

Программный комплекс «Геодиалог» для моделирования съемки и обработки данных аэрокосмических РСА

Б.М. Балтер, Д.Б. Балтер, В.В. Егоров, М.В. Стальная

Институт космических исследований РАН

117997 Москва, Профсоюзная, 84/32

E-mail: victor_egorov@mail.ru

Приводится описание концепции программного комплекса «Геодиалог», предназначенного для моделирования процессов мониторинга и управления состоянием природных и природно-антропогенных объектов. Отмечается, что в настоящее время производится модернизация этого комплекса, которая затронула лишь модуль, имитирующий процесс рассеяния электромагнитных волн земной поверхностью и прохождения принимаемого РСА сигнала через приемный тракт с формированием радиолокационных изображений. С помощью этого модуля производится расчет величин удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) зондируемой поверхности для различных комбинаций поляризации на прием и передачу, исследуются процедуры синтеза антенной апертуры.

Введение

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) находят все большее применение в исследовании Земли с аэрокосмических платформ. Вместе с тем при разработке новых образцов РСА и обработке данных дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей возникают проблемы, связанные с оптимизацией этих процедур, выбором параметров радаров, режимов съемки и использования получаемой информации в управлении состоянием зондируемых природных и антропогенных объектов. Однако решение этих проблем на основе проведения лишь широкомасштабных полигонных экспериментов и летных испытаний аппаратуры представляется достаточно трудоемким и дорогостоящим. И здесь весомый вклад могли бы внести методы имитационного компьютерного моделирования, которые, не исключая экспериментального подхода, позволили бы взять на себя значительную часть исследовательской нагрузки. Первой версией комплекса имитационного моделирования процедур дистанционного зондирования и управления состоянием объектов земной поверхности, разработанной в начале 90-х годов, была программа «Геодиалог» [1]. Однако на сегодняшний день эта версия программного комплекса «Геодиалог» представляется недостаточно полной и строгой. В частности, в ней отсутствуют модули имитации поляризации излучения, прохождения сигнала через приемный тракт сенсора, и, в частности, имитации процедуры синтеза антенной апертуры и других факторов. Это потребовало модернизации комплекса «Геодиалог», которая была начата с РСА-модуля. Поэтому целью настоящей работы является изложение метода симулирования изображений, получаемых с помощью бортовых РСА, работающих в широком диапазоне длин волн (от миллиметровых до метровых), на различных поляризациях для моделирования различных эффектов взаимодействия волн с зондируемыми объектами, поверхностями и средами.

Концепция программного комплекса «Геодиалог»

В ее основу положен принцип изоморфизма двух типов взаимодействующих циклов: природных (вещества/энергии) и техногенных или информационных (мониторинга/управления). Формализм описания природных циклов, может быть представлен имитационной моделью, задаваемой системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (см. также рис. 1)

$$\frac{\partial X}{\partial t} + A(X) = Z, \quad (1)$$

Здесь X - вектор-параметр, описывающий состояние зондируемого объекта или среды; A - система нелинейных дифференциальных операторов, Z — функция источника, описывающая внешнее воздействие на объект; \hat{X} - оценка вектора-параметра состояния; X_0 – вектор-параметр желаемого состояния; $g(\hat{X}, X_0)$ – функция управляющего воздействия. В простейшем случае она пропорциональна разности значений \hat{X} и X_0 ; K – коэффициент передачи фильтра Калмана; Q – параметр динамики зондируемого объекта; t — время.



Рис. 1. Структурная схема замкнутого цикла мониторинга и управления состоянием природных и антропогенных объектов

В состав программного комплекса входят следующие модельные блоки:

- спутниковых систем и космических сенсоров, в первую очередь, обеспечивающих тех, что обеспечивают получение изображений зондируемой поверхности.
- системы обработки аэрокосмических данных ДЗ, а также всей другой сопутствующей этому процессу информации (наземных наблюдений, картографической базы данных, метеоданных, знаний экспертов и т.п.) и предназначенная для оптимизации процедур обработки;
- управления состоянием экосистем на основе указанной выше информации ДЗ, которая выявляет такое изменение параметров модельной экосистемы, которое приближало бы ее к желаемому состоянию;
- экосистемы, описывающей ее поведение во времени и пространстве с учетом управляющих воздействий, а также зависимость дистанционно измеряемых параметров излучения, восходящего от зондируемых экосистем, от параметров состояния последних.

Функционирование комплекса носит характер диалога пользователя с персональным компьютером, в ходе которого достигается желаемый критерий качества системы аэрокосмического мониторинга-управления.

Принципы имитационного моделирования РСА-изображений

Радиолокационное изображение, получаемое с борта аэрокосмического носителя, есть результат прохождения сигнала, генерируемого РСА, от передающей антенны до зондируемого объекта (поверхности, среды), взаимодействия с этим объектом (обратного рассеяния), попадания эхо-сигнала в приемную антенну и прохождения его через приемный тракт радара. Последнее, в частности, включает, в качестве главного элемента, процедуру синтеза антенной апертуры.

Моделирование рассеяния радиоволн земным покровом

Имитация процесса рассеяния основана на предположении о гауссовой статистике эхо-сигнала радара [2] и предусматривает использование двухмасштабной модели зондируемой поверхности, объектов, сред и модели формирования УЭПР. Модуль имитатора радиолокационного

изображения (см. «Изображение Y» на рис. 1), входящий в состав усовершенствованного программного комплекса «Геодиалог», как раз и предназначен для реализации этой процедуры.

Модели рассеяния электромагнитных волн и расчет УЭПР.

Для симулирования изображений, получаемых радарными с синтезированной апертурой, требуется знать статистические характеристики амплитуды или огибающей эхо-сигнала и его фазы. В соответствии с [2] радиолокационный сигнал, рассеянный статистически шероховатой поверхностью, представляет собой нормальный случайный процесс, амплитуда которого распределена по закону Рэлея, а фаза равновероятна в пределах от $-\pi$ до $+\pi$. Это утверждение всегда справедливо для случаев наклонного зондирования земной поверхности. Для записи средней амплитуды $\langle A \rangle$ эхо-сигнала, значение которой используется при когерентном накоплении последнего в ходе синтеза антенной апертуры, воспользуемся основным уравнением радиолокации и формулами, приведенными в [2]:

$$\langle A \rangle = C \cdot \sqrt{\sigma_{\epsilon_N}^0(\theta)}. \quad (2)$$

Здесь введены следующие обозначения: θ - угол визирования, отсчитываемый от нормали к среднему уровню зондируемой поверхности; $C = \frac{1}{4\pi H^2} \sqrt{P_t G_t S_a S_y^g}$, H - высота полета летательного аппарата, носителя РСА, P_t - средняя мощность зондирующего сигнала, G_t - коэффициент усиления антенны по мощности, S_a - эффективная площадь приемно-передающей антенны, S_y^g - площадь элементарной ячейки зондируемой поверхности или размер пиксела на поверхности; $\sigma_{\epsilon_N}^0(\theta)$ - зависимость нормированной относительно $|F_0|^2$ УЭПР зондируемой поверхности от угла визирования θ .

Закон регулярного изменения фазы принятого сигнала, связанного с перемещением носителя относительно элементарного участка поверхности с заданной наклонной дальностью R и азимутом $\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{V \cdot t}{R} \approx \frac{\pi}{2} - \frac{V \cdot t}{R}$, отсчитываемым от линии пути, где V - путевая скорость носителя, t - время, может быть представлена в виде $\Phi(t) = -\frac{2\pi V^2 t^2}{\lambda R}$. Здесь λ - средняя длина волны зондирующего сигнала.

Из анализа формулы (2) следует, что наибольший интерес для модельных расчетов представляет функция $\sigma_{\epsilon_N}^0(\theta)$. Рассмотрим общую форму записи всех компонент поляризационной матрицы УЭПР [2]. Она имеет следующий вид:

$$\sigma_{VV}^{(3)} = \sigma_{VV}^{(1)} + \sigma_{VV}^{(2)}, \quad \sigma_{HH}^{(3)} = \sigma_{HH}^{(1)} + \sigma_{HH}^{(2)}, \quad \sigma_{VH}^{(3)} = \sigma_{HV}^{(3)} = \sigma_{VH}^{(1)} + \sigma_{VH}^{(2)} = \sigma_{HV}^{(1)} + \sigma_{HV}^{(2)}, \quad (3)$$

где верхние индексы при компонентах и соответствующих слагаемых УЭПР, (указанные в скобках) означают их принадлежность к типу модели поверхности, а нижние - к поляризации на передачу-прием. Перейдем теперь к записи каждого слагаемого в (3).

$$\sigma_{VV}^{(1)} = \frac{\sec^3 \theta}{2tg^2 \beta_{ck}} \cdot \exp\left(-\frac{tg^2 \theta}{2tg^2 \beta_{ck}}\right) \cdot \left[|a_V^{(1)}(\theta, \epsilon)|^2 + |b_V^{(1)}(\theta, \epsilon)|^2 \cdot tg^2 \beta_{ck} \right], \quad (4)$$

$$\text{где } a_V^{(1)}(\theta, \epsilon) = \frac{\cos \theta \left(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \right)}{\cos \theta + \frac{1}{\sqrt{\epsilon}}}, \quad b_V^{(1)}(\theta, \epsilon) = \frac{\sin \theta \left[\left(\cos \theta + \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \right)^2 - \frac{2}{\epsilon} \right]}{\left(\cos \theta + \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \right)^2},$$

$tg\beta_{ck} = \frac{\sqrt{2}}{\rho_{\kappa}} \cdot \sigma_{\kappa}$ - тангенс среднеквадратического угла наклона крупномасштабной неровности, $\varepsilon = \varepsilon_r + j\varepsilon_i$ - относительная комплексная диэлектрическая проницаемость вещества зондируемой поверхности.

$$\sigma_{VV}^{(2)} = 64\pi^4 \left[\frac{(\varepsilon_r - 1)^2 + \varepsilon_i^2}{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2} \right]^2 \cdot \left| 1 - \frac{1}{|\varepsilon|^2} \right| \cdot \sec\theta \cdot \left(\frac{\sigma_M \rho_M}{\lambda^2} \right) \cdot \exp \left[- \left(2\pi \frac{\rho_M}{\lambda} \sin\theta \right)^2 \right] \cdot \frac{|\alpha_0|^2}{|\beta_0|^2}, \quad (5)$$

где $\alpha_0 = \left(1 + \sin^2\theta + \frac{1}{\varepsilon} \right) \cos^2\theta + 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos^3\theta (1 + \sin^2\theta)$,

$$\beta_0 = \left(1 + \frac{1}{\varepsilon^2} \right) \cos^2\theta + \frac{1}{\varepsilon} (1 + 4\cos^2\theta + \cos^4\theta) + \frac{2}{\sqrt{\varepsilon}} \left(1 + \frac{1}{\varepsilon} \right) \cos\theta (1 + \cos^2\theta).$$

$$\sigma_{HH}^{(1)} = \frac{\sec^3\theta}{2tg^2\beta_{ck}} \cdot \exp \left(- \frac{tg^2\theta}{2tg^2\beta_{ck}} \right) \cdot \left[|a_H^{(1)}(\theta, \varepsilon)|^2 + |b_H^{(1)}(\theta, \varepsilon)|^2 \cdot tg^2\beta_{ck} \right], \quad (6)$$

где $a_H^{(1)}(\theta, \varepsilon) = \frac{\cos\theta \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos\theta \right)}{1 + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos\theta}$, $b_H^{(1)}(\theta, \varepsilon) = \frac{\sin\theta \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos\theta \right)^2 - \frac{2}{\varepsilon} \cos^2\theta \right]}{\left(1 + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos\theta \right)^2}$.

$$\sigma_{HH}^{(2)} = 64\pi^4 \left[\frac{(\varepsilon_r - 1)^2 + \varepsilon_i^2}{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2} \right]^2 \cdot \left| 1 - \frac{1}{|\varepsilon|^2} \right| \cdot \sec\theta \cdot \left(\frac{\sigma_M \rho_M}{\lambda^2} \right) \cdot \exp \left[- \left(2\pi \frac{\rho_M}{\lambda} \sin\theta \right)^2 \right] \cdot \frac{|\gamma_0|^2}{|\beta_0|^2}, \quad (7)$$

где $\gamma_0 = \cos^2\theta \left(\cos\theta + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \right)^2$.

$$\sigma_{VH}^{(1)} = \frac{\sec^3\theta}{2tg^2\beta_{ck}} \cdot \exp \left(- \frac{tg^2\theta}{2tg^2\beta_{ck}} \right) \cdot \left| \frac{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \sin 2\theta}{\left(\cos\theta + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos\theta \right)} \right|^2 \cdot tg^2\beta_{ck} \quad (8)$$

$$\sigma_{VH}^{(2)} = 64\pi^4 \left[\frac{(\varepsilon_r - 1)^2 + \varepsilon_i^2}{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2} \right]^2 \cdot \left| 1 - \frac{1}{|\varepsilon|^2} \right| \cdot \sec\theta \cdot \left(\frac{\sigma_M \rho_M}{\lambda^2} \right) \cdot \exp \left[- \left(2\pi \frac{\rho_M}{\lambda} \sin\theta \right)^2 \right] \cos^2\theta \times \quad (9)$$

$$\times \left(tg^2\beta_{ck} \cdot |D|^2 + 4tg^4\beta_{ck} \cdot |I|^2 \right)$$

где $D = \frac{\sin 2\theta}{\left(1 + \frac{2}{\varepsilon} \right) \cos^2\theta + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos^3\theta + \left(2 + \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos\theta + \frac{1}{\varepsilon}}$,

$$I = \frac{1 - 3\sin^2 \theta + \frac{1}{2} D \sin \theta \left[2 \left(1 + \frac{2}{\varepsilon} \right) \cos \theta + 3 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos^2 \theta + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \left(2 + \frac{1}{\varepsilon} \right) \right]}{\left(1 + \frac{2}{\varepsilon} \right) \cos^2 \theta + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos^3 \theta + \left(2 + \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cos \theta + \frac{1}{\varepsilon}}$$

Расчеты, проведенные по формулам (3) – (9), показывают, что зависимость величины УЭПР от угла визирования θ и поляризации весьма существенна для интерпретации РСА- изображений, так как при проведении съемок земной поверхности этот угол может находиться меняется в них в достаточно широких пределах (как минимум, в интервале 30^0 - 60^0). Иллюстрация этих зависимостей дана на рис. 2.

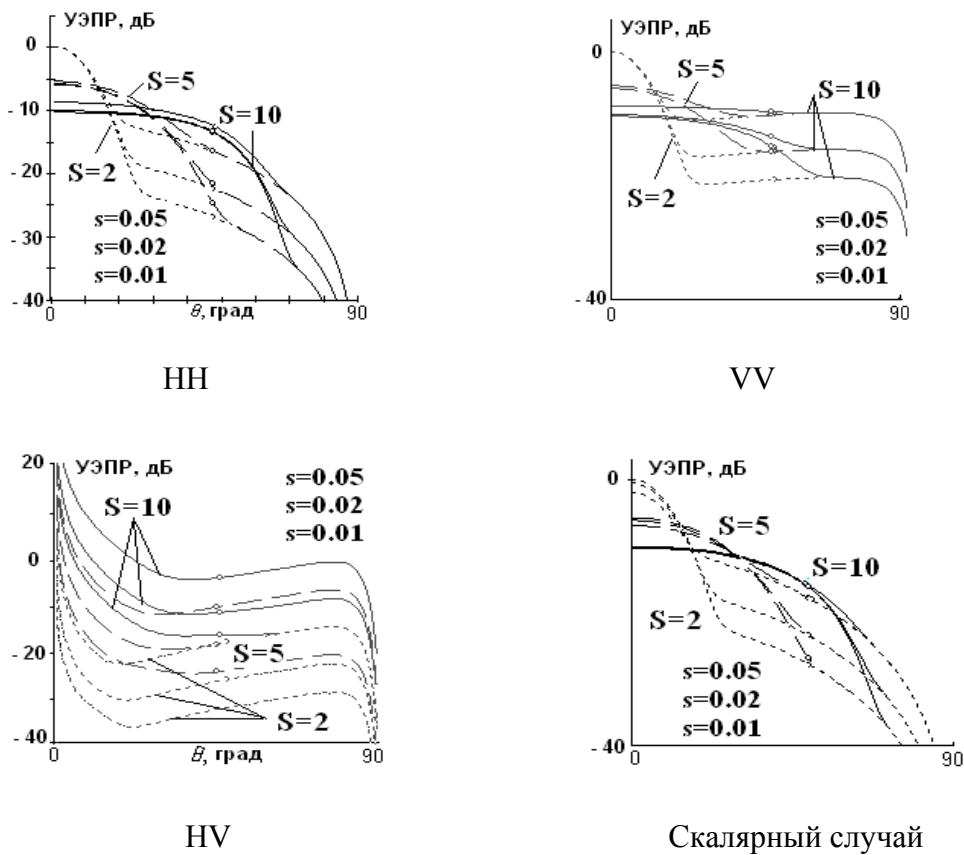


Рис. 2. Зависимость УЭПР от угла визирования для модельной сцены с разными σ_m , σ_k , $\rho_m = 0,1$ м, $\rho_k = 25$ м, Р-диапазон (68 см), разные поляризации. Тройки кривых соответствуют $\sigma_{мелк} = 0,01, 0,02$ и $0,05$ м, точки, пунктир и сплошная линия - $\sigma_k = 2, 5, 10$ м. Интервал углов визирования $0 - 90^0$. а – HH, б – VV, в – HV, г – скалярный случай

Из анализа рис. 2 видно, что изменение вертикального размера мелкомасштабной шероховатости не меняет принципиально хода зависимости от угла θ , а только смещает эту зависимость по вертикали. Поэтому графики идут «тройками», каждая из которых соответствует трем использованным в расчете значениям вертикального размера мелкомасштабной шероховатости при постоянстве всех других параметров. На этих рисунках введены следующие обозначения: $S = \sigma_k$, а $s = \sigma_m$.

Имитация синтеза антенной апертуры

Имитатор реализует процедуру синтеза антенной апертуры с фокусированной обработкой в частотной области. Структурная схема последней была предложена в работе [3]. На выходе схемы формируется усредненный по времени некогерентного накопления квадрат модуля комплексной ампли-

туды синтезированного сигнала, величина которого присваивается пикселу имитированного радиолокационного изображения, соответствующего каналу заданной наклонной дальности, т.е. строке дальности на изображении. При этом в алгоритм имитатора были заложены следующие упрощения.

Имитатор предоставляет три способа синтеза апертуры:

- single-look (SL), когда для синтеза изображения каждой точки сцены используется весь доступный диапазон доплеровских частот (вся азимутальная ширина диаграммы направленности);
- multi-look (ML), когда формируется не одно, а несколько (NML) изображений, каждое из которых основано на своем диапазоне доплеровских частот, соответствующем определенному диапазону азимутов визирования;
- усредненный multi-look (AML), когда из вышеуказанного набора изображений ML формируется одно усредненное изображение;

Размер пятна облучения ДНА земной поверхности невелик, что связано с ограниченностью объема оперативной памяти компьютера, однако это обстоятельство не ограничивает общности рассмотрения, представляя собой лишь техническую сложность. Результаты синтеза, зависят от времени последетекторного накопления сигнала и эффект влияния этого параметра на SL-изображения хорошо виден на рисунке.

В реальном РСА время накопления для SL-изображения не является выбираемой величиной, а зависит от набора факторов: азимутальной ширины ДНА, скорости полета, возможностей сигнального процессора и др. Однако на этапе проектирования РСА или процесса съемки имеющимся РСА время накопления – один из важнейших факторов оптимизации. В режиме ML время когерентного накопления для каждого отдельного изображения (look) определяется их желаемым числом.

Рис. 3 показывает эффект этого параметра как для отдельного изображения, так и для среднего, получаемого в режиме AML.

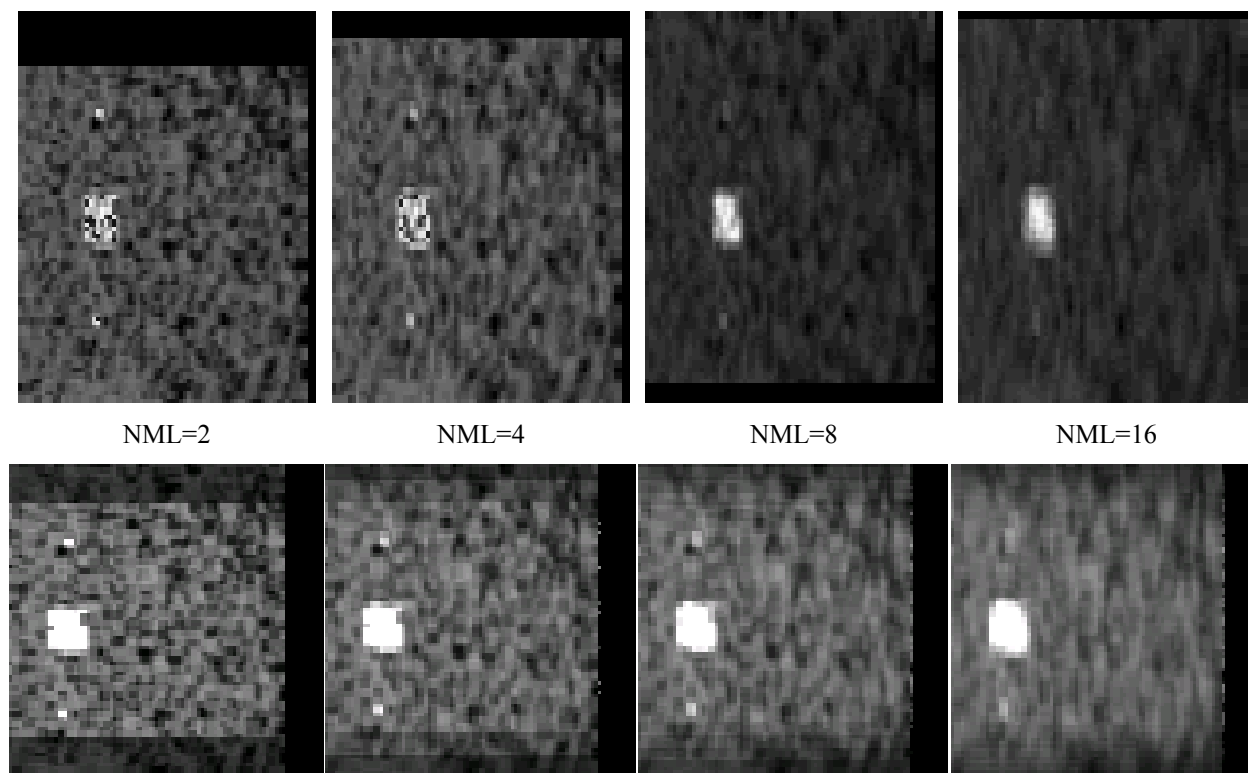


Рис. 3. Эффект multi-look-режима для сцены «точки». NML – число компонент (looks), суммируемых в изображении. Вверху – одна из компонент, внизу – сумма всех компонент. Светлым тоном на изображении показан участок, отличающийся по своим отражательным характеристикам (диэлектрическим свойствам) от окружающего его фона

Анализ рис. 3 позволяет заключить, что симулированные изображения качественно верно отражают процесс формирования радиолокационного изображения.

Выводы

1. Программный комплекс «Геодиалог» служит эффективным инструментом моделирования как всего комплекса процессов мониторинга и управления, так и его отдельных компонент и, в частности, процесса формирования РСА-изображений.

2. Проявляющиеся на РСА-изображениях эффекты их спектральной и поляризационной зависимости, а также спекл-шума качественно верно отражают реальные физические процессы.

3. Сравнение симулированных изображений с реальными РСА-снимками показывает их удовлетворительное совпадение.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 06-08-01576.

Литература

1. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг. Под ред. *А.И. Канащенкова*. М.: Радиотехника, 2006. 240 с.
2. *Жуковский А.П., Оноприенко Е.И., Чижов В.И.* Теоретические основы радиометрии. М., «Сов. Радио», 1979. 320 с.
3. *Кондратенков Г.С., Потехин В.А., Реутов А.П., Феоктистов Ю.А.* Радиолокационные станции обзора Земли. Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радио и связь, 1983. 272 с.