

УДК 621.391

М.В. БОРЦОВА, А.В. ПОПОВ

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*При решении задачи интерпретации данных поляриметрического дистанционного зондирования Земли широко используются модели рассеяния электромагнитных волн пространственно-распределенными объектами. Представлены микрофакетная модель статистически шероховатой поверхности и методика расчета отраженных поляриметрических сигналов. С целью проверки их адекватности выполнен сравнительный анализ статистических свойств поляризационных характеристик радиолокационных поляриметрических сигналов, полученных в результате моделирования, и данных, полученных в ходе натурных экспериментов при исследовании морской поверхности с гравитационным волнением.*

**Ключевые слова:** радиолокационная поляриметрия, поляризационные характеристики, моделирование, поляризационная матрица рассеяния, эллиптичность, ориентация, поляризационный базис.

### Введение

В настоящее время при проведении поисково-спасательных работ, дистанционном определении свойств земных покровов (влажности и солености почв, степени зрелости сельскохозяйственных культур), решении задач экологического мониторинга (обнаружение и классификация загрязнений водных акваторий, ликвидация последствий аварий и техногенных катастроф), в геодезии и картографии (исследование рельефа земной поверхности, береговых линий морей, рек, болот, озер) широко используется радиолокационная (РЛ) поляриметрия [1 – 3].

Об актуальности данного направления свидетельствует внедрение поляриметрических режимов работы практически во всех радиолокационных системах искусственных спутников Земли, запущенных развитыми странами в 2007–2010 гг. (например, RADARSAT-2, Terra SAR-X, Terra DEM-X, COSMO-SkyMed 1-4) [4].

Поскольку поляризационные свойства объектов дистанционного зондирования (ДЗ) к настоящему времени исследованы недостаточно, существует проблема интерпретации поляриметрических данных. Для выявления общих закономерностей влияния свойств отражающего объекта на поляризацию сигнала, регистрируемого РЛ поляриметрами (РЛП), требуется проведение многочисленных целенаправленных экспериментов, при этом данные дистанционного зондирования должны быть сопряжены с данными наземного контроля. Сложность проведения экспериментальных исследований привела к созданию многочисленных моделей рассеяния, при этом, поскольку многие земные покровы являются протяженными (например, горные массивы, водные

акватории, пашни, пустыни), особое внимание уделяется вопросам рассеяния электромагнитных волн пространственно-распределенными объектами.

На сегодняшний день наиболее распространены являются мелкошероховатая, крупношероховатая и двухмасштабная модели рассеяния [5]. Анализ литературных источников и результаты собственных исследований авторов показывают, что традиционным моделям рассеяния присущ ряд недостатков. Так, например, они не позволяют в полной мере учитывать поляризационные свойства земных покровов [5, 6] и часто не согласуются с результатами экспериментальных исследований [6, 7]. Такие модели, как правило, дают оценки только энергетических параметров (амплитуды или мощности) отраженных сигналов, тогда как неэнергетические параметры также являются информативными [8]. Поскольку большинство моделей рассеяния являются интегральными, они позволяют находить только среднестатистические оценки параметров сигналов и не дают мгновенных реализаций, что приводит к потере информации о временных характеристиках сигналов, рассеянных флуктуирующими объектами.

В работах [9 – 11] была предпринята попытка разработать усовершенствованную электродинамическую (ЭД) модель статистически шероховатой поверхности. Были предложены микрофакетная модель многомасштабной поверхности [9, 10] и методика расчета отраженных поляриметрических сигналов [11], которые позволяют осуществлять моделирование реализаций сигналов, рассеянных пространственно-распределенными объектами ДЗ, с учетом параметров РЛП. **Целью** данной работы является проверка адекватности предложенных модели и методики по экспериментальным данным.

## 1. Поляризационные характеристики объектов дистанционного зондирования

Для описания электромагнитной волны (ЭМВ) традиционно используется ее представление в виде вектора-столбца ортогонально поляризованных компонент [3, 12]:

$$\vec{E}(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_X \\ \dot{E}_Y \end{bmatrix} \cdot e^{j\omega t}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – несущая частота сигнала;

$\dot{E}_X$ ,  $\dot{E}_Y$  – комплексные амплитуды проекций на оси выбранной системы координат  $(x, y)$ , образующей так называемый поляризационный базис (ПБ)  $\{x, y\}$ .

Как известно [1, 3, 5, 8], отраженный от радиолокационного объекта сигнал  $\dot{E}_{Sc}$  вида (1) связан с зондирующим сигналом  $\dot{E}_{In}$  комплексной поляризационной матрицей рассеяния (ПМР)  $\dot{S}$  размером  $2 \times 2$

$$\dot{E}_{Sc} = \dot{S} \cdot \dot{E}_{In}. \quad (2)$$

ПМР  $\dot{S}$  описывает отражающие свойства объекта на ортогональных поляризациях  $x$ ,  $y$ ,

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{xx} & \dot{S}_{xy} \\ \dot{S}_{yx} & \dot{S}_{yy} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

причем в случае моностатической радиолокации  $\dot{S}_{xy} = \dot{S}_{yx}$  [3, 5]. В матрице (3) содержится вся информация об отражающих свойствах объекта при заданной частоте зондирования и фиксированном ракурсе наблюдения, однако значения ее элементов зависят от выбора ортогональных поляризаций  $\{x, y\}$ . В бортовых средствах дистанционного зондирования обычно используются вертикальная ( $y = V$ ) и горизонтальная ( $x = H$ ) поляризации.

На основе поляризационной матрицы рассеяния может быть вычислен ряд относительных поляризационных характеристик (ПХ) [13] сигналов, к которым относятся коэффициент асимметрии  $C_A$  и коэффициенты деполаризации при горизонтальной  $C_H$  и вертикальной  $C_V$  поляризации излучения:

$$C_A = 20 \cdot \lg \left( \frac{S_{HH}}{S_{VV}} \right), \quad (4)$$

$$C_H = 20 \cdot \lg \left( \frac{S_{HV}}{S_{HH}} \right), \quad (5)$$

$$C_V = 20 \cdot \lg \left( \frac{S_{VH}}{S_{VV}} \right). \quad (6)$$

Также могут быть определены неэнергетические характеристики – эллиптичности  $\varphi_H$ ,  $\varphi_V$  и ориентации  $\theta_H$ ,  $\theta_V$  поляриметрических сигналов [3]:

$$\varphi_H = \frac{1}{2} \arctg \frac{2 \cdot S_{HH} S_{HV} \sin(\psi_{HV} - \psi_{HH})}{S_{HH}^2 + S_{HV}^2}, \quad (7)$$

$$\varphi_V = \frac{1}{2} \arctg \frac{2 \cdot S_{VV} S_{VH} \sin(\psi_{VH} - \psi_{VV})}{S_{VV}^2 + S_{VH}^2}, \quad (8)$$

$$\theta_H = \frac{1}{2} \arctg \frac{2 \cdot S_{HH} S_{HV} \cos(\psi_{HV} - \psi_{HH})}{S_{HH}^2 - S_{HV}^2}, \quad (9)$$

$$\theta_V = \frac{1}{2} \arctg \frac{2 \cdot S_{VV} S_{VH} \cos(\psi_{VH} - \psi_{VV})}{S_{VV}^2 - S_{VH}^2}. \quad (10)$$

где  $\psi_{xy}$  – фаза  $\dot{S}_{xy}$ ,  $x, y \in \{H, V\}$ .

Поскольку элементы ПМР (3) зависят от поляризации излучения и приема, в исследованиях используются разложения ПМР на инвариантные поляризационные характеристики [3, 12, 13], основанные на ее представлении собственными числами  $\dot{\lambda}_1$ ,  $\dot{\lambda}_2$  и собственными векторами  $\vec{\zeta}_E$  [12, 13], которые определяются характеристическим уравнением

$$\dot{S} \cdot \vec{\zeta}_E = \lambda \cdot \vec{\zeta}_E \quad (11)$$

и имеют вид [4, 13]:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \cdot e^{j\psi_1} & 0 \\ 0 & \lambda_2 \cdot e^{j\psi_2} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\vec{\zeta}_E = \begin{bmatrix} \cos \theta_E & -\sin \theta_E \\ \sin \theta_E & \cos \theta_E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi_E \\ j \cdot \sin \varphi_E \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где  $\varphi_E$  и  $\theta_E$  – поляризационные параметры так называемой [12] собственной поляризации объекта. Физически собственные поляризации (13), соответствующие собственным числам (12) матрицы (3), характеризуются отсутствием в отраженном сигнале компонент, поляризованных ортогонально облучающей волне. При этом собственные числа  $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$

ПМР  $\dot{S}$  являются комплексными коэффициентами отражения объекта при зондировании его сигналами собственных поляризаций, а собственные вектора (13)  $\vec{\zeta}_E$ , соответствующие собственным числам ПМР  $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ , являются ортогональными по определению и образуют собственный синфазный ортогонально эллиптический поляризационный базис объекта. Сумма собственных чисел  $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$

$$\lambda_E = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2} \quad (14)$$

определяет полную эффективную поверхность рассеяния объекта ДЗ [3].

## 2. Микрофакетная электродинамическая модель поверхности

Известно [5], что форма и поляризационные характеристики отраженного радиолокационного сигнала зависят от многих факторов, а именно от параметров РЛ станции (длины излучаемой волны, ширины диаграммы направленности антенны, длительности и формы РЛ импульса), от условий наблюдения (ракурса, дальности до объекта, угла места и азимута, поляризации зондирования и приема), от профиля объекта и его электрофизических свойств (диэлектрической проницаемости и проводимости). При моделировании поляриметрических сигналов для получения достоверных результатов должны быть учтены все перечисленные факторы.

В работе [9] предложена микрофакетная модель шероховатой поверхности, согласно которой поверхность формируется как случайное поле с заданным законом распределения высот и пространственной корреляционной функцией. При дискретном представлении поля его соседние отсчеты образуют треугольные факеты, для которых может быть рассчитан отраженный сигнал. Характерной особенностью микрофакетной модели является то, что геометрические размеры факетов много меньше длины излучаемой ЭМВ, что позволяет при расчете отраженного сигнала применять теорию Гюйгенса [14].

Для моделирования таких поверхностей предложен метод векторной рекурсивной фильтрации, в основе которого лежит двумерный рекурсивный фильтр [15] вида

$$\begin{aligned}
 y_{i,j} = & \sum_{k=0}^{K_1} \sum_{l=0}^{K_2} a_{k,l} \cdot x_{i-k,j-l} - \\
 & - \sum_{k=0}^{M_1} \sum_{l=0}^{M_2} b_{k,l} \cdot y_{i-k,j-l} \Big|_{k \neq 0},
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где  $y_{i,j}$  – отсчеты выходного сигнала;

$K_{k,l}$ ,  $M_{k,l}$  – порядок фильтра, который определяется исходя из необходимой точности реализации корреляционной функции [9];

$a_{k,l}$ ,  $b_{k,l}$  – постоянные коэффициенты;

$x_{i,j}$  – отсчеты входного сигнала.

Для моделирования поверхностей со сложной частотной структурой, к которым относятся морская поверхность, песчаные барханы и т.п. [16], в работе [10] предложен модифицированный метод моделирования многомасштабных поверхностей, в котором алгоритмы рекурсивной фильтрации сочетаются с алгоритмами линейной интерполяции. Этот метод позволяет получать произвольное количество слоев и воспроизводить любой многомодовый спектр.

Расчет отраженных поляриметрических сигналов основывается на известных ЭД соотношениях [17]. Падающая ЭМВ пересчитывается в собственный ПБ каждого факета, отраженный факетом сигнал формируется исходя из граничных условий электродинамики [14], а суммарный рассеянный сигнал определяется суперпозицией элементарных волн, отраженных факетами, по методике, аналогичной используемой при расчетах выпуклых фазированных антенных решеток [18], с учетом эффектов затенения. По результатам моделирования рассчитывается полная комплексная ПМР вида (3).

## 3. Экспериментальная проверка адекватности микрофакетной ЭД модели морской поверхности

Для проверки адекватности предложенных микрофакетной модели шероховатой поверхности и методики расчета отраженных поляриметрических сигналов выполнялся сравнительный анализ статистических свойств ПХ сигналов, полученных в ходе натурных экспериментов, и данных, полученных в результате моделирования.

Осуществлялось моделирование поляриметрических сигналов, отраженных морской поверхностью при наличии только гравитационных волн. Фрагмент модели поверхности с гравитационными волнами, использовавшейся при расчете отраженных сигналов, представлен на рис. 1.

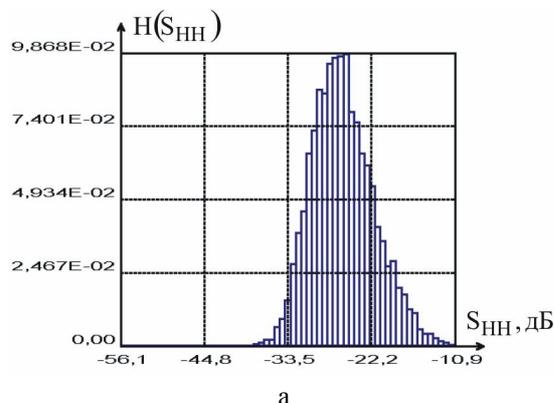


Рис. 1. Фрагмент модели морской поверхности с гравитационным волнением

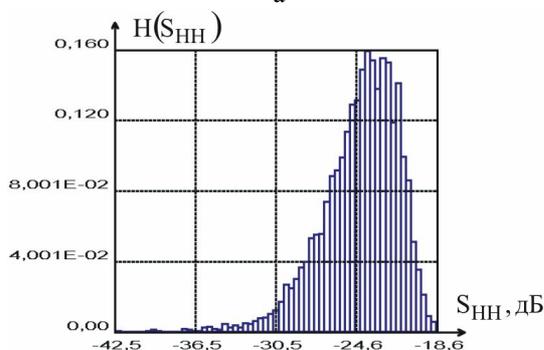
Натурные экспериментальные исследования проводились в р-не г. Феодосия мобильным РЛ поляриметрическим комплексом 3-х см диапазона [19] с разрешающей способностью по дальности 75 м и угловым разрешением 3° (по нулям диаграммы направленности антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях). Радиолокационный поляриметр обеспечивал в эксперименте измерение ПМР объектов ДЗ с погрешностью измерения амплитуд не более 1 дБ и фаз – не более 0,5° при уровне поляризационной развязки каналов не менее 30 дБ. Исследовалась морская поверхность при наличии

только гравитационной составляющей волнения с высотой волн 0,2...0,8 м при угле скольжения  $1^\circ$  и движении волн к РЛП.

Экспериментальные исследования показали, что при зондировании морской поверхности под углом скольжения  $1^\circ$  при наличии только гравитационных волн имеет место рассеяние сигнала на двух ортогональных поляризациях (рис. 2 а-4 а), при этом средняя мощность сигнала при горизонтальной поляризации излучения и приема ( $S_{HH}$ ) соизмерима со средней мощностью сигнала при вертикальной поляризации излучения и приема ( $S_{VV}$ ), а уровень кроссполаризационной компоненты ( $S_{HV}$ ) незначительно (на 7...10 дБ) меньше уровня основных компонент. Модельные данные, полученные для аналогичных условий наблюдения, дают несколько меньшие диапазоны изменения мощности, но при этом общие тенденции сохраняются. Наблюдается рассеяние сигнала на двух ортогональных поляризациях, при этом разность средней мощности  $S_{HH}$  и  $S_{VV}$  составляет несколько дБ, а уровень  $S_{HV}$  на 8...9 дБ меньше уровня основных компонент (рис. 2 б – 4 б). Оценки математического ожидания (м.о.) и среднеквадратического отклонения (с.к.о.) ПХ, рассчитанных по экспериментальным и модельным данным, представлены в табл. 1.

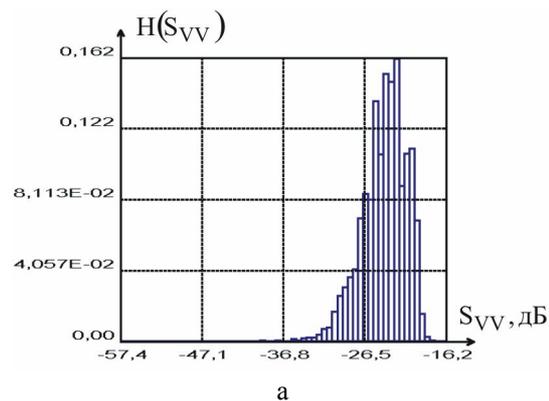


а

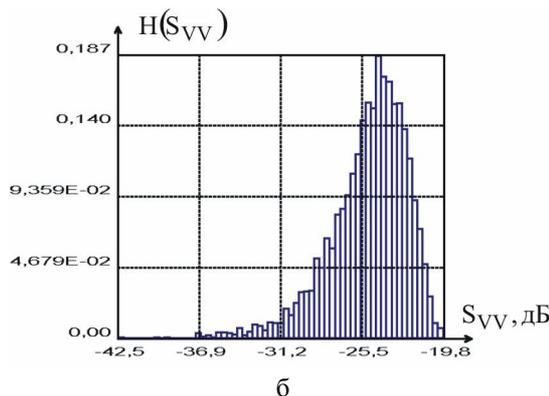


б

Рис. 2. Гистограмма  $S_{HH}$  :  
а – экспериментальные данные;  
б – модельные данные

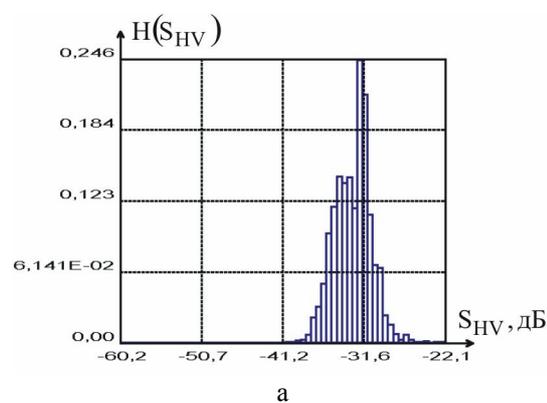


а

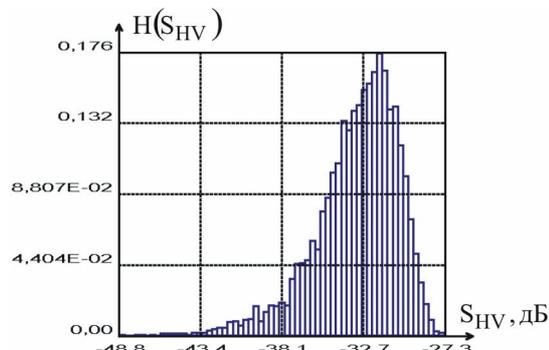


б

Рис. 3. Гистограмма  $S_{VV}$  :  
а – экспериментальные данные;  
б – модельные данные



а

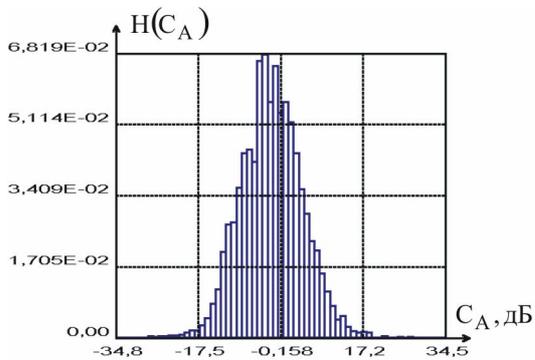


б

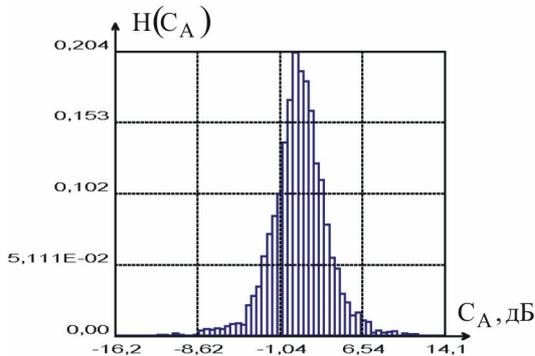
Рис. 4. Гистограмма  $S_{HV}$  :  
а – экспериментальные данные;  
б – модельные данные

Мгновенные значения коэффициента асимметрии  $C_A$  (рис. 5), рассчитанные по экспериментальным данным (рис. 5 а), характеризуются бóльшим с.к.о. (см. табл. 1) по сравнению с модельными данными (рис. 5 б), однако и в первом, и во втором случаях превышение  $S_{HH}$  над  $S_{VV}$  ( $C_A > 0$ ) практически так же вероятно, как и  $C_A < 0$ .

На рис. 6 и 7 представлены гистограммы коэффициентов деполаризации при горизонтальной  $C_H$  и вертикальной  $C_V$  поляризации зондирования. Анализ гистограмм показывает, что как при горизонтальной, так и при вертикальной поляризации излучения происходит деполаризация сигнала. Существуют области положительного коэффициента деполаризации, что, согласно (5), (6), указывает на присутствие в сигнале выбросов, в которых уровень кроссполаризационных компонент превышает уровень основных компонент. Максимальные значения коэффициентов  $C_H$  и  $C_V$  достигают 25 дБ и 35 дБ для экспериментальных данных и 7 дБ и 8 дБ для модельных данных. В среднем коэффициенты деполаризации являются отрицательными (см. табл. 1), при этом  $C_H$  превышает коэффициент деполаризации  $C_V$  на 4 дБ для экспериментальных данных и на 1 дБ для модельных данных.



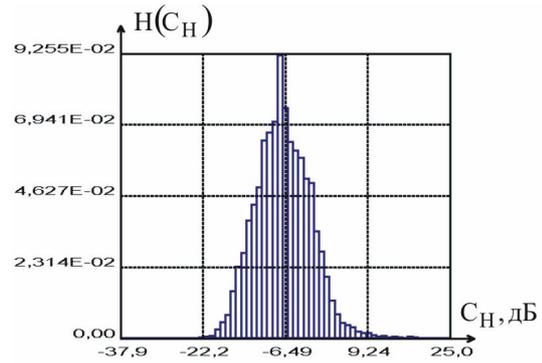
а



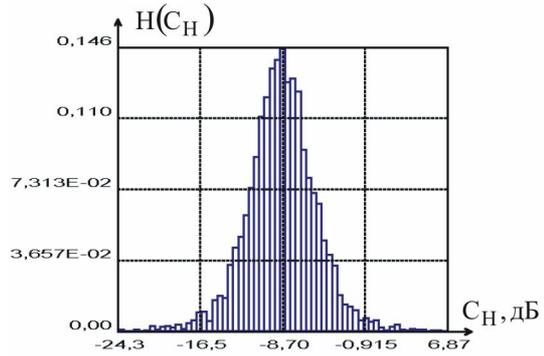
б

Рис. 5. Гистограммы коэффициента асимметрии:

а – экспериментальные данные;  
б – модельные данные



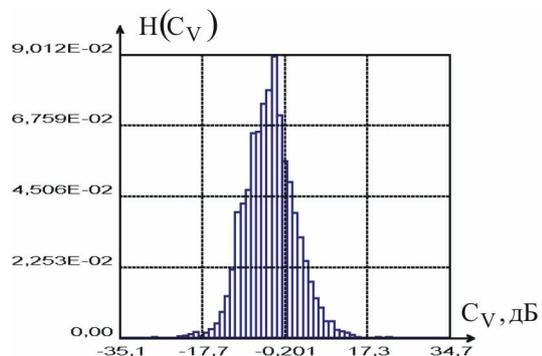
а



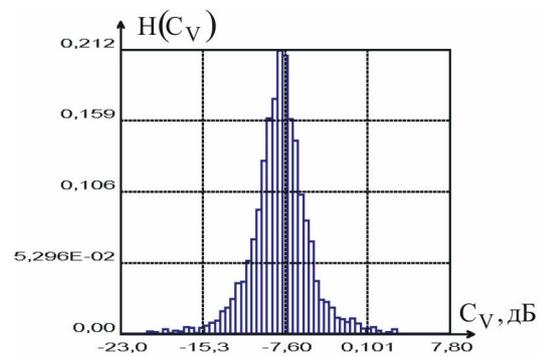
б

Рис. 6. Гистограммы  $C_H$ :

а – экспериментальные данные;  
б – модельные данные



а



б

Рис. 7. Гистограммы  $C_V$ :

а – экспериментальные данные;  
б – модельные данные

Гистограммы углов эллиптичностей  $\varphi_H$ ,  $\varphi_V$  и углов ориентаций  $\theta_H$ ,  $\theta_V$  представлены на рис. 8 – 11. Их анализ показывает, что сигнал, отраженный морской поверхностью, практически линейно поляризован, средние значения углов эллиптичности составляют от  $-1^\circ$  до  $2^\circ$  как для экспериментальных данных, так и для данных, полученных в результате моделирования (см. табл. 1). С.к.о. углов эллиптичности в первом случае не превышает  $6^\circ$ , во втором –  $7^\circ$ , при этом гистограммы являются достаточно симметричными.

Диапазон изменения углов ориентации отраженного сигнала и для модельных, и для экспериментальных данных составляет почти  $90^\circ$  как при зондировании морской поверхности сигналом горизонтальной поляризации, так и при зондировании сигналом вертикальной поляризации. Оценки м.о. и с.к.о. приведены в табл. 1. Анализ гистограмм, представленных на рис. 8 – 11, позволяет сделать вывод, что флуктуации сигнала в ортогонально поляризованных каналах приема обусловлены в основном флуктуациями ориентации, в то время как эллиптичность сигнала практически не изменяется.

Гистограммы полной ЭПР  $\lambda_E$ , рассчитанные по экспериментальным и по модельным данным, представлены на рис. 12. В первом случае диапазон изменения мощности составляет  $-32 \dots -11$  дБ со средним  $-22$  дБ и с.к.о. 3 дБ, во втором  $-33 \dots -18$  дБ, математическое ожидание  $\approx -23$  дБ, с.к.о.  $\approx 2,5$  дБ (см. табл. 1).

На рис. 13, 14 представлены гистограммы собственной эллиптичности  $\varphi_E$  и собственной ориентации  $\theta_E$  сигнала. Их анализ показывает, что собственная поляризация морской поверхности (поляризация зондирующего сигнала, при которой отраженный сигнал будет максимальным) является практически линейной и случайно ориентированной в диапазоне углов  $0 \dots 90^\circ$  с преимущественно вертикальной ориентацией (с модой закона распределения в районе  $70 \dots 80^\circ$ ). Диапазон изменения собственных эллиптичностей составляет  $\pm 20^\circ$  для экспериментальных данных и  $\pm 35^\circ$  для данных, полученных путем моделирования. При этом м.о. находится в диапазоне  $\pm 2^\circ$ , а с.к.о. составляет  $4^\circ$  для экспериментальных данных и  $6^\circ$  для модельных.

Оценки м.о. и с.к.о. всех рассмотренных ПХ сигналов, полученных в ходе экспериментальных исследований и путем моделирования, приведены в табл. 1. Результаты статистического анализа показывают, что предложенная в работах [9 – 11] микрофакетная ЭД модель шероховатой поверхности с достаточной степенью адекватности воспроизводит статистические свойства ПХ реальных поляриметрических сигналов.

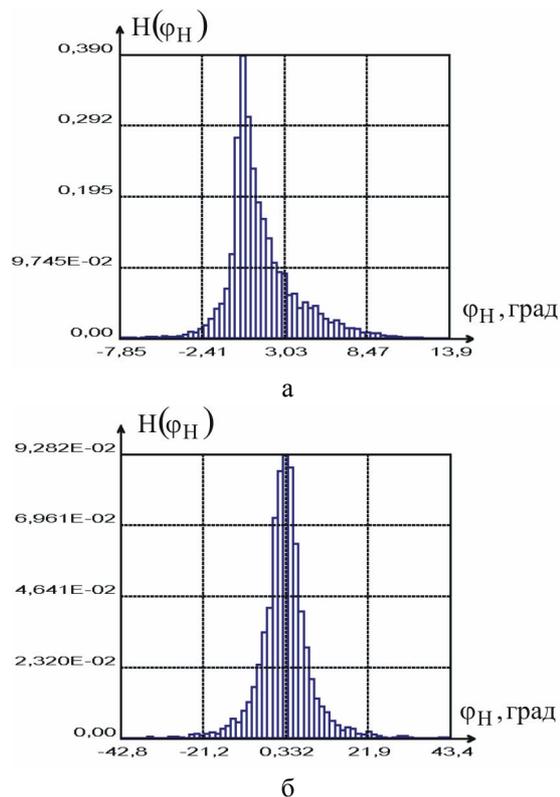


Рис. 8. Гистограммы  $\varphi_H$ :  
а – экспериментальные данные;  
б – модельные данные

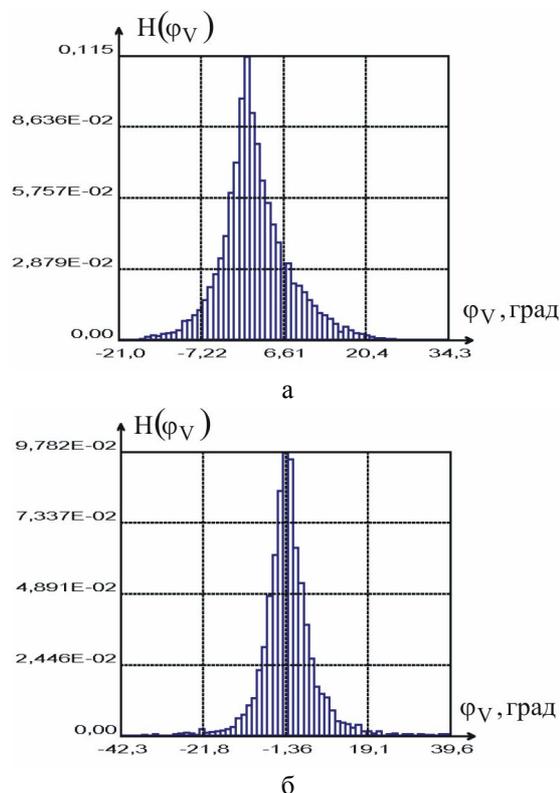
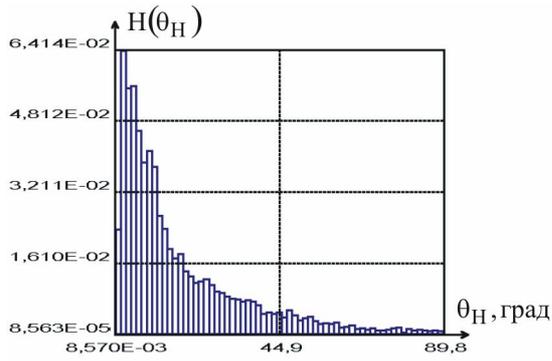
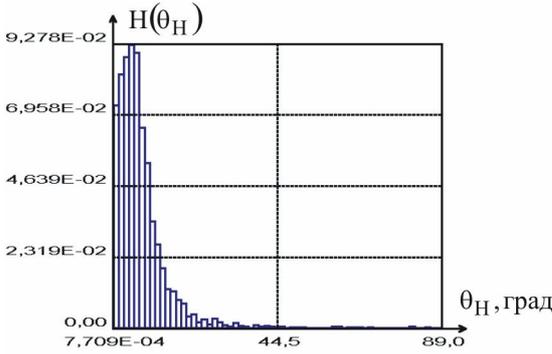


Рис. 9. Гистограммы  $\varphi_V$ :  
а – экспериментальные данные;  
б – модельные данные

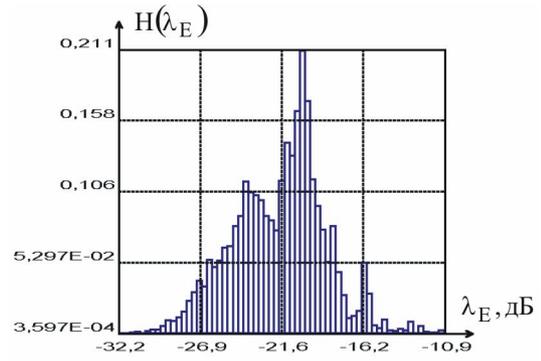


а

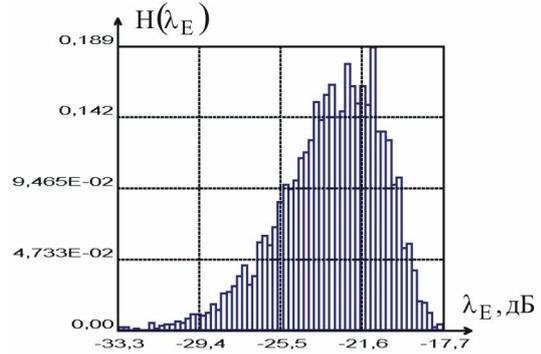


б

Рис. 10. Гистограммы  $\theta_H$  :  
а – експериментальні данні;  
б – модельні данні

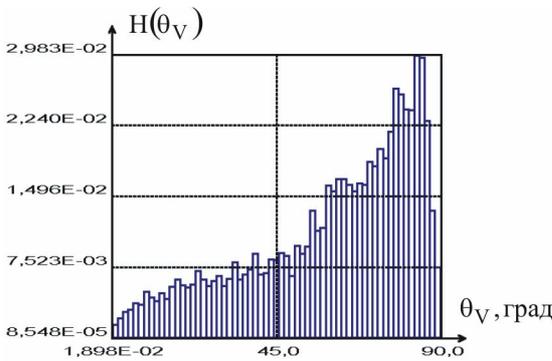


а

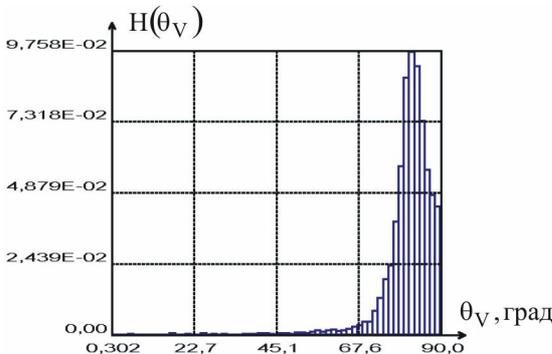


б

Рис. 12. Гистограммы  $\lambda_E$  :  
а – експериментальні данні;  
б – модельні данні

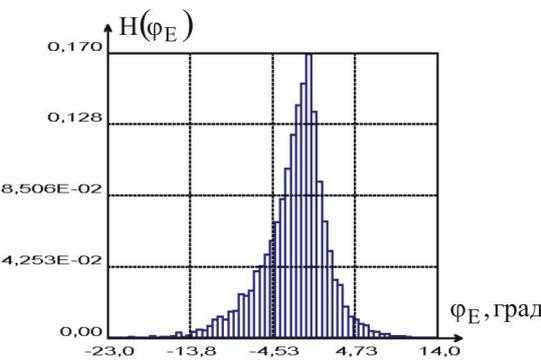


а

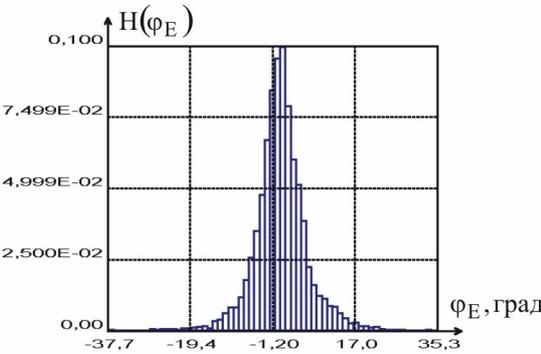


б

Рис. 11. Гистограммы  $\theta_V$  :  
а – експериментальні данні;  
б – модельні данні



а



б

Рис. 13. Гистограммы  $\phi_E$  :  
а – експериментальні данні;  
б – модельні данні

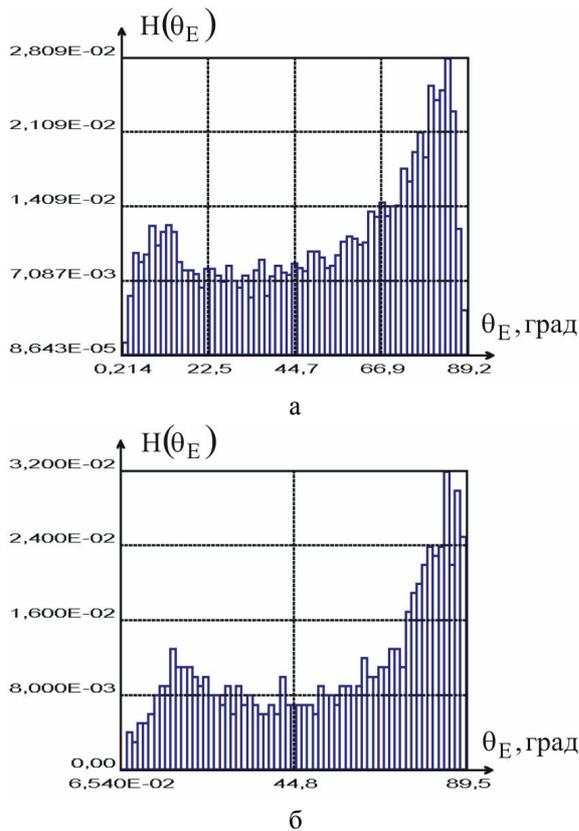


Рис. 14. Гистограммы  $\theta_E$  :  
а – экспериментальные данные;  
б – модельные данные

Таблица 1  
Оценки статистических параметров  
ПХ сигналов

ПХ	Эксперимент		Модель	
	М.о.	С.к.о.	М.о.	С.к.о.
$S_{HH}$ , дБ	-26,05	5,47	-24,31	2,88
$S_{VV}$ , дБ	-23,98	3,93	-25,06	2,72
$S_{HV}$ , дБ	-32,89	2,23	-33,10	2,82
$C_A$ , дБ	-2,07	6,55	0,75	2,68
$C_H$ , дБ	-6,84	5,33	-8,78	3,33
$C_V$ , дБ	-3,28	5,48	-8,03	2,77
$\varphi_H$ , град	1,52	2,36	0,18	7,03
$\varphi_V$ , град	1,89	5,87	-0,72	6,93
$\theta_H$ , град	17,67	17,65	7,73	8,33
$\theta_V$ , град	59,91	22,73	81,18	7,77
$\lambda_E$ , дБ	-21,71	3,07	-23,08	2,44
$\varphi_E$ , град	-1,96	3,69	0,68	6,24
$\theta_E$ , град	52,82	26,51	34,23	26,92

## Заключение

С целью проверки адекватности предложенной в работах [9 - 11] микрофакетной ЭД модели шероховатой поверхности выполнен сравнительный анализ статистических свойств ПХ поляриметрических сигналов, отраженных морской поверхностью при наличии только гравитационного волнения, полученных путем моделирования и в результате проведения экспериментальных исследований. В целом, ПХ, полученные в результате моделирования, с достаточной степенью адекватности воспроизводят ПХ реальных сигналов и отражают ряд физических явлений, возникающих при рассеянии ЭМВ морской поверхностью с гравитационным волнением, а именно явление деполяризации сигналов, наличие отсчетов ПМР, в которых уровень кроссполяризационных компонент превышает уровень основных компонент, слабое влияние морской поверхности на эллиптичность излученного сигнала (в т.ч. в собственном ПБ поверхности) и широкий диапазон изменения углов ориентации отраженных сигналов.

## Литература

1. Cloude S.R. *Polarisation: Applications in Remote Sensing* / S.R. Cloude. – Oxford: Oxford University Press, 2009. – 352 p.
2. *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.
3. Козлов А.И. *Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия* / А.И. Козлов, А.И. Логвин, В.А. Сарычев. – М.: Радиотехника, 2007. – 640 с.
4. Никольский Д.Б. *Сравнительный обзор современных радиолокационных данных ДЗЗ [Электронный ресурс]* / Д.Б. Никольский. – Режим доступа к ресурсу: [www.sovzondconference.ru/pdf\\_2010/018\\_rus.pdf](http://www.sovzondconference.ru/pdf_2010/018_rus.pdf).
5. 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.
6. Hajnsek I. *Rough Surface Scattering Models [Электронный ресурс]* / I. Hajnsek, K. Papathanassiou. – 2005. – 11 p. – Режим доступа к ресурсу: <http://earth.eo.esa.int/polsarpro/Manuals>
7. *Wind-Speed Dependence of Small-Grazing-Angle Microwave Backscatter from Sea Surfaces* / P.H.Y. Lee, J.D. Barter, E. Caponi, M. Caponi, C.L. Hindman, B.M. Lake, H. Rungaldier // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1996. – Vol. 44, No 3. – P. 333 - 340.

8. Popov A. Informativity of Polarimetric Radar Invariants / A. Popov, O. Pogrebnyak // *Proceedings of SPIE. Earth Observing Systems VIII, San Diego, 3 – 6 August 2003. - Vol. 5151. - P. 74 – 84.*

9. Борцова М.В. Моделирование шероховатых поверхностей методом рекурсивной фильтрации / М.В. Борцова // *Авиационно-космическая техника и технология. - 2007. - № 5(41). - С. 79 – 85.*

10. Борцова М.В. Моделирование многомасштабных поверхностей методом векторной рекурсивной фильтрации / М.В. Борцова // *Авиационно-космическая техника и технология. - 2009. - № 1/58. - С.84 – 88.*

11. Борцова М.В. Моделирование поляриметрических сигналов, отраженных подстилающей поверхностью, с учетом параметров радиолокационной станции / М.В. Борцова, А.В. Попов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи. - 2009. - № 4(38). - С. 33 – 41.*

12. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.

13. Попов А.В. Сравнительный анализ теорем декомпозиции поляризационных характеристик объектов активного аэрокосмического дистанци-

онного зондирования / А.В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология. - 2010. - № 5(72). - С. 90 – 99.*

14. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн / Я.Л. Альперт, В.Л. Гинзбург, Е.Л. Фейнберг. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 883 с.

15. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В.В. Быков. – М.: Советское радио, 1971. – 440 с.

16. 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.

17. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны: пер. с англ. / А.Р. Хиппель. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 439 с.

18. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 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 15.02.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., начальник отдела радиолокации Г.И. Хлопов, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ МОРСЬКОЮ ПОВЕРХНЕЮ

*М.В. Борцова, А.В. Попов*

При вирішенні задач інтерпретації даних поляриметричного дистанційного зондування Землі широко використовуються моделі розсіювання електромагнітних хвиль. Представлено мікрофасетну модель статистично шорохуватої поверхні та методику розрахунку відбитих поляриметричних сигналів. З метою перевірки їх адекватності виконано порівняльний аналіз статистичних властивостей поляризаційних характеристик радіолокаційних поляриметричних сигналів, отриманих в результаті моделювання та даних, отриманих в ході натурних експериментів при дослідженні морської поверхні з гравітаційними хвилями.

**Ключові слова:** радіолокаційна поляриметрія, поляризаційні характеристики, моделювання, поляризаційна матриця розсіювання, еліптичність, орієнтація, поляризаційний базис.

## EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE METHOD FOR RADAR POLARIMETRIC SIGNALS BACKSCATTERED BY THE SEA SURFACE MODELLING

*M. V. Bortsova, A. V. Popov*

Electromagnetic waves scattering models are widely used while solving tasks of interpreting polarimetric remote sensing data. A rough surface microfacet model and a methodology for calculating backscattered polarimetric signals are presented. For their verification a comparative analysis of polarization signatures of radar signals received by modeling and during experimental researches of the sea surface with gravitational waves was carried out.

**Key words:** radar polarimetry, polarization signatures, modeling, polarization scattering matrix, ellipticity, orientation, polarization basis.

**Борцова Мария Викторовна** – аспірантка кафедри виробництва радіоелектронних систем летальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харьков, Україна, e-mail: masha\_bortsova@gambler.ru.

**Попов Анатолий Владиславович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри виробництва радіоелектронних систем летальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харьков, Україна, e-mail: a.v.popov@inbox.ru.