

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ТОЧЕК РАСПОЛОЖЕНИЯ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ АБОНЕНТОВ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА

Блинова О. В.¹

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Использование беспроводных сетей в качестве временного решения для обеспечения связью участников ряда работ или мероприятий затруднено сложностью и дороговизной проектирования подобных сетей. Но отсутствие связи в экстремальных условиях может привести к гибели людей даже при наличии других ресурсов для обеспечения безопасности. Существуют сетевые устройства и оборудование, позволяющие обеспечить беспроводную связь даже в самых труднодоступных районах, но для их эффективного использования нужен анализ целесообразности их расположения в конкретных местах и возможность оценить работоспособность сети в целом. Существующие средства автоматизированного проектирования ориентированы на создание сетей внутри помещений и не имеют достаточных средств для проектирования сетей в условиях дефицита сетевого оборудования. Рассмотренная в докладе система разработана для упрощения и ускорения проектирования беспроводных сетей на открытой местности со сложным рельефом. Решается проблема обеспечения связью абонентов, передвигающихся по заданным маршрутам, при ограниченном наборе сетевого оборудования путем поиска оптимальных мест его расположения и анализа обеспечиваемого уровня связи для каждой заданной точки маршрута. Используется алгоритм на основе градиентного спуска и две фазы поиска оптимального расположения устройств. Результаты моделирования отображаются графически на трехмерном рельефе, а также в табличной форме, совместимой с табличными процессорами для дальнейшей обработки. Создан модуль оцифровки рельефа на основе топографических карт или схем.

Ключевые слова: сети беспроводной связи, сети связи с неполным покрытием, связь на сложном рельефе, сети связи быстрого развертывания, расположение сетевых устройств.

¹ Ольга Викторовна Блинова, н.с. (blinova_olga_v@mail.ru).

1. Введение

Проектирование на местности систем с использованием беспроводной передачи сигналов – это сложная и ресурсоемкая задача, при решении которой необходимо учесть множество факторов и условий. Существуют готовые решения для проектирования беспроводных сетей, но они охватывают ограниченный круг задач, в первую очередь проектирование беспроводных сетей в офисных помещениях. Примерами подобных моделей являются [7, 8, 9]. Обзор таких программных решений есть в [4, 6]. Ключевыми требованиями большинства целевых систем для данных программных продуктов является обеспечение полного покрытия территории и обеспечение устойчивой связи.

Существует большой круг задач по проектированию и исследованию сетей с неполным покрытием. Это могут быть временные сети, резервные сети в случае поломки основной сети или с целью балансировки нагрузки, сети быстрого развертывания, системы с сильно ограниченным бюджетом и низкими требованиями к качеству связи. Для их проектирования требуется простой и универсальный инструмент, позволяющий оценить работоспособность возможных решений и найти хорошие решения для конкретных условий. [1, 3]. Проектирование таких сетей может быть связано с большим количеством дополнительных условий и ограничений, таких как проходимость местности, погодные условия, наличие или отсутствие источников электропитания, большой разброс по численности и плотности абонентов,

При проектировании таких сетей хорошим решением является использование комплектов сетевого оборудования или источников электропитания, адаптированных для использования в конкретных условиях. Они могут располагаться в спасательных пунктах, выдаваться в аренду туристическим, спортивным и исследовательским группам, группам, находиться в резерве в отелях и кемпингах на случай возникновения чрезвычайной ситуации. Наличие таких комплектов позволяет свести задачу проектирования сети к задаче расстановке оборудования на местности. При поиске расположения сетевых устройств

необходимо учитывать особенности рельефа и типичные маршруты движения абонентов (например, тропы, дороги и т.п.).

Разработана система, применяющая метод градиентного спуска для поиска оптимальных координат расположения сетевых устройств на рельефе с учетом маршрутов движения абонентов, и использующая в качестве целевой функции показатель, характеризующий доступность сети для них [2, 5]. В его основе лежит вероятность доступа абонента к каждому сетевому устройству с учетом расстояния, но итоговое значение целевой функции не несет конкретного физического смысла, так как полученные вероятности и суммарное значение умножаются на весовые коэффициенты, позволяющие учесть условия и требования конкретной задачи. В [2] была предложена система, решающая поставленную задачу с использованием имитационного моделирования и генетических алгоритмов. В таком решении был обнаружен ряд недостатков. Принято решение изменить подход к поиску оптимальных мест расположения сетевых устройств.

2. Анализ опыта разработки системы для поиска оптимальных мест расположения сетевых устройств

В [2] описана система, разработанная для решения описанного класса задач. При ее тестировании и использовании был выявлен ряд серьезных недостатков. Применение целевой функции к постоянно перемещающимся узлам связи привело к отсутствию конечного решения. Использованный метод может быть успешно применен для позиционирования подвижных сетевых устройств, но не позволяет найти конкретные координаты для статического размещения, только некоторую область. В связи с этим было принято решение отказаться от динамического моделирования движения абонентов и задать маршруты статически в виде списка ключевых точек с заданными координатами и весовыми коэффициентами.

При таком задании маршрута нет необходимости в использовании имитационного моделирования и генетических алгоритмов, при которых получаемое решение сильно зависело

от производительности устройства, на котором производилось моделирование и от эмпирически подбираемых параметров (вероятностей мутаций, кроссинговера и т.д.). Было принято решение об использовании алгоритма градиентного спуска, позволяющего быстро получить оптимальное решение. Одним из недостатков этого алгоритма является возможность попадания в локальные минимумы. Для минимизации влияния этого недостатка на конечное решение было принято применение метода градиентного спуска к множеству конфигураций с различным исходным размещением сетевых устройств (размещаются случайным образом).

Так же наличие нескольких различных вариантов размещения оборудования позволяет рассмотреть альтернативные варианты, уступающие по значению целевой функции, но, возможно, более целесообразные с учетом сложности размещения, временных затрат, необходимых для доставки сетевого оборудования на точки и других параметров.

3. Модуль построения рельефа на основе карты или схемы

Ранее разработанная система тестировалась только на математически смоделированных рельефах и не имела возможностей для привязки к реальной местности. Для устранения этого недостатка был разработан модуль построения 3D рельефа на основе изображения. В качестве исходного материала может выступать топографическая карта с цветовой дифференциацией высот или схема, на которой различными цветами будут обозначены высотные характеристики местности, влияющие на распространение сигнала.

Например, на топографическую карту можно добавить различные объекты, влияющие на распространение сигнала: дома, стены и другие препятствия. Или, если в случае чрезвычайного происшествия был существенно изменен рельеф местности, изменения можно нанести на карту в любом графическом редакторе. При этом необходимо либо использовать соответствующие легенде цвета или любой другой цвет, который необходимо добавить в легенду.

Существует ряд программных продуктов, реализующий построение цифрового рельефа местности на основе карт, такие как ZWCAD, ArcGIS, ArcView и др. Готовые программные решения не имеют единого стандартного формата, в большинстве своем защищены лицензионными ограничениями, требуют длительного времени для качественной обработки изображения, опыта работы и больших вычислительных мощностей.

Разработанный модуль прост в применении и совместим с любыми графическими форматами. Интерфейс построения трехмерного рельефа на основе изображения представлен на рисунке ниже.

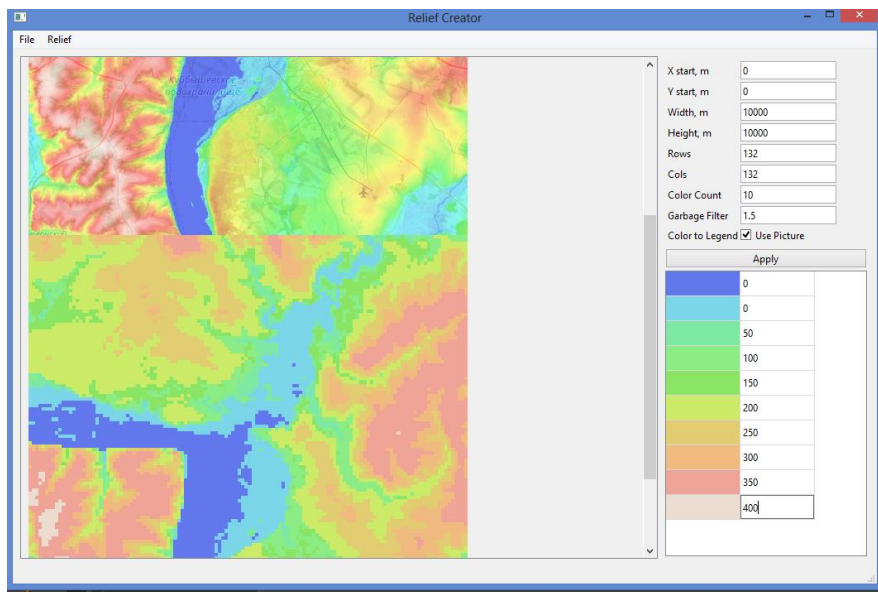


Рис. 1. Работа модуля построения рельефа

В верхней части рисунка можно видеть исходное изображение (топографическая карта), справа – параметры оцифровки и легенда. Цвета легенды задаются путем выделения областей на рисунке, или можно загрузить созданную ранее легенду. Это может быть полезно в случае использования

стандартных карт для решения разных задач. Изображение разбивается на прямоугольные участки согласно заданному количеству строк и столбцов, цвет каждого участка усредняется, после чего высота всего участка приравнивается к высоте, заданной для наиболее близкого к полученному цвету из легенды.

На основе полученной карты высот генерируется трехмерный рельеф. Пример такого рельефа можно видеть на рис. 2. Полученный рельеф возможно сохранить и использовать многократно. Стоит отметить что на рельеф в настоящий момент невозможно добавить объекты, частично затрудняющие прохождение сигнала. Проблемой могут оказаться линии разметки при высокой степени детализации рельефа, например, линия или надпись на карте может быть распознана как возвышенность или впадина в зависимости от легенды.

4. Постановка задачи и задание исходных данных для моделирования

Задача формулируется следующим образом: задана некоторая прямоугольная территория, обладающая сложным рельефом. На территории задано множество точек, в которых необходимо обеспечить связью абонентов. Точки объединены в маршруты. Каждой точке маршрута задан весовой коэффициент, характеризующий вероятность нахождения абонента или приоритет обеспечения связи в заданной точке. Сумма коэффициентов всех точек маршрута не должна превышать единицы. Маршрут может состоять из одной точки. Задается количество и радиус действия сетевых устройств, обеспечивающих связь абонентам на маршруте. Необходимо найти такие координаты размещения сетевых устройств на местности, чтобы обеспечить максимальный уровень обеспечения точек маршрута связью. О расчете целевой функции сказано ниже.

Для задания рельефа местности используется описанный выше модуль.

После создания рельефа необходимо задать базовые параметры моделирования. В начале работы сетевые устройства размещаются на рельефе случайным образом. Работа алгоритма градиентного спуска может приводить к локальным, а не глобальным минимумам. В связи с этим рекомендуется создавать несколько конфигураций с разными вариантами случайных расстановок сетевых устройств – это приведет к большей эффективности работы алгоритма и разнообразию предлагаемых решений.

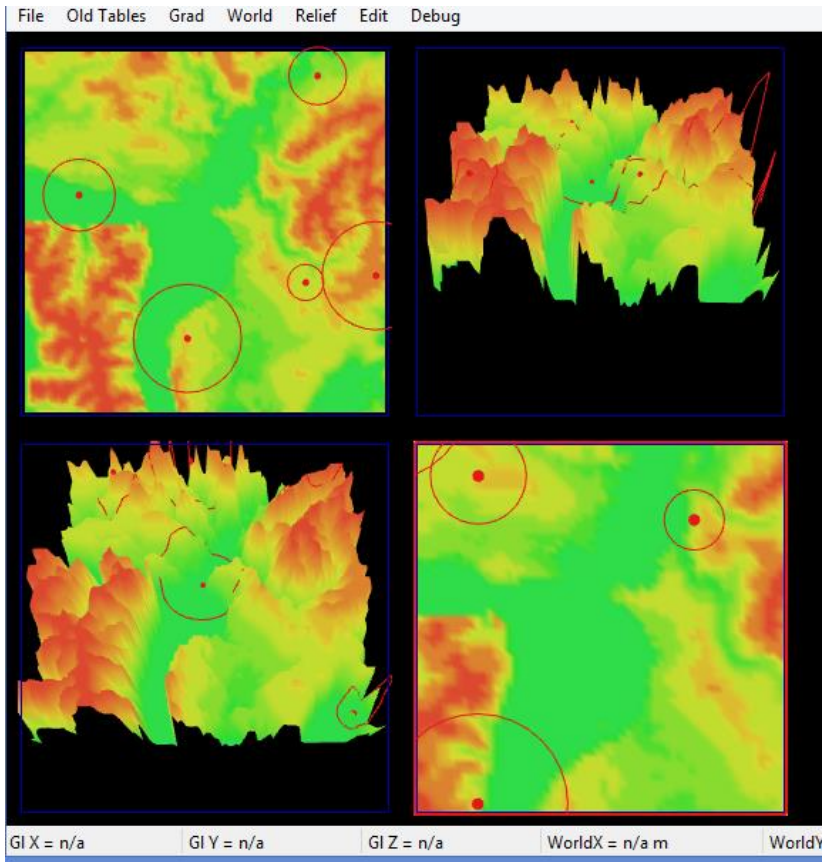


Рис.2. Расположение сетевых устройств и маршрутов на сгенерированном рельефе.

Пользователю предлагается выбрать количество конфигураций и задать параметры сетевых устройств (радиус действия). Далее на сформированных конфигурациях необходимо задать маршруты движения абонентов в виде списка точек, в которых необходимо обеспечить связь. Кроме того, необходимо задать параметры моделирования и целевой функции или использовать значения по умолчанию (рис. 3).

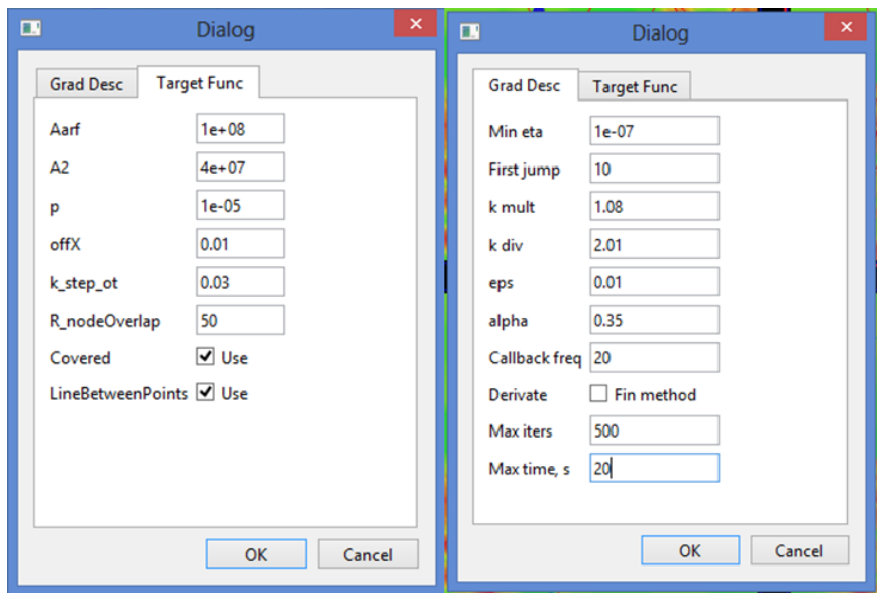


Рис.3. Меню настройки параметров целевой функции и градиентного спуска.

Созданную и подготовленную к моделированию модель можно сохранить в конфигурационном файле формата json. В ней сохраняется ссылка на файл рельефа, характеристики сетевых устройств (кроме координат), маршруты движения абонентов, все заданные настройки.

5. Расчет целевой функции

Расчет значения целевой функции состоит из нескольких этапов. На первом этапе уровень доступа каждой точки к сетевому устройству без учета рельефа рассчитывается следующим образом:

$$(1) p_{ij} = e^{-d/2R_i^2}, d = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2,$$

где x_j и y_j – координаты точки маршрута, x_i и y_i – координаты сетевого устройства.

Далее осуществляется проверка отсутствия препятствий рельефа на пути распространения сигнала. Для этого строится трехмерный отрезок, соединяющий размещенные на рельефе точку маршрута и сетевое устройство. Отрезок разбивается на интервалы, привязанные по длине к степени дискретизации рельефа. На границах интервалов проверяется возможность распространения сигнала (отрезок не должен погружаться в рельеф).

В случае наличия препятствия значение уровня доступа для данной точки и сетевого устройства приравнивается к нулю. Проверка осуществляется для всех точек маршрута для каждого сетевого устройства. Значение целевой функции получается путем суммирования всех полученных значений уровня доступа от каждого сетевого устройства к каждому узлу.

Использование суммирования уровней доступа для каждой точки маршрута от всех сетевых устройств является достаточно неоднозначным решением. Такой выбор сделан в связи с тем, что система не имеет возможности учесть все параметры реального мира, влияющие на распространение сигнала, поскольку разработано как средство быстрого и примерного проектирования, как помощь работающим на местности экспертам. Если рассматривать вместо условного уровня доступа вероятность доступа точки к сети одно близко расположенное сетевое устройства может обеспечить расчетную 100% вероятность и связь с другими устройствами не будет учтена, а по факту на местности может оказаться уровень доступа сильно меньше 100% и связь от других сетевых устройств будет важна.

Но необходимо дополнительное исследование об эффективности использования разных целевых функций.

На вход алгоритму градиентного спуска подается целевая функция, ограничения (координаты не должны выходить за пределы рассматриваемой области, задаются ограничения на максимальное количество итераций и максимальное время поиска решения для одной конфигурации), линейный список исходных координат сетевых устройств.

Работа алгоритма градиентного спуска реализована с помощью свободно распространяемой библиотеки `tf_gd_lib`. Согласно алгоритму на каждом шаге определяется вектор перемещения сетевого устройства с целью максимизации целевой функции. Уровень доступа для каждого абонента от каждого сетевого устройства суммируется, это позволяет учесть возможность подключения к каждому из устройств и сгладить влияние неучтенных факторов, но может привести к размещению всех сетевых устройств в одной и той же точке, что чаще всего противоречит здравому смыслу. Для компенсации этого эффекта включается дополнительный компонент, названный функцией отталкивания. Он рассчитывается следующим образом:

$$(2) \quad b = x \cdot e^{-0.004 \cdot l_{ij}} \cdot \left(\frac{100}{1 + 0.25 l_{ij}} \right),$$

где l_{ij} – расстояние между двумя сетевыми устройствами, x – задаваемый пользователем в настройках коэффициент. Значение функции отталкивания рассчитывается между всеми сетевыми устройствами. Итоговое перемещение устройства на каждом шаге моделирования – это сложение вектора, рассчитанного оптимизационным алгоритмом, с векторами отталкивания от всех других сетевых устройств. Стоит отметить, что использование функции отталкивания усложняет и замедляет работу оптимизационного алгоритма.

6. Работа 2-х фаз оптимизационного алгоритма по поиску координат размещения сетевых устройств

После того как заданы рельеф, маршруты абонентов, характеристики сетевых устройств и параметры моделирования запускается первая фаза моделирования. Если в результате поиска решения точка маршрута обеспечена связью, это отображается графически изменением ее цвета. Таким образом, первичную оценку эффективности найденного решения можно провести моментально в процессе моделирования.

Сетевые устройства обозначаются окружностями соответствующего радиуса с точкой в центре. При изображении радиуса не учитывается распространение сигнала, поэтому графически точка маршрута может оказаться внутри радиуса действия сетевого устройства, но не быть обеспечена связью. Помимо целевой функции в результате запуска первой фазы моделирования составляется таблица узлов и маршрутов, которые обслуживает каждое сетевое устройство. Это необходимо для проведения второй фазы моделирования и помогает провести оценку результатов.

После завершения первой фазы можно провести вторую дополнительную фазу моделирования. Ее алгоритм аналогичен работе первой фазы за исключением того, что при расчете целевой функции для каждого сетевого устройства учитываются значения только для тех точек маршрутов, которые обслуживаются конкретной точкой доступа. Это позволяет расположить устройство лучше с учетом требований конкретных точек.

Полученные в процессе моделирования результаты можно предварительно оценить благодаря цветовой маркировке обеспеченных связью точек на маршрутах, подробная информация формируется в виде таблиц, содержащих информацию как обо всех конфигурациях и модели в целом, так и подробно о каждой

В них содержатся найденные координаты сетевых устройств, значения обеспечиваемого уровня связи для каждой точки и значения целевой функции для конфигурации. Данные из

таблиц легко можно экспортировать в табличный процессор для последующей обработки. После каждой фазы моделирования конфигурации сортируются по значению целевой функции.

7. Выводы

Представленная система проектирования беспроводных сетей является переработкой ранее разработанной системы. Изменен способ задания исходных данных: не учитывается скорость движения абонентов и изменение их положения с течением времени. Использован другой метод поиска оптимальных точек расположения сетевых устройств. Предложенное решение позволяет получить конкретное решение более, чем в 50% конфигураций при правильной настройке параметров моделирования (в первую очередь достаточного количества времени на обработку и числа итераций).

К недостаткам системы можно отнести требовательность к аппаратным ресурсам, связанную с большим количеством вычислительных операций на каждом шаге моделирования, особенно с учетом анализа распространения сигнала через рельеф. Необходимо рассмотрение возможности использования других алгоритмов для расчета возможности распространения сигнала. Также важно отметить, что настоящий способ расчета привязан к детализации рельефа, а, значит, одна и та же задача может получить разные решения в зависимости от выбранной пользователем детализации. Неочевидно, какая степень детализации может быть рекомендована. Качество полученного рельефа будет сильно зависеть от качества исходной карты.

Целесообразность использования функции отталкивания и ее сложения с целевой функцией вызывает сомнения, так как может приводить к нестабильности работы алгоритма градиентного спуска и невозможности нахождения оптимального решения. Необходимы дополнительные исследования и тестирование других способов расчета целевой функции. Сейчас в системе могут использоваться только ненаправленные сетевые устройства, необходима доработка системы с целью добавления возможности использовать

направленные антенны. Нет возможности использования подвижных сетевых устройств.

Переход к статическому рассмотрению задачи привел к невозможности рассмотреть реально обеспечиваемый уровень связи с учетом скорости движения абонентов по часам работы, которая была предусмотрена в предыдущем решении. Возможно, было бы целесообразно добавить возможность имитационного движения абонентов с учетом уже найденного решения о размещении сетевых устройств и составления графиков обеспечиваемого уровня связи по часам.

Заключение

Разработанная система позволяет решать широкий круг задач по проектированию или исследованию беспроводных сетей связи с неполным покрытием сети и с сильно ограниченным временем или бюджетом для проектирования. Возможность использовать весовые коэффициенты при расчете значений целевой функции повышает гибкость системы. Система обладает простым и понятным интерфейсом, результаты моделирования могут быть сохранены и легко экспортированы. Система не имеет аналогов на рынке.

Полученный программный продукт может быть применен для быстрого проектирования временных сетей связи для обеспечения связью абонентов при чрезвычайных ситуациях, при проведении спортивных и научно-исследовательских мероприятий. Целесообразно переработать данную систему для возможности предоставления по сети как сервис и создание базы данных готовых решений, интеграция с конкретным оборудованием или его комплектами. Перспективной областью применения системы может быть модернизация продукта для проектирования систем охраны и видеонаблюдения для решения задачи расположения камер или охранных датчиков для контроля ключевых участков, например, дорог или входов.

Система требует дальнейшего развития и разработки, но уже применима для решения конкретных практических задач на местности.

Литература

1. БЛИНОВА О.В., ВАСЬКОВСКИЙ С.В., ВОРОНЦОВ Ю.А., ФАРХАДОВ М.П. *Информационная система с подвижными узлами связи* // Датчики и системы. – 2015. – №12(198). – С. 24–28.
2. БЛИНОВА О.В., ВАСЬКОВСКИЙ С.В., РЫКОВ Я.В. *Проектирование сетей связи быстрого развертывания с использованием программного приложения анализа конфигурации сети* // Управление большими системами. – 2021. – Вып. 90. – С. 121–138.
3. БЛИНОВА О.В., ВАСЬКОВСКИЙ С.В., ФАРХАДОВ М.П. *Взаимосвязь подвижных абонентов и стационарных узлов связи при известных характеристиках движения* // Датчики и системы. – 2017. – №3. – С. 3–8.
4. ANDRUSENKO J., KASCH W.T., WARD J.R. *Wireless network modeling and simulation tools for designers and developers* // IEEE Communications Magazine. – 2009. – Vol. 47, No. 3. – P. 120–127.
5. BLINOVA O.V. *On how to model and investigate the interaction of mobile network nodes with a limited number of mobile access points* // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1864. – P. 1–8.
6. BUDIMIR D., SHELKOVNIKOV B.N. *CAD for broadband wireless access design* // Proc. 5th Int Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service. TELSIX-2001. – (Cat. No. 01EX517). – 2001. – Vol. 2. – P. 525–528.
7. HANNIKAINEN M., HAMALAINEN T.D., VANHATUPA T. *Genetic algorithm to optimize node placement and configuration for WLAN planning* // 4th IEEE Int. Symposium on Wireless Communication Systems. – 2007. – P. 612–616.
8. DALMASSO I. et al. *WiMAX networks for emergency management based on UAVs* // IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL-2012). – IEEE, 2012. – P. 1–6.

9. KALIKA L. et al. *Node placement method within a wireless network, such as a wireless local area network*: Patent USA 7539495. – 2009.

SEARCH FOR OPTIMAL LOCATIONS OF NETWORK DEVICES FOR WIRELESS NETWORKS, TAKING INTO ACCOUNT THE TRAJECTORIES OF THE ABONENTS AND SIGNAL PROPAGATION

Blinova Olga, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, research associate (blinova_olga_v@mail.ru)

Abstract: The use of wireless networks as a temporary solution for providing communication to participants of a number of works or events is complicated by the complexity and high cost of designing such networks. But the lack of communication in extreme conditions can lead to the death of people even if other resources are available to ensure security. There are network devices and equipment that allow providing wireless communication even in the most inaccessible areas, but for their effective use, an analysis of the feasibility of their location in specific places and the ability to assess the performance of the network as a whole is needed. The existing computer-aided design tools are focused on creating indoor networks and do not have sufficient funds for designing networks in conditions of a shortage of network equipment. The system discussed in the report is designed to simplify and accelerate the design of wireless networks in open areas with complex terrain. The problem of providing communication to subscribers traveling along specified routes with a limited set of network equipment is solved by searching for optimal locations and analyzing the provided communication level for each specified route point. An algorithm based on gradient descent and two phases of searching for the optimal location of devices are used. The simulation results are displayed graphically on a three-dimensional relief, as well as in a tabular form compatible with tabular processors for further processing. A module for digitizing terrain based on topographic maps or diagrams has been created.

Keywords: wireless communication networks, communication networks with incomplete coverage, communication on complex terrain, rapid deployment communication networks, location of network devices.

УДК + 004.7 + 004.9
ББК 32.972.5