

УДК 621.371.029

Г. П. КУЛЕМИН, Е.В. ТАРНАВСКИЙ

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТЫ ПОМЕХ ОТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ РЛС ММД ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

Представлен метод получения карт радиолокационных помех от земной поверхности в частотном диапазоне 3...100 ГГц. С помощью которого строятся карты помех с учетом рельефа местности и подстилающей растительности, что позволяет получить хорошее соответствие модели помех реальным измерениям. Проанализированы источники исходных данных для модели и описаны методы, с помощью которых были получены исходные данные для моделирования. Кратко описаны принцип действия и области применения в модели специально разработанной нейроразобной структуры (дерева укрупнения).

моделирование, эффективная поверхность рассеивания, карта помех, слой, нейроструктура

Введение

Обнаружение низколетящих целей и подавление помех, созданных обратным рассеянием электромагнитного поля от земной поверхности, связано с многочисленными трудностями [1-3]. Основная - это то, что эффективная отражающая поверхность (ЭПР) земли сопоставима с ЭПР цели или больше нее. Кроме того, обратное рассеяние от неоднородного ландшафта приводит к большому динамическому диапазону изменения удельной ЭПР, поэтому модели помехи, разработанные для однородного ландшафта, очень ограничены и не дают полного представления о распределении помехи по дальности и азимуту.

Учитывая, что радиолокационные станции обнаружения таких объектов работают на частотах выше 3 ГГц, при построении карт радиовидимости для заданного рельефа возможно применение законов геометрической оптики к распространению радиоволн.

Наибольший интерес представляет моделирование помех, созданных отражениями от земли, для наземных РЛС, расположенных на высоте менее 100 м над поверхностью земли и радиусом действия порядка 5-10 км, поскольку в таких системах уровень помех значительно превышает собственные

шумы приемника.

Для построения карт радиолокационных помех требуется достаточно большой объем исходных данных, среди которых важное место занимают топографические данные и модели помех для однородных участков земной поверхности. Достаточно большой объем топографических данных в настоящее время практически не используется для моделирования, хотя могут быть использованы различные исходные данные: DTED (Digital Terrain Elevation Data)[3], цифровые многослойные карты, цифровые или обычные топографические карты и т.д.

В качестве модели помех от однородных участков поверхности в Институте радиофизики и электроники НАН Украины был разработан пакет программ RadarMap. С помощью этого пакета программ возможно моделирование карты удельных ЭПР помех σ^0 от земной поверхности определенного типа, зависящего от типа растительности, сезона и т.п., и определение характеристик рассеянного сигнала в заданной точке поверхности, а также имеется ряд дополнительных функций, упрощающих процесс моделирования и обработки исходных данных.

Целью настоящей работы является разработка методов построения карт радиолокационных помех

от земной поверхности, учитывающих особенности рельефа и наличие растительного покрова.

1. Особенности моделирования

Помеховый сигнал от земной поверхности определяется, прежде всего, типом растительного покрова, углом скольжения и рабочей частотой РЛС. Наиболее важной характеристикой для вычисления помехового сигнала является удельная ЭПР земли.

Построение универсальной модели помехи от земной поверхности в диапазоне СВЧ проблематично из-за многообразия типов земной поверхности. В работе [1] представлена эмпирическая модель для определения удельной ЭПР земли, в которой выделено восемь типов поверхности. На основании анализа экспериментальных данных исследований в диапазоне частот 3...100 ГГц и углов скольжения меньше 45 градусов получена эмпирическая формула для удельной ЭПР:

$$\sigma^{\circ} = A_1 + A_2 \lg \frac{\psi}{20} + A_3 \lg \frac{f}{10}, \quad (1)$$

где f - частота в ГГц, ψ - угол скольжения в градусах, A_1, A_2, A_3 - коэффициенты для различных типов земной поверхности (представлены в таблице).

Для большинства задач достаточно приведения различных участков к типам, описанным в таблице:

Таблица

Типы поверхностей

Тип поверхности	A_1	A_2	A_3
Бетон	-49	32	20
Пашня	-37	18	15
Снег	-34	25	15
Лиственный и хвойный лес летом	-20	10	6
Лиственный лес зимой	-40	10	6
Луг с травой более 0.5 м	-21	10	6
Луг с травой менее 0.5 м	-(25-30)	10	6
Урбанизированные территории (дома, строения)	-8.5	5	3

2. Особенности исходных данных для моделирования

Каждый вид данных в разработанной модели представляется в виде слоя, который привязывается только к геокоординатам; это позволяет использовать данные различного масштаба. Структура слоя позволяет представлять в виде слоя любые исходные данные (рельеф, погодные условия, подстилающую поверхность и т.д.). В общем виде структура слоя показана на рис. 1. Имеется достаточно большой банк данных векторных карт (карты изолиний и топографические карты). Если использование векторных карт, описывающих рельеф поверхности, целесообразно, то топографические карты могут быть использованы лишь в общих случаях из-за их неточностей и быстрых изменений, вызванных деятельностью человека.

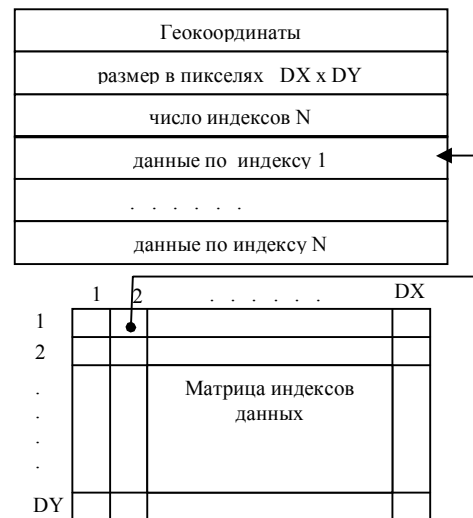


Рис. 1. Общая структура слоя

Для более точного соответствия модели реальности, совместим рельеф местности из одних источников (крупномасштабные векторные карты) и карты растительности, полученные из других источников (космические или аэрофотоснимки). Структура слоя (см. рис.1) позволяет совмещать исходные данные только по координатам, независимо от масштаба. Для выделения объектов земной поверхности (текстуры участков) и приведения их к восьми стандартным типам поверхности (см. таблицу) разрабо-

тана специальная нейроструктура - дерево укрупнения. Использование этой структуры может максимально минимизировать зависимость погрешности модели от исходных данных, стоимость обработки исходных данных и увеличить оперативность построения модели.

Для распознавания образов с большой размерностью вектора характеристик был разработан метод дерева укрупнения, который применим к широкому классу задач. Принципы функционирования данного метода подробно описаны в [4], и здесь мы не будем останавливаться на его работе.

Отметим лишь некоторые особенности, присущие данному методу:

- 1) характеристики образа изоморфны;
- 2) число характеристик образа произвольно и увеличивается при продвижении вглубь структуры (образы одного уровня уточняют образы предыдущего);
- 3) образы могут иметь метки определенных классов (сразу может выполняться классификация);
- 4) структура дерева однозначно описывается топологически с помощью функций ρ , Δ , Δ_{lm} ;
- 5) просто описываются взаимодействия нескольких структур.

Здесь функция ρ - евклидово расстояние между любыми двумя характеристиками образов (например, расстояние между точками на плоскости).

Функция Δ - мера различия между двумя образами, которая принимает значения от 0 (образ сравнивается с собой) до 1 (максимальное различие образов). Функцию Δ можно трактовать как расстояние в пространстве признаков объектов и в соответствии с ней вычислять вероятность распознавания образа.

Функция Δ_{lm} является внутренней функцией структуры и определяет максимальный коэффициент разветвления и чувствительность дерева. Она является важной характеристикой структуры, так

как от нее зависит качество функционирования и обучения.

Структура дерева и эффективность его использования зависят от последовательности его обучения, обычно число операций над образами дерева - порядка $\log K$, где K - число образов в обучающей выборке. Свойства 1 и 2 обуславливают способность структуры классифицировать образы при недостатке исходной информации.

Если невозможно однозначно построить разделяющую поверхность для классов образов сразу, то можно использовать свойство 5 и построить несколько взаимосвязанных структур. Это позволяет анализировать образы уже не по физическим характеристикам (цвету и координатам пикселей), а по более сложным характеристикам (кускам линий, регионов, вспомогательных объектов и т.д.). Чем больше структур соединено, тем выше уровень абстракции анализа образа и, соответственно, качество классификации.

Структура подобно нейросети реагирует на набор входных данных, получая на выходе набор вероятных классов образов и в общем виде может быть представлена, как показано на рис. 2. Деление на уровни - логическое, одно дерево укрупнения может выполнять функции всех уровней, и каждый уровень может состоять из нескольких деревьев.

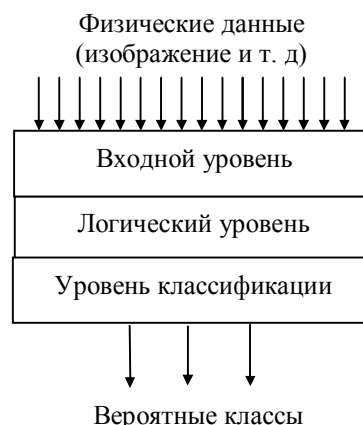
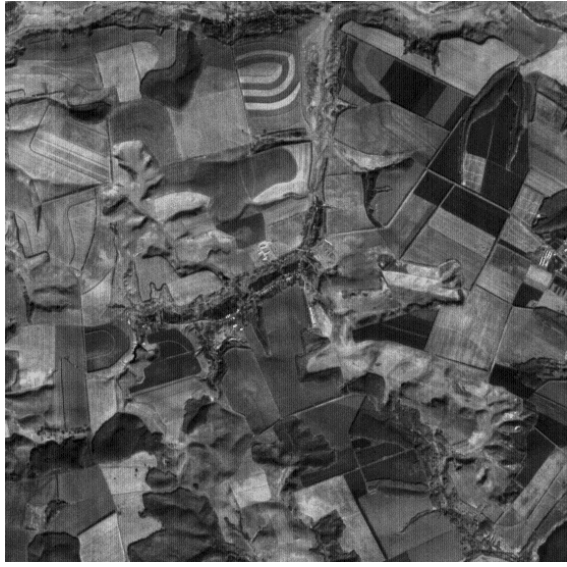


Рис. 2. Уровни нейроструктуры

Пример классификации (согласно табл. 1) объектов со спутниковой фотографии с помощью одной

структуры дерева укрупнения приведен на рис. 3. Внутренние водоемы классифицируются как квази-гладкие поверхности. Входными (физическими) данными являются цвет и текстура изображения, а выходными данными (классами) - типы поверхностей земли для моделирования (см. таблицу). Выполняется также привязка к геокоординатам со всеми необходимыми преобразованиями.



а



■ - РЕКА	■ - СТРОЕНИЯ	■ - ТРАВА >0,5
■ - ЛЕС	■ - ТРАВА <0,5м	■ - ПАШНЯ

б

Рис. 3. Классификация поверхностей:
а - исходные данные (космическая съемка);
б - классифицированные данные

Характерными особенностями данной модели являются сильная зависимость удельной ЭПР от

углов наклона земной поверхности и небольшие размеры участков в пределах прямой видимости (порядка 5-10 км).

Для восстановления поверхности используются различные исходные данные: стереоснимки земной поверхности, данные, полученные с помощью GPS, цифровые векторные карты.

Анализ показал, что метод восстановления поверхности по стереоснимкам либо не всегда возможен, либо дает неприемлемую для моделирования погрешность (порядка 20 м).

Основным методом для восстановления поверхности по опорным точкам или векторным картам (изолиниям) является метод триангуляции Делоне [5], который дает приемлемую погрешность по высотам, но в стыках треугольников проявляется большая погрешность по углам наклона. Эта погрешность, а также отсутствие "вершин" будет значительно искажать модель (рис. 4).

Поэтому необходим метод, который по погрешности восстановления высот был бы сопоставим с триангуляцией Делоне, а по погрешностям наклона углов поверхности его превосходил.

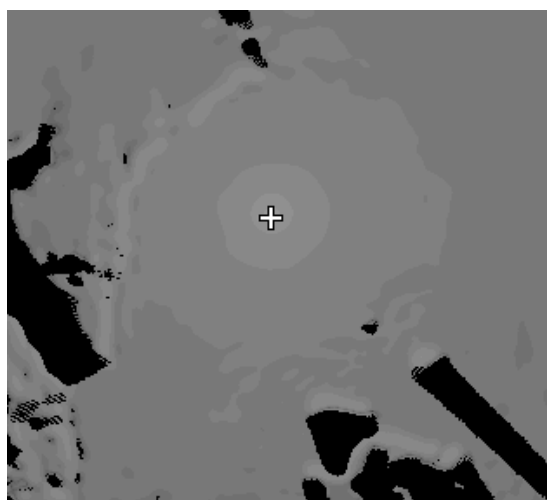
Этого сочетания характеристик можно добиться, восстанавливая рельеф с помощью гладких функций – сплайнов [6]. Если с восстановлением рельефа по отдельным опорным точкам (GPS) проблем нет, то при использовании изолиний возникают трудности в выборе точек для построения 3D-сплайна. Решением этой проблемы является использование средневзвешенного значения от нескольких 2D-сплайнов в некоторой окрестности точки. Этот метод позволяет точно выбирать опорные точки, а погрешность при вычислении высоты не превышает 10% от высоты, вычисленной с помощью 3D-сплайна. При вычислении высоты точек с помощью этого метода получается неоднородная поверхность (рис. 5).

Неоднородность возрастает с увеличением расстояния от изолинии, поэтому применялась неоднородная гауссова фильтрация [7], в которой при уда-

лении от изолинии возрастает глубина сглаживания. Для устранения возможных погрешностей восстановления поверхности с помощью сплайнов добавлены некоторые вспомогательные операции. Обобщенная последовательность операций восстановления рельефа приведена на рис. 6.



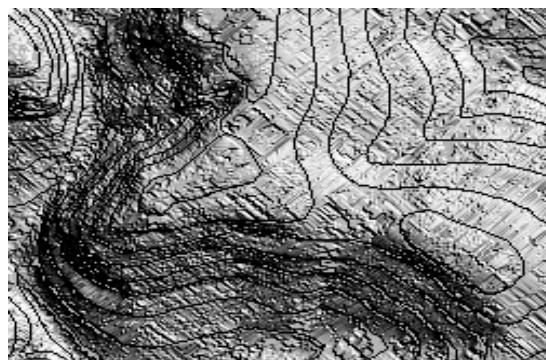
а



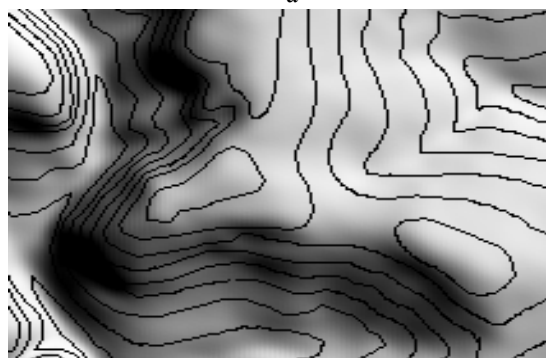
б

Рис. 4. Погрешности модели:
а - модель для поверхности, восстановленной методом триангуляции Делоне;
б - модель для реальной поверхности

Описанный метод был реализован в пакете программ RadarMap и дает погрешность порядка 6-10% от дискретности опорных точек независимо от характеристик рельефа, в то время как триангуляция Делоне обеспечивает ошибки порядка 10-20%.



а



б

Рис. 5. Восстановление рельефа:
а - восстановленный рельеф без сглаживания в градиентах; б - полностью восстановленный рельеф

3. Использование нейрподобной структуры для коррекции модели

Если имеются экспериментальные данные для участков земной поверхности при работе некоторой РЛС, то модель можно скорректировать с помощью дерева укрупнения (ДУ), учитывающего параметры данной РЛС. Использование ДУ дает следующие преимущества:

- определение удельной ЭПР в точке по некоторой ее окрестности;
- возможность построения точной модели для пространственно протяженных объектов (линий электропередач, железных дорог, автомагистралей);
- высокая точность определения удельной ЭПР;
- возможность сбора и обобщения большого объема экспериментальных данных.

К недостаткам следует отнести то, что структура может функционировать только в рамках экспери-

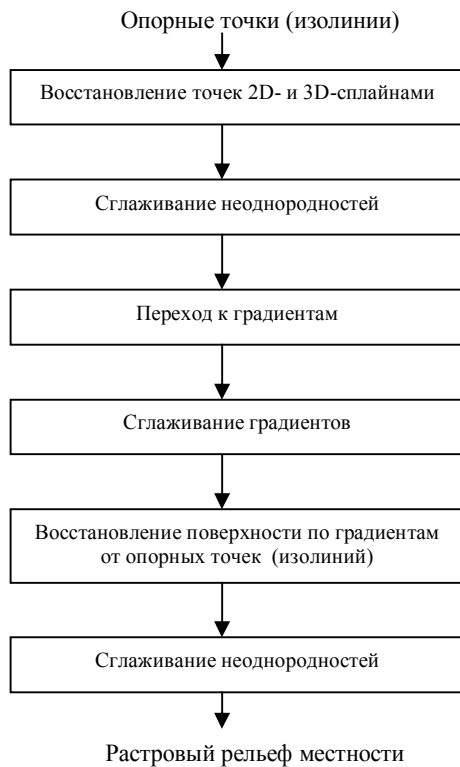


Рис. 6. Последовательность восстановления рельефа

ментальных данных, на которые она обучалась. Поэтому целесообразно строить модель по формуле (1) и выполнять ее коррекцию с помощью дерева укрупнения по экспериментальным данным для локальных участков земной поверхности, имеющимся в базе знаний. Этапы моделирования с использованием ДУ показаны на рис. 7.

4. Результаты моделирования

Моделирование позволяет определить оптимальные положение, высоту размещения и диаграмму направленности РЛС, а также требуемые характеристики РЛС для обнаружения цели с заданной траекторией полета. Карта помех на рис. 8 была получена с помощью пакета программ RadarMap.

Моделирование производилось для различных рельефов местности. В качестве примера для моделирования холмистой местности был взят участок территории Харьковской области размером 12x12 км². Рельеф был получен путем восстановле-

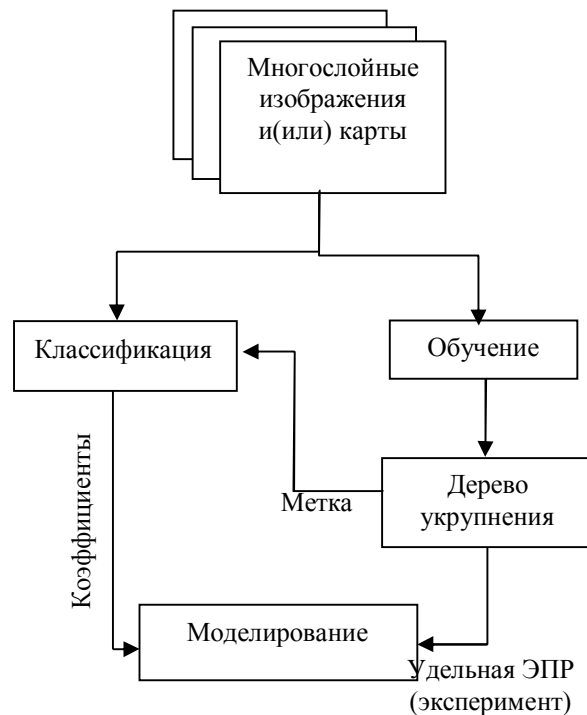


Рис. 7. Схема моделирования

ния из изолиний пп. 2 с дискретностью 2.5-5 м, полученных из бумажных носителей, максимальная высота составляет 160 м, минимальная – 90 м. Растительные покровы были получены из космической фотографии того же участка местности (см. рис. 3) с помощью использования одноуровневого дерева укрупнения. В качестве примера горной местности был взят участок территории Ивано-Франковской области таких же размеров с дискретностью изолиний 40 м. Максимальная высота – 1100 м, минимальная – 500 м.

Наиболее интересные результаты получены для равнинной и холмистой местностей (рис. 8,а), для горной местности модель характеризуется значительными затенениями (рис. 8,б), которые мало зависят от высоты РЛС примерно до высот 1500-2000 м.

Результаты моделирования для участка местности Харьковской области при высоте РЛС 20 м приведены на рис. 8,а,в. Анализ показал, что расположение РЛС на высоте менее 50 м, приводит к появлению больших участков затенения. В то же время для целей, летящих на высотах, больших 50 м, высо-

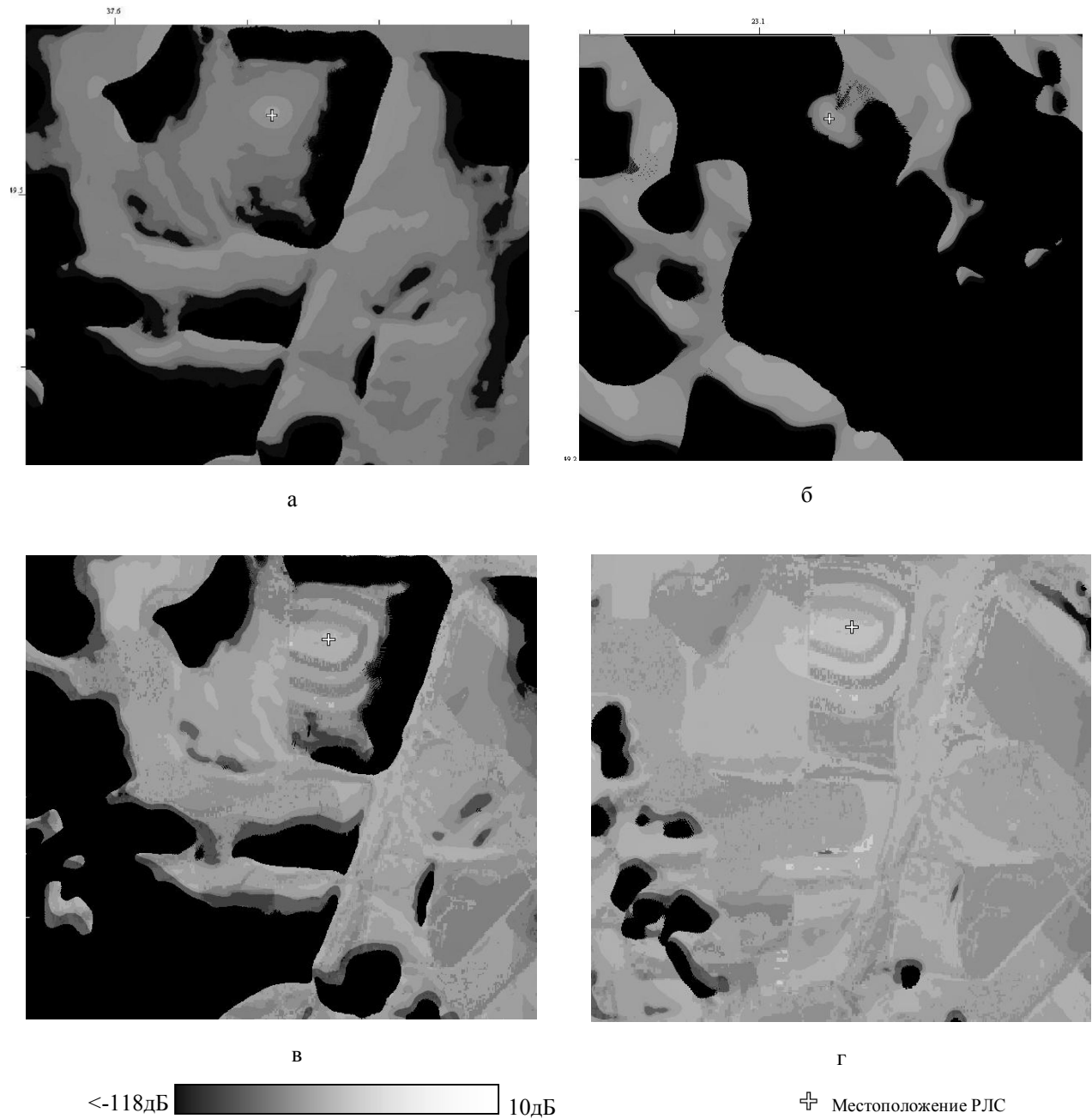


Рис. 8. Результаты моделирования σ^0 с помощью программы RADARMAP:
 а - холмистая местность без учета растительности, $H_{\text{РЛС}} = 20$ м;
 б - горная местность без учета растительности, $H_{\text{РЛС}} = 20$ м;
 в - холмистая местность с учетом растительности, $H_{\text{РЛС}} = 20$ м;
 г - холмистая местность с учетом растительности, $H_{\text{РЛС}} = 200$ м

та расположения РЛС практически не имеет значения.

Качество моделирования сильно зависит от качества исходных данных. Использование для определения подстилающей растительности спутниковых или фотоизображений поверхности позволяет полу-

чить хорошее качество модели для рельефа, восстановленного по изолиниям (рис. 8,в). Это связано с разным временем изменения рельефа и подстилающей поверхности вследствие действий человека и позволяет значительно упростить получение исходных данных. Сравнительный анализ модели без уче-

та растительности (рис. 8,а) и модели с учетом растительных покровов (рис. 8,б) показал значительное различие моделей для гомогенных и реальных поверхностей. При увеличении высоты РЛС до 200 м (бортовая РЛС) участки затенения для холмистой местности практически исчезают и увеличивается удельная ЭПР земной поверхности (рис. 8,г).

Заключение

Описан метод получения карты радиолокационных помех. Карта строится с учетом локальных углов наклона земной поверхности, рельефа и растительности. Рассмотрены особенности и методы получения исходных данных и возможные погрешности.

Для улучшения качества исходных данных и модели используется нейроструктура - дерево укрупнения. Продемонстрирован пример построения карты модели помех с помощью пакета программ "RADAR MAP".

Литература

1. Кулемин Г.П., Разказовский В.Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами. – К.: Наук. думка, 1987. – 230 с.

2. Barton D.K., Ward H.R. Handbook of radar measurement // Prentice – Hall, Inc., N.J. - 1969. - P. 392.

3. Bellingsley J.B. Low-angle radar clutter: measurements and empirical models // William Andrew Publishing. - 2002.

4. Тарнавский Е.В. Метод дерева укрупнения для распознавания образов // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ. – 1998. – Вып. 7. – С. 118–120.

5. Пономаренко Н.Н., Лукин В.В., Зеленский А.А. Итеративная процедура построения цифровой модели рельефа по карте изолиний с использованием дискретного косинусного преобразования и гистограммной фильтрации// Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ.– 2000. – Вып. 20. – С. 5 – 12.

6. ДеБор К. Практическое руководство по сплайнам : Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.

7. Schowengerdt R.A. Remote sensing. Models and methods for image processing // Academic Press, Tucson, Arizona, 1997.

Поступила в редакцию: 15.01.04

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук В.К. Иванов, ИРЭ НАН Украины, г. Харьков; д-р техн. наук, проф. А.А. Зеленский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков