

На правах рукописи



Новиков Николай Валентинович

**ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

Специальность: 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и промышленности)» по техническим наукам

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород 2013

Работа выполнена на кафедре «Электроника и сети ЭВМ» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
Милов Владимир Ростиславович

Официальные оппоненты: Крылов Владимир Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
ООО «Мера Лабс»,
директор по технологиям

Вдовин Леонид Михайлович,
кандидат технических наук,
ОАО «НПП «Полет»,
заместитель начальника
научно-исследовательского центра,
начальник отдела

Ведущая организация: Самарский филиал «Самарское отделение
научно-исследовательского института
радио» (Филиал ФГУП НИИР-СОНИИР),
г. Самара

Защита диссертации состоится «18» апреля 2013 г. в «15» часов в ауд. 1258 на заседании диссертационного совета Д 212.165.05 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Автореферат разослан «18» марта 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.165.05
к.т.н., доцент

 Суркова А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Постоянно возрастающие требования пользователей технологической сети связи к качеству обслуживания, надежности радиосвязи, объему передаваемой информации, времени доставки информации определяют целесообразность применения современных систем подвижной радиосвязи цифровых стандартов. Без развития аналитического аппарата для проведения системно-сетевых расчетов, включающих расчеты зон обслуживания базовых станций (БС), надежности сети, количества соединительных линий, количества обслуживаемых абонентов с заданными показателями качества, невозможно обосновать правильность принимаемых технико-экономических решений при проектировании технологической сети подвижной радиосвязи.

Основные теоретические положения по распространению радиоволн от подвижных объектов к стационарным, влияние характеристик среды распространения сигнала на качество подвижной связи, включая потери при распространении, приведены в работах Nata M., Okumura Y., Ohmori E., Walfich J., Ikegami F., Yoshida S., Takeuchi T., Williaam C.Y.Lee, Калинина А.И., Черенкова Е.Л. Основные методические подходы к расчетам зон радиопокрытия базовых станций сетей подвижной радиосвязи приведены в работах Крупнова А.Е., Бабкова В.Ю., Вознюка М.А., Михайлова П.А., Кирюшина Г.В., Маслова О.Н., Шаталова В.Г., Тамаркина В.М., Громова В.Б., Сергеева С.И., Мордачева В.И., Козел В.М., Ковалева К.А., Безлюдникова О.Л., Дервянко С.А., С.В.Севостьянова, Тарасенко А.Г., Томина А.М.

Системно-сетевые расчеты, проводимые при проектировании технологической сети подвижной радиосвязи (ТСПР), основываются на оценке качества прогнозируемых (рассчитываемых) зон радиопокрытия БС. Расчет зон радиопокрытия БС ТСПР выполняется с использованием международных рекомендаций МСЭ (ITU-R).

Существующие методики и рекомендации МСЭ (ITU-R) носят обобщающий характер и не содержат весь математический аппарат, необходимый для системно-сетевых расчетов, а также не учитывают специфические особенности технологической сети подвижной радиосвязи и особенности оборудования, предназначенного для организации технологической радиосвязи. Нормы планирования сетей подвижной радиосвязи различного назначения и методика расчетов зон обслуживания БС для статистической модели распространения радиоволн приведены в «Методике частотно-территориального планирования сетей подвижной и стационарной радиосвязи метрового и дециметрового диапазонов» Государственной инспекции электросвязи. Появилась возможность проведения расчетов с использованием точной пространственной модели рельефа

местности, основанной на спутниковой съемке Земли. Международные рекомендации МСЭ (ITU-R) постоянно уточняются в виде новых версий. Появляются новые методические подходы к расчетам зон радиопокрытия БС. Однако методики, по которым выполняются расчеты зон радиопокрытия, носят рекомендательный характер.

Ограничения, накладываемые со стороны ТСПР на выбор мест размещения площадок БС, связанные с уменьшением стоимости строительства подъездных дорог, подводящих линий электропередач и коммуникаций, а также уменьшение высот антенных опор и минимизация землеотвода приводят к необходимости разработки соответствующих методов и алгоритмов проведения системно-сетевых расчетов, позволяющих обосновать правильность принимаемых проектных решений.

Важность этой задачи объясняется наблюдающейся тенденцией ужесточения требований к качеству проектной документации со стороны «Заказчика», эксплуатирующих организаций, организаций, выполняющих экспертизу проектов, и организаций, осуществляющих контроль над работой радиочастотных средств. Перед проектировщиками появляются новые задачи по применению данных решений при выполнении расчетов.

Рекомендательный характер существующих методик, их постоянное обновление, различного рода ограничения, ужесточение требований к качеству проектной документации требуют дальнейших исследований по созданию систем поддержки принятия решений и выбора рациональных решений при проектировании ТСПР.

Таким образом, тема диссертационного исследования, связанная с разработкой концепции, математического и алгоритмического обеспечения системно-сетевых расчетов, повышение их точности и автоматизация процесса выбора оптимальных решений по заданным критериям при проектировании ТСПР является актуальной.

Цель и задачи диссертационной работы

Цель работы заключается в обеспечении поддержки принятия рациональных решений при проектировании технологической сети подвижной радиосвязи (ТСПР) с учетом системы факторов за счет создания новой комплексной методики, математического, алгоритмического и программного обеспечения.

Указанная цель достигается решением следующих задач:

1. Сформировать показатель оценки качества радиопокрытия ТСПР, развертываемой вдоль протяженных технологических объектов, а также систему критериев и ограничений на системно-сетевые решения.
2. Разработать алгоритмы определения структуры и параметров ТСПР с учетом системы показателей и ограничений.
3. Разработать процедуру принятия системно-сетевых решений по построению ТСПР.

4. Разработать автоматизированный комплекс формирования системно-сетевых решений при проектировании ТСПР.

Методы исследования

Проведенные исследования основаны на методах и положениях статистической теории связи, теории и моделях распространения радиоволн, эмпирических методах оценки качества связи, сочетании системного и проектного подходов, методах математического моделирования.

Научная новизна исследования

1. Введен показатель обеспеченности связью, основанный на сопоставлении оцениваемой надежности связи и требуемых зон радиопокрытия, отличающийся от ранее использовавшихся возможностью учета специфических требований к качеству обслуживания в технологической сети подвижной радиосвязи.
2. Разработан новый алгоритм структурно-параметрического синтеза ТСПР, позволяющий находить подмножество эффективных альтернатив, при наличии системы критериев и ограничений на системно-сетевые решения.
3. Разработана автоматизированная процедура принятия системно-сетевых решений, отличающаяся способом определения рациональной альтернативы посредством дополнительной оптимизации параметров для множества отобранных структур ТСПР.

Практическая значимость работы

Применение разработанных комплексной методики, алгоритмического и программного обеспечения позволяет значительно сократить время по принятию технических решений при выборе мест размещения площадок и определении основных характеристик БС подвижной радиосвязи, повысить точность выполняемых системно-сетевых расчетов, уменьшить капитальные затраты на строительство.

Результаты диссертационной работы нашли применение в НИР, выполнявшихся в рамках программы предприятия по разработке нормативно-технической документации, а также в практике проектирования ТСПР. По результатам НИР разработаны нормативные документы по проектированию ТСПР.

Апробация работы

Результаты исследования обсуждались на научно-технических совещаниях и были представлены на 12 научно-технических конференциях, конкурсах, и семинарах, из них 6 на международных конференциях.

Общий подход к методологии и научной направленности согласован с ведущей научной организацией Самарский филиал «Самарское отделение научно-исследовательского института радио» (Филиал ФГУП НИИР-СОНИИР).

Основные положения диссертации опубликованы в периодических изданиях.

Разработанное программное обеспечение выносилось на конкурсы ОАО «Газпром».

Основные положения работы выносились на заседания Управления технологической связи ОАО «Газпром», что отражено в соответствующих протоколах.

На разработанное программное обеспечение «Программа расчета зон обслуживания базовых станций сети подвижной профессиональной радиосвязи» получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611549.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту

1. Разработанный показатель обеспеченности связью позволяет оценить качество радиопокрытия ТСПР при непосредственном учете рельефа местности и существующих ограничений, определяемых инфраструктурой технологических объектов.
2. Разработанный алгоритм структурно-параметрического синтеза ТСПР позволяет находить подмножество эффективных решений при учете сформированной системы критериев и ограничений.
3. Разработанная процедура принятия системно-сетевых решений обеспечивает выбор рационального варианта по построению ТСПР посредством дополнительной оптимизации параметров для множества отобранных структур ТСПР.
4. Разработанный комплекс формирования системно-сетевых решений позволяет автоматизировать определение мест расположения базовых станций и их параметров при проектировании ТСПР.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 25 научных работ, из них 8 статей в рецензируемых журналах, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, и 12 докладов на Всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, содержащего 103 наименования и 3 приложения. Содержание работы изложено на 110 страницах. В работе представлено 16 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, продемонстрированы научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен обзор основных положений проектирования ТСПР.

Концептуальные вопросы системно-сетевого планирования отражены в нормативных документах, в решениях Государственной комиссии электросвязи (ГКЭС) и в работах Государственного специализированного проектного института (ГСПИ).

В работе определены и систематизированы основные принципы системно-сетевого планирования ТСПР, включающие выбор структурных решений, определение параметров и конфигурации оборудования.

Показана актуальность разработки математического и алгоритмического аппарата для проведения расчетов системно-сетевых показателей, позволяющего учесть влияние множества факторов, которые определяют качество работы ТСПР.

Поскольку существующие методические подходы носят достаточно обобщенный характер и не учитывают всех требований и ограничений, ставится задача разработки комплексной методики, математического, алгоритмического и программного обеспечения для поддержки принятия рациональных технико-экономических решений при проектировании ТСПР.

Традиционно места размещения БС аналоговой УКВ радиосвязи при проектировании определялись на основе расчетов средних радиусов обслуживания. Площадки БС вдоль трасс линейных технологических объектов выбирались на преобладающих возвышенностях. Оборудование БС имело дистанционное питание, организованное на медных кабельных линиях связи, из-за чего к площадкам не требовалось подводить линии электропередач. По возможности оборудование БС совмещалось с оборудованием радиорелейных линий связи.

В настоящее время требования к выбору площадок БС значительно изменились. Медные кабельные и радиорелейные линии на технологической сети связи заменяются на волоконно-оптические линии передачи. Для организации подвижной радиосвязи на смену аналоговым системам пришли системы цифровых стандартов. Строительство самостоятельных площадок становится затратным из-за необходимости землеотвода, проектирования подъездных путей, линий электропередач, протягивания технологического волоконно-оптического кабеля. Поэтому актуальным стал вопрос обоснования принимаемых проектных решений по месту размещения БС, который невозможно решить с использованием ранее применявшихся при проектировании методик и алгоритмов.

Отмечена необходимость автоматизации процесса расчетов зон радиопокрытия БС ТСПР, повышения точности выполняемых расчетов, совершенствования и автоматизации процесса выбора системно-сетевых решений по заданным критериям на основе создаваемого математического, алгоритмического и программного обеспечения.

Вторая глава посвящена способу системно- сетевого планирования и поддержки принятия решений при определении архитектуры технологической сети подвижной радиосвязи.

На типовом участке линейного технологического объекта (рис. 1) БС могут располагаться на технологических площадках (ТП). Вдоль линейного технологического объекта имеется проезд, а к каждой технологической площадке подведена линия электропередач, волоконно-оптическая линия связи, установлен блок-контейнер для размещения оборудования. Вынос антенных опор (АО) и оборудования БС за пределы ТП приводит к значительному возрастанию стоимости технического (проектного) решения.

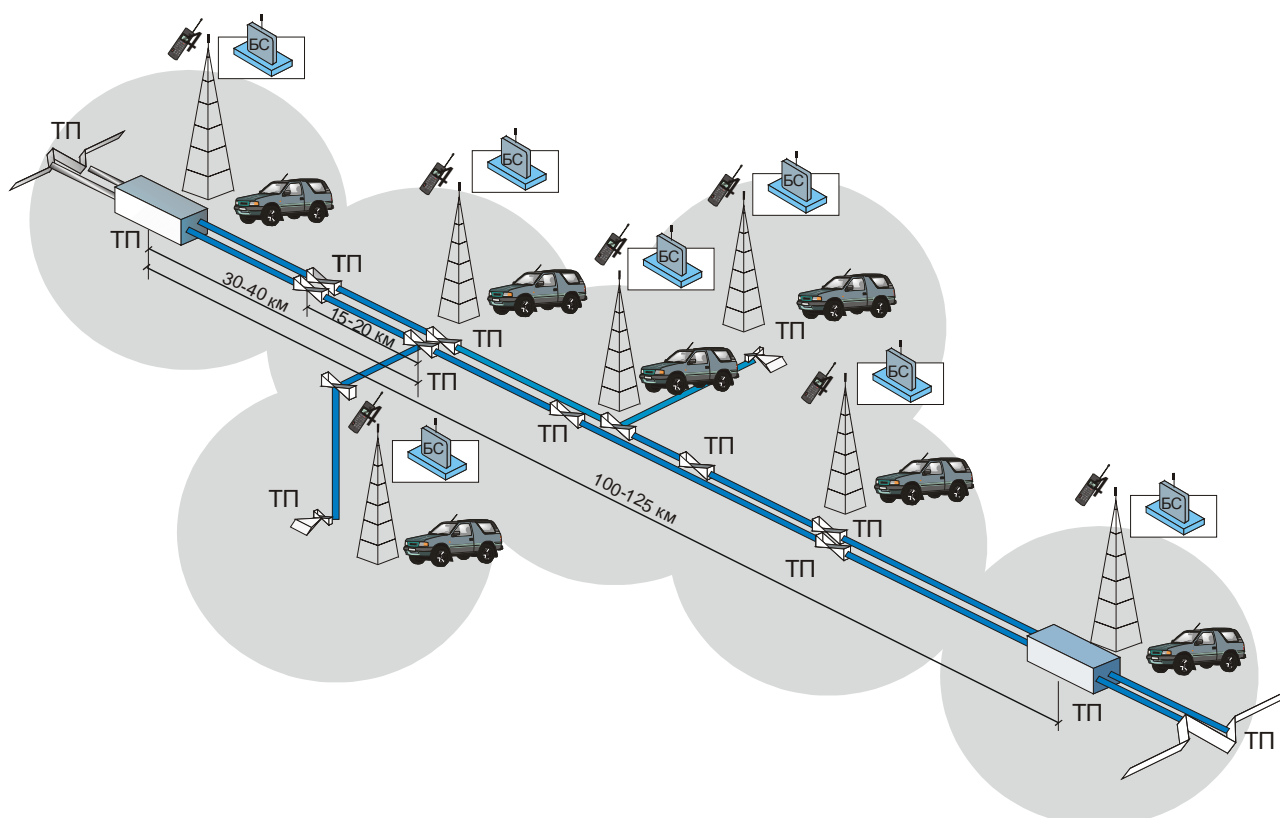


Рис. 1. Типовой участок линейного технологического объекта

Проектирование ТСПР связано с выбором количества $N_{\text{БС}}$ и мест расположения БС, что определяет структуру s сети, а также с определением вектора параметров $\theta_s = [\theta_1^T, \dots, \theta_n^T, \dots, \theta_{N_s}^T]^T$, где $\theta_n = [\vartheta_{n,1}, \dots, \vartheta_{n,q}]^T$ – вектор параметров n -й БС.

Для описания структуры ТСПР применен двоичный вектор s , размерность которого соответствует количеству технологических площадок $N_{\text{ТП}}$. Если на j -й площадке размещается БС, то $s_j = 1$, а если j -я площадка не задействуется, то $s_j = 0$. При этом количество БС в ТСПР со структурой s соответствует весу Хемминга $N_{\text{БС}} = W_H(s)$.

Определение структуры и параметров ТСПР осуществляется из решения задачи двухкритериальной оптимизации:

$$\begin{aligned} R(s, \theta_s) &\rightarrow \max, \\ \Delta C(s, \theta_s) &\rightarrow \max \end{aligned} \quad (1)$$

при наличии ограничений на значения параметров в виде двусторонних неравенств, определяющих допустимые значения параметров

$$\tilde{\vartheta}_{i j} \leq \vartheta_{n, j} \leq \tilde{\vartheta}_{\hat{a} j}, \quad n = \overline{1, N_{\text{БС}}}, \quad j = \overline{1, q}, \quad (2)$$

а также ограничений, связанных с инфраструктурой ТСПР:

$$g_n(s, \theta_s) > 0, \quad n = \overline{1, N_{\text{БС}}}. \quad (3)$$

В задаче (1) частные целевые функции $R(s, \theta_s)$ и $\Delta C(s, \theta_s)$ характеризуют качество радиопокрытия и выигрыш (экономия) по стоимости системно-сетевого решения при развертывании ТСПР.

Задача структурно-параметрического синтеза может быть представлена в виде двух вложенных задач. Внешней задачей является выбор структуры ТСПР. Для решения задачи структурной оптимизации обоснована возможность применения алгоритмов полного перебора, добавления, удаления, добавления и удаления БС, различающихся по вычислительной сложности и качеству формируемого решения.

На первом этапе находится множество Парето-оптимальных структур ТСПР (рис. 2). Так, при фиксированных типовых параметрах стоимость ТСПР пропорциональна количеству БС. Снижение вычислительной сложности задачи проектирования ТСПР может быть достигнуто за счет формирования подмножества эффективных решений, в которое не включаются альтернативы, характеризующиеся недопустимо низким значением качества радиопокрытия, т.е. для которых $R(s, \theta_s) < R_{\text{доп}}$.

На втором этапе выполняется процедура параметрической оптимизации с целью улучшение найденных эффективных решений

$$\hat{\theta}_{\tilde{\gamma}} = \arg \max_{\theta_{\tilde{\gamma}}} \Delta C(s, \theta_{\tilde{\gamma}})$$

при условии ограничения равенства на требуемое качество связи $R(s, \theta_s) = 1$.

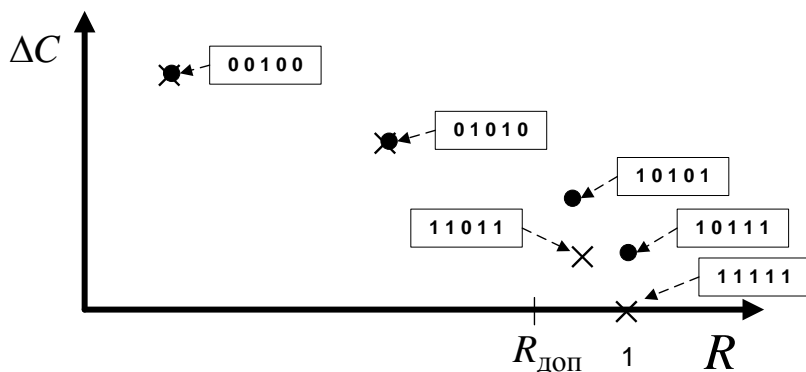


Рис. 2. Примеры структур ТСПР в пространстве критериев

В третьей главе приведен способ определения характеристик системно-сетевых решений ТСПР.

Так, в стоимость n -й БС, размещаемой на технологической площадке, входит стоимость оборудования БС, АО, антенно-фидерного тракта (АФТ):

$$C_{ТПn} = C_{БСn} + C_{АОn} + C_{АФТn}.$$

В случае размещения БС на удаленной площадке в ее стоимость, наряду с оборудованием БС, АО, АФТ, входит оборудование передачи данных по ВОЛС, землеотвод, подъездная дорога, подводная линия электропередач, подводный волоконно-оптический кабель, ограждение и организация периметра, включая видеонаблюдение. При этом чем удаленнее площадка, тем значительнее удорожание:

$$C_{УПn} = C_{БСn} + C_{АОn} + C_{АФТn} + L_n \alpha K_n + C_{допn},$$

где L_n – расстояние, на которое выносятся БС от ТП;

α – погонная стоимость, проектируемых коммуникаций и инфраструктуры;

K – коэффициент удорожания, зависящий от характеристик местности (например, равнинная, горная);

$C_{допn}$ – дополнительные затраты, зависящие от организационных аспектов.

Результирующая стоимость типового участка ТСПР определяется суммой затрат на все БС:

$$C(s, \theta_s) = \sum_{n=1}^{N_{БС}} C_n(s, \theta_n).$$

Выигрыш по стоимости $\Delta C(s, \theta_s) = C_{ПР} - C(s, \theta_s)$ определяется с учетом доступного финансирования $C_{ПР}$.

Определение качества радиопокрытия $R(s, \theta_s)$ основано на определении зон радиопокрытия и связано с надежностью связи, которая определяется согласно рекомендациям МСЭ (ITU-R) как вероятность, с которой связь будет доступна с заданными параметрами качества обслуживания.

Область земной поверхности, для которой рассчитанная надежность связи превышает заданную величину P_R , образует зону радиопокрытия базовой станции для каждого из направлений связи (БС – АС «линия вниз»; АС – БС «линия вверх»):

$$\Omega_{ni}(\theta_n) = \arg\left\{P_{ni}(x, y; \theta_n) \geq P_R\right\}, \quad n = \overline{1, N}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

В качестве результирующих зон радиопокрытия принимаются области, в пределах которых обеспечивается требуемое качество связи для обоих направлений. Таким образом, результирующая зона радиопокрытия n -й БС представляет собой пересечение зон, определенных для «линии вниз» и для «линии вверх» $\Omega_n(\theta_n) = \Omega_{n1}(\theta_n) \cap \Omega_{n2}(\theta_n)$.

Зона радиопокрытия сети подвижной радиосвязи (рис. 3) находится как объединение зон радиопокрытия отдельных БС:

$$\Omega(\theta_s) = \bigcup_{n=1}^{N_{\text{БС}}} \Omega_n(\theta_n) = \bigcup_{n=1}^{N_{\text{БС}}} (\Omega_{n1}(\theta_n) \cap \Omega_{n2}(\theta_n)). \quad (5)$$

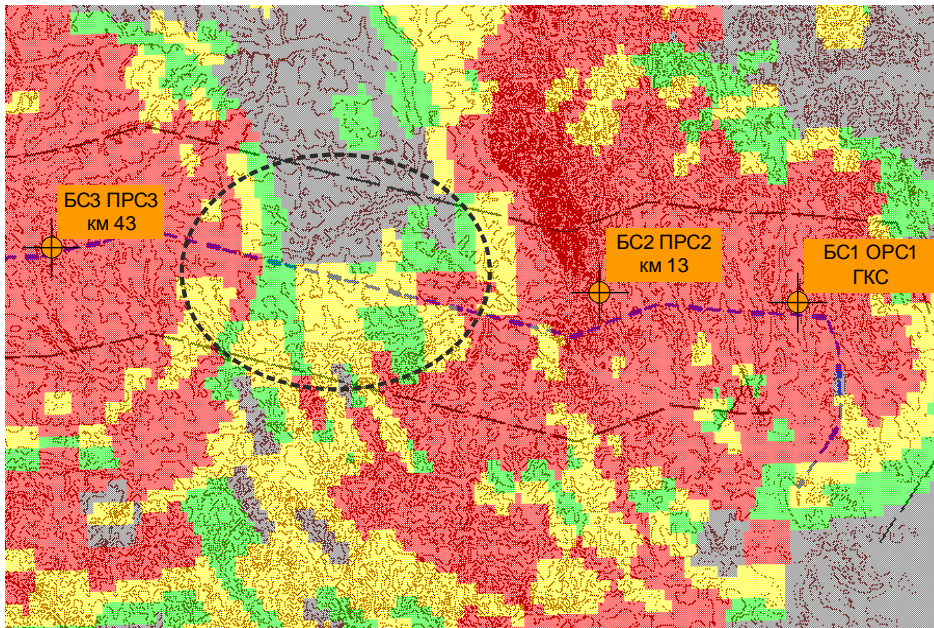


Рис. 3. Зоны радиопокрытия фрагмента сети

При проектировании ТСПР требования по обеспечению надежности связи предъявляются в заданной области земной поверхности Ω_R . За пределами Ω_R надежность связи обычно не регламентируется. При этом критерием качества радиопокрытия может служить площадь $S\{\bullet\}$ области $\Omega_R \setminus \Omega(\theta_s)$, на которой должно, но не обеспечивается требуемое качество связи. Однако такой интегральный критерий:

$$J_S(\theta_s) = S\{\Omega_R \setminus \Omega(\theta_s)\} \quad (6)$$

не позволяет учесть различия в значимости требований по обеспечению качества связи в пределах заданной области Ω_R . Для преодоления указанного недостатка предлагается следующий функционал качества радиопокрытия:

$$J(\boldsymbol{\theta}_s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\varepsilon(x, y; \boldsymbol{\theta}_s)) \psi(x, y) dx dy. \quad (7)$$

Здесь $\psi(x, y)$ – весовая функция, такая, что $\psi(x, y) = 0 \forall (x, y) \notin \Omega_R$; $\rho(\varepsilon)$ – функция потерь; $\varepsilon(x, y; \boldsymbol{\theta}_N)$ – невязка, определяемая выражением

$$\varepsilon(x, y; \boldsymbol{\theta}_s) = P_R - P(x, y; \boldsymbol{\theta}_s), \quad (8)$$

где $P(x, y; \boldsymbol{\theta}_s)$ – функция надежности связи ТСПР, определяемая в виде

$$P(x, y; \boldsymbol{\theta}_s) = \max_{n=1, N_{\text{БС}}} P_n(x, y; \boldsymbol{\theta}_n). \quad (9)$$

Функции надежности связи БС

$$P_n(x, y; \boldsymbol{\theta}_n) = \min_{i=1, 2} P_{ni}(x, y; \boldsymbol{\theta}_n), \quad n = \overline{1, N_{\text{БС}}} \quad (10)$$

находятся на основе функций надежности связи $P_{ni}(x, y; \boldsymbol{\theta}_n)$, $i = 1, 2$ для линий «вниз» и «вверх» соответственно.

Весовая функция $\psi(x, y)$ определяет значимость местоположения АС при расчете интегрального показателя радиопокрытия. При проектировании ТСПР область Ω_R часто задается как «полоса» относительно линии, соответствующей, например, трассе газопровода. При этом $\psi(x, y)$ может монотонно убывать по мере приближения к границам области и удаления от опорной линии. Если в некоторой подобласти $\Omega_o \subset \Omega_R$ предъявляются повышенные требования к качеству связи, то значения функции $\psi(x, y)$ при $(x, y) \in \Omega_o$ могут быть приняты сколь угодно большими. Так, могут быть выделены отдельные важные технологические объекты, на которых должно обеспечиваться гарантированное качество связи. Если требования по обеспечению качества связи одинаковы во всей области Ω_R , то принимается $\psi(x, y) = 1$.

Функция потерь $\rho(\varepsilon)$ определяет вклад невязки $\varepsilon \in [P_R - 1; P_R]$ при определении интегрального критерия качества радиопокрытия. В области, где прогнозируемая (расчетная) надежность связи не меньше, чем требуемая, невязка (8) принимает отрицательные значения $\varepsilon \leq 0$, а функция потерь $\rho(\varepsilon) = 0$. В области, где требуемая надежность связи не обеспечивается, $\varepsilon > 0$, а функция потерь принимает положительные значения и является неубывающей. Так, функция потерь при $\varepsilon > 0$ может быть линейной или квадратичной. При таком определении функций $\rho(\varepsilon)$ и $\psi(x, y)$ функционал $J(\boldsymbol{\theta}_s)$ является неотрица-

тельным и принимает нулевое значение в случаях, когда выполняются требования к качеству радиопокрытия. Ухудшение качества радиопокрытия сопровождается увеличением значений $J(\theta_s)$.

Функционал (7) представляет собой интегральную характеристику качества формируемого радиопокрытия и может интерпретироваться как суммарные потери, связанные с недостаточно надежной связью. Применение весовой функции $\psi(x, y)$ обеспечивает дополнительные возможности по оценке относительной значимости отдельных локальных областей.

При использовании весовой функции $\psi(x, y) = 1 \forall (x, y) \in \Omega_R$ и функции потерь $\rho(\varepsilon)$ в виде пороговой функции потерь, такой, что $H(\varepsilon) = 1$ при $\varepsilon > 0$ и $H(\varepsilon) = 0$ при $\varepsilon \leq 0$, функционал качества радиопокрытия (7) принимает вид

$$J(\theta_s) = \iint_{\Omega_R} H(P_R - P(x, y; \theta_s)) dx dy = S\{\Omega_R \setminus \Omega(\theta_s)\}. \quad (11)$$

Таким образом, в частном случае предложенный функционал качества радиопокрытия представляет собой площадь области, для которой должно, но не обеспечивается требуемое качество связи.

Для удобства интерпретации значений показателя и возможности сравнительного анализа качества радиопокрытия, обеспечиваемого на различных участках сети подвижной радиосвязи, предлагается применять нормированный показатель:

$$R = \frac{J_{\max} - J(\theta_s)}{J_{\max}}, \quad (12)$$

где J_{\max} – значение функционала (9) до развертывания сети подвижной радиосвязи:

$$J_{\max} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(P_R) \psi(x, y) dx dy. \quad (13)$$

Показатель $R \in [0; 1]$, характеризующий качество связи, предлагается рассматривать как обеспеченность связью. При этом стопроцентная обеспеченность связью имеет место, когда $P(x, y; \theta_s) \geq P_R \forall (x, y) \in \Omega_R$.

В частном случае $J_{\max} = S\{\Omega_R\}$ при $\psi(x, y) = 1$ и $\rho(\varepsilon) = H(\varepsilon)$, а нормировка (12) приводит к показателю $R = 1 - S\{\Omega_R \setminus \Omega(\theta_s)\} / S\{\Omega_R\}$, определяющему долю площади, на которой обеспечивается требуемая надежность связи от площади требуемой области радиопокрытия.

Необходимость организации дублирующих радиорелейных каналов, обеспечивающих связность сети для передачи трафика между БС, приводит к дополнительному требованию наличия прямой видимости между смежными БС:

$$\Delta h_n > 0, n = \overline{1, N_{\text{БС}}}, \quad (14)$$

где Δh_n – просвет радиолинии между $(n-1)$ -й и n -й БС (0-я БС соответствует последней БС предыдущего сегмента, расположенной на конечной станции).

Четвертая глава посвящена методике проектирования ТСПР, алгоритмам и инструментальным средствам системно-сетевому планированию.

Площадки базовых станций размещаются на технологических объектах, при этом антенны БС размещаются на невысоких антенных опорах (АО) из-за существующих ограничений на удаленность высоких АО от линейного технологического объекта.

В соответствии с требованиями нормативных документов, площадки БС вдоль линейного технологического объекта должны быть расположены таким образом, чтобы обеспечить его полное радиопокрытие с надежностью радиосвязи 0,9 для мобильных радиостанций.

Исходными данными для структурно-параметрического синтеза являются:

1. Цифровая модель местности (ЦММ) формируемая на основе:
 - бумажных топографических карт;
 - геоинформационных систем («MapInfo» и т.д.);
 - спутниковой съемки Земли;
 - лазерного сканирования местности;
 - материалов инженерных изысканий.
2. Трасса магистрального газопровода и «ширина полосы».
3. Места размещения технологических площадок.

Структуру ТСПР определяют:

1. Количество БС.
2. Места их расположения (s).

Оптимизируемыми параметрами ТСПР являются:

1. Высота АО.
2. Координаты смещения (в местных координатах «С»-«Ю», «З»-«В») относительно существующей технологической площадки.
3. Ориентация антенн (азимут).
4. Коэффициент усиления антенн.

На основе сформированной системы критериев и ограничений на системно-сетевые решения предложена методика структурно-параметрического синтеза ТСПР.

После ввода исходных данных задается начальное приближение для структуры ТСПР $s(0) = \vec{1}_{N_{\text{ТП}}}$, где $\vec{1}_{N_{\text{ТП}}}$ – единичный вектор с $N_{\text{ТП}}$ компонентами, что соответствует расположению БС на всех ТП («полная структура») и параметров $\vartheta_{n,j}(0)$, $n = \overline{1, N_{\text{ТП}}}$, $j = \overline{1, q}$, в качестве которых принимаются типовые

значения. Эти значения для параметров, влияющих на стоимость технического решения, совпадают с нижней границей $\tilde{\mathfrak{F}}_1 j$.

На первом расчетном шаге алгоритма выполняется проверка условия (14) связности сети базовых станций. Если ограничение (14) не выполняется, то осуществляется поиск параметров, обеспечивающих наличие прямой видимости между соответствующими парами БС. Для этого итерационно увеличивается высота антенных опор и, как следствие, высота подвеса антенн. При превышении допустимой высоты $h_{\text{доп}}$ возникает необходимость в переносе АО на регламентируемое расстояние от трассы магистрального газопровода, что сопровождается большим увеличением стоимости технического решения.

После того как найдена архитектура (структура и параметры) ТСПР, удовлетворяющая условию связности БС, выполняется алгоритм структурной оптимизации, основанный на удалении избыточных БС с некоторых ТП. Последовательность шагов структурной модификации позволяет найти Парето-оптимальные (с целевыми функциями R и ΔC) решения, удовлетворяющие ограничению (14) и характеризующиеся допустимой обеспеченностью связи $R_{\text{доп}} < R \leq 1$. При этом шаги поиска, наряду с проверкой условия связности сети, сопровождаются расчетом зон радиопокрытия и стоимости ТСПР, на основе которых определяются и значения целевых функций $R(s, \theta_s)$, и $\Delta C(s, \theta_s)$.

На последнем этапе выполняется процедура модификации параметров для множества найденных эффективных решений с целью достижения 100%-й обеспеченности связью, которая сопровождается увеличением стоимости (рис. 4), поскольку, как правило, требует заметного удаления отдельных БС от ТП. В случае успешной модификации (рис. 4а) находится техническое решение с большими значениями целевых функций по сравнению с решениями, отобранными на предыдущем этапе. Алгоритм завершается выбором лучшего решения и выводом результатов структурно-параметрического синтеза ТСПР.

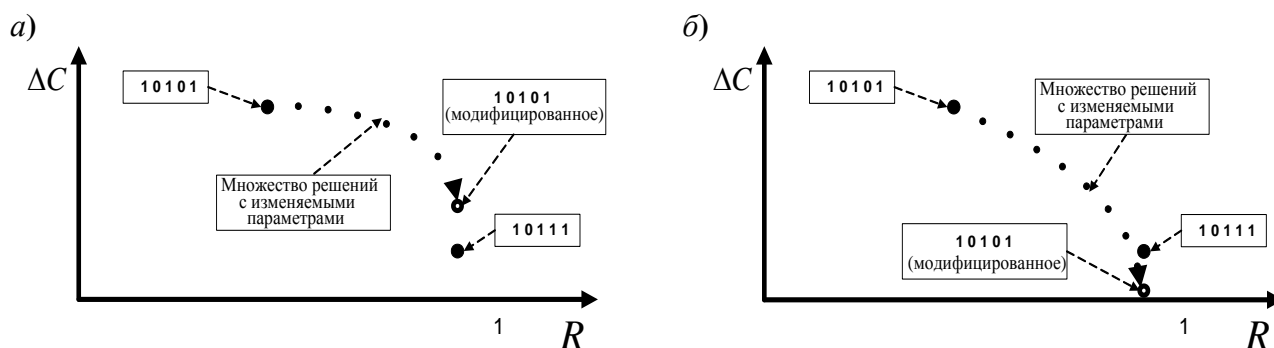


Рис. 4. Пример «улучшения» архитектуры ТСПР за счет модификации параметров: *а* – «успешно», *б* – «не успешно»

На рис. 4, *а* показано модифицированное техническое решение ТСПР со структурой 10101, которое предпочтительнее, чем структура 10111. Напротив,

на рис. 4, б — модифицированное техническое решение со структурой 10101 уступает варианту со структурой 10111.

В зависимости от исходных данных, в том числе рельефа местности, возможен ряд ситуаций, для которых предложены соответствующие рекомендации, включенные в разработанную методику поддержки принятия решений при проектировании ТСПР. Отметим некоторые из них.

1. Ситуация: для начальной архитектуры ТСПР (структура полная, параметры типовые) не выполняется условие связанности, т.е. хотя бы между одной парой смежных БС отсутствует прямая видимость.

Рекомендация: увеличивать высоту АО либо смещать БС относительно ТП.

2. Ситуация: для начальной архитектуры ТСПР (структура полная, параметры типовые) не выполняется 100%-я обеспеченность связью, т.е. $R < 1$.

Рекомендация: изменять параметры ТСПР: увеличивать высоту АО, смещать АО относительно ТП, устанавливать дополнительные направленные антенны.

3. Ситуация: для начальной архитектуры ТСПР (структура полная, параметры типовые) выполняется условие связности и 100%-я обеспеченность связью ($R = 1$).

Рекомендация: выполнить процедуру структурной оптимизации (удаление «лишних» БС) для снижения стоимости ТСПР.

4. Найдено несколько архитектур ТСПР (структура модифицированная, параметры типовые), принадлежащих множеству Парето и характеризующихся допустимой обеспеченностью связи $R_{\text{доп}} < R < 1$ (например, для одной из архитектур ТСПР не выполняется 100%-я обеспеченность связью, но она значительно дешевле).

Рекомендация: за счет модификации параметров выполнить поиск улучшенных решений (архитектур ТСПР) для 100%-й обеспеченности связи.

Возможность прогнозирования уровней сигналов и надежности радиосвязи для подвижных абонентов в заданных местах позволяет значительно снизить капитальные затраты на строительство инфраструктуры базовых станций.

Структура разработанного ПО включает блоки создания, обработки и анализа модели рельефа, блок визуализации, а также расчетный модуль. Блок создания цифровой модели местности обеспечивает загрузку данных о высотах точек местности. Блок обработки модели рельефа служит для сглаживания построенной модели рельефа сплайн интерполяцией и для выделения участков, объединения нескольких моделей в одно целое. Блок анализа модели рельефа позволяет оценить точность построения триангуляционной модели по массиву опорных точек, а также построить горизонталы, профили и т.д.

Результаты расчетов сохраняются в файлы и визуализируются.

Блок визуализации позволяет отображать различные типы данных (исходные точки, триангуляционная и сеточная модели, горизонталы, профили, подписи), осуществлять быструю навигацию по модели рельефа, а также рассчитанные (прогнозируемые) зоны радиопокрытия для заданных уровней надежности радиосвязи на цифровой модели местности, на электронных (векторных) и на сканированных топографических картах местности.

В пятой главе отражены аспекты практического применения результатов расчетов при проектировании ТСПР. Расчет зон радиопокрытия начинается с подготовки и загрузки исходных данных, к которым относятся картографические данные о рельефе местности, параметры абонентских и базовых станций (рис. 5), а также параметры расчета.

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
Мощность передатчика	1	Вт	Мощность передатчика	-30	дБВт
Потери в фидере	4	дБ	Длина волны	1.873703	м
Потери в комбайнере	1	дБ	Эффективная мощность передатчика	-35	дБ
Коэффициент усиления антенны передатчика	0	дБ	Эффективная длина приемной антенны	0.3614568	м
Коэффициент усиления антенны приемника	2.15	дБ	Минимальная напряженность соответствующая чувствительности	0.8800717	дБмкВ / м
Высота передающей антенны	25	м	Поправка на высоту приемной антенны	5.305867	дБ
Высота приемной антенны	25	м			
Чувствительность	0.4	мкВ			
Входное сопротивление	50	Ом			
Использовать диаграмму направленности передающей антенны	<input type="checkbox"/>				
Угол ориентации диаграммы передающей антенны	0				
Диаграмма направленности передающей антенны	<input type="button" value="Импорт"/> <input type="button" value="Поиск"/>				
Использовать диаграмму направленности приемной антенны	<input type="checkbox"/>				
Угол ориентации диаграммы приемной антенны	0				
Диаграмма направленности приемной антенны	<input type="button" value="Импорт"/> <input type="button" value="Поиск"/>				

Buttons: OK, Применить, Отмена

Рис. 5. Параметры БС

Функциональные возможности программного обеспечения по расчету зон радиопокрытия базовых станций:

- формирование цифровой модели местности на основе спутниковой съемки Земли или лазерного сканирования местности;
- установка параметров БС;
- установка параметров АС;
- установка параметров расчета;
- расчет зон радиопокрытия отдельной БС на основе статистической модели распространения радиоволн;
- расчет зон радиопокрытия отдельной БС на основе комбинирования статистической и детерминированной моделей распространения радиоволн;
- расчет зон радиопокрытия для линии вверх и линии вниз, комбинационной составляющей;
- расчет уровней напряженности поля;

- сохранение результатов расчета зон радиопокрытия БС в файлы.

В процессе системно-сетевого планирования с использованием программного комплекса выполняется подготовка географической карты; определение положения базовой станции; ввод параметров оборудования базовой и подвижной станций (высота подвеса антенны, диаграмма направленности антенны базовой станции, потери в фидере и комбайнере, чувствительность приемника и др.); ввод параметров расчета (включая количество рассчитываемых зон и соответствующие значения надежности связи); ввод картографических данных; расчет, отображение и сохранение в файл результатов расчета: уровней напряженности поля (рис. 6) и зон радиопокрытия (рис. 7).

Расчеты характеристик радиопокрытия в разработанном программном комплексе подтверждены результатами экспериментальной проверки. Экспериментальные измерения проводились на эксплуатирующихся базовых станциях, для которых были выполнены предварительные расчеты зон радиопокрытия. Измерения проводились с использованием специализированной измерительной лаборатории, размещаемой в автомобиле, вдоль трассы (трека) и в контрольных точках (рис. 7).

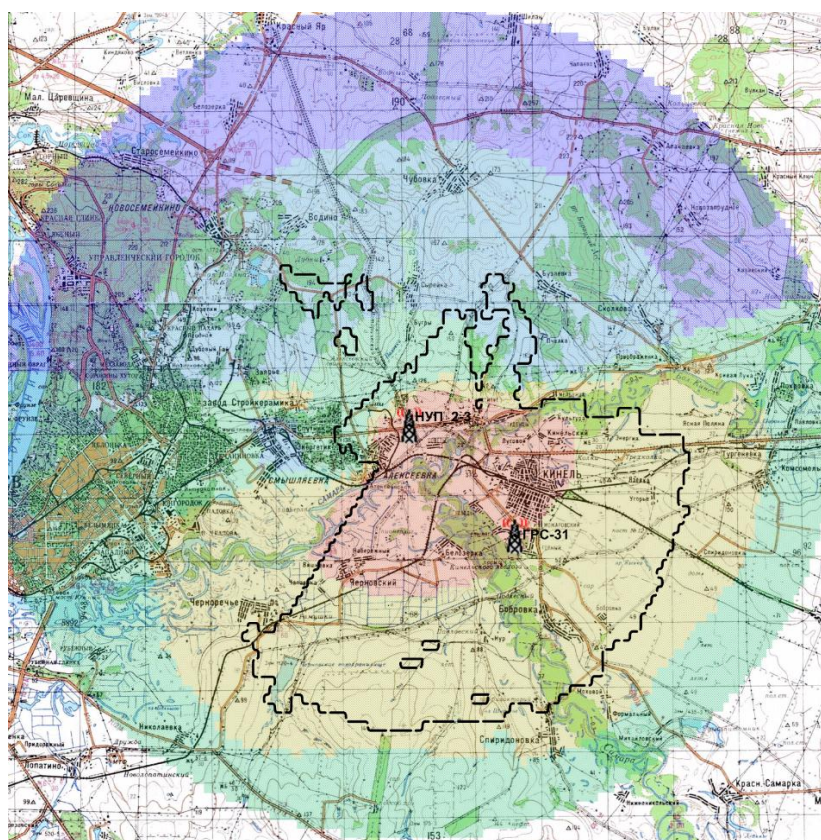


Рис. 6. Зона радиопокрытия и уровни напряженности поля

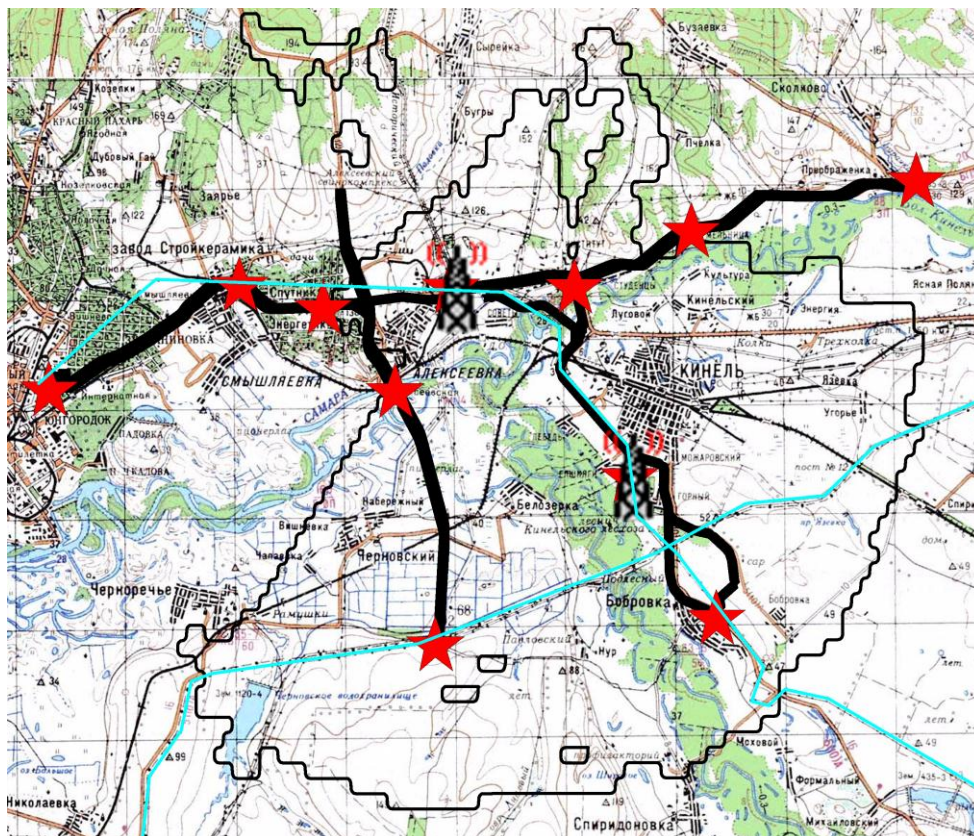


Рис. 7. Зона радиопокрытия и контрольные точки:



- контрольная точка;
- трек непрерывного измерения уровня напряжённости поля для мобильной радиостанции

Результаты практических измерений уровней поля для мобильных радиостанций, а также наличия/отсутствия радиосвязи в контрольных точках позволяют сделать следующие выводы:

- допустимая погрешность расчетных и измеренных уровней напряженности поля не превысила нормативной величины;
- наличие/отсутствие связи в контрольных точках полностью подтвердило прогнозируемую (расчетную) надежность связи.

В заключение сформулированы выводы и основные результаты диссертационной работы, а также рекомендации, вытекающие из проведенного исследования.

Разработанное программное обеспечение рекомендовано для выполнения расчетов зон обслуживания базовых станций при проектировании (протокол совещания по вопросу рассмотрения алгоритма и программного обеспечения расчета зон обслуживания базовых станций № 01/1600/1150-346 от 16 апреля 2010 г, г. Москва).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен показатель обеспеченности связью, позволяющий оценить качество радиопокрытия ТСПР при непосредственном учете рельефа местности и существующих ограничениях, определяемых инфраструктурой технологических объектов, а также сформирована система критериев и ограничений на системно-сетевые решения по построению ТСПР.
2. Разработан конструктивный алгоритм структурно-параметрического синтеза ТСПР, позволяющий находить совокупность системно-сетевых решений, удовлетворяющих сформированной системе ограничений и требований.
3. Разработана процедура принятия системно-сетевых решений, обеспечивающая выбор рациональной альтернативы посредством дополнительной оптимизации параметров для множества отобранных структур ТСПР.
4. Разработан комплекс формирования системно-сетевых решений, позволяющий автоматизировать выбор мест расположения базовых станций, определение их параметров и обеспечивающий представление результатов расчетов в виде пригодном для непосредственной подготовки документации при проектировании ТСПР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание, положения и результаты диссертации отражены в следующих работах.

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:

1. Савченков, С.В. Способы оценки и анализа радиопокрытия проектируемой сети технологической подвижной радиосвязи / С.В. Савченков, М.А. Смычек, В.Р. Милов, Н.В. Новиков // Электросвязь. 2011. №2. С. 30-33.
2. Новиков, Н.В. Структурно-параметрическая оптимизация технологических сетей подвижной радиосвязи / Н.В. Новиков, В.Р. Милов, В.В. Алексеев, А.А. Севрюков // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т.8, №2. С. 55-59.
3. Новиков, Н.В. Системно-сетевые расчеты показателей сети технологической подвижной радиосвязи при проектировании // Научно-технический и производственный журнал «Газовая промышленность». 2009. №6. С. 39-41.
4. Смычек, М.А. Нормативно-техническая документация для создания сети подвижной радиосвязи ОАО «Газпром» цифровых стандартов / М.А. Смычек, Н.В. Новиков // Научно-технический и производственный журнал «Газовая промышленность». 2008. Спецвыпуск. Ноябрь. С. 74-75.
5. Новиков, Н.В. Системно-сетевые расчеты показателей сети технологической подвижной радиосвязи при проектировании // Научно-технический и производ-

ственный журнал «Газовая промышленность». 2008. Спецвыпуск. Ноябрь. С. 91-93.

Свидетельства об официальной регистрации ПО:

6. Савченков, С.В., Смычек М.А., Милов В.Р., Писарев О.В., Новиков Н.В., Сударииков Р.А. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 201161549. Программа расчета зон обслуживания базовых станций сети подвижной профессиональной радиосвязи.

Статьи в прочих научных журналах и изданиях:

7. Смычек, М.А. Оценка и анализ радиопокрытия проектируемой сети технологической подвижной радиосвязи / М.А. Смычек, Р.А. Сударииков, Н.В. Новиков // Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций. 2011. Том 3. С. 395-416.
8. Смычек, М.А. Планирование технологической сети подвижной радиосвязи с использованием цифровой модели местности / М.А. Смычек, Р.А. Сударииков, Н.В. Новиков // Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций. 2011. Том 3. С. 416-424.
9. Смычек, М.А. Планирование технологической сети подвижной радиосвязи с использованием цифровой модели местности / М.А. Смычек, Р.А. Сударииков, Н.В. Новиков // Технологии и средства связи. 2011. № 5. С. 38-40.
10. Баранов, В.Г. Расчет зон радиопокрытия базовых станций в системе технологической подвижной связи / В.Г. Баранов, В.Р. Милов, Н.В. Новиков // Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы и устройства: труды НГТУ / НГТУ. - Н.Новгород. 2009. Т. 75. Вып. 12. С. 75-78.
11. Беляев, Г.Л. Совершенствование инфраструктуры отраслевой сети подвижной связи ОАО «Газпром»: стратегия и перспективы развития / Г.Л. Беляев, О.В. Писарев, Н.В. Новиков // Мир связи. Connect! 1999. № 11. С. 58-61.

В материалах и тезисах докладов научно-технических конференций:

12. Смычек, М.А. Планирование технологической сети подвижной радиосвязи с использованием цифровой модели местности / М.А. Смычек, Р.А. Сударииков, Н.В. Новиков // Профессиональная мобильная радиосвязь. PMR–2011: материалы четвертого международного форума и выставки. Москва: Infor-mediaRussia, 2011. С. 78-81.
13. Смычек, М.А. Планирование сети подвижной радиосвязи с использованием пространственной цифровой модели местности / М.А. Смычек, Р.А. Сударииков, Н.В. Новиков // Двенадцатый конкурс ОАО «Газпром» по компьютерному проектированию и информационным технологиям: материалы конкурса. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский филиал НОУ «Корпоративный институт ОАО «Газпром», 2011. С. 116-122.
14. Смычек, М.А. Опыт проектирования сетей профессиональной подвижной радиосвязи / М.А. Смычек, Н.В. Новиков // Профессиональная мобильная радио-

- связь. PMR – 2010: материалы третьего международного форума и выставки. – Москва: Infor-mediaRussia, 2010. С. 46-51.
- 15.Смычек, М.А. Технология проектирования сети подвижной радиосвязи с использованием геоинформационной системы / М.А. Смычек, Н.В. Новиков, И.А. Прахов // Одиннадцатый конкурс ОАО «Газпром» по компьютерному проектированию и информационным технологиям: материалы конкурса. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский филиал НОУ «Корпоративный институт ОАО «Газпром», 2010. С. 164-170.
 - 16.Смычек, М.А. Разработка алгоритма и программы расчета зон обслуживания базовых станций подвижной радиосвязи / М.А. Смычек, Н.В. Новиков, И.А. Прахов // Десятый конкурс ОАО «Газпром» по компьютерному проектированию и информационным технологиям: материалы конкурса. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский филиал НОУ «Корпоративный институт ОАО «Газпром», 2009. С. 175-181.
 - 17.Новиков, Н.В. Взаимодействие технологической сети подвижной связи с интеллектуальными сетями / Н.В. Новиков // Восьмой международный симпозиум «Интеллектуальные системы».INTELS'2008: труды / НГТУ. –Н.Новгород: НГТУ, 2008. С. 256-260.
 - 18.Новиков, Н.В. Системно-аналитическое моделирование при проектировании технологической сети подвижной связи / Н.В. Новиков // Информационные системы и технологии. ИСТ – 2008: материалы Международной научно-технической конференции / НГТУ– Н.Новгород: НГТУ, 2008. С. 114.
 - 19.Новиков, Н.В. Подход к проектированию технологической сети подвижной связи на основе системно-сетевых показателей / Н.В. Новиков // Информационные системы и технологии. ИСТ – 2007: материалы Международной научно-технической конференции / НГТУ – Н.Новгород: НГТУ, 2007. – С. 104-105.
 - 20.Новиков, Н.В. Системно-сетевые решения при проектировании сети технологической подвижной связи / Н.В. Новиков // Информационные системы и технологии. ИСТ – 2006: материалы Международной научно-технической конференции / НГТУ. – Н.Новгород: НГТУ, 2006. С. 83-84.
 - 21.Новиков, Н.В., Задача планирования технологической сети подвижной связи / Н.В. Новиков // Информационные системы и технологии. ИСТ – 2005: материалы всероссийской научно-технической конференции / НГТУ. – Н.Новгород: НГТУ, 2005. С. 46-47.
 - 22.Г.Л. Беляев, Совершенствование инфраструктуры ведомственной сети связи ОАО «Газпром» / Г.Л. Беляев, О.В. Писарев, Н.В. Новиков // 4-й Бизнес-Форум «Мобильные системы – 99»: материалы бизнес-форума. – Москва, 1999. С. 158-165.
 - 23.Новиков, Н.В. Транкинговая сеть связи ОАО «Газпром» / Н.В. Новиков // Бизнес-семинар «Транкинговая радиосвязь: Проектирование и эксплуатация региональных и муниципальных сетей связи»: материалы бизнес-семинара. – Москва, 1998. С. 121-123.

В отраслевых стандартах и отчетах по НИР:

- 24.СТО Газпром 2-1.18-598-2011 Типовые технические требования на технологическую связь / под руководством М.А. Смычка, при участии Л.Ю. Абакшиной, А.Н. Аникина, П.В. Горева, А.В. Давыдова, А.С. Двоглазова, П.В. Дербенева, А.А. Евтеева, П.И. Иванова, Т.И. Иванова, Н.В. Новикова, В.В. Овчинникова, О.В. Писарева, В.Ю. Ремешкова, Д.А. Романова, С.Н. Светлова, Л.Ю. Сорокоумова, М.А. Шулиной, А.В.Хализова. – М.: ООО «Газпром экспо», 2012. 86с.
- 25.СТО Газпром 11-024-2011 Технологическая связь. Технологические сети подвижной радиосвязи. Общие технические требования / под руководством М.А. Смычка, при участии П.В. Горева, Н.В. Новикова, О.В. Писарева, В.Ю. Ремешкова, Р.А. Сударикова. – М.: ООО «Газпром экспо», 2012. 35с.
- 26.СТО Газпром 11-027-2011 Проектирование сети подвижной радиосвязи ОАО «Газпром» / под руководством М.А. Смычка, при участии П.В. Горева, Н.В. Новикова, О.В. Писарева, В.Ю. Ремешкова, Р.А. Сударикова.– М.: ООО «Газпром экспо»,– 2012. 42с.

Подписано в печать 15.03.2012 Формат 60×84¹/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Уч.-изд. Л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Типография НГТУ. 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.