

Применение геоинформационных технологий к автоматизированному проектированию систем радиосвязи

К.П. Голиков

Аннотация. В работе рассматриваются некоторые аспекты применения геоинформационных технологий в задачах автоматизированного проектирования систем радиосвязи. Приводятся структура данных и алгоритм пространственной интерполяции для построения цифровой модели рельефа земной поверхности по топографической карте изолиний высот.

1. Введение

Системы радиосвязи - одна из самых быстро развивающихся отраслей промышленности в мире. К таким системам относятся и более современные системы сотовой и пейджинговой связи, и системы радиовещания и телевидения, и более традиционные сети радио и радиорелейной связи.

Промышленно развитые страны тратят миллионы долларов ежегодно на развитие систем радиосвязи, поэтому необычайно важной становится проблема эффективного проектирования таких систем.

Основная цель любой системы планирования радиосвязи – обеспечить определенный уровень полезного сигнала, получаемого приемником в заданной точке местности. Обычно эта цель достигается подходящим выбором рабочих частот и мест расположения передатчиков. Точки с допустимыми значениями уровня принимаемого сигнала образуют на местности *зону обслуживания* (покрытия) передатчика.

Следует отметить, что для современных систем радиосвязи оптимизация зоны обслуживания вовсе не означает, что эта зона должна быть как можно более обширной. Дефицит свободных радиочастот приводит к тому, что одна и та же рабочая частота используется разными передатчиками, находящимися на достаточном удалении друг от друга. Зоны обслуживания таких передатчиков не должны пересекаться. В более общей постановке еще одна задача планирования радиосвязи состоит в оценке взаимных помех между передатчиками новой и существующих систем связи. В силу некоторых особенностей интерференции

радиоволн помехи могут возникать и между передатчиками, работающими на разных частотах.

К настоящему времени разработан ряд теоретических и эмпирических *моделей распространения радиоволн* над поверхностью земли [1,2], на которых основаны практически значимые алгоритмы предсказания величины уровня радиосигнала, достигающего различных точек местности. Все модели в большей или меньшей степени используют информацию о рельефе земной поверхности.

Таким образом, при планировании радиосвязи требуются различные виды географической информации, и значит, компьютерная система автоматизированного проектирования должна быть интегрирована с достаточно мощной *географической информационным системой* (ГИС).

Прежде всего, ГИС обеспечивает проектировщику работу с *цифровой топографической картой* местности. Цифровая карта позволяет произвести общую оценку территории, на которой разворачивается система радиосвязи. На цифровой карте в интерактивном режиме выполняется размещение передатчиков, отображаются и оцениваются зоны обслуживания, “затенения” и радиопомех. Для более простых систем радио и радиорелейной связи, со стационарно расположенными приемно-передающими станциями, на карте обозначаются трассы соединений, выбираются места установки ретрансляторов. Цифровая карта с нанесенными на нее элементами радио обстановки служит основой для получения твердых копий выходных документов системы автоматизированного проектирования.

Для расчетов распространения радиоволн необходима *цифровая модель рельефа* земной поверхности. Горы, холмы и другие возвышенности рельефа блокируют радиоволны, вызывая дифракцию вокруг вершин и склонов, что приводит к заметным потерям сигнала в точке приема.

Большинство моделей распространения радиоволн для анализа рельефа использует профили. *Профиль* – это вертикальный разрез земной поверхности плоскостью, проходящей через точки размещения антенн передатчика и приемника.

Наиболее точные модели кроме рельефа учитывают еще и особенности *подстилающей поверхности* (“clutter”). Подстилающую поверхность составляют растительный покров, застройка и водные пространства. Лесные массивы и строения рассматриваются как дополнительные препятствия на пути распространения волны. Водные пространства влияют на величину и фазу отраженного сигнала, достигающего приемника. В перспективе для планирования радиосвязи в крупных городах потребуются пространственные модели каждого здания и сооружения, а также учет отражающих и поглощающих свойств материалов, из которых они построены.

Далее в статье будут рассмотрены практические методы и алгоритмы для построения и анализа модели рельефа с учетом информационных потребностей автоматизированного проектирования систем радиосвязи.

2. Цифровые модели рельефа земной поверхности

Цифровые модели рельефа (ЦМР) начали разрабатываться и применяться еще в 50-е годы, и с тех пор они стали важным инструментом моделирования и анализа пространственно-топографической информации. Помимо интересующих нас задач распространения радиоволн, модели рельефа широко применяются в таких областях как строительство, геология, управление ресурсами, геодезия и картография. Существуют многочисленные и разнообразные приложения таких моделей в военных целях. К настоящему времени подсистемы моделирования рельефа составляют интегральную часть многих инструментальных геоинформационных систем [3].

Для построения ЦМР используются три основных источника информации: оцифровка традиционных топографических карт, полевая геодезическая съемка и фотограмметрические данные, полученные методами дистанционного зондирования (аэросъемка, съемка со спутников и т.п.).

Полевая геодезическая съемка и фотограмметрические методы доступны только с привлечением специализированных организаций, обладающих необходимыми исходными данными, обученным персоналом и весьма дорогостоящим профессиональным оборудованием. Поэтому, несмотря на значительный прогресс в развитии фотограмметрических методов, позволяющих получать наиболее точные ЦМР регионального покрытия, самым распространенным и доступным к настоящему времени источником для построения моделей рельефа остаются топографические карты.

На топографических картах рельеф местности изображается при помощи *горизонталей*. Горизонталь - это изолиния точек равной высоты над уровнем моря. Кроме того, на картах изображаются точки локальных максимумов и минимумов высот с цифровыми отметками. Для более полной характеристики рельефа используются специальные обозначения хребтов, обрывов и других особенностей формы. Важную роль играет изображение гидрографии, поскольку русла рек и ложа водоемов располагаются в углублениях рельефа и характеризуют естественный уклон поверхности.

Ввод информации с топографических карт чаще всего выполняется при помощи растровых сканеров. Затем полученный цифровой образ векторизуется. Векторизация означает преобразование растрового изображения в набор векторных графических примитивов. Для карты рельефа этот набор обычно состоит из точек и ломаных. После векторизации требуется значительный объем интерактивного редактирования для устранения дефектов. Дефекты могут быть

вызваны как ошибками векторизации, так и рядом соглашений, принятых при составлении исходных карт. Например, немалую проблему составляет устранение разрывов линий, выполненных для размещения надписей и условных обозначений. На завершающем этапе примитивам приписываются значения высот.

Полученная в результате цифровая контурная карта или, как ее еще называют, *гипсография* (hypsography) служит исходным материалом для построения ЦМР. Наряду с другими слоями цифровой карты местности, гипсографические данные могут быть представлены в стандартных форматах обмена графической информацией (DXF, DGN и др.).

Основная проблема, возникающая при построении ЦМР, это интерполяция высот в промежутках между горизонталями. В общем случае задача интерполирования сводится к построению непрерывной и достаточно гладкой поверхности по линиям равных значений. Однозначного решения эта задача не имеет, в связи с чем разработано множество разных методов пространственной интерполяции [5,6,7]. Идеального метода не существует. Каждый метод имеет свои ограничения и ориентирован на доступные ресурсы вычислительной системы.

Среди методов пространственной интерполяции на картах изолиний особое место занимают градиентные методы. Они отличаются высокой эффективностью, имеют простую реализацию и обеспечивают хорошее качество представления поверхности, выявляя такие особенности формы рельефа как хребты и долины. В следующих параграфах мы рассмотрим алгоритм интерполяции, развивающий идею одного из таких методов, предложенного в работе [8] и известного как метод последовательного наискорейшего спуска.

2.1. Структура цифровой модели рельефа для анализа распространения радиоволн

Для анализа распространения радиоволн обычно используются матричные (растровые) модели рельефа. Такая модель подразумевает, что территория разбивается на ячейки равного размера. Каждой ячейке сопоставляется элемент прямоугольной матрицы. Значение элемента – высота земной поверхности над уровнем моря.

Важно отметить, что необходимое пространственное разрешение модели существенно зависит от частоты радиосигнала. Например, если на частоте 900МГц для достаточно точного предсказания дифракционных потерь на пути распространения волны требуется размер матричного элемента порядка 80м и разрешение по высоте 8м, то на частоте 2300МГц эти величины составляют соответственно 30м и 3м. В [4] приводится правило приблизительной оценки, в силу которого допустимый размер матричного элемента составляет 250 длин

волны, а разрешение по высоте 25 длин волны. Для городских территорий с плотной застройкой требуются модели с еще более высоким разрешением.

Для удобства дальнейшего изложения будем считать, что модель рельефа покрывает сравнительно небольшую территорию, которая целиком отображается на одну плоскость картографической проекции. Тогда ЦМР можно представить как прямоугольную матрицу квадратных ячеек – *пикселов*, лежащую в этой плоскости. Координатами пиксела на поверхности земли будем считать географические координаты его центральной точки. Высоту пиксела определим как высоту земной поверхности в некоторой точке, лежащей внутри пиксела. С точностью до метра высоту над уровнем моря в любой точке суши земного шара можно представить целым числом в диапазоне от –407 до 8752 метров. Вне этого диапазона выберем специальное значение NIL, которое показывает, что пиксел “пустой”, т.е. высота для него не определена.

В силу принятых соглашений ЦМР имеет структуру двумерной матрицы целых чисел. Такую модель можно интерпретировать еще и как *растр* - целочисленную решетку точек, расположенных по центру ячеек матрицы. На дискретной модельной плоскости определим правостороннюю систему координат так, чтобы левый нижний пиксел матрицы имел координаты (0,0).

Заметим, что для реальных задач планирования радиосвязи требуются матрицы большого размера. Например, модель рельефа, покрывающая территорию 120x120 км с разрешением 30м, имеет размеры 4000x4000 пикселов и занимает более 30Мб памяти. Типовая задача при моделировании распространения земной волны включает анализ профиля прямолинейной трассы между антеннами передатчика и приемника. Для стационарно расположенных антенн количество профилей невелико и анализ с высокой точностью может быть выполнен за короткое время. Однако при планировании систем радиовещания, телевидения и мобильной связи необходимо построить большое количество профилей. Теоретически требуется трассировка пути распространения сигнала от передатчика к любой точке местности, где может находиться приемник. На практике для прогнозирования зоны обслуживания обычно рассматривается семейство радиальных трасс, исходящих из точки размещения передатчика. Для получения достаточно точного прогноза требуется очень плотная сетка таких трасс.

Проведенные нами эксперименты показали, что традиционные способы размещения матрицы, например по строкам, дают очень низкую эффективность доступа к базе данных модели. Существенно лучшие характеристики времени доступа получаются, если в структуру модели ввести дополнительный логический уровень, разбив растр на прямоугольные блоки сравнительно небольшого размера. Такая структура в большей степени учитывает пространственную когерентность извлекаемых из модели данных при построении профилей прямолинейных трасс. Среднее количество ячеек, пересекаемых трассой в одном блоке, мало зависит от направления трассы.

Кроме того, две соседние радиальные трассы при круговом сканировании модели лежат в практически совпадающих цепочках блоков. Все это хорошо согласуется со страничным механизмом доступа виртуальной памяти.

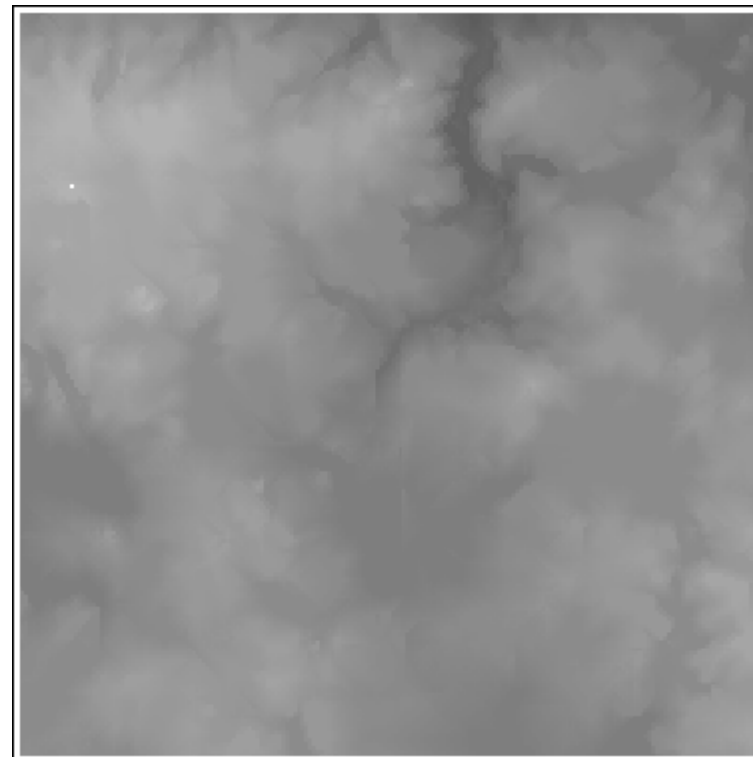


Рис. 1

Блочная структура хорошо “работает” в интерактивных процедурах визуализации модели, позволяя проводить достаточно естественную *генерализацию* изображения рельефа. На рис.1 приведено детальное изображение рельефа, в котором интенсивность тона определяется значением высоты в каждой ячейке модели.

На рис.2 показано обзорное изображение рельефа в мелком масштабе. Интенсивность тона определяется максимальным значением высоты в блоке. Хорошо заметны наиболее возвышенные участки местности, представляющие наибольший интерес для размещения передатчиков. С другой стороны, при пересечении таких участков возможны наибольшие потери радиосигнала. Белым цветом выделен участок с максимальным значением высоты по всей области определения модели.

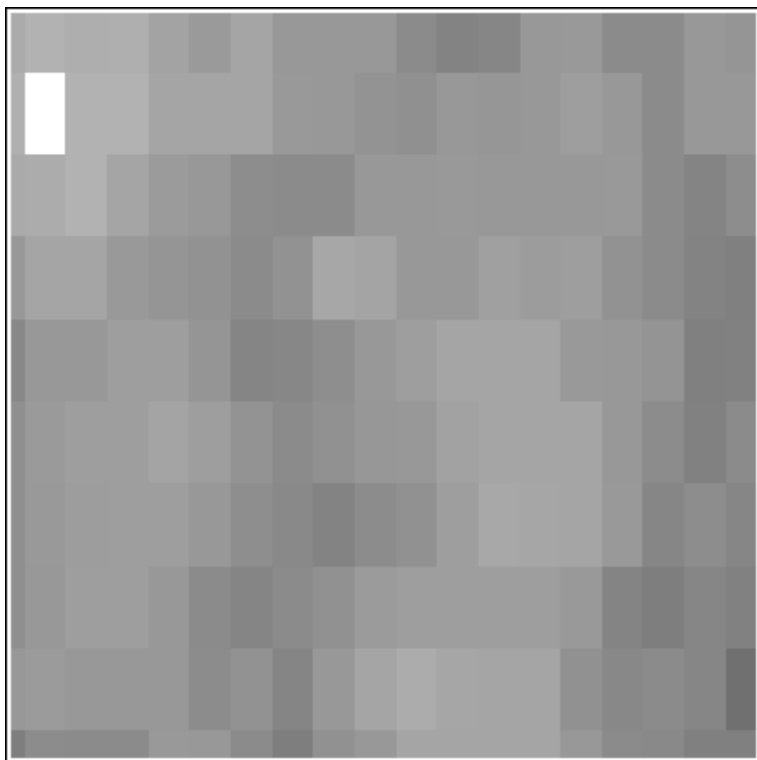


Рис. 2

2.2. Алгоритм пространственной интерполяции при построении ЦМР

Мы будем предполагать, что цифровая контурная карта рельефа состоит из векторных примитивов двух типов – ломаных и точек. Ломаные соответствуют линиям равной высоты, точки – локальным отметкам высот. Каждому примитиву приписана z-координата – значение высоты над уровнем моря.

Модель рельефа формируется в два этапа. На первом этапе создается “пустая” матрица и выполняется растеризация векторных примитивов контурной карты. Локальная отметка высоты инициирует значение одной, содержащей ее ячейки матрицы. Ломаная раскладывается в 4-связную дискретную кривую [9]. Эта кривая обладает двумя важными свойствами. Во-первых, она содержит все ячейки, которые пересекает ломаная. Во-вторых, составляющие ячейки соприкасаются сторонами. Если в какую-то ячейку матрицы попадают

изображения двух и более примитивов контурной карты, то для нее выбирается максимальное значение высоты.

На втором этапе выполняется интерполяция значений высот в незаполненных ячейках матрицы. Для решения этой задачи воспользуемся стратегией сканирующей линии. Воображаемая вертикальная линия сканирования перемещается слева направо, пересекая столбцы матрицы. В текущем столбце поочередно обрабатываются еще не заполненные ячейки. В структуре состояния алгоритма собирается информация о высоте рельефа слева от линии сканирования, которая необходима для последующих вычислений. Фактически это значения высот в предшествующем столбце матрицы, однако, если в базе данных высоты представлены в целочисленном формате, то в структуре состояния они сохраняются в формате с плавающей точкой, что позволяет избежать накопления ошибок промежуточных вычислений. Когда линия сканирования передвинется за последний столбец матрицы, все ячейки будут заполнены значениями высот.

Для вычисления высоты в точке S, находящейся в центре еще не заполненной ячейки на линии сканирования, используется метод наискорейшего спуска [8].

Мы предполагаем, что высота рельефа является непрерывной и достаточно гладкой функцией координат на поверхности Земли. Приблизительное направление градиента функции определяется поиском по четырем направлениям – вертикальному, горизонтальному и двум диагональным. Схема поиска показана на рис. 3. Точка 1 это предшествующая S точка на линии сканирования. Точки 2, 3 и 4 соседние к S точки предыдущего столбца, уже обработанного алгоритмом и сохраненного в структуре состояния сканирующей линии. Точки 5, 6, 7 и 8 определяются как центры ближайших к S заполненных ячеек матрицы. Поиск заполненных ячеек выполняется последовательным перебором, и составляет наиболее затратную по времени фазу работы алгоритма.

В качестве направления градиента принимается то направление, по которому уклон поверхности имеет наибольшую абсолютную величину. Предположим, что это направление 2-6. Тогда высота в точке S вычисляется при помощи линейной интерполяции высот в точках 2 и 6:

$$h_s = h_2 + (h_6 - h_2) \times \rho_{2,s} / \rho_{2,6}$$

Здесь ρ - евклидово расстояние между точками.

Вблизи границ модели возникают ситуации, когда уклон не может быть определен ни по одному из направлений поиска. Например, в начальном положении линии сканирования не определены точки 2, 3 и 4, а в конечном положении – точки 6, 7 и 8. В этих случаях высота вычисляется как взвешенное среднее высот в тех точках, которые определены. Веса обратно пропорциональны расстояниям до этих точек.

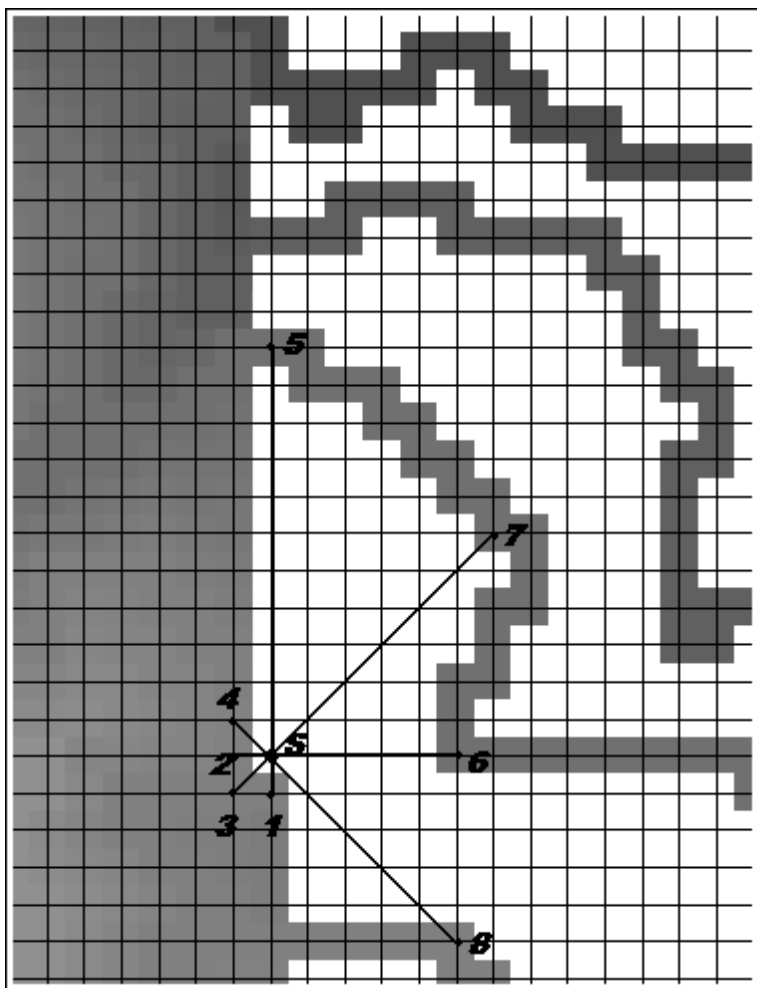


Рис. 3

Для оценки качества полученных моделей мы провели ряд тестов. Специалисту было предложено вручную построить профили для случайно выбранных трасс, используя исходную топографическую карту. Для сравнения те же профили были построены автоматически по цифровой модели рельефа. Расхождения между профилями оказались в допустимых пределах, не превышая половины интервала высот между горизонталями на исходной карте.

3. Заключение

Цифровые топографические карты и цифровые модели рельефа земной поверхности – это важнейшие компоненты базы данных для автоматизированного проектирования систем радиосвязи. Применение геоинформационных технологий позволяет использовать сложные модели распространения радиоволн для предсказания величины уровня радиосигнала в различных точках местности. Проектировщик может в интерактивном режиме проигрывать сценарии размещения узлов телекоммуникационной сети, получая результаты в наглядной графической форме с привязкой к местности.

Рассмотренные в статье подходы к построению специализированной геоинформационной базы данных были реализованы в рамках совместного проекта ИСП РАН и НИИ Спецтехники МВД РФ по разработке системы планирования радиосвязи ОВЧ-диапазона.

Литература

1. Черенкова Е.Л., Чернышев О.В. Распространение радиоволн. - М.: Радио и связь, 1984.
2. Пономарев Г.А., Куликов А.Н., Тельпуховский Е.Д. Распространение УКВ в городе. - Томск. МП "Раско", 1991.
3. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. - М.: "Финансы и статистика", 1998.
4. Kinch-James D.G. Spatial data for radio communication systems planning. – Photogrammetric Record, 14(81), April 1993.
5. Robinson G.J. The accuracy of digital elevation models derived from digitized contour data. - Photogrammetric Record, 14(83), April 1994.
6. Ушаков А.Н. Алгоритм восстановления поверхности на ЦВМ по линиям равных значений. В сб. "Вопросы кибернетики", Вып. 38, М., 1978.
7. Яковлев А.Ф. Метод граничных сетей для представления и обработки географической информации в ЭВМ. – М.: Вычислительный центр АН СССР, 1982.
8. Leberl F.W., Olson D. Raster scanning for operational digitizing of graphical data. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 48, No. 4, April 1982.
9. Дж. Фоли, А. Вэн Дэм. Основы интерактивной машинной графики. – М.: "Мир", 1985.