

УДК 621.391

М.В. БОРЦОВА, А.В. ПОПОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Рассмотрены общие принципы работы радиолокационных поляриметров и предложена методика моделирования сигналов, отраженных объектами дистанционного зондирования, учитывающая параметры радиолокационной станции. Приведено описание разработанного программного обеспечения, которое позволяет моделировать работу радиолокационных поляриметров в трех режимах: режим построения диаграммы рассеяния, режим измерения в фиксированной точке и режим сканирования по дальности. Представлены результаты моделирования отраженных сигналов для различных типов подстилающей поверхности и их сравнение с экспериментальными данными, полученными с помощью радиолокационного поляриметра.

Ключевые слова: моделирование, радиолокационный поляриметр, шероховатая поверхность, поляризационная матрица рассеяния, коэффициенты Френеля, поляризационный базис.

Введение

В настоящее время для решения многих задач дистанционного зондирования (ДЗ), таких как экологический мониторинг окружающей среды, дистанционное определение свойств Земных покровов, проведение поисково-спасательных работ и др., широко используется радиолокационная (РЛ) поляриметрия. При обнаружении малоразмерных объектов на фоне интенсивных помех от подстилающей поверхности, картографировании участков загрязнения водных акваторий продуктами биологического (фитопланктон) и небиологического (нефть и нефтепродукты) происхождения, дистанционном определении влажности и солености почв значительный интерес представляют общие закономерности влияния свойств подстилающей поверхности на сигнал, регистрируемый радиолокационными станциями (РЛС). Для выявления такого рода зависимостей требуется большой объем экспериментальных данных, полученных различными РЛС для различных типов подстилающей поверхности в различных условиях наблюдения, а также данные наземного контроля исследуемых параметров. Очевидно, что проведение таких широкомасштабных экспериментальных исследований связано с рядом трудностей технического и экономического характера и обуславливает необходимость математического моделирования поляриметрических сигналов, отраженных объектами ДЗ.

В данной статье рассмотрены общие принципы работы РЛ поляриметров (РЛП) и предложена методика моделирования поляриметрических сигналов, отраженных объектами ДЗ, учитывающая техниче-

ские характеристики РЛП. Приведено описание разработанного программного обеспечения и представлены результаты моделирования отраженных поляриметрических сигналов для различных типов подстилающей поверхности. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными данными.

Цель работы – разработка методов и алгоритмов моделирования поляриметрических сигналов, отраженных объектами дистанционного зондирования, с учетом параметров радиолокационного поляриметра.

1. Общие принципы работы РЛП

Как известно [1, 2], наличие поляриметрической информации позволяет значительно повысить информативность РЛ исследований и достоверность интерпретации снимков, полученных с аэрокосмических носителей. На рис. 1 представлена упрощенная схема РЛ поляриметра. В передатчике (ПРД) формируется сигнал в виде прямоугольного радиоимпульса длительностью $\tau_{\text{и}}$, переключаемый от импульса к импульсу модулятором (М) между вертикальным (V) и горизонтальным (H) каналами поляризационного разделителя (ПР) антенны (А). Отраженный сигнал, принятый антенной, через циркуляторы поступает на двухканальный приемник (ПРМ1, ПРМ2) с общим гетеродином (Г), выходной сигнал которого подвергается обработке и индикации (И). Благодаря тому, что радиолокационные поляриметры обеспечивают одновременный прием основной (VV или HH) и кросс-поляризационной (VH или HV) компонент, за два цикла работы может

быть измерена полная комплексная поляризационная матрица рассеяния (ПМР) [3 – 5] вида:

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{HH} & \dot{S}_{VH} \\ \dot{S}_{HV} & \dot{S}_{VV} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\dot{E}_R = \dot{S} \cdot \dot{E}_S, \quad (2)$$

где \dot{E}_S – амплитуда зондирующего сигнала.

\dot{E}_R – амплитуда отраженного сигнала.

Отраженный сигнал формируется множеством элементарных отражателей, расположенных на различном расстоянии от антенны, поэтому принятый сигнал представляет собой суперпозицию сигналов от элементарных отражателей с учетом разности расстояний ΔR до них:

$$S(t)_{k,m} = \sum_{i=1}^{\infty} \dot{S}_{km} \cdot e^{j\left(\omega t + 2\pi \frac{\Delta R_i}{\lambda}\right)}, \quad k, m \in \{H, V\}, \quad (3)$$

где λ – длина волны РЛС.

Общая схема РЛ наблюдения представлена на рис. 2. Вследствие неидеальности диаграммы направленности (ДН) антенны (рис. 3), объекты, находящиеся в центре РЛ пятна, дают максимальный вклад, а вклад объектов на краях освещенного участка определяется формой ДН. Поэтому выражение (3) должно быть дополнено коэффициентом $\dot{A}(\theta_i)$, учитывающим форму диаграммы направленности антенны:

$$S(t)_{k,m} = \sum_{i=1}^{\infty} \dot{A}(\theta_i)_{k,m} \dot{S}_{km} \cdot e^{j\left(\omega t + 2\pi \frac{\Delta R_i}{\lambda}\right)}, \quad (4)$$

где θ_i – угол прихода электромагнитной волны.

Кроме того, следует учитывать, что радиоимпульсы, формируемые в передатчике, не являются идеально прямоугольными (рис. 4), следовательно, по дальности происходит «взвешенное» суммирование сигналов, отраженных элементарными отражателями в пределах импульсного объема, поэтому в (4) также должна быть учтена форма импульсной характеристики $p(t)$:

$$S(t)_{k,m} = \sum_{i=1}^{\infty} \dot{A}(\theta_i)_{k,m} \cdot p(t) \cdot \dot{S}_{km} \cdot e^{j\left(\omega t + 2\pi \frac{\Delta R_i}{\lambda}\right)}. \quad (5)$$

Таким образом, из (5) следует, что сигнал, регистрируемый РЛС, зависит от параметров станции (длины излучаемой волны, ширины диаграммы направленности антенны, длительности и формы РЛ импульса), условий наблюдения (дальности до поверхности, угла места и азимута) и от ПМР объекта РЛ наблюдения. В свою очередь, как показывают многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [6 – 8], ПМР зависит от профиля подстилающей поверхности, от ее электрофизиче-

ских свойств (диэлектрической проницаемости и проводимости) и от поляризации зондирования.

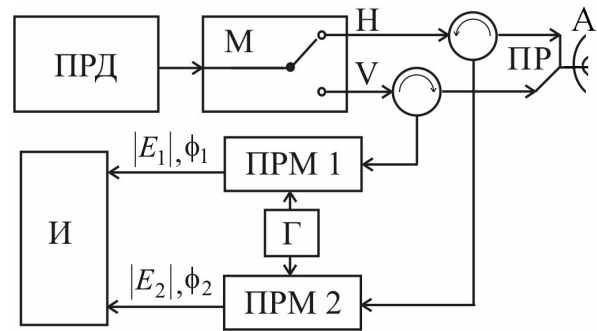


Рис. 1. Упрощенная схема радиолокационного поляриметра

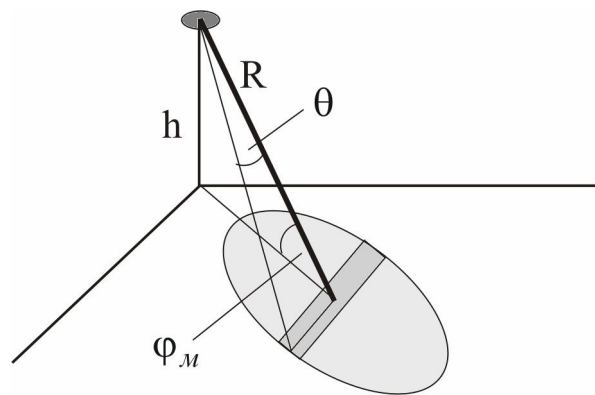


Рис. 2. Общая схема радиолокационного наблюдения

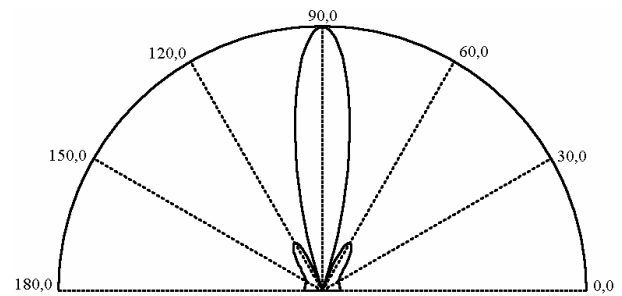


Рис. 3. Характерная форма ДН антенны

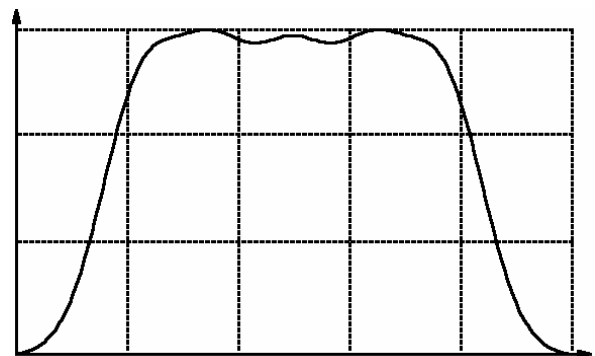


Рис. 4. Характерная форма РЛ импульса

При моделировании поляриметрических сигналов, отраженных статистически шероховатой подстилающей поверхностью, для получения достоверных результатов должны быть учтены все указанные факторы.

2. Методика моделирования поляриметрических сигналов

В работе [9] была предложена математическая модель статистически шероховатой подстилающей поверхности, согласно которой поверхность формируется как случайная двумерная функция с заданными законом распределения высот и пространственной корреляционной функцией. При дискретном представлении поля соседние точки поверхности образуют треугольные facets, для которых может быть рассчитан отраженный сигнал (рис. 5). При размерах facets много меньше длины волны ($\lambda/32$ и менее) его можно считать элементарным отражателем [10], что позволяет применять теорию Гюйгенса при расчете отраженного сигнала [11].

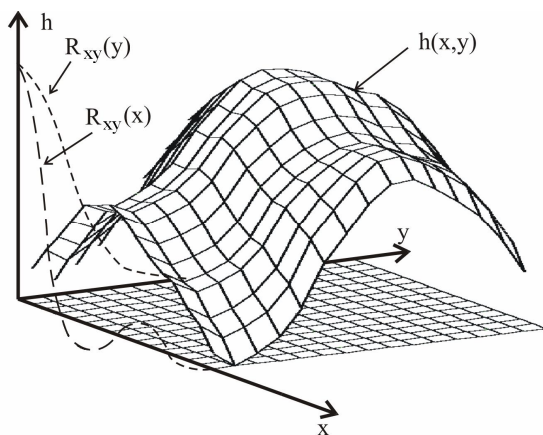


Рис. 5. Общий вид модели поверхности

При моделировании также следует учитывать, что многие типы земных поверхностей (в частности, морская) характеризуются широкополосным пространственным спектром [8, 12 – 14]. Так, например, в структуре морского волнения выделяют гравитационные и капиллярные волны, а также ветровую рябь, и каждому из указанных видов волнения соответствует свой спектральный диапазон пространственных частот [13, 15]. В работе [16] был предложен метод моделирования шероховатых поверхностей со сложной частотной структурой как многомасштабных поверхностей, представляющих собой суперпозицию ряда поверхностей с простой частотной структурой.

Для моделирования поляриметрических сигналов, отраженных объектами ДЗ, с учетом параметров РЛП, может быть предложена следующая мето-

дика моделирования. Вводится система координат, в начале которой расположена РЛС на высоте h и дальности до центра освещаемой площадки R (рис. 2). Размеры освещаемой площадки определяются шириной диаграммы направленности антенны и длиной РЛ импульса. К каждому facetу излучается электромагнитная волна (ЭМВ) с горизонтальной или вертикальной поляризацией с амплитудой, определяемой мощностью передатчика и диаграммой направленности антенны $A(\theta_i)$. В процессе распространения волны происходит ее затухание пропорционально квадрату пройденного расстояния. Фаза волны при падении на i -й facet может быть вычислена как

$$\phi_i = \frac{2\pi R_i}{\lambda}, \quad (6)$$

где R_i – расстояние от антенны радиолокатора до центра facets.

Электрические компоненты поля излученной электромагнитной волны посредством преобразования вида [5]

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где E'_1, E'_2 – компоненты поля в новом базисе;

E_1, E_2 – компоненты поля в исходном базисе;

α – угол поворота,

для каждого facets могут быть приведены к собственному поляризационному базису, в котором ПМР имеет вид [17]:

$$\dot{S}_i = \begin{bmatrix} r_{En} & 0 \\ 0 & r_{Ep} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где r_{En} – коэффициент отражения нормальной компоненты электрического поля;

r_{Ep} – коэффициент отражения касательной компоненты электрического поля.

Таким образом, амплитуда и фаза отраженных от каждого facets компонент определяется коэффициентами Френеля:

$$r_{En} = \frac{Z_2 \cos \varphi - Z_1 \cos \psi}{Z_2 \cos \varphi + Z_1 \cos \psi}, \quad (9)$$

$$r_{Ep} = \frac{Z_2 \cos \psi - Z_1 \cos \varphi}{Z_2 \cos \psi + Z_1 \cos \varphi}, \quad (10)$$

где Z_1, Z_2 – волновые сопротивления сред распространения;

φ – угол падения волны на facet;

ψ – угол преломления волны, который может быть вычислен как

$$\psi = \arcsin\left(\frac{Z_2}{Z_1} \sin(\varphi)\right). \quad (11)$$

В общем случае отраженные от фазетов сигналы являются эллиптически поляризованными [18]. При приеме антенна раскладывает их в собственном поляризационном базисе [4], и принятый антенной сигнал, согласно (5), может быть определен путем взвешенного суммирования элементарных сигналов с учетом коэффициента затухания электромагнитной волны при распространении от фазета к радиолокатору и формы ДН приемной антенны $\dot{A}(\theta_i)$.

Таким образом, может быть выполнено моделирование поляриметрических сигналов, отраженных объектами ДЗ, с учетом параметров РЛП.

3. Описание программного обеспечения

Для реализации предлагаемой методики моделирования поляриметрических сигналов, отраженных объектами ДЗ, был разработан комплекс программных средств. Прототипом при создании программного обеспечения (ПО) стал реально существующий радиолокационный поляриметрический комплекс (рис. 6) [19], разработанный в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

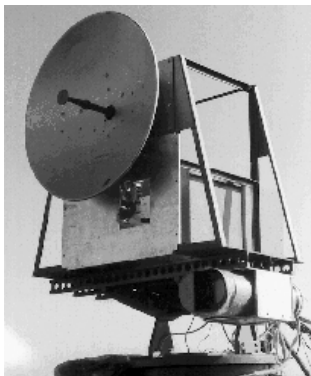


Рис. 6. Радиолокационный поляриметрический комплекс [19]

Разработанное ПО предназначено для имитации различных условий радиолокационной съемки и позволяет оператору при моделировании устанавливать:

- параметры моделируемой шероховатой поверхности (шаг между соседними отсчетами случайного поля, радиусы корреляции и пространственные частоты для продольного и поперечного направлений, соотношение высот неровностей для компонент многомасштабной поверхности, диэлектрическую проницаемость и проводимость, максимальную результирующую высоту неровностей);

- параметры радиолокационной станции (длину излучаемых электромагнитных волн и их амплитуду, ширину диаграммы направленности антенны,

длину радиолокационного импульса, поляризацию излучения и приема);

- условия проведения измерений (дальность от антенны радиолокатора до центра освещаемого в пределах одного РЛ импульса пятна, высоту РЛП относительно уровня подстилающей поверхности или угол места, угол азимута, время наблюдения).

Разработанное ПО также предусматривает моделирование нескольких режимов измерений: расчет диаграммы рассеяния, измерение со стробированием по дальности и сканирование по дальности.

3.1. Расчет диаграммы рассеяния

При расчете диаграммы рассеяния от статистически шероховатой поверхности моделируется работа бистатической РЛС с разнесенными излучающей и приемной антеннами. При этом излучающая антенна неподвижна и расположена под заданным углом места относительно подстилающей поверхности, а приемная антенна перемещается в плоскости «излучаемый луч – нормаль к поверхности» таким образом, что дальность до центра освещаемой площадки постоянна, а угол места при приеме изменяется от 0 до 180 град относительно горизонта.

В настоящее время известны четыре основные модели подстилающей поверхности, характеризующие ее профиль [6, 7]: зеркальная (например, поверхность воды при абсолютном штиле); мелкошероховатая с размерами неровностей много меньше длины волны (поверхность асфальта или бетона для сантиметрового диапазона волн); пологая крупношероховатая поверхность, на высоту неровностей которой ограничения не накладываются («мертвая» зыбь на море) и поверхности со сложной шероховатостью (поверхность моря при развитом волнении, покрытая как крупными первичными волнами, так и волнами более мелких размеров, вплоть до мелкой ряби).

Для проверки предлагаемой методики моделирования выполнялся расчет диаграмм рассеяния от зеркальной поверхности для горизонтальной и вертикальной поляризаций. Передающая антенна расположена на дальности 1 км и высоте 500 м; при этом угол места составил 30° относительно горизонта. В диаграмме рассеяния (см. рис. 7) присутствует основной лепесток, направленный под углом 150°, что соответствует зеркальному рассеянию, и боковые лепестки, наличие которых объясняется крайевыми эффектами. Отношение $\frac{\langle S_{HH} \rangle}{\langle S_{VV} \rangle}$ составля-

ет 1,4. Кросс-поляризационные компоненты (HV, VH) отсутствуют, что соответствует известным результатам теоретических и экспериментальных ис-

следований [6, 7].

На рис. 8 представлены результаты моделирования диаграмм рассеяния от шероховатой поверхности с крупными пологими неровностями при следующих параметрах:

- высота неровностей до 50 см;
- дальность до центра площадки 1 км;
- высота РЛП относительно подстилающей поверхности 50 м (угол места 30°);
- длина излучаемой ЭМВ 3,2 см.

В диаграмме рассеяния присутствует множество боковых лепестков, в том числе и в направлении обратного рассеяния, что соответствует известным результатам [6]. Кросс-поляризационные компоненты отличны от нуля.

3.2. Режим измерения со стробированием по дальности

В данном режиме работы ПО имитируется радиолокационное наблюдение за фиксированной по дальности и азимуту точкой в пространстве. При моделировании шероховатой поверхности, подверженной влиянию турбулентных явлений в атмосфере (например, морской поверхности) крупно- и среднemasштабная компоненты от отсчета к отсчету сдвигаются в направлении к РЛП для имитации движения крупных волн к наблюдателю, а мелко-масштабная компонента поверхности переформируется (имитация быстро изменяющейся ветровой ряби).

Выполнялся расчет рассеянного сигнала для модели морской поверхности (рис. 9) при следующих параметрах:

- в составе поверхности присутствуют крупно-, средне- и мелкомасштабная компоненты;
- высота волн до 30 см;
- диэлектрическая проницаемость поверхности $\epsilon = 80$;
- проводимость поверхности $\sigma = 4$;
- дальность от РЛП до центра освещаемой площадки 1552 м;
- высота РЛП над уровнем моря 30 м (угол места 1,11°);
- длина ЭМВ 3,2 см;
- угол азимута 0° (движение волн к наблюдателю);
- количество отсчетов сигнала 4096.

Полученные в результате моделирования отраженные сигналы и их гистограммы представлены на рис. 10 и 11 соответственно. Для сравнения на рис. 12 показана гистограмма НН компонента ПМР для морской поверхности со слабо развитым волнением, полученной экспериментально радиолокационным поляриметрическим комплексом (РЛПК) [19].

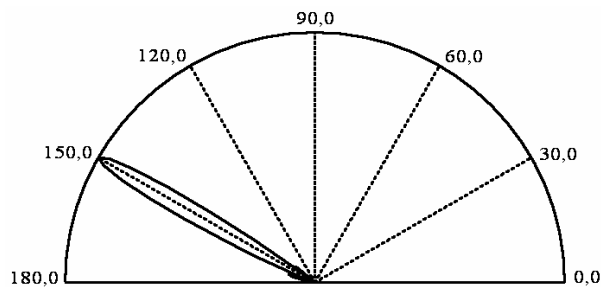


Рис. 7. Диаграмма рассеяния от зеркальной поверхности (НН компонента ПМР)

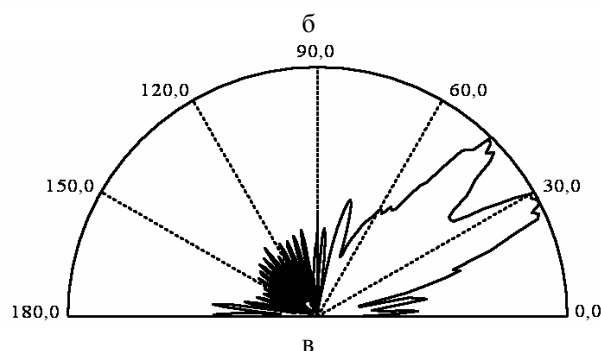
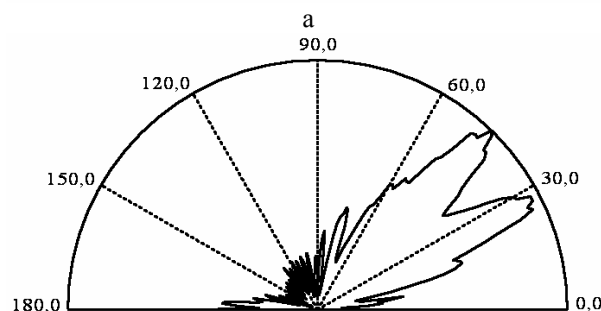
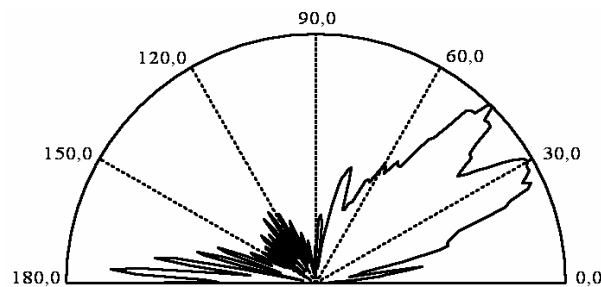


Рис. 8. Диаграммы рассеяния от шероховатой поверхности с крупными пологими неровностями: а – НН компонента ПМР; б – VV компонента ПМР; в – VH компонента ПМР

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показывает, что сигналы, полученные в результате моделирования, воспроизводят статистические свойства реальных сигналов.

3.3. Режим сканирования по дальности

Режим сканирования поверхности по дальности предназначен для исследования взаимных корреляционных свойств подстилающей поверхности и и

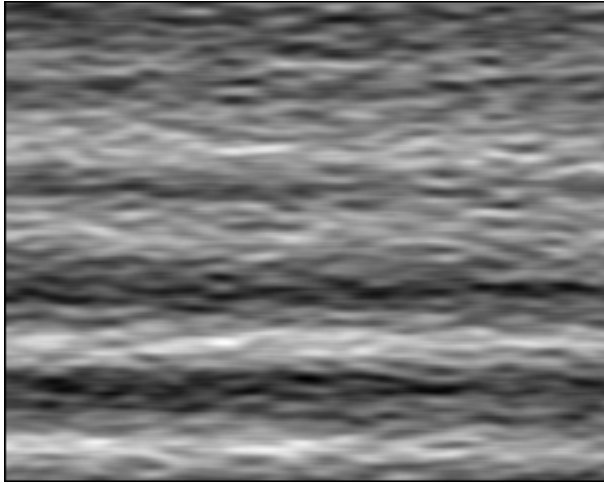
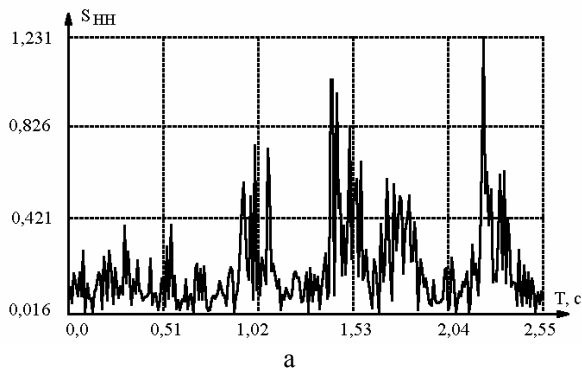
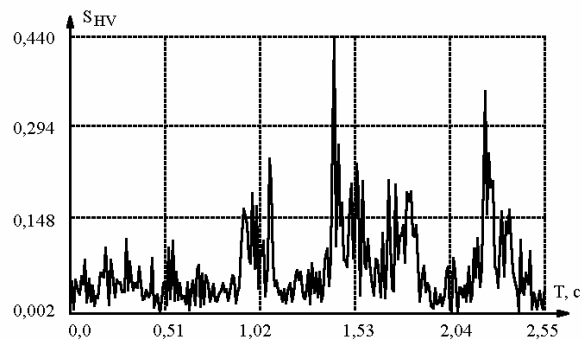


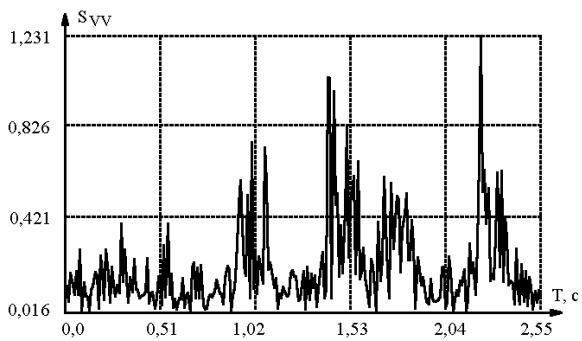
Рис. 9. Фрагмент моделируемой морской поверхности



а

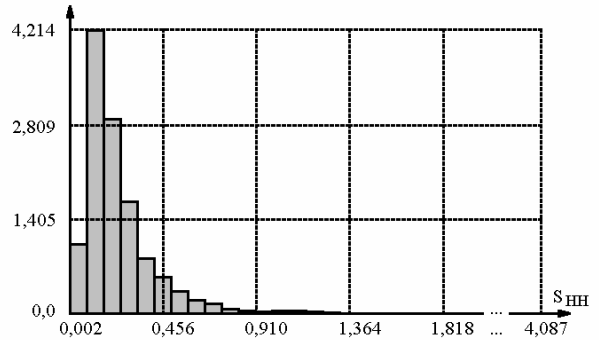


б

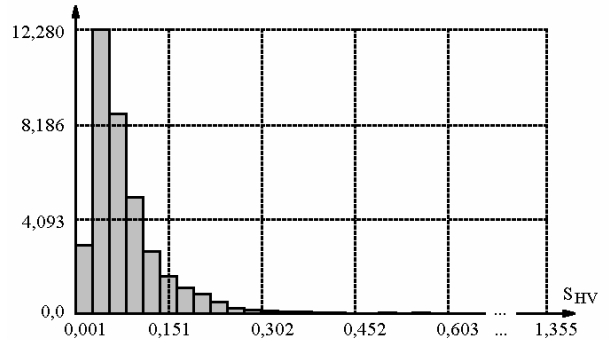


в

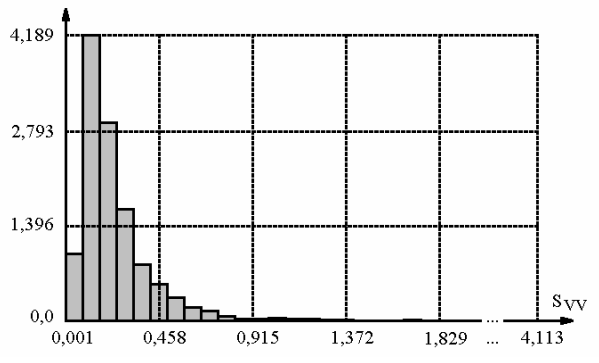
Рис. 10. Результаты моделирования сигнала, рассеянного морской поверхностью (рис. 9): а – HH компонента ПМР; б – HV компонента ПМР; в – VV компонента ПМР



а



б



в

Рис. 11. Гистограммы сигнала (рис. 10), рассеянного морской поверхностью (рис. 9): а – HH компонента ПМР; б – HV компонента ПМР; в – VV компонента ПМР

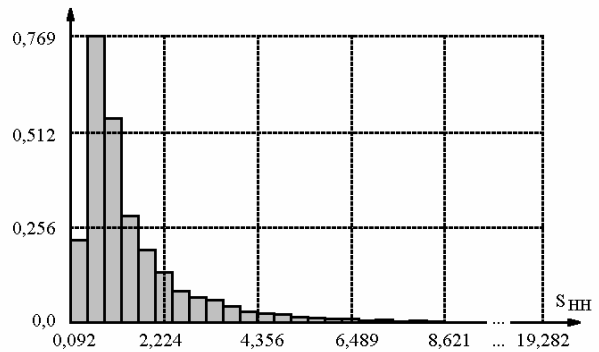


Рис. 12. Гистограмма HH компоненты ПМР, полученной экспериментально радиолокационным поляризметрическим комплексом [19]

реєструємих сигналів. Шаг по дальности между отсчетами задается оператором. При этом крупно- и среднемасштабная компонента поверхности неподвижны, а дальность до центра освещаемой площадки изменяется. При моделировании морской поверхности мелкомасштабная компонента от отсчета к отсчету переформируется для имитации быстроизменяющейся ветровой ряби.

Для проверки предлагаемой методики моделирования были выбраны две тестовые поверхности – зеркальная поверхность, на которой на разной дальности расположены три вертикальных штыря высотой 1 м, и поверхность, изменяющаяся по закону синуса. Результаты моделирования отраженного сигнала в режиме сканирования по дальности для тестовой поверхности с вертикальными штырями представлены на рис. 13. В отраженном сигнале присутствуют выбросы на дальностях, соответствующих расположению штырей. С увеличением дальности до штырей амплитуда отраженного сигнала уменьшается. Для сравнения на рис. 14 показана компонента S_{VV} ПМР, полученной в ходе экспериментальных исследований РЛПК [19] для вертикального металлического штыря.

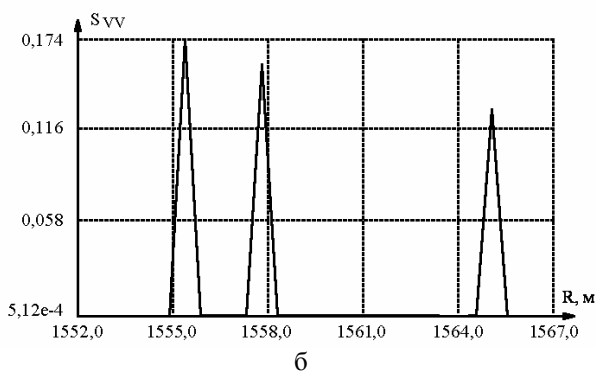
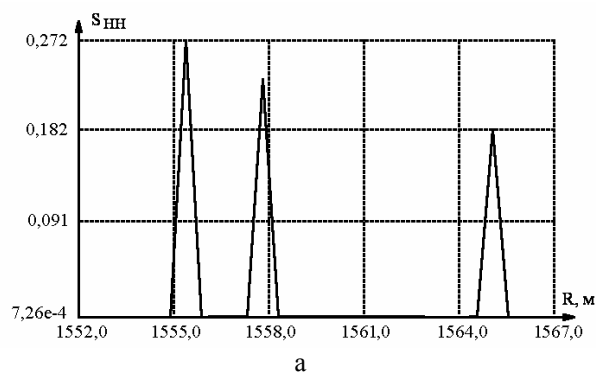


Рис. 13. Зависимость рассеянного сигнала от дальности для тестовой поверхности с вертикальными штырями: а – HH компонента ПМР; б – VV компонента ПМР

На рис. 15 показаны результаты моделирования отраженного сигнала для поверхности, изменяющейся по закону синуса.

Известно [6], что ПМР пропорциональна интегралу по поверхности с учетом разности расстояний до каждой точки поверхности, т.е.:

$$\dot{S}_{km} \sim \iint_{\Pi} h(x, y) \cdot \cos(\vartheta) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(x, y)\right) dx dy, \quad (12)$$

где Π – разрешаемая площадка;

$h(x, y)$ – функция распределения высот площадки;

ϑ – угол падения волны на разрешаемую площадку.

Для тестовой поверхности, изменяющейся по закону синуса, отраженный сигнал имеет форму затухающего косинуса, что подтверждает адекватность предлагаемой методики моделирования.

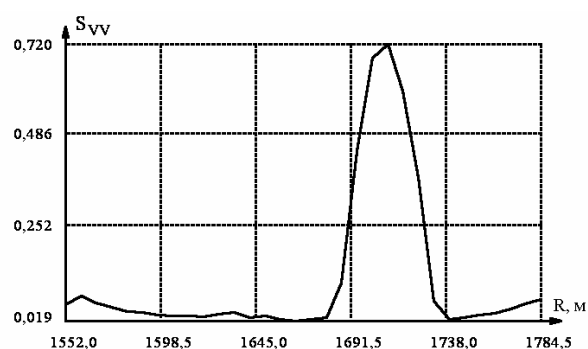


Рис. 14. VV компонента ПМР, полученной экспериментально для вертикального металлического штыря

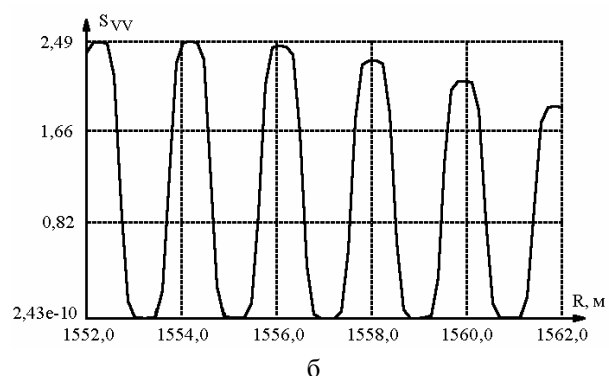
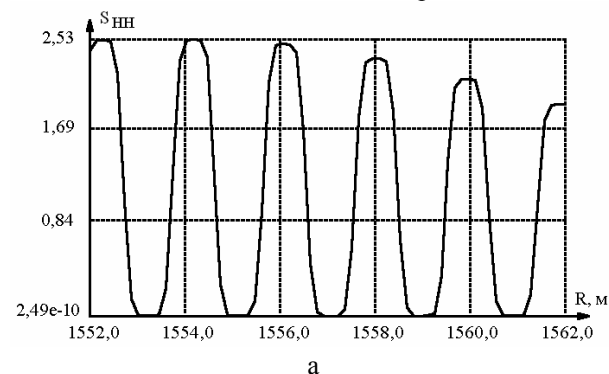


Рис. 15. Зависимость рассеянного сигнала от дальности для периодической поверхности: а – HH компонента ПМР; б – VV компонента ПМР

Выполнялся расчет отраженного сигнала в режиме сканирования по дальности для модели морской поверхности (рис. 9) при следующих параметрах:

- высота волн до 40 см;
- диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 80$, проводимость $\sigma = 4$;
- дальность от РЛП до центра освещаемой площадки 1552 м;
- высота РЛП над уровнем моря 30 м (угол места $1,11^\circ$);
- длина ЭМВ 3,2 см;
- угол азимута 0° (движение волн к наблюдателю);
- количество отсчетов сигнала 128.

Результаты моделирования представлены на рис. 16.

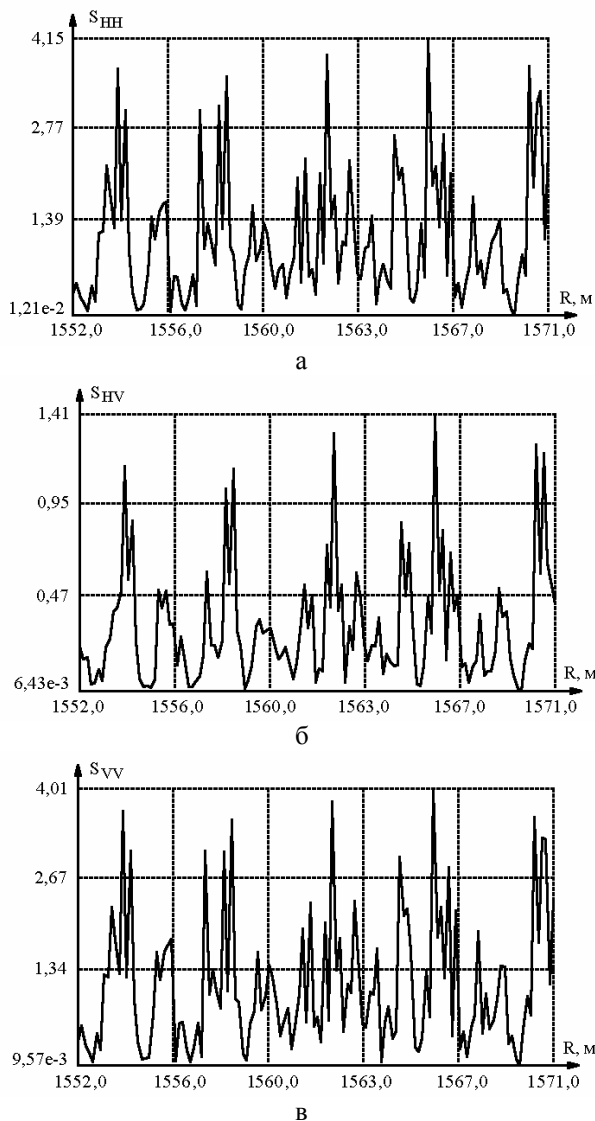


Рис. 16. Зависимость рассеянного сигнала от дальности для морской поверхности: а – HH компонента ПМП; б – HV компонента ПМП; в – VV компонента ПМП

Заключение

Для решения задачи моделирования радиолокационных поляризметрических сигналов, отраженных подстилающей поверхностью, предложена методика, позволяющая учитывать параметры радиолокационной станции. Сравнение результатов моделирования с теоретическими и экспериментальными данными подтверждает ее адекватность.

Разработанные методика моделирования и программное обеспечение создают предпосылки для дальнейших исследований, а именно для исследования возможности классификации поверхностно-распределенных объектов по данным дистанционного зондирования и выявления информативных признаков для их распознавания.

Литература

1. Boerner W.-M. *Basic Concepts in Radar Polarimetry (PolSARpro Lecture Notes)* [Electronic resource] / W.-M. Boerner. – 2007. – 100 p. – Downloaded from: <http://earth.esa.int/landtraining07/material.html>
2. Pottier E. *Advanced Concepts (PolSARpro v3.0 Lecture Notes)* [Electronic resource] / E. Pottier, J.-S. Lee, L. Ferro-Famil. – 2007. – 65 p. – Downloaded from: <http://earth.esa.int/landtraining07/material.html>
3. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей: моногр. / Под ред. С.Н. Конюхова, В.И. Драновского, В.Н. Цымбала. – К.: НАНУ, 2007. – 440 с.
4. Козлов А.И. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия / А.И. Козлов, А.И. Логвин, В.А. Сарычев. – М.: Радиотехника, 2007. – 640 с.
5. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин; под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
6. Радиолокационные методы исследования земли / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович и др.; под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
7. Волосюк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко; под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.
8. Кулемин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами: моногр. / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. – К.: Наукова думка, 1987. – 232 с.
9. Борцова М.В. Моделирование шероховатых поверхностей методом рекурсивной фильтрации / М.В. Борцова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 5. – С. 79-85.
10. Штагер Е.А. Рассеяние волн на телах сложной формы / Е.А. Штагер, Е.В. Чаевский – М.: Сов. радио, 1974. – 240 с.

11. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн / Я.Л. Альперт, В.Л. Гинзбург, Е.Л. Фейнберг. – М.: ГИИТЛ, 1953. – 883 с.
12. Yildiz S. On the Scattering of Electromagnetic Waves by Periodic Rough Dielectric Surfaces: A BOA Solution / S. Yildiz, Y. Altuncu, A. Yapar, I. Akduman // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2008. – Vol. 46, iss. 9. – P. 2599-2606.
13. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
14. Blaes X. Characterizing Bidimensional Roughness of Agricultural Soil Surfaces for SAR Modeling / X. Blaes, P. Defourny // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2008. – Vol. 46, No. 12. – P. 4050 – 4061.
15. Zavorotny V.U. Two-Scale Model and Ocean Radar Doppler Spectra at Moderate- and Low-Grazing Angles / V.U. Zavorotny, A.G. Voronovich // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1998. – Vol. 46, No. 1. – P. 84-92.
16. Борцова М.В. Моделирование многомасштабных поверхностей методом векторной рекурсивной фильтрации / М.В. Борцова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 1(58). – С. 84-88.
17. Hajnsek I. Inversion of Surface Parameters From Polarimetric SAR / I. Hajnsek, E. Pottier, Sh.R. Cloude // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. – Vol. 41, No. 4. – P. 727-744.
18. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны: пер. с англ. / А.Р. Хиппель. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 439 с.
19. Бабаков М.Ф. Применение поляризационно-модулированных сигналов для селекции и распознавания радиолокационных объектов / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов // Зарубежная радиоэлектроника: Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 11. – С. 45-50.

Поступила в редакцию 4.12.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры производства радиоэлектронных систем Г.Я. Красовский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ ПІДСТИЛАЮЧОЮ ПОВЕРХНЕЮ, З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ

М.В. Борцова, А.В. Попов

Розглянуто загальні принципи роботи радіолокаційних поляриметрів і запропоновано методику моделювання сигналів, відбитих об'єктами дистанційного зондування, що враховує параметри радіолокаційної станції. Наведено опис розробленого програмного забезпечення, що дозволяє моделювати роботу радіолокаційних поляриметрів у трьох режимах: режим побудови діаграми розсіювання, режим вимірювання у фіксованій точці та режим сканування по дальності. Представлено результати моделювання відбитих сигналів для різних типів підстилаючої поверхні та їх порівняння з експериментальними даними, що отримані за допомогою радіолокаційного поляриметра.

Ключові слова: моделювання, радіолокаційний поляриметр, шорохувата поверхня, поляризаційна матриця розсіювання, коефіцієнти Френеля, поляризаційний базис.

MODELING POLARIMETRIC SIGNALS BACKSCATTERED BY AN UNDERLYING SURFACE TAKING INTO ACCOUNT RADAR STATION PARAMETERS

M.V. Bortsova, A.V. Popov

General principles of radar polarimeters operation are considered. A methodology for modeling signals backscattered by remote sensing objects that takes into account radar station parameters is suggested. The developed software that allows to model radar polarimeters operation in three modes: scattering diagram calculating, measuring in a fixed point and scanning along the range is described. Results of modeling signals backscattered from various types of underlying surface are shown. Their comparison with experimental data obtained with a radar polarimetry is presented.

Key words: modeling, radar polarimeter, rough surface, polarization scattering matrix, Fresnel's coefficients, polarization basis.

Борцова Мария Викторовна – аспирантка кафедри производства радиоэлектронных систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: masha_bortsova@rambler.ru.

Попов Анатолий Владиславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри производства радиоэлектронных систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.v.popov@inbox.ru.