K_{пок}$ , характеризующий часть  $S_{пок}$  суммарной площади  $S_{сум}$  возможных мест размещения подвижных абонентов (ПА)  $\{X^*, Y^*\}$ , на которой выполняются требования к качеству связи  $P_c \geq P_c^*$ :

$$K_{пок} = S_{пок} / S_{сум} \quad (4)$$

В результате решения 1-й и 3-й оптимизационных задач указанный коэффициент (4) должен быть не менее заданной величины  $K_{пок}^*$ .

В результате решения 1, 2 и 3-й оптимизационных задач указанный коэффициент (5) должен быть не менее заданной величины  $K_{обс}^*$ .

$$K_{обс} = \rho_{обс} / \rho_{сум} \quad (5)$$

Основу методики прогнозирования зон покрытия составляют методы определения дальности связи в различных направлениях от БС, опирающиеся на модель радиоканала между БС и мобильным абонентом, основу которой составляют два типовых уравнения передачи.

Итогом решения обоих уравнений является проверка выполнения требований к надежности связи  $P_c \geq P_c^*$ .

Имея карту уровней сигнала от каждой  $i$ -й БС  $\{P_{сиг\ m\ ixy}\}$  и зная требуемое значение медианного уровня  $P_{сиг\ м}^*$ , можно сформировать карту покрытия данной БС следующим образом:

$$P_{ixy} = \begin{cases} 1, & (Y_{xy} = 1) \cap (P_{сиг\ m\ ixy} \geq P_{сиг\ м}^*); \\ 0, & (Y_{xy} = 0) \cup (P_{сиг\ m\ ixy} < P_{сиг\ м}^*). \end{cases} \quad (6)$$

Расчет карты покрытия всеми БС  $\{P_{xy}\}$  выполняется путем следующего преобразования карт покрытия отдельных БС  $\{P_{ixy}\}$ ,  $i = 1, \dots, n_{BC}$ :

$$P_{xy} = 1 - \prod_{i=1}^{n_{BC}} (1 - P_{ixy}). \quad (7)$$

После этого вычисляется коэффициент покрытия:

$$K_{пок} = \left( \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} P_{xy} \right) / \left( \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} Y_{xy} \right). \quad (8)$$

Информацию о заданном распределении нагрузки предлагается хранить в виде матрицы, элементы которой соответствуют элементарным квадратным площадкам матричной карты с площадью  $g = (\Delta xy)^2$ . При этом непрерывное распределение плотности нагрузки  $\mathbf{p}(x, y)$ ,  $\{x, y\} \in \{X^*, Y^*\}$  будет иметь вид матрицы значений удельной нагрузки  $\{\rho_{xy}\}$ , приходящейся на площадку с координатами  $\{x, y\}$ ,  $x = 1, \dots, N_x$ ;  $y = 1, \dots, N_y$ .

Значения элементов матрицы удельной нагрузки  $\{\rho_{xy}\}$  должны быть согласованы со значениями элементов матрицы признаков принадлежности к обслуживаемой территории  $\{Y_{xy}\}$ :

$$Y_{xy} = \begin{cases} 1, & \rho_{xy} > 0; \\ 0, & \rho_{xy} = 0; \end{cases} \quad \forall x=1, \dots, N_x; \quad \forall y=1, \dots, N_y. \quad (9)$$

Зная конфигурацию зоны покрытия отдельной  $i$ -й БС  $\{P_{ixy}\}$ , можно определить максимальную входную нагрузку  $\rho_i$ , которая может оказаться на ее входе при отсутствии перекрытия с зонами покрытия других БС:

$$\rho_i = \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \rho_{xy} P_{ixy}. \quad (10)$$

Далее на основании заданного алгоритма множественного доступа к  $i$ -й БС и дисциплины обслуживания определяется вероятность своевременного предоставления каналов  $P_{ki}$  в зоне покрытия данной БС. Представлены математические модели процесса обслуживания ПА в зоне покрытия отдельных БС при типовых алгоритмах множественного доступа и дисциплинах обслуживания в транкинговых сетях подвижной связи. Приведена также методика учета алгоритмов случайного многостанционного доступа к каналам управления БС, необходимая для более точного определения конфигурации зон обслуживания по цифровой карте местности (ЦКМ).

По аналогии с матрицей покрытия  $i$ -й БС  $\{P_{ixy}\}$ , единичные значения элементов которой соответствуют выполнению неравенства  $P_{cixy} \geq P_c^*$ , после вычисления величины  $P_{ki}$  формируется матрица обслуживания  $i$ -й БС  $\{O_{ixy}\}$ , единичные значения элементов которой соответствуют дополнительному выполнению неравенства  $P_{ki} \geq P_k^*$ :

$$O_{ixy} = \begin{cases} 1, & (Y_{xy} = 1) \cap (P_{\text{сиг } m_{ixy}} \geq P_{\text{сиг } m}^*) \cap (P_{ki} \geq P_k^*); \\ 0, & (Y_{xy} = 0) \cup (P_{\text{сиг } m_{ixy}} < P_{\text{сиг } m}^*) \cup (P_{ki} < P_k^*). \end{cases} \quad (11)$$

После завершения анализа качества обслуживания в зонах покрытия всех БС вычисляется коэффициент обслуживания  $K_{\text{обс}}$  на всей территории размещения ПО:

$$K_{обс} = \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \rho_{xy} \left( 1 - \prod_{i=1}^{n_{БС}} (1 - O_{ixy}) \right). \quad (12)$$

В выражении (12) учитывается возможное перекрытие зон покрытия и, соответственно, зон обслуживания путем подсчета удельных нагрузок во всех клетках, которые входят хотя бы в одну зону обслуживания.

Анализ последовательности решаемых задач при планировании сетей подвижной радиосвязи с использованием геоинформационных технологий (ГИТ) позволил разделить их на три (совместно влияющих на итоговое время расчетов) вложенных уровня, отличающихся классами используемых алгоритмов принятия решения:

1. Верхний уровень: определение состава и пределов управляемых (варьируемых) параметров, а также уточнение цели расчетов и состава задач.
2. Средний уровень: выбор и реализация правила (последовательности) перебора варьируемых параметров и учитываемых внешних факторов.
3. Нижний уровень: вычисление частных показателей качества функционирования радиоэлектронных средств (РЭС) при выборе очередных перебираемых параметров.

В качестве еще одного метода оптимизации промежуточных вычислений предложен метод использования дополнительных исходных данных, например, о различной важности (приоритетности) различных ПА в транкинговых СПС СН, который позволяет, с одной стороны, уменьшить количество ресурсов, необходимых для развертывания неоднородных сетей при выполнении всех заданных требований, а с другой стороны, увеличить степень выполнения заданных требований при неизменном количестве ресурсов.

На основе методов оптимизации промежуточных вычислений возможны четыре упорядоченных в использовании алгоритма оптимизированного выбора мест размещения БС, отличающихся различным соотношением объемов учитываемых дополнительных исходных данных и избыточностью получаемых оценок минимально необходимой величины ресурсов: алгоритм регулярной расстановки БС и частот с размерами сот, соответствующими размеру минимальной зоны гарантированного обслуживания; алгоритм регулярной расстановки БС с нерегулярным распределением частотных каналов, учитывающим различия нагрузки в сотах, размером, соответствующим размеру минимальной зоны энергетического покрытия; алгоритм последовательной расстановки БС и частот с плотной укладкой по нагрузке; алгоритм последовательной расстановки БС и частот с плотной укладкой по нагрузке и по покрытию.

Все разработанные алгоритмы обеспечивают вычисление сочетания варьируемых параметров, гарантирующего выполнение требований по качеству связи и по покрытию, но при разном минимально необходимом количестве БС и частот, убывающем в порядке возрастания номера используемого алгоритма и, соответственно, длительности расчетов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы подвижной транкинговой связи стандарта TETRA / Абатуров П.С. [и др.]. – СПб. : Судостроение, 2004. – С. 65–70.
2. Максимов В.И., Комашинский А.В. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации. Основы моделирования. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 173 с.
3. Овчинников А.М. Сравнительный анализ стандартов цифровой транкинговой связи // Специальная техника. – 2000. – № 2.
4. Овчинников А.М., Воробьев С.В. Стандарт TETRA и APCO 25: оценка зон обслуживания. Компания Sagatelecom, 2004.