

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИООТРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ СПУТНИКОВОГО ЗЕМЛЕОБЗОРА

Андреев В.Г., д.т.н., доцент, профессор кафедры РТС РГРТУ, e-mail: andrejev.v.g@rsreu.ru;
Белокуров В.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры РТС РГРТУ, belokurov.v.a@rsreu.ru;
Кагаленко М.Б., к.т.н., доцент кафедры РТС РГРТУ, e-mail: kagalenko.m.b@rsreu.ru;
Кошелев В.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РТС РГРТУ, e-mail: koshelev.v.i@rsreu.ru;
Чёрный А.Н., с.н.с., к.в.н., НИИ КС им. А.А. Максимова – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»

MODELING OF RADIO REFLECTIONS FOR SATELLITE SURVEY SYSTEMS

Andrejev V.G., Belokurov V.A., Kagalenko M.B., Koshelev V.I., Chyorny A.N.

A method is proposed for constructing a model of radar reflection from the Earth's surface using a digital map of the area. Reference radio images of the underlying surface can be used in problems of identification, monitoring and detection of objects. The method of forming a detailed radar image of the earth's surface is based on the use of a three-dimensional digital topographic map of the area and the characteristics of radio wave scattering by various types of surfaces and objects. Based on a comparison of the developed reflection model and a real radio image, the possibility of detecting and classifying ground stationary objects against the background of reflections from the underlying surface is shown. The gain μ_1/μ_2 in the signal-to-background ratio was estimated compared to the known method, which does not take into account cartographic information, which amounted (for the given example) to 7.31 dB. The purpose of the article is the construction and optimization of radio reflection models for the problems of radar satellite survey.

Key words: SAR, SAR image, satellite, image modeling, RADAR.

Ключевые слова РСА, радиолокационное изображение, искусственный спутник Земли, моделирование изображений,

Введение и постановка задачи

Проблема формирования и детального анализа радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности остается актуальной [1]. Можно выделить два типа спутниковых систем обзора Земли: оптические и радиолокационные. Известные [2] недостатки формирования изображения оптическими системами заключаются в их высокой чувствительности к погодным условиям и освещенности. Поэтому среди источников информации летательных или космических аппаратов важную роль играют бортовые радиолокационные системы (БРЛС), обладающие высокой степенью инвариантности к погодным, климатическим и временным условиям функционирования. Несмотря на то, что БРЛС уступают оптическим системам по детальности изображения, использование доплеровской фильтрации позволяет обнаруживать и различать подвижные объекты. Однако, обычно при этом не используется информация с выходов доплеровских каналов, соответствующих направлению главного луча (ГЛ) синтезированной диаграммы направленности антенны (ДНА), ввиду большой мощности пассивной помехи (отражений от подстилающей поверхности). Это не позволяет обнаруживать неподвижные объекты на фоне пассивных помех. Вместе с тем, как будет показано ниже, возможна разработка методики формирования детального радиолокационного изображения на основе заранее известной цифровой топографической карты местности для обнаружения

Предложен метод построения модели радиолокационного отражения от поверхности Земли по цифровой карте местности. Эталонные радиоизображения подстилающей поверхности могут использоваться в задачах идентификации, мониторинга и обнаружения объектов. Метод формирования детального радиолокационного изображения поверхности земли основан на использовании трехмерной цифровой топографической карты местности и характеристики рассеяния радиоволн различными типами поверхностей и объектов. На основе сопоставления разработанной модели отражений и реального радиоизображения показана возможность обнаружения и классификации наземных неподвижных объектов на фоне отражений от подстилающей поверхности. Оценен выигрыш μ_1/μ_2 в отношениях сигнал-фон по сравнению с известным методом, не учитывающим картографическую информацию, который составил (для приведенного примера) 7,31 дБ. Цель статьи – построение и оптимизация моделей радиоотражений для задач радиолокационного спутникового землеобзора.

неподвижных объектов с помощью когерентно-импульсной БРЛС.

Получение радиолокационных изображений поверхности Земли по цифровой карте местности

Известны [3] методики получения радиолокационных изображений подстилающей поверхности и обнаружения объектов на ее фоне. Однако, не обладая априорной информацией об ожидаемом изображении, возможно осуществлять обнаружение лишь тех объектов, параметры отражений от которых отличны от фона. Аппаратная реализация подобных методов осложнена тем, что известные методики предполагают большое время

накопления сигнала или наличие нескольких разнесенных приемных каналов [4, 5, 6, 7]. Поэтому на практике для обнаружения неподвижных объектов используется методика, базирующаяся на сравнении эталонного и получаемого РЛИ. При этом эталонное изображение формируется заранее локационными методами путем создания матрицы ячеек, размеры которых обусловлены отражающей площадкой (сечение синтезированной ДНА земной поверхностью). Каждой ячейке ставится в соответствие эффективная площадь рассеивания (ЭПР). Формируемая таким образом карта записывается в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) бортового вычислительного комплекса и, являясь двумерной матрицей [8, 9], не требует больших объемов памяти, т.к. при достаточно большой высоте носителя РЛС над рельефом допустимо не учитывать изменения геометрии областей затенения по мере движения носителя РЛС.

Предлагаемая методика получения радиолокационных изображений подстилающей поверхности не использует карту ЭПР, а базируется на цифровой топографической карте (ЦТК) [10], дополненной коэффициентами отражения сверхвысокочастотной энергии на известной несущей частоте, что даёт возможность оценить ЭПР участка земной поверхности при произвольных углах ГЛ относительно неё [11]. ЦТК может быть сформирована на основе данных геоинформационных систем [12], например при помощи системы ГИС-95 [13].

Величины коэффициентов отражения оцениваются на основе априорно известной информации о составе поверхности или измеряется скатеометрами – специализированными БРЛС, предназначенными для измерения характеристик рассеяния радиоволн заданного диапазона различными видами земной поверхности. Такими характеристиками являются диаграммы отражения – зависимости параметров матрицы рассеяния от угла падения облучающей волны или угла визирования РЛС [11]. Используемая ЦТК представляет собой тензор \mathfrak{Z} третьей валентности [14], каждый элемент матричного (двумерного) представления которого есть четырехкомпонентный вектор $\mathbf{t}_{j,k}$ признаков фрагмента поверхности, $j = 0, 1, \dots, N_Y, k = 0, 1, \dots, N_X$:

$$\mathfrak{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{0,0} & \mathbf{t}_{0,1} & \dots & \mathbf{t}_{0,k} & \dots & \mathbf{t}_{0,N_X} \\ \mathbf{t}_{1,0} & \mathbf{t}_{1,1} & \dots & \mathbf{t}_{1,k} & \dots & \mathbf{t}_{1,N_X} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{t}_{j,0} & \mathbf{t}_{j,1} & \dots & \mathbf{t}_{j,k} & \dots & \mathbf{t}_{j,N_X} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{t}_{N_Y,0} & \mathbf{t}_{N_Y,1} & \dots & \mathbf{t}_{N_Y,k} & \dots & \mathbf{t}_{N_Y,N_X} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где N_X – число дискретных отсчётов по условной географической координате X (горизонтальной); N_Y – число дискретных отсчётов по условной географической координате Y (вертикальной). Подобное представление соответствует принятой в настоящее время модели рельефа – DTEM (Digital Terrain Elevation Data), что облегчает преобразование картографической информации к виду (1) [15].

Вектор $\mathbf{t}_{j,k}$, содержащий информацию о характери-

сти как j -й, k -й точке поверхности, состоит из четырёх компонент и может быть представлен в следующем виде:

$$\mathbf{t}_{j,k} = \begin{bmatrix} x + kd \\ y + jd \\ z_{j,k} \\ \vartheta_{j,k} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где d – шаг цифровой карты (задаётся в погонных единицах); x, y – условные декартовы географические координаты начальной точки рассматриваемой ЦТК по осям X, Y (соответственно); $z_{j,k}$ – высота (altitude) над уровнем моря j -го, k -го фрагмента поверхности; $\vartheta_{j,k}$ – коэффициент отражения СВЧ излучения, который может быть представлен как удельная эффективная поверхность рассеяния.

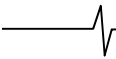
В качестве начальной точки с координатами (x, y) выбрана крайняя левая верхняя точка рассматриваемого картографированного участка местности.

С учётом сделанных в (1), (2) обозначений, тензор \mathfrak{Z} цифровой карты местности принимает следующий вид:

$$\mathfrak{Z} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z_{0,0} \\ \vartheta_{0,0} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} x+d \\ y \\ z_{0,1} \\ \vartheta_{0,1} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} x+kd \\ y \\ z_{0,k} \\ \vartheta_{0,k} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} x+N_X d \\ y \\ z_{0,N_X} \\ \vartheta_{0,N_X} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x \\ y+d \\ z_{1,0} \\ \vartheta_{1,0} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} x+d \\ y+d \\ z_{1,1} \\ \vartheta_{1,1} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} x+kd \\ y+d \\ z_{1,k} \\ \vartheta_{1,k} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} x+N_X d \\ y+d \\ z_{1,N_X} \\ \vartheta_{1,N_X} \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} x \\ y+jd \\ z_{j,0} \\ \vartheta_{j,0} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} x+d \\ y+jd \\ z_{j,1} \\ \vartheta_{j,1} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} x+kd \\ y+jd \\ z_{j,k} \\ \vartheta_{j,k} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} x+N_X d \\ y+jd \\ z_{j,N_X} \\ \vartheta_{j,N_X} \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} x \\ y+N_Y d \\ z_{N_Y,0} \\ \vartheta_{N_Y,0} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} x+d \\ y+N_Y d \\ z_{N_Y,1} \\ \vartheta_{N_Y,1} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} x+kd \\ y+N_Y d \\ z_{N_Y,k} \\ \vartheta_{N_Y,k} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} x+N_X d \\ y+N_Y d \\ z_{N_Y,N_X} \\ \vartheta_{N_Y,N_X} \end{bmatrix} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где координаты (x, y) начальной точки могут быть приняты нулевыми.

Для использования цифровой карты местности с целью выделения на ней неподвижных или малоподвижных объектов удобно интерпретировать тензор \mathfrak{Z} как послынное наложение четырех $(N_X+1) \times (N_Y+1)$ -мерных матриц: матрицы \mathbf{X} , компоненты которой $(x+kd)$, $k = 0, 1, \dots, N_X$ определяют координаты на оси X, устремленной с юга на север; матрицы \mathbf{Y} , компоненты которой $(y+jd)$, $k = 0, 1, \dots, N_Y$ определяют координаты на оси Y, устремленной с запада на восток; матрицы \mathbf{Z} , компоненты которой $z_{j,k}$ характеризуют абсолютную высоту j -го, k -го элемента карты; Θ с коэффициентами $\vartheta_{j,k}$, соответствующими удельной ЭПР фрагмента поверхности [11].



Следует отметить, что с уменьшением d увеличивается плотность заполнения пространства карты. Выбор величины d производится исходя из компромисса между детальностью и требуемых для её обеспечения объёмов хранимой информации и вычислительных затрат для её обработки.

Увеличение плотности заполнения делает модель поверхности Земли ближе к реальной, т.е. стремящейся к непрерывной. Вместе с тем, дискретный характер цифровой обработки эхо-сигналов и их интерпретация в форме двумерной матрицы яркостей позволяет ограничить требования к модели поверхности минимально достаточным разрешением. Однако надо учитывать, что с увеличением d сильнее проявляется эффект взаимопроникновения сегментов модели поверхности, что порождает нечеткие границы наземных объектов.

Простой и достаточно адекватный способ математического описания поверхности основывается на триангуляции, при которой каждый элемент поверхности аппроксимируется треугольником, построенным по трем точкам карты. При расчете эталонного РЛИ используется центр треугольника и коэффициент его отражения, усредненный по трем образующим точкам (вершинам). Таким образом, РЛИ формируется как совокупность точечных фрагментов определенной яркости. Каждому i -му фрагменту (треугольнику) ставится в соответствие ряд определяющих его признаков, позволяющих определить его координаты «азимут-дальность».

В рамках данной работы осуществлен синтез ландшафта (поверхности Земли по маршруту полета носителя РЛС) по цифровой карте местности на основе метода полигональных поверхностей, который предполагает представление ландшафта в виде набора многоугольников в пространстве. В их качестве предложено использовать треугольники, т.е. реализовать триангуляционное описание поверхности [16, 17]. При этом каждый её элемент аппроксимируется треугольником, построенным по трем точкам ЦТК.

Топология полученной при этом сетки описывается следующим образом:

1) объектами сетки являются вершины, ребра и треугольники (задаваемые тремя вершинами или тремя ребрами);

2) любая вершина обладает набором координат (условных географических и/или сферических, связанных с РЛС);

3) для любого треугольника существует не более одного другого треугольника, инцидентного для первого по фиксированному ребру.

При триангуляции качество получаемой поверхности и синтезируемое на её основе РЛИ тем лучше, чем больше треугольников используется. В данной работе для снижения негативных эффектов, вызванных большим шагом d карты, предусмотрена процедура квази-разрешения [18]. При расчете эталонного РЛИ используется центр треугольника и коэффициент его отражения, усредненный по трем образующим точкам (вершинам). Таким образом, РЛИ формируется как совокупность точечных фрагментов определенной яркости. Каждому i -у фрагменту (треугольнику) ставится в соот-

ветствие ряд определяющих его признаков, позволяющих сформировать его координаты (азимут, дальность, доплеровская частота), необходимые для формирования спектрально-дальностного портрета и РЛИ на его основе.

Процедура моделирования РЛИ предусматривает использование не только модели диаграммы направленности антенны (ДНА), но и её реальной формы, задаваемой экспериментально полученным массивом данных, что позволяет более точно учитывать пространственный коэффициент направленного действия при оценивании отраженной от поверхности мощности на входе приемного устройства РЛС. Результатом обработки информации, содержащейся в тензоре \mathfrak{Z} , является РЛИ, каждый элемент которого представляет собой спектральную плотность мощности отраженного от подстилающей поверхности сигнала в пределах кольца дальности.

Энергия принимаемого отражённого от i -го фрагмента поверхности сигнала зависит от ряда параметров: пространственного положения фрагмента относительно носителя и ДНА; коэффициента отражения; площади и угла между нормалью к поверхности фрагмента и направлением на носитель РЛС, что определяет эквивалентную площадь фрагмента.

Рассмотрим вычисление трёх основных параметров.

1. Доплеровская составляющая скорости отраженного сигнала определяется положением i -го треугольника относительно вектора V_n путевой скорости носителя. Скорость V_i i -го треугольника относительно РЛС вычисляется по формуле:

$$V_i = V_n \cos \alpha_i \cos \beta_i \quad (4)$$

где α_i , β_i – соответственно азимутальная и угломестная координаты центра i -го треугольника в системе координат, связанной с носителем. Исходя из найденных для каждого фрагмента скоростей V_i , рассчитывается соответствующий номер l_i доплеровского канала для каждого фрагмента:

$$l_i = \text{floor} \left(\frac{V_n \cdot \cos \gamma_i}{\delta V} \right), \quad (5)$$

где δV – разрешение по скорости, определяемое шириной доплеровского канала; γ_i – угол, образующий конус равных доплеровских скоростей [19, 20]; функция $\text{floor}(\bullet)$ находит наименьшее целое. В результате расчётов по выражению (5) формируется вектор $\mathbf{L} = [l_i]$, элементы l_i которого принимают целочисленные значения в интервале $[0; L-1]$, где L – число доплеровских каналов РЛС.

2. Номер строки, которому соответствует центр i -го треугольника. Присвоение номеров строк всем треугольникам имитирует стробирование по дальности.

3. Бинарный признак ζ_i наличия отражений от i -го фрагмента поверхности. Величина $\zeta_i = 0$, если соответствующий фрагмент поверхности попадает в поле радиолокационной тени. При падении зондирующей энергии на i -й фрагмент $\zeta_i = 1$. Бинарный признак используется в качестве множителя удельной ЭПР фрагмента и учитывает эффект влияния радиолокационных затенений.

Упрощенная структура алгоритма построения РЛИ может быть представлена следующим образом.

1. Ввод исходных данных: параметры движения носителя РЛС, сектор сканирования и отклонение его центра от вектора путевой скорости и т.д.

2. Загрузка формы ДНА (модельные или экспериментальные данные) и текущего участка ЦКМ.

3. Построение триангуляционной модели поверхности и вычисление характерных признаков её фрагментов (треугольников): сферические координаты относительно БРЛС, эквивалентная площадь рассеяния, коэффициент отражения, измеряемая дальность до БРЛС с учётом неоднозначности по дальности [21].

4. Расчет распределения мощности по L доплеровским каналам в каждом стробе дальности вдоль линии визирования (формирование спектрально-дальностного портрета) при каждом положении ГЛ ДНА в пространстве.

5. Построение РЛИ в заданных секторах и режимах обзора пространства. Процедуру формирования РЛИ при маловысотном полете необходимо дополнить алгоритмом построения теней, учитывающим бинарные признаки ζ_i затенения.

Подробно разработанная методика синтеза радиолокационных изображений изложена в [22, 23].

Методика обработки радиолокационных изображений

Выделив на эталонной карте опорные сегменты поверхности – радиоконтрастные области (мосты, озера, береговая линия) – можно осуществить привязку обнаруживаемых объектов и точки позиционирования носителя к географическим координатам местности [18]. Это даст возможность совместить реальное и модельное радиоизображения поверхности Земли.

Для поиска на РЛИ характерных объектов на местности, присутствующих на ЦТК, создана процедура имитации радиолокационных отражений от поверхности Земли по цифровой карте её рельефа.

Процедура состоит из 4-х этапов:

1) формирование растровой топографической карты высот и дополнение ее признаками типа поверхности;

2) создание рельефа поверхности на основе триангуляционной аппроксимации путем разбиения на элементарные фрагменты (треугольники);

3) определение свойств элементарных треугольных сегментов рельефа исходя из заданного положения носителя РЛС и рассматриваемого участка поверхности;

4) расчет мощности отражения от поверхности на основе параметров анализируемой РЛС и свойств (площадь, направление нормали, материал) элементарных фрагментов поверхности.

Расчет принимаемой относительной мощности $P_{пр}$ излучения, отраженного от заданного фрагмента, производится с использованием модифицированного уравнения дальности радиолокационного обнаружения:

$$P_{пр}(\alpha, \beta) = \frac{P_{пер} \cdot \lambda^2 \cdot G_{пер}(\alpha, \beta) \cdot G_{пр}(\alpha, \beta)}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \times$$

$$\times \vartheta(\alpha, \beta) \cdot S(\alpha, \beta),$$

где α – азимут, β – угол места центра элементарного

фрагмента (треугольника) поверхности (соответственно); $\vartheta(\alpha, \beta)$ – усредненный по элементу разрешения РЛС коэффициент отражения фрагмента; $S(\alpha, \beta)$ – эффективная площадь (с учетом угла скольжения электромагнитного излучения) фрагмента; $G_{пер}(\alpha, \beta)$ – коэффициент усиления (КУ) ДНА передатчика в анализируемом направлении; $G_{пр}(\alpha, \beta)$ – КУ ДНА приемника в анализируемом направлении с учётом синтеза апертуры; $P_{пер}$ – мощность передатчика; λ – длина волны излучаемого несущего колебания; R – наклонная дальность до центра фрагмента.

После оценки относительной мощности $P_{пр}$ отражений от фрагментов подстилающей поверхности осуществляется их сортировка в пределах разрешаемых элементов РЛС по дальности и доплеровской скорости и с учетом бинарного признака ζ_i затенений. При переходе в режим доплеровской фильтрации для каждого i -го фрагмента рассчитывается доплеровская частота F_i отражений от него, которая зависит от радиальной скорости V_i движения носителя РЛС относительно отражающего фрагмента подстилающей поверхности.

Радиолокационное изображение строится после того, как подсчитаны величины $P_{пр}$ для всех фрагментов рельефа, входящих в рассматриваемое пространство. Таким образом РЛИ формируется на основе цифровой карты местности как совокупность точечных элементов с яркостью, соответствующей величине $P_{пр}$.

Учет формы ДНА особенно важен при попадании радиоконтрастных или протяженных объектов в пространство, расположенное рядом с наблюдаемым фрагментом. Отражения от таких объектов могут просачиваться по боковым лепесткам ДНА и попадать в элемент разрешения соответствующий текущему направлению главного луча в рассматриваемом кольце дальности. Предварительное знание карты местности и координат носителя РЛС, можно при обработке сигналов учесть наличие просачиваний отражений по боковым лепесткам и компенсировать их.

При необходимости получения корреляционных свойств радиоотражений от подстилающей поверхности в текущем кольце дальности достаточно перейти с помощью обратного преобразования Винера-Хинчина плотности мощности $S(I)$, которая совпадает по форме со спектральной плотностью мощности $S(F)$, к автоковариационной функции $K(t)$:

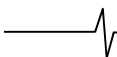
$$K(t) = F^{-1}[S(F)],$$

где t – временной интервал между отсчётами радиоотражений (импульсами в пачке) в рамках анализируемого кольца дальности; F^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье. В случае излучения импульсов с постоянным периодом T повторения величина t принимает дискретные значения:

$$t = \frac{2R}{c} + jT,$$

где $j = 0, 1, \dots, N-1$, N – число импульсов в пачке.

Информация об автоковариационной функции $K(t)$ позволяет определить параметры фильтров первичной обработки радиоотражений от наземных объектов, поступающих на фоне эхо-сигналов от Земли.



Пример радиолокационных реального (слева) и модельного (справа) изображений местности (район города Коломна Московской области с географическими координатами (55,0789°N 38,7848°E) приведен на рис. 1. Из рисунка видно, что предлагаемая методика моделирования даёт возможность адекватно отображать радиоотражения от подстилающей поверхности с известными рельефом местности и расположением крупных наземных объектов. Так, на рис. 1 видны берег реки и два моста, берега реки и складки местности.

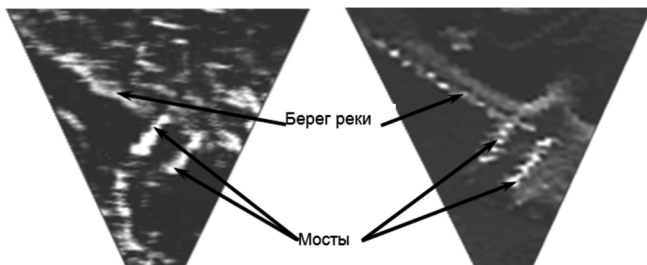


Рис. 1. Реальное (слева) и модельное (справа) радиоизображения наземных объектов

Топографическая карта лоцируемой местности приведена на рис. 2. На карте изображено слияние двух рек и пара мостов через одну из них: железнодорожный (слева) и шоссейный (справа). На радиолокационных портретах, как модельном, так и реальном, видны элементы, содержащиеся на топографической карте.



Рис. 2. Топографическая карта местности с наложенным на неё сектором радиолокационного обзора

Сопоставление радиолокационных изображений, полученных в ходе модельных и натуральных экспериментов, показало наличие их взаимного соответствия (см. рис. 1). В частности, наблюдается совпадение конфигурации модельных и реальных изображений крупных наземных объектов: русел рек, складок местности, склонов холмов и т.д. Вместе с тем, выявлена нечувствительность модели к сезонным и погодным aberrациям отражающей способности различных элементов поверхности Земли. Для обработки радиоизображений, например, для поиска и идентификации наземных объектов, в ряде случаев необходимо проводить адаптацию модели к текущей отражающей способности $\mathcal{G}_{j,k}$ различных материалов, которая может изменяться в зависимости от метеорологических условий и времени года. Характерным является измерение отражающих свойств водной поверхности в зимнее и летнее время. Открытая вода характеризуется зеркальными отражениями, а запорошенная снегом поверхность льда – диффузными.

Перспективным представляется не только поиск и идентификация объектов на поверхности Земли с целью, например, автономной навигации, но и выделение новых, не отмеченных на карте, предметов. Так, в известных методиках радиолокационного обнаружения наземных объектов предполагается либо их радиоконтрастность по отношению к фону, либо подвижность. Последнее обстоятельство даёт возможность для обнаружения подвижных объектов использовать хорошо разработанные методы доплеровской фильтрации. Однако обнаружение наземного неподвижного объекта, обладающего слабой радиоконтрастностью, затруднено.

Предлагаемое решение состоит в сопоставлении модельного и реального радиолокационных изображений для выявления новых объектов, которые отсутствуют на цифровой топографической карте местности, послужившей основой синтеза модельного радиолокационного изображения.

Отметим, что уменьшение мощности ожидаемых и моделируемых по ЦКМ отражений происходит, например, из-за выборки грунта или размещения на местности замаскированного радиопоглощающим покрытием объекта, не учтённого в карте, на основе которой происходило моделирование.

Избыточный по сравнению с моделью рост мощности радиоизлучения от малоразмерной области подстилающей поверхности может быть вызван размещением на местности искусственного радиоотражающего объекта с высоким значением ЭПР (транспортные средства, мачты линий электропередач, здания) или искусственным изменением рельефа (насыпка грунта).

Для объективной оценки эффективности обнаружения наземных объектов при помощи предложенной методики было вычислено отношение μ сигнал-фон, которое является определяющим при обнаружении объектов на фоне отражений от подстилающей поверхности:

$$M = P_s / P_b, \quad (6)$$

где P_b – усредненная мощность радиоотражений от подстилающей поверхности (фона), P_s – мощность в элементе разрешения, соответствующего положению объекта (цели) на поверхности.

Выигрыш предложенного метода оценен посредством сопоставления достигаемого при его использовании отношения μ_1 сигнал-фон с аналогичной величиной μ_2 для классического метода, в качестве которого был использован метод вычитания усредненной мощности соседних элементов разрешения РЛС из мощности анализируемого элемента разрешения.

Для приведенной цифровой топографической карты выигрыш μ_1/μ_2 для объекта типа речное судно составил:

$$\mu_1/\mu_2 = 10 \lg(382,72/71,07) \approx 7,3 \text{ дБ.}$$

Следует также отметить тот факт, что при подавлении отражений по боковым лепесткам сужается спектр обрабатываемого сигнала и, в соответствии с приоритетом, можно либо снизить требования к обесвечивающему фильтру, либо повысить точность аппроксимации спектра для повышения вероятности обнаружения объектов.

Заключение

Таким образом, предложена методика формирования радиолокационного изображения поверхности земли на основе трехмерной цифровой топографической карты местности, дополненной характеристикой рассеяния радиоволн различными видами поверхностей и объектов. Алгоритмы моделирования протестированы на различных рельефах, результаты моделирования сопоставлены с реальными радиолокационными изображениями. Сопоставление показало подобность смоделированного и реального изображений. Показана принципиальная возможность выявления новых неподвижных наземных объектов путем сопоставления реальных отражений от рельефа Земли и модельных портретов отражений от лоцируемой подстилающей поверхности. Важным применением полученных в статье модельных РЛИ является возможность их использования в качестве эталонных при анализе качества радиолограмм при разработке систем дистанционного зондирования Земли с борта летательного или космического аппарата.

Статья написана по результатам исследований, проведенных в рамках выполнения составной части (СЧ) НИР «Разработка технологии обработки целевой информации на борту космического аппарата дистанционного зондирования Земли, получаемой с использованием радаров космического базирования с синтезированной апертурой, технической и программной документации в интересах создания экспериментального образца программного комплекса для ее автоматизированной обработки» (Шифр СЧ НИР «Интеграция-СГ-3.2.8.1»).

Литература

1. Коренной А.В., Кулешов С.А. Математические модели радиои изображений объектов в системах дистанционного зондирования земной поверхности. Радиотехника. 2013. № 8. С. 60-66.
2. Аксенов О.Ю. Обнаружение объектов на изображениях при изменяющихся условиях наблюдения. Цифровая обработка сигналов. 2006. № 2. С. 40-44.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
4. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. М.: ИПРЖР, 2002. 176 с.
5. Клименко Н.Н., Занин К.А., Москатынцев И.В. Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли. Часть 1. Базовые проектные решения и пути модернизации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли оптико-электронного наблюдения. Воздушно-космическая сфера. 2020. № 2. С. 95-101. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-103-2-106-116.
6. Клименко Н.Н., Занин К.А., Москатынцев И.В. Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли. Часть 2. Особенности применения коммерческих космических аппаратов оптико-электронного наблюдения для решения задач в интересах государственных и военных потребителей. Воздушно-космическая сфера. 2020. № 3. С. 89-99.
7. Занин К.А., Клименко Н.Н. Выбор параметров орбитального построения космических систем радиолокационного наблюдения. Космонавтика и ракетостроение. 2019. № 2. С. 30-41.
8. Берлянт А.М. Математическая основа карт. Картография. М.: Аспект Пресс. 2002. 70 с.
9. Технология потоковой обработки данных ДЗЗ высокого разрешения / В.В. Еремеев, И.И. Зинина, А.Е. Кузнецов и др. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 11-18.
10. Самардак А.С. Геоинформационные системы. Владивосток: Изд-во Дальневосточного гос. ун-та, 2005. 124 с.
11. Радиолокационные методы исследования Земли / Мельник Ю.А., Зубкович С.Г., Степаненко В.Д. и др. М.: Советское радио, 1980. 264 с.
12. Злобин В.К., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. Обработка изображений в геоинформационных системах. Рязань: РГРТУ, 2008. 264 с.
13. Бугаевский Л.М., Цветков В.Я. Геоинформационные системы. М.: Наука, 2000. 222 с.
14. Дмитриенко Ю.И. Тензорное исчисление. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
15. Шеххар Ш., Чаула С. Основы пространственных баз данных: пер. с англ. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2004. 336 с.
16. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.
17. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учеб. для физ.-мат. и инж.-физ. спец. вузов. 6 изд., стер. М.: Наука, 1987. 319 с.
18. Андреев В.Г. Оптимизация алгоритмов и устройств обработки радиотехнических сигналов на основе параметрических моделей: диссертация на соискание уч. степени д-ра техн. наук по спец. 05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. Рязань, 2013. 294 с.
19. Субботин С.В., Большаков Д.Ю. Оценка мешающих отражений при облучении земной поверхности сверхширокополосным сигналом. Журнал радиоэлектроники 2007. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/win/jun07/2/text.html#e2>.
20. Матвеев А.М. Построение модели и предобработка изображения подстилающей поверхности для радиолокационных систем с доплеровским облучением луча на основе информации, получаемой о поверхности в оптическом диапазоне. Труды МАИ. 2008. №3. Режим доступа: http://www.mai.ru/projects/mai_works/articles/num3/article8/print.htm#ris1.
21. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах; Ч.1. М.: Радиотехника, 2004. 309 с.
22. Андреев В.Г., Кошелев В.И. Моделирование радиои изображений поверхности земли по цифровой карте местности. Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации; вып. 3: 3-я Международная конференция / РНТОРЭС им. А.С. Попова, Рос. Секция IEEE. М., 2009. С. 146-149. 280 с.
23. Андреев В.Г., Юкин С.А. Формирование радиолокационного изображения подстилающей поверхности по цифровой топографической карте. Вестник РГРТУ. Выпуск 21. Рязань: РГРТУ, 2007. С. 25-31.