

УДК 621.396

К.А. Смирнов

К ВОПРОСУ ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Смирнов Константин Алексеевич, окончил факультет радиосвязи Военного университета связи. Ведущий научный сотрудник ОАО «НИИ «Рубин», г. Санкт-Петербург. Имеет статьи в области управления сетями подвижной радиосвязи специального назначения. [e-mail: smirnov@rubin-spb.ru].

Аннотация

Планирование сетей подвижной связи специального назначения (СПС СН) включает этапы частотно-территориального планирования (ЧТП) и расчет емкости сети транкинговой связи, влияющий на качество обслуживания абонентов в сети связи.

ЧТП СПС СН предусматривает выбор структуры (конфигурации) сети, места стоянки подвижных базовых станций (БС), выбор типа, высоты и ориентации антенн, распределение частот между БС.

При расчете емкости сети учитываются предполагаемое количество подвижных абонентов, необходимое количество приемопередатчиков на БС и требуемая своевременность предоставления услуг с необходимым качеством.

Анализ и синтез структуры СПС СН являются достаточно сложными задачами, при решении которых часто используется метод декомпозиции. Составными частями синтеза являются задача расчета зоны покрытия сетей подвижной связи и задача расчета зон обслуживания. Решая эти задачи, можно получить предполагаемые области предоставления услуг подвижным абонентам с заданным качеством. После решения задачи синтеза необходимо провести анализ проекта сети, используя более точные модели расчета распространения радиоволн, и при наличии возможностей провести инструментальные измерения в предполагаемом районе развертывания сети подвижной радиосвязи. Следующим этапом является внесение изменений в первичный вариант синтеза сети. На этапах и синтеза, и анализа необходимо использовать методы оптимизации. При рассмотрении сетей подвижной связи можно учитывать четыре глобальных объекта оптимизации: собственно сеть подвижной связи – затраты на развертывание и эксплуатацию, радиоканал – пути прохождения радиоволн от БС к абоненту и обратно, доступность услуг – возможность получения определенного набора сетевых услуг в любом месте нахождения абонента в пределах обозначенной территории, качество предоставления услуг – возможность получения заявленных услуг с должным качеством в любом месте обозначенной территории.

Ключевые слова: сети подвижной радиосвязи, частотно-территориальное планирование, базовые станции.

ABOUT THE FREQUENCY-TERRITORIAL PLANNING OF THE SPECIAL PURPOSE TRUNKED RADIO

Konstantin Alekseevich Smirnov, graduated from the Faculty of Radio Communications at Military Communications University; a leading research officer of the 'NII 'Rubin' JSC of Saint-Petersburg; an author of articles in the field of control of special-purpose radio nets. e-mail: smirnov@rubin-spb.ru.

Abstract

A special purpose mobile communication networks planning includes stages of frequency and territorial planning and calculation of trunking radio communication network capacity, influencing on subscribers service quality in communication networks.

Frequency-territorial planning of a special purpose mobile communication networks provides a choice: a network structure (configuration), a parking lot of mobile base stations, a type, height and orientation of aerials, distribution of frequencies between base stations.

At calculation a network capacity, the estimated number of the mobile subscribers, necessary number of transceivers on base stations and demanded timeliness of service with the necessary quality is considered.

The analysis and synthesis of a special purpose mobile communication networks structure are rather complex problems. The decomposition method is often used when solving such problems. Components of synthesis are problems of calculation of a mobile communication networks cover zone and a problem of calculation of service zones. When solving these problems, mobile subscribers can receive estimated areas of service with the set quality. After the solution of a synthesis problem, it

is necessary to carry out the analysis of the network project, using more exact calculation models for distribution of radio waves, and, if possible, to carry out tool measurements in the mobile radio communication network expansion area. The following stage is modification of network synthesis primary option. At stages of synthesis and analysis, it is necessary to use optimization methods. Considering mobile communication networks, you need to take into account four global optimization object: a mobile communication network – costs of expansion and operation, a radio channel - radio waves passing from a base station to a subscriber and backwards, availability of services – a possibility to get a set of network services at any subscriber's location within the designated territory, quality of service – a possibility to get the declared services with the due quality in any place of the designated territory.

Key words: frequency-territorial planning, trunked radio, base stations.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы управления характеризуются, прежде всего, тем, что отличительной чертой процесса управления является его информационная сущность. Для каждого уровня управления характерно взаимодействие как 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. Решение задач планирования и эксплуатации сетей подвижной радиосвязи помогают решать системы автоматизированной поддержки принятия решения (АСППР) на базе геоинформационных систем (ГИС).

ОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТИ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

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 позволяют наиболее полно удовлетворить органы управления 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 [1–3].

На рисунке 1 показана обобщенная модель процесса функционирования сетей подвижной связи специального назначения (СПС СН) с учетом оптимизируемых внутренних и контролируемых внешних управляющих воздействий. На основе данной модели решаемая задача может быть формально представлена в виде совокупности двух вложенных задач оптимизации следующим образом:

$$m^* = \arg \min \mathcal{S}_\pi(m) / A^*(m) = \\ = \arg \min \mathcal{S}_c(A(m)) / Q(A(m), U) \in Q_{\text{тр}}. \quad (1)$$

Другими словами, необходимо разработать методику m^* , позволяющую при минимальных затратах на планирование \mathcal{S}_π разработать проект сети A^* , на развертывание и дальнейшее функционирование которой потребуются минимальные затраты \mathcal{S}_c , и при этом сеть сможет

выполнить требования к качеству связи $Q \in Q_{\text{тр}}$ в заданных условиях U [4].

Постановка задачи (1) является декомпозицией более общей задачи минимизации суммарных затрат на процесс планирования \mathcal{S}_π и развертывание сети \mathcal{S}_c . Различная структура данных затрат затрудняет строгое решение совместной оптимизационной задачи по критерию минимума $\mathcal{S}_\pi + \mathcal{S}_c$. В данном случае предполагается, что методика m^* должна включать упорядоченный набор алгоритмов $\{m_i\}$ с различным соотношением минимальных затрат $\mathcal{S}_c(\mathcal{S}_\pi(m_i))$, 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^* [5–6].

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

$$\mathcal{S}_c \approx \mathcal{S}_{\text{БС сум}} = \\ = \sum_{i=1}^{n_{\text{БС}}} (\mathcal{S}_{\text{ПП}}(B_i) n_{fi} + \mathcal{S}_k n_{fi} n_{ti} + \mathcal{S}_a(H_i, G_i)) + \mathcal{S}_f n_f, \quad (2)$$

где $\mathcal{S}_{\text{ПП}}(B_i)$ – 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;

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

\mathcal{S}_f – стоимость одного частотного канала;

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

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

$$S_c = n_{\text{БС}} (S_{\text{кПШ}} n_k + S_a) + n_k K_f S_f, \quad (3)$$

где $S_{\text{кПШ}}$ – 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 $n_{\text{БС}}$, количества частотных каналов на каждой станции n_k и размерности частного кластера K_f . Указанным задачам соответствуют три типовые задачи, последовательно решаемые на трех этапах ЧТП, отличающихся целевой направленностью на выполнение различных составляющих требований пользователей ($Q_{\text{тр}}$):

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

2. Определение минимального количества каналов БС $n_{k'}^*$, обеспечивающих в зоне обслуживания БС площадью $S_{\text{БС}}$ (зависящей от результатов решения задачи 1) заданную вероятность P_k^* предоставления каналов связи в те-

чение времени, не превышающего допустимую величину $t_{\text{ож}}^*$ при заданном распределении нагрузки

$$\rho(x, y), \{x, y\} \in \{X^*, Y^*\}.$$

3. Определение распределения $F^* = \{F_i^*\}$, $i = 1, \dots, n_{\text{БС}}$, 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 $K_{\text{пок}}$, характеризующий часть $S_{\text{пок}}$ суммарной площади $S_{\text{сум}}$ возможных мест размещения подвижных абонентов (ПА) $\{X^*, Y^*\}$, на которой выполняются требования к качеству связи $P_c \geq P_c^*$:

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

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

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

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

Основу методики прогнозирования зон покрытия составляют методы определения дальности связи в различных направлениях от БС, опирающиеся на модель радио-

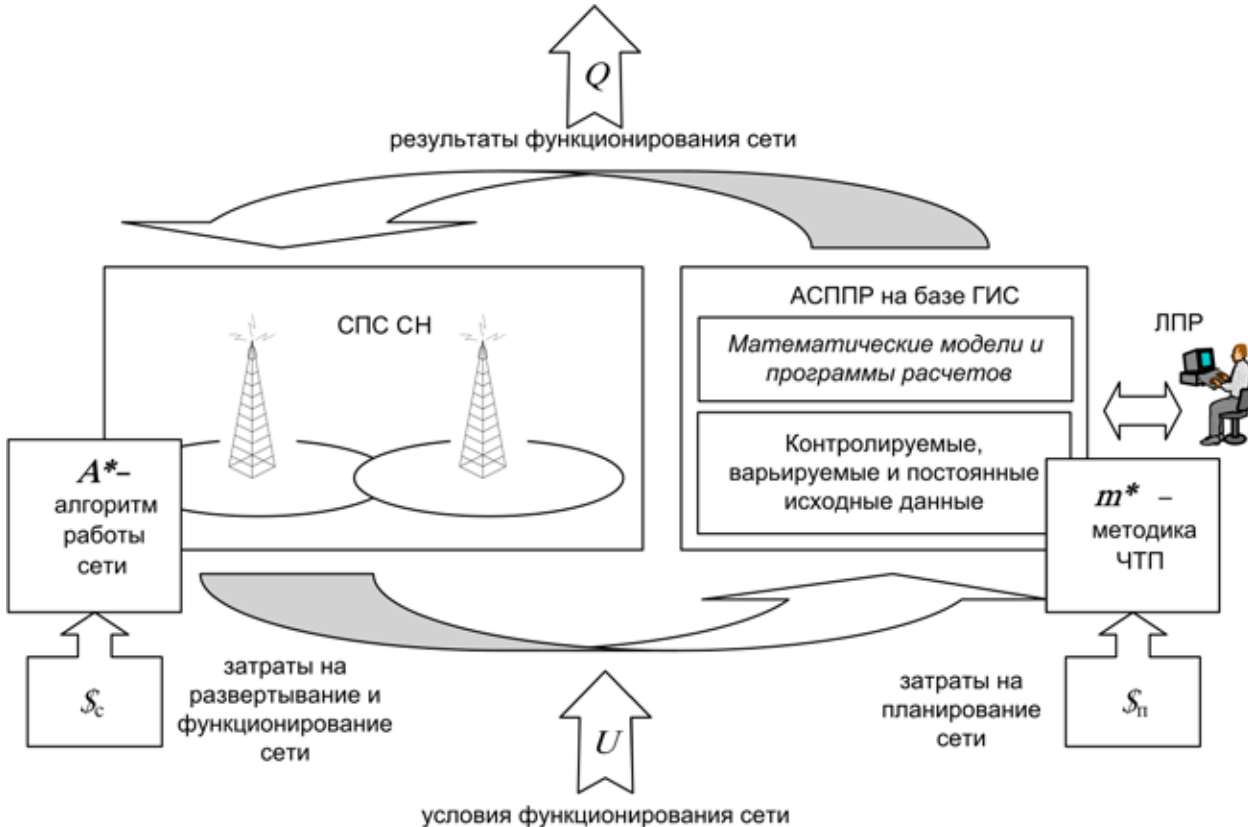


Рис. 1. Обобщенная модель процесса функционирования СПС СН

канала между БС и мобильным абонентом, основу которой составляют два типовых уравнения передачи. Итогом решения обоих уравнений является проверка выполнения требований к надежности связи $P_c \geq P_c^*$ [4].

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

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

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

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

После этого вычисляется коэффициент покрытия:

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

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 $\rho(x, y), \{x, y\} \in \{X^*, Y^*\}$, будет иметь вид матрицы значений удельной нагрузки $\{\rho_{xy}\}$, приходящейся на каждую конкретную 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 ρ_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 [7].

По аналогии с матрицей покрытия i -й БС $\{P_{ixy}\}$, единичные значения элементов которой соответствуют выполнению неравенства $P_{\text{сиг } m_{ixy}} \geq P_{\text{сиг } m}^*$, 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 ПА:

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

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 ГИС позволил разделить их на три (совместно влияющих на итоговое время расчетов) вложенных уровня, отличающиеся классами используемых алгоритмов принятия решения.

Верхний уровень: определение состава и пределов управляемых (варьируемых) параметров, а также уточнение цели расчетов и состава задач.

Средний уровень: выбор и реализация правила (последовательности) перебора варьируемых параметров и учитываемых внешних факторов.

Нижний уровень: вычисление частных показателей качества функционирования радиоэлектронных средств 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 СПС СН 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, отличающиеся 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена обобщенная модель процесса функционирования сети подвижной радиосвязи, учитывающая затраты на планирование, развертывание и дальнейшую эксплуатацию сети, требования к качеству связи в заданных условиях функционирования, которыми могут являться не только физико-географические особенности предполагаемого района развертывания, но и требования к разведзащищенности сети. Введены обобщенные показатели качества проектируемой сети, которыми являются коэффициенты покрытия и обслуживания на заданной территории.

Разработанные алгоритмы возможно использовать при построении автоматизированной системы планирования сети подвижной радиосвязи специального назначения. Особенностью разработанных алгоритмов и предлагаемого подхода к оптимизации промежуточных вычислений является возможность их использования в ГИС как составной части автоматизированной системы планирования сети подвижной радиосвязи.

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 / П.С. Абатуров [и др.]. – СПб. : Судостроение, 2004. – С. 65–70.
2. Широкополосные беспроводные сети / В.М. Вишневецкий [и др.]. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.

3. Овчинников А.М., Воробьев С.В., Сергеев С.И. Открытые стандарты цифровой транкинговой радиосвязи. – М. : Связь и бизнес, 2000. – 166 с.

4. Максимов В.И., Комашинский А.В. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации. Основы моделирования. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 173 с.

5. Овчинников А.М. Сравнительный анализ стандартов цифровой транкинговой связи // Специальная техника. – 2000. – № 2. – С. 63–68.

6. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления. – М. : Эко трендз, 2003. – 288 с.

7. Тот Л.Ф. Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве. – М. : Физматлит, 1958.

REFERENCES

1. Abaturov P.S. and Others. *Sistemy podvizhnoy trunkingovoy svyazi standarta TETRA* [Mobile Trunking Communication Systems of TETRA Standard]. Sankt-Peterburg, Sudostroeniye Publ., 2004. pp. 65–70.

2. Vishnevskiy V.M. and Others. *Shirokopolosnye besprovodnye seti* [Broadband Wireless Networks]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 592 p.

3. Ovchinnikov A.M., Vorobyev S.V., Sergeev S.I. *Otkrytye standarty tsifrovoy trunkingovoy radiosvyazi* [Open Standards of Digital Trunking Radio Communication]. Moscow, Svyaz i biznes Publ., 2000. 166 p.

4. Maksimov V.I., Komashinskiy A.V. *Sistemy podvizhnoy radiosvyazi s paketnoy peredachey informatsii. Osnovy modelirovaniya* [Mobile Batch Communication Systems. Modeling Principles]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom Publ., 2007. 173 p.

5. Ovchinnikov A.M. *Sravnitelny analiz standartov tsifrovoy trunkingovoy svyazi* [Comparative Analysis of Digital Trunking Communication Standards]. *Spetsialnaya tekhnika* [Special-Purpose Machinery Journal], 2000, no. 2, pp. 63–68.

6. Grebeshkov A.Yu. *Standarty i tekhnologii upravleniya* [Control Standards and Technologies]. Moscow, Eko Trends Publ., 2003. 288 p.

7. Tot L.F. *Raspolozheniya na ploskosti, na sfere i v prostranstve* [Locations in a Plane, on a Sphere, and in Space]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1958.