

УДК 621.396.96

Е.П. ШАПОВАЛ

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

## О ВЛИЯНИИ ФИЛЬТРАЦИИ НА ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлены результаты моделирования поляриметрических изображений объектов дистанционного зондирования с различными поляризационными характеристиками и обработки их фильтрами различного типа. Показано, что применение традиционных методов фильтрации к поляриметрическим изображениям приводит к изменению формы законов распределения поляризационных характеристик объекта, а восстановление поляриметрической информации после фильтрации исходных изображений приводит к существенным ошибкам восстановления. Приведены численные оценки степени потерь поляризационной информации.

**поляриметрические изображения, поляризационные параметры, фильтрация**

### Введение

В настоящее время все большее значение приобретают дистанционные методы исследования поверхности Земли, позволяющие повысить эффективность работы поисково-спасательных и пограничных служб, обеспечить безопасность полетов летательных аппаратов и движения морских судов, более широко использовать возможности радиолокационного картографирования, экологического мониторинга. Однако функциональные возможности современных систем дистанционного зондирования (ДЗ) пока не отвечают в полной мере многообразию предъявляемых к ним требований.

Одним из путей повышения эффективности современных систем ДЗ является использование поляризационной информации об объектах радиолокационного наблюдения. Применение в качестве средств ДЗ радиолокационных поляриметров позволяет организовать эффективное подавление помеховых сигналов от подстилающей поверхности и гидрометеорообразований, расширить признаковое пространство для принятия решений в системах распознавания, выделять информативные признаки, связанные с геометрическими и электрофизическими особенностями радиолокационных объектов [1]. Однако методы об-

работки поляриметрических изображений на сегодняшний день разработаны недостаточно [2].

### 1. Поляризация радиолокационных сигналов

Известно [3], что электромагнитная волна, распространяющаяся в пространстве, может быть описана комплексными числами – проекциями комплексного вектора  $\vec{E}$ :

$$\begin{aligned} \dot{E}_X &= E_{X \max} \cdot e^{j(\omega t + \psi_X)}, \\ \dot{E}_Y &= E_{Y \max} \cdot e^{j(\omega t + \psi_Y)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\psi_X, \psi_Y$  – фазовые углы компонент  $\dot{E}_X$  и  $\dot{E}_Y$  соответственно (рис. 1).

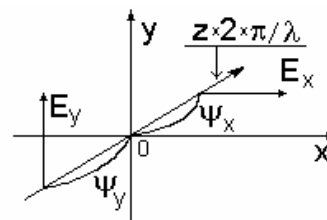


Рис. 1. Компоненты вектора поляризации

Комплексные амплитуды  $\dot{E}_X$  и  $\dot{E}_Y$  ортогонально поляризованных компонент (1) образуют вектор поляризации

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} E_X \cdot e^{j\psi_X} \\ E_Y \cdot e^{j\psi_Y} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для количественного описания поляризации электромагнитной волны используются геометрические параметры эллипса (рис. 2):

– угол эллиптичности

$$\phi = \arctg(b/a); \quad \phi \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right]; \quad (3)$$

где  $b$  и  $a$  – малая и большая полуоси эллипса (угол эллиптичности  $\phi$  принимают положительным для правого направления вращения вектора  $\vec{E}$ );

– угол ориентации  $\theta$  – угол между ортом  $\vec{n}_x$  и большой полуосью эллипса, ограниченный пределами  $\theta \in [0.. \pi]$ .

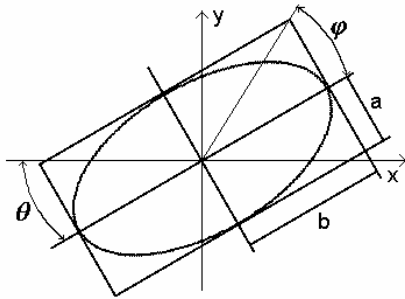


Рис. 2. Геометрические параметры поляризационного эллипса

Угол эллиптичности  $\phi$  и угол ориентации  $\theta$  не зависят от положения в пространстве ортов  $\vec{n}_x$  и  $\vec{n}_y$ , т.е. являются инвариантными характеристиками поляризации электромагнитной волны.

Известно [4], что отраженный от радиолокационного объекта сигнал  $\dot{E}_R$  вида (2) связан с излученным сигналом  $\dot{E}_S$  комплексной поляризационной матрицей рассеяния (ПМР)  $\dot{S}$  размером  $2 \times 2$  как

$$\dot{E}_R = \dot{S} \cdot \dot{E}_S. \quad (4)$$

ПМР  $\dot{S}$  описывает отражающие свойства объекта на ортогональных поляризациях  $a, b$

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{aa} & \dot{S}_{ab} \\ \dot{S}_{ba} & \dot{S}_{bb} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

а квадраты модулей ее элементов соответствуют эффективным поверхностям рассеяния объекта. Для моностатической радиолокации  $\dot{S}_{ab} = \dot{S}_{ba}$  [4].

В матрице (5) содержится вся информация об отражающих свойствах объекта при заданной частоте зондирования и фиксированном ракурсе наблюдения, однако значения ее элементов зависят от выбора ортогональных поляризаций  $a, b$ . Обычно это вертикальная ( $V$ ) и горизонтальная ( $H$ ) поляризации.

Поляризационными инвариантами радиолокационного объекта являются собственные числа матрицы (10)  $\dot{\lambda}_1$  и  $\dot{\lambda}_2$  [4]:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1 & 0 \\ 0 & \dot{\lambda}_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Характеристическое уравнение для (5) задается в виде

$$\dot{S} \times \vec{x} = \lambda \times \vec{x}, \quad (7)$$

Собственный вектор, соответствующий (6), при этом имеет вид

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \Theta \\ j \sin \Theta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $\Phi$  и  $\Theta$  – поляризационные параметры собственной поляризации объекта. Физически собственные поляризации, соответствующие собственным числам (8) матрицы (6), характеризуются отсутствием в отраженном сигнале компонент, поляризованных ортогонально облучающей волне. Т.е. при облучении объекта сигналом его собственной поляризации амплитуда отраженного сигнала будет максимальна.

## 2. Поляриметрические изображения

Радиолокационные поляриметры представляют собой многоканальную радиолокационную систему, измеряющую амплитуды и фазы отражённых сигналов (4) на различных поляризациях.

В результате измерений получают многоканальные радиолокационные изображения. На рис. 3 представлен план участка местности размером  $2 \times 2$  км, на которой расположены различные по электрофизическим свойствам объекты: поля с травяным покровом, лиственный лес, здания, дороги, линии электропередач. На рис. 4, 5, 7 представлены радио-

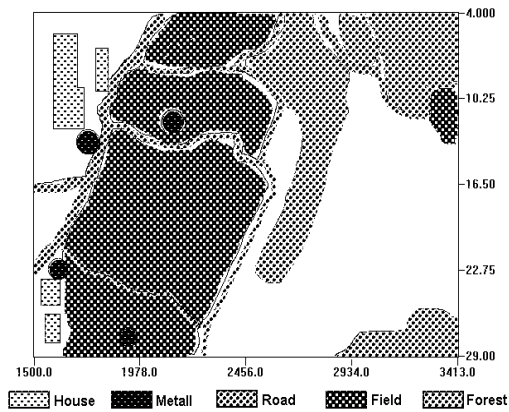


Рис. 3. План местности, составленный по данным GPS

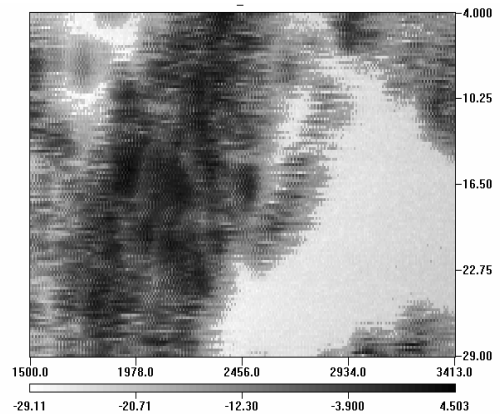


Рис. 4. Радиолокационное изображение при вертикальной поляризации зондирования и приема ( $S_{VV}$ )

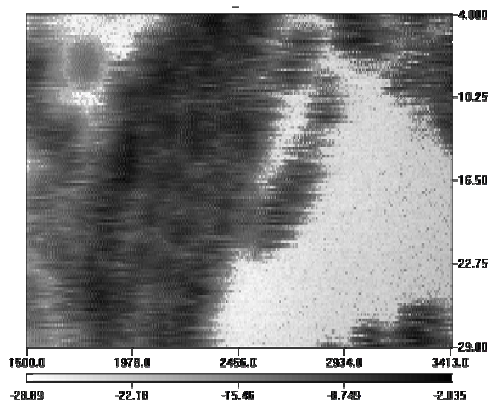


Рис. 5. Радиолокационное изображение при вертикальной поляризации зондирования и горизонтальной приема ( $S_{VH}$ )

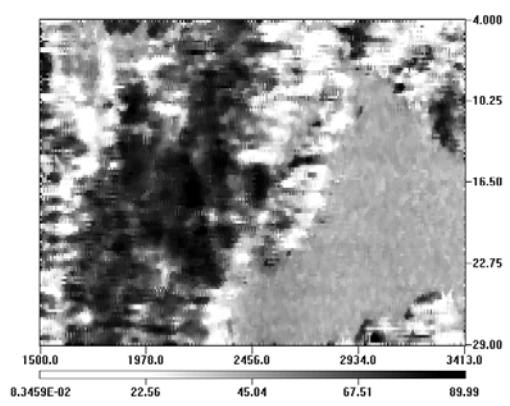


Рис. 6. Поляриметрическое изображение при использовании угла ориентации собственной поляризации  $\Theta$ :  $0^\circ$  – "белый" – горизонтальная поляризация,  $90^\circ$  – "черный" – вертикальная

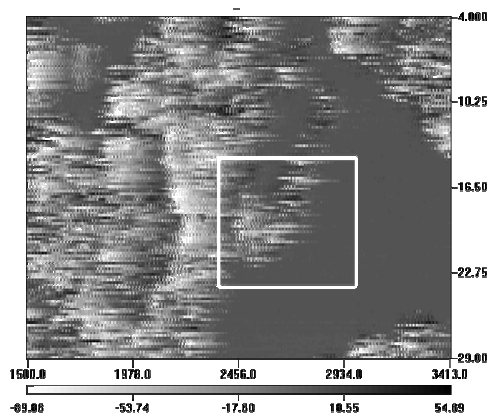


Рис. 7. Фазоразностное радиолокационное изображение при вертикальной поляризации зондирования и приема ( $\Psi_{VH} - \Psi_{VV}$ )

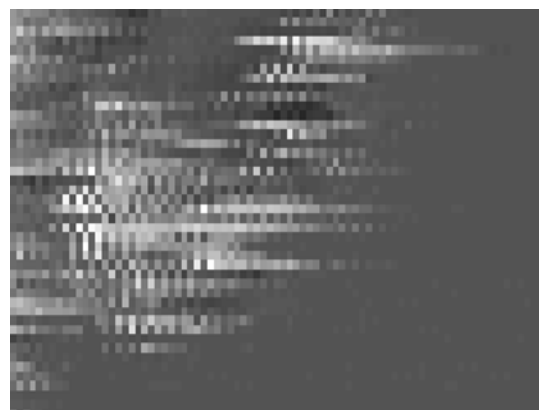


Рис. 8. Увеличенный фрагмент радиолокационного изображения на рис. 7

локационные изображения данного участка местности при вертикальной поляризации зондирования с визуализацией амплитуды отраженного сигнала ВДБ. Несмотря на имеющиеся различия, данные радиолокационные изображения представляются малоинформативными, однако на их основе могут быть получены поляриметрические изображения, характеризующие электрофизические и геометрические свойства объектов. Например, на рис. 6 показано поляриметрическое изображение, на котором уровнем яркости представлен угол ориентации  $\theta$  собственной поляризации (8). Сигнал, отраженный от вертикально-ориентированных стеблей травы имеет ярко выраженную вертикальную поляризационную составляющую, в то время как отражения от лесного массива по поляризации достаточно хаотичны. Таким образом, получаемые с помощью поляриметров изображения более информативны по сравнению с традиционными изображениями, поскольку различные объекты имеют различные деполаризующие свойства, что может служить основой для их распознавания.

Детальный анализ поляриметрических изображений (рис. 8) показал, что они являются зашумлёнными как по техническим причинам, так и в следствии флуктуации свойств объектов дистанционного зондирования. Для улучшения визуальной информативности изображений традиционно применяются различные методы их фильтрации, разработанные для улучшения оптических изображений. Применение этих методов к многоканальным поляриметрическим изображениям приводит, как правило, к разрушению поляриметрической информации.

### 3. Методика исследований

Было проведено исследование влияние традиционных методов фильтрации на информативность поляриметрических изображений, с точки зрения, насколько предварительная фильтрация искажает поляриметрическую информацию.

Выполнялось моделирование поляриметрических изображений с использованием классической двухвибраторной модели стабильной радиолокационной цели, описывающей её поляризационные свойства в заданном направлении [5]. Объект ДЗ представляется в виде двух линейных электрических вибраторов (рис. 9).

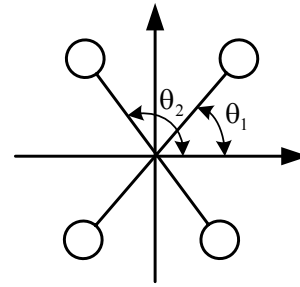


Рис. 9. Двухвибраторная модель стабильной радиолокационной цели

В таком случае элементы матрицы рассеяния в системе координат  $\{H, V\}$  могут быть представлены как функции параметров модели [5]:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{HH} &= k_1 \cos^2 \theta_1 e^{j\psi_1} + k_2 \cos^2 \theta_2 e^{j\psi_2}; \\ \dot{s}_{VV} &= k_1 \sin^2 \theta_1 e^{j\psi_1} + k_2 \sin^2 \theta_2 e^{j\psi_2}; \\ \dot{s}_{HV} &= 1/2(k_1 \sin 2\theta_1 e^{j\psi_1} + k_2 \sin 2\theta_2 e^{j\psi_2}), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – ориентация диполей относительно выбранной системы координат,  $\psi_1, \psi_2$  – фаза колебаний сигналов, отраженных диполями.

Постоянные коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  представляют собой максимальные значения коэффициентов рассеяния (отражения) вибраторов.

Моделировались объекты, отражающие сигнал с различной эллиптичностью и ориентацией с разбросом этих параметров по нормальному закону с небольшой дисперсией, обусловленной флуктуацией собственных параметров объекта, что по статистическим свойствам соответствует полям с травяным покровом. Шумы аппаратуры не учитывались.

Моделировалась работа радиолокационной системы излучающей вертикально поляризованный сигнал и осуществляющей приём по трём каналам –

вертикальному, горизонтальному и фазоразностно-  
му, т.е. с измерением  $S_{VV} = |\dot{S}_{VV}|$ ,  $S_{VH} = |\dot{S}_{VH}|$ ,  
 $\Delta = \psi_V - \psi_H$ .

Определялись параметры поляризации [6]:

$$\begin{cases} \sin 2\phi = \sin 2\gamma \sin \Delta; \\ \operatorname{tg}\theta = \frac{\sin 2\gamma \cos \Delta}{\cos 2\gamma + \cos 2\phi}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\gamma = \arctg(E_V / E_H)$ ;

$\phi$  – угол эллиптичности;

$\theta$  – угол ориентации поляризационного эллипса;

$\Delta$  – разность фаз компонент  $\dot{E}_H$  и  $\dot{E}_V$ .

По результатам этих измерений, используя соотношения (10), восстанавливались параметры сигнала и строились законы распределений ориентации и эллиптичности отражённого сигнала.

Исходные изображения подвергались фильтрации различными методами с окнами различных размеров. Использовались классические линейный и медианный фильтры [7]. Размеры окна варьировались от  $3 \times 3$  до  $9 \times 9$ .

Главной целью применения сглаживающих фильтров является подавление «несущественных» деталей на изображении, под которыми понимаются совокупности пикселей, которые малы по сравнению с размерами маски фильтра. Однако негативной стороной применения сглаживающих фильтров является дефокусировка границ объектов. Медианные фильтры демонстрируют меньший эффект дефокусировки, по сравнению с линейными [7].

Анализ степени искажения поляриметрических изображений выполнялся путём восстановления параметров поляризации (10) после фильтрации. Строились гистограммы  $S_{VV}$ ,  $S_{VH}$ ,  $\theta$  и  $\phi$ . Оценивались средние значения и дисперсии угла ориентации и угла эллиптичности в зависимости от разности фаз ортогонально поляризованных компонент (ОПК) отражённого сигнала и от угла ориентации отражённого сигнала. Степень искажения поляриметрической информации оценивается как

$$\delta = \frac{x - \hat{x}}{x} 100\%, \quad (11)$$

где  $x$  – значение параметра до фильтрации;

$\hat{x}$  – значение после фильтрации.

#### 4. Результаты исследований

Анализ результатов моделирования показывает, что фильтрация исходных изображений вызывает изменение содержащейся в них поляризационной информации.

При линейной фильтрации происходит изменение формы законов распределения элементов ПМР, при медианной – смещение законов распределения, как показано на рис. 10.

Соответственно восстановление параметров поляризации по (10) приводит к другим результатам. При этом законы распределения угла эллиптичности и угла ориентации, оценённые по отфильтрованным данным, претерпевают искажения, как показано на рис. 11.

Численная оценка искажения поляризационных параметров приведена на рис. 12 – 14. Искажение оценок математического ожидания поляризационных параметров сигнала за счёт предварительной фильтрации может достигать сотен процентов. Увеличение размера окна, как показано на рис. 12, слабо влияет на степень искажения. Линейный и медианный фильтры вносят искажения одного порядка (рис. 13).

Ориентация сигнала в меньшей степени подвержена искажению при фильтрации. Искажение эллиптичности более существенно (рис. 14).

Степень искажений существенно зависит от поляризационных свойств объектов (рис. 12): существуют области эллиптичности сигналов, при фильтрации которых резко возрастают ошибки определения ориентации сигнала. Очевидно, это связано с трансформацией законов распределения поляризационных параметров, например, как показано на рис. 11.

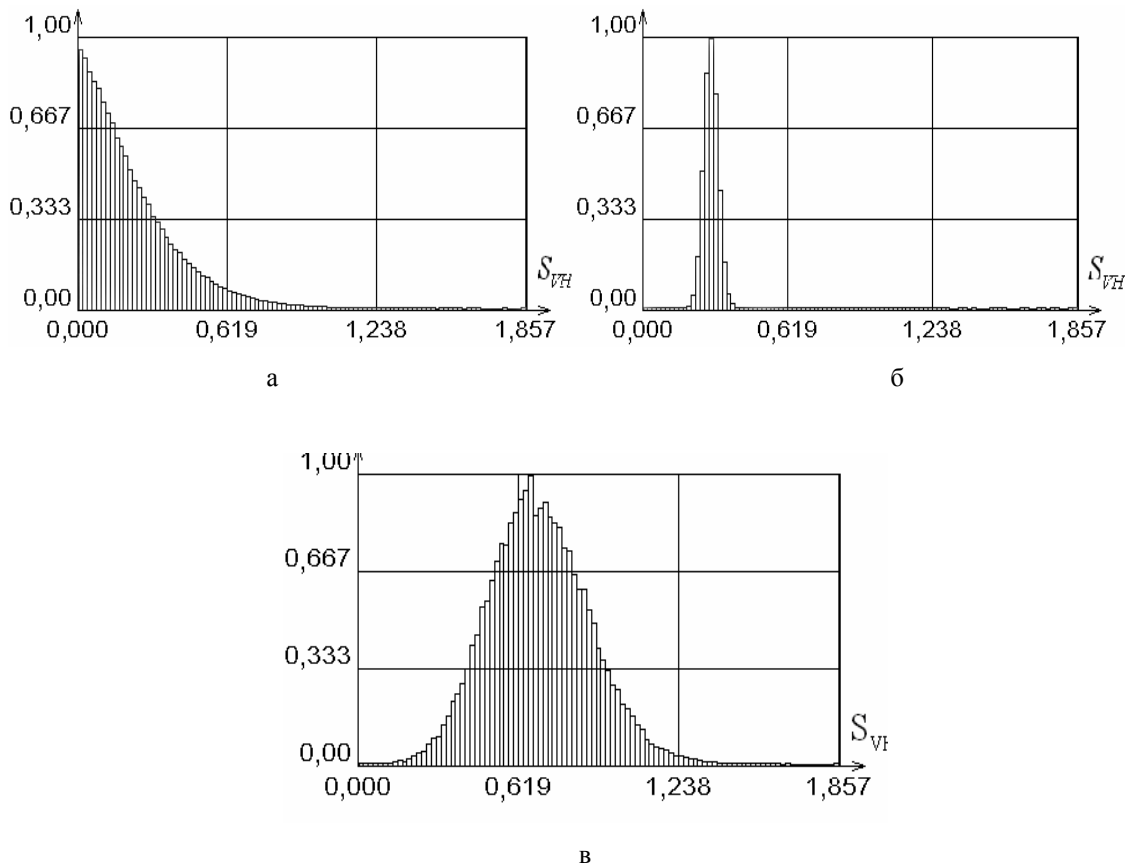


Рис. 10. Гистограмма  $S_{VH}$ :  
 а – исходного изображения;  
 б – изображения отфильтрованного линейным фильтром;  
 в – изображения, отфильтрованного медианным фильтром.

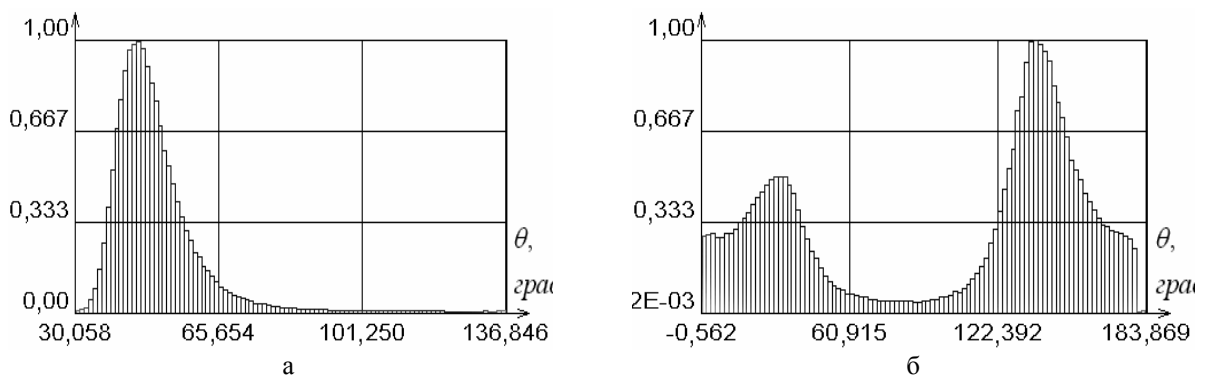


Рис. 11. Гистограмма угла ориентации:  
 а – исходного изображения;  
 б – отфильтрованного изображения

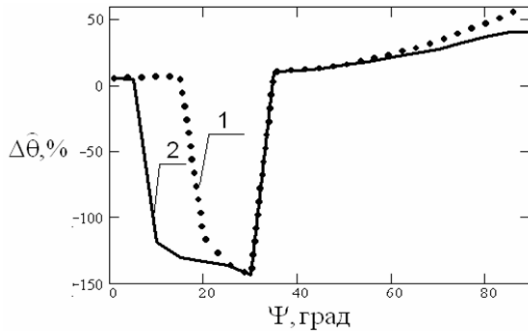


Рис. 12. Искажение оценки математического ожидания угла ориентации в зависимости от разности фаз ОПК отражённого сигнала:

- 1 –линейный фильтр с маской  $9 \times 9$ ;  
2 –линейный фильтр с маской  $3 \times 3$

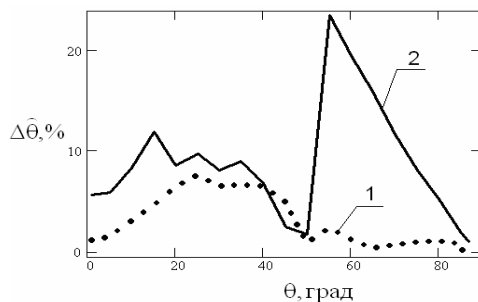


Рис. 13. Искажение оценки математического ожидания угла ориентации в зависимости от угла ориентации отражённого сигнала:

- 1 –медианный фильтр с маской  $9 \times 9$ ;  
2 –линейный фильтр с маской  $9 \times 9$

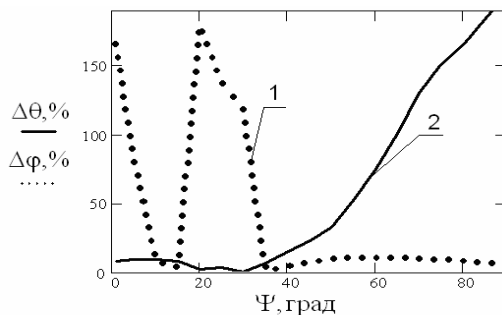


Рис. 14. Искажение оценки математического ожидания угла эллиптичности и угла ориентации в зависимости от разности фаз ОПК отражённого сигнала:

- 1 –линейный фильтр с маской  $9 \times 9$ ;  
2 – медианный фильтр с маской  $3 \times 3$

### Заклучение

Повышение эффективности средств ДЗ за счёт использования поляриметрической информации ограничено зашумлённостью получаемых многоканальных изображений. Применение традиционных методов фильтрации изображений вносит, как пока-

зали проведённые исследования, существенные искажения поляриметрической информации, вследствие искажения формы законов распределения поляризационных параметров сигналов. Восстановление поляриметрической информации после фильтрации исходных изображений приводит к существенным ошибкам восстановления. Поэтому для обработки поляриметрических изображений требуется разработка специальных фильтров, не вносящих поляризационных искажений.

### Литература

1. Popov A. Informability of polarimetric radar invariants. / A. Popov, O. Pogrebnyak // Proc. SPIE. – 2003. – V. 5151. – P. 74-84.
2. David Ballester-Berman J. Retrieval of biophysical parameters of agricultural crops using polarimetric SAR interferometry / J. David Ballester-Berman, Juan M. Lopez-Sanchez // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2005. – V. 43, № 4. – P. 683-684.
3. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные колебания и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В.Зернов. – М.: Сов. Радио, 1956. – 640 с.
4. Канарейкин А.Б. Морская поляриметрия / А.Б. Канарейкин, В.А.Потехин, И.Ф. Шишкин – Л.: Судостроение, 1968. – 328 с.
5. Канарейкин А.Б. Поляризация радиолокационных сигналов. / А.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
6. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция. / К.Г. Гусев, А.Д. Филатов, А.П. Сополев. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
7. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006 – 1027 с.

Поступила в редакцию 11.03.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, ГНПЦ «Природа», Харьков.