

УДК 621.391

А.В. ПОПОВ, Р.В. КОЛЕСНИК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОЛЯРИМЕТРА**

Измерение параметров движения радиолокационного объекта традиционно основано на оценке параметров спектра отраженного им сигнала. Предлагается поляриметрический метод оценки траектории движения объекта на основе анализа инвариантных поляризационных характеристик объекта, получаемых путем когерентной декомпозиции его поляризационной матрицы рассеяния. Представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований в безэховой камере и в натурных условиях поляризационных характеристик объектов со сложной траекторией движения. Показано, что предложенный метод обеспечивает определение характера движения объекта и оценку параметров его траектории.

Ключевые слова: радиолокационный объект, поляризационная модуляция, инварианты поляризационной матрицы рассеяния, декомпозиция.

Введение

Современные методы аэрокосмического дистанционного зондирования (ДЗ) позволяют решать широкий круг актуальных задач [1], таких как картографирование поверхности Земли, экологический мониторинг, обеспечение поисково-спасательных работ и др. Радиотехнические системы ДЗ обеспечивают измерение характеристик объектов по параметрам отраженного сигнала, что позволяет применить методы ДЗ для решения задач технической диагностики объектов. Дистанционное измерение параметров вибрации, качки или движения объекта в направлении средства ДЗ основано, как известно, на наличии доплеровских составляющих в спектре отраженного объектом сигнала, однако к аналогичным эффектам приводит вращение объекта, его качка и вибрации в плоскости волнового фронта.

Для однозначного дистанционного определения характера и параметров движения объекта необходимо использование многоканальных средств ДЗ, обеспечивающих получение дополнительной информации об объектах радиолокационного наблюдения [2].

Известно [1, 3], что любой отражающий объект можно представить в виде набора элементарных отражателей, перемещения которых приводят к амплитудной, фазовой, частотной и поляризационной модуляции отраженного сигнала. Получение полной информации об объектах ДЗ возможно за счет измерения полной поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) объектов [3]. Одним из путей измерения полной ПМР является применение поляризационно модулированных сигналов (ПМС) [4], что позволяет при последующей обработке сигналов

выделить информативные характеристики радиолокационных объектов [5]. Как правило, отраженные ПМС обладают сложной спектральной структурой [6], а совместная оценка всех модулирующих функций таких сигналов является сложной задачей [7]. Кроме того, поляризационные характеристики отраженного сигнала зависят от геометрических и электрофизических свойств объектов [5].

Постановка задачи исследований

Недостатком традиционного описания поляризационных характеристик объектов ДЗ с помощью ПМР является зависимость ее элементов как от поляризации антенн средства ДЗ, так и от ориентации объекта относительно него. Используемые в настоящее время различные инвариантные преобразования ПМР [3] порождают громоздкие математические конструкции, усложняющие процессы обработки данных ДЗ и интерпретацию поляриметрической информации.

В работе [8] на основе математического аппарата двойной комплексной плоскости проведена когерентная декомпозиция ПМР и введена инвариантная характеристика поляризационных свойств объекта ДЗ, названная оператором рассеяния, параметры которого теоретически позволяют разделить процессы, вызывающие амплитудную, фазовую (частотную) и поляризационную модуляцию отраженного объектом сигнала.

Целью данной работы является экспериментальное исследование метода оценки параметров движения объектов на основе операторной декомпозиции поляризационных характеристик сигналов, отраженных объектами ДЗ.

1. Математическая модель поляриметрического сигнала

Для описания электромагнитной волны (ЭМВ) традиционно используется ее представление в виде вектора-столбца ортогонально поляризованных компонент [4]:

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

где ω – несущая частота сигнала;

\dot{E}_X, \dot{E}_Y – комплексные амплитуды проекций на оси выбранной системы координат (x, y).

Представление (1) соответствует разложению эллиптически поляризованной ЭМВ на ее проекции:

$$\vec{\dot{E}}(t) = (\vec{n}_X \cdot E_X \cdot e^{j\psi_X} + \vec{n}_Y \cdot E_Y \cdot e^{j\psi_Y}) \cdot e^{j\omega t}, \quad (2)$$

где \vec{n}_X, \vec{n}_Y – единичные орты осей x и y ;

E_X, E_Y – амплитуды;

ψ_X, ψ_Y – фазы проекций вектора \vec{E} на оси x и y соответственно (рис. 1).

Если в соответствие плоскости $\{x0y\}$ поставить комплексную плоскость, мнимая ось i которой совпадает с осью y , а действительная ось – с осью x , как показано на рис. 1, то из (2), временно опустив множитель $e^{j\omega t}$, получим форму записи эллиптически поляризованного поля на двойной комплексной плоскости: временной $(1, j)$ и пространственной $(1, i)$ [4, 8]:

$$\ddot{E} = E \cdot (\cos \varphi - ij \sin \varphi) \cdot (\cos \theta + i \sin \theta) \cdot e^{j\psi}, \quad (3)$$

где E – амплитуда сигнала;

φ – эллиптичность ЭМВ;

θ – ориентация ЭМВ;

ψ – фаза сигнала.

Применение к (3) формулы Эйлера [9] дает представление сигнала на двойной комплексной плоскости в виде

$$\ddot{E}(t) = E \cdot e^{-ij\varphi} e^{i\theta} e^{j(\omega t + \psi - kz)}, \quad (4)$$

где множитель e^{-jkz} описывает распространение ЭМВ вдоль оси z, t [8].

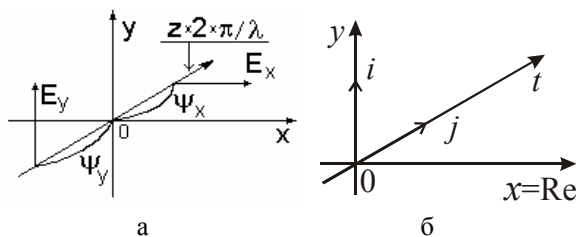


Рис. 1. Компоненты электромагнитной волны (а) и двойная комплексная плоскость (б)

Согласно (4), отраженный радиолокационный сигнал может быть представлен в виде:

$$\ddot{E}_R(t) = E_R(t) \cdot e^{-ij\varphi(t)} \cdot e^{i\theta(t)} \cdot e^{j(\omega t + \psi(t))}, \quad (5)$$

где $E_R(t)$ – изменение амплитуды отраженного сигнала (амплитудная модуляция);

$\varphi(t)$ – изменение эллиптичности ЭМВ, обусловленное взаимным перемещением элементарных отражателей объекта;

$\theta(t)$ – изменение угла ориентации вектора поляризации;

$\psi(t)$ – фазовая модуляция сигнала, вызванная перемещением объекта вдоль линии визирования.

2. Поляризационная декомпозиция объекта дистанционного зондирования

Известно, что отраженный от радиолокационного объекта сигнал \dot{E}_R вида (1) связан с излученным сигналом \dot{E}_S комплексной поляризационной матрицей рассеяния (ПМР) \dot{S} размером 2×2 как

$$\dot{E}_R = \dot{S} \cdot \dot{E}_S. \quad (6)$$

ПМР \dot{S} описывает отражающие свойства объекта на ортогональных поляризациях X, Y :

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{XX} & \dot{S}_{XY} \\ \dot{S}_{YX} & \dot{S}_{YY} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

а квадраты модулей ее элементов соответствуют эффективным поверхностям рассеяния объекта. Для моностатической радиолокации $\dot{S}_{XY} = \dot{S}_{YX}$ [3]. В матрице (7) 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 . На практике обычно используют вертикальную (V) и горизонтальную (H) поляризации [1, 3, 5].

Поляризационными инвариантами объекта ДЗ являются собственные числа λ_1, λ_2 и собственные вектора $\vec{\zeta}_E$ матрицы (7) [3, 5], которые определяются характеристическим уравнением

$$\dot{S} \cdot \vec{\zeta}_E = \lambda \cdot \vec{\zeta}_E$$

и имеют вид [3]:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \cdot e^{j\psi_1} & 0 \\ 0 & \lambda_2 \cdot e^{j\psi_2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\vec{\zeta}_E = \begin{bmatrix} \cos \theta_E & -\sin \theta_E \\ \sin \theta_E & \cos \theta_E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi_E \\ j \cdot \sin \varphi_E \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где φ_E и θ_E – поляризационные параметры так называемой [3, 5] собственной поляризации объекта,

образующие т.н. собственный поляризационный базис $\check{\zeta}_E = \zeta(\varphi_E, \theta_E)$ [3, 4]. Физически собственные поляризации (9), соответствующие собственным числам (8) матрицы (7), характеризуются отсутствием в отраженном сигнале компонент, поляризованных ортогонально облучающей волне. При этом собственные числа λ_1, λ_2 ПМР \check{S} являются комплексными коэффициентами отражения объекта при зондировании его сигналами собственных поляризаций $\check{\zeta}_{E1} = \zeta(\varphi_E, \theta_E)$ и $\check{\zeta}_{E2} = \zeta(-\varphi_E, \theta_E + \pi/2)$.

Описание поляризационных характеристик объекта ДЗ, адекватное представлению сигнала на двойной комплексной плоскости (5), было получено в работе [8] в виде оператора в терминах двойной комплексной плоскости, который описывает амплитудные, фазовые и поляризационные преобразования сигнала при его отражении от объекта как

$$\check{S}(\vec{\lambda}, \check{\zeta}_E) = k \cdot e^{j\psi_T} \cdot \check{\Phi}(\varphi_T, \theta_E) \cdot \check{\Theta}(\theta_T), \quad (10)$$

где $\check{\Phi}(\phi, \theta) = \left\{ \check{\Theta}\left[-\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)\right] \times e^{-ij\phi} \right\} \cdot \check{\Theta}\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)$ – оператор изменения эллиптичности ϕ сигнала, ориентированного под углом θ в плоскости $(x0y)$;

$\check{\Theta}(\theta) = e^{i\theta}$ – оператор поворота системы координат на угол θ в плоскости $(x0y)$;

$\varphi_T, \theta_T, \psi_T$ – параметры эллиптичности, ориентации и фазы объекта, определяемые [8] по собственным числам (8) ПМР объекта $\vec{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2]$;

$k = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}$ – «размер» радиолокационного объекта;

θ_E – угол ориентации собственной поляризации объекта $\check{\zeta}_E = \zeta(\varphi_E, \theta_E)$.

Для определения компонент волны, отраженной объектом ДЗ в базисе антенны, например, традиционном $\{H, V\}$: $\check{\zeta}_H = \zeta(0, 0)$, $\check{\zeta}_V = \zeta(0, \pi/2)$, необходимо записать зондирующий сигнал \check{E}_S в виде (4), представить \check{E}_S в базисе объекта $\check{\zeta}_E$ согласно (9), выполнить его операторное умножение на (10) и результат, полученный в собственном базисе объекта $\check{\zeta}_E$, представить согласно (9) в исходном поляризационном базисе:

$$\check{E}_R|_{HV} = \left[\check{S}(\vec{\lambda}, \check{\zeta}_E) \times \check{E}_S|_{\check{\zeta}_E} \right] \cdot e^{-ij\varphi_E} \cdot e^{\theta_E}. \quad (11)$$

Особенностью операторного представления поляризационных характеристик объектов является его инвариантность относительно применяемых сигналов, и его параметры являются собственными инвариантными характеристиками объекта ДЗ. Опе-

ратор (10) позволяет отдельно описать преобразования амплитуды, фазы и поляризации сигналов при их отражении объектом ДЗ. Оценка параметров оператора (10) по данным поляриметрических измерений позволяет определить параметры движения объекта – изменение его ориентации в плоскости волнового фронта (вращение относительно оси z) $\theta(t)$, взаимное перемещение элементарных отражателей объекта (изменение ракурса, вращение относительно оси симметрии) $\varphi(t)$, перемещение объекта вдоль линии визирования $\psi(t)$.

3. Математическая модель объекта экспериментальных исследований

Возможность оценки параметров движения объекта ДЗ исследовалась в лабораторных условиях для частного случая – изменения ориентации объекта в плоскости волнового фронта. Объектом дистанционного зондирования в поляризационном базисе $\{H, V\}$ являлся металлический диполь, ориентированный в плоскости (H, V) под углом θ относительно оси $\overline{0N}$. Нормированная ПМР такого объекта хорошо известна [3]:

$$\check{S}|_{HV} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \sin \theta \cdot \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

По соотношениям, приведенным в [8], найдем параметры оператора рассеяния \check{S} для данного объекта:

– собственные числа ПМР $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$;

– собственный вектор для λ_1 имеет вид

$$\vec{\zeta}_E^T = [\cos \theta \quad \sin \theta] \Rightarrow \check{\zeta}_E = e^{i\theta};$$

– собственная эллиптичность $\varphi_T = 0$;

– собственная ориентация $\theta_T = 0$;

– собственная фаза $\psi_T = 0$.

Подстановка указанных параметров в (10) дает значение оператора объекта:

$$\check{S} = e^{i\theta}. \quad (13)$$

При вращении объекта в плоскости волнового фронта с постоянной угловой скоростью $\Delta\theta$ отраженный сигнал согласно (11) будет иметь вид:

$$\check{E}_R(t) = E \cdot e^{i(\theta_0 + \Delta\theta t)} \cdot e^{j\omega t}, \quad (14)$$

где θ_0 – начальная ориентация объекта.

Подстановка (14) в (11) позволяет определить вид сигналов, регистрируемых в ортогональных каналах поляриметра при измерении ПМР объекта в базисе $\{H, V\}$. При зондировании сигналом горизонтальной поляризации принимаемый сигнал в каналах H, V будет иметь вид

$$\dot{E}_H(t) = E \cdot \cos^2(\Delta\theta \cdot t + \theta_0) \cdot e^{j\omega t}, \quad (15)$$

$$\dot{E}_V(t) = E \cdot \sin(\Delta\theta \cdot t + \theta_0) \cdot \cos(\Delta\theta \cdot t + \theta_0) \cdot e^{j\omega t},$$

а при зондировании сигналом вертикальной поляризации –

$$\dot{E}_H = E \cdot \sin(\Delta\theta \cdot t + \theta_0) \cdot \cos(\Delta\theta \cdot t + \theta_0) \cdot e^{j\omega t},$$

$$\dot{E}_V = E \cdot \sin^2(\Delta\theta \cdot t + \theta_0) \cdot e^{j\omega t}, \quad (16)$$

где E – полная амплитуда сигнала.

Необходимо обратить внимание на тот факт, что изменение ориентации объекта помимо модуляции угла ориентации θ ЭМВ приводит к дополнительной модуляции амплитуды рассеянного сигнала. Таким образом, в приемных каналах будет наблюдаться сложный вид модуляции ЭМВ, в которой присутствует поляризационная модуляция угла ориентации по линейному закону и амплитудная модуляция рассеянной волны.

4. Результаты экспериментальных исследований в лабораторных условиях

Для экспериментальной проверки возможности оценки параметров движения объектов радиолокационного наблюдения использовался экспериментальный когерентный доплеровский поляриметр 3-х см диапазона [6], обеспечивающий поочередное излучение сигналов вертикальной и горизонтальной поляризации и одновременный двухканальный прием отраженного сигнала антеннами вертикальной и горизонтальной поляризации (рис. 2). Двойное преобразование частоты обеспечивает получение стабильной второй промежуточной частоты 8,1 кГц. Цифровое измерение сигнала с частотой дискретизации 44 кГц дает возможность полного восстановления отраженного сигнала в виде (5).

В качестве объекта радиолокационного наблюдения, изменяющего свою ориентацию в пространстве, использовался металлический штырь длиной 20 мм, закрепленный на оси электродвигателя, как показано на рис. 3. Объект исследований размещался в безэховой камере для снижения влияния фоновых отражений. Частота вращения вала двигателя управлялась электронной системой стабилизации. Структура измерительного стенда и схема эксперимента представлены на рис. 4.

В качестве примера на рис. 5 представлен спектр сигнала, принимаемого в V канале при вертикальной поляризации зондирования, рассчитанный согласно (16), а на рис. 6 – спектр измеренного сигнала, отраженного вращающимся металлическим штырем. Очевидно, что в реальном спектре помимо информационных составляющих присутствуют помеховые компоненты с частотами, кратными 50 Гц, а также шумы приемного устройства.



Рис. 2. Антенный блок поляриметра

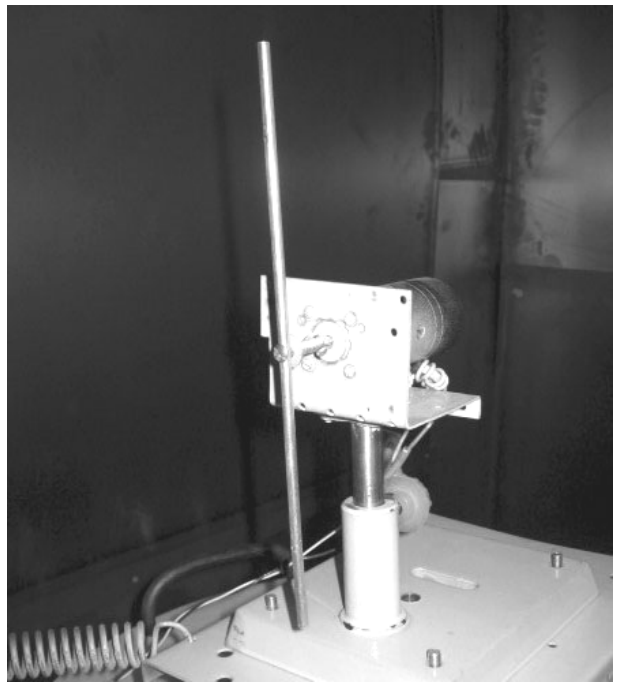


Рис. 3. Объект исследований



Рис. 4. Структура измерительного стенда

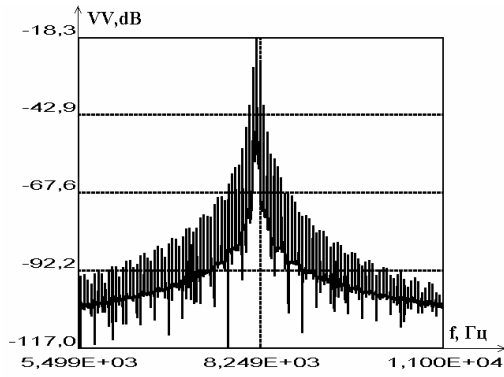


Рис. 5. Расчетный спектр сигнала

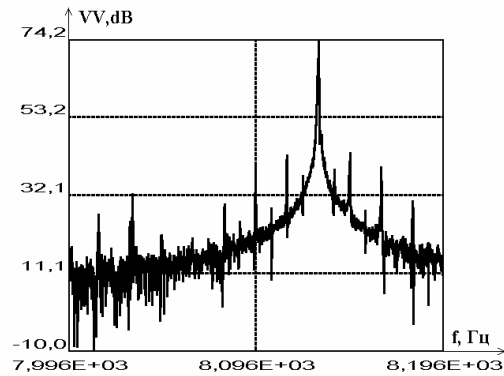


Рис. 6. Экспериментально измеренный спектр сигнала

При обработке данных эксперимента определение амплитуд и фаз отраженных сигналов для их представления в виде (2) выполнялось путем цифрового синхронного амплитудного и фазового детектирования [1]. Рассчитанные согласно (15), (16) и восстановленные по экспериментальным данным амплитуды сигналов в Н и V каналах представлены на рис. 7 – 10. Спектральный анализ этих данных позволил достаточно точно определить модулирующую частоту ($\approx 16,5$ Гц), что соответствует данным системы стабилизации частоты вращения двигателя.

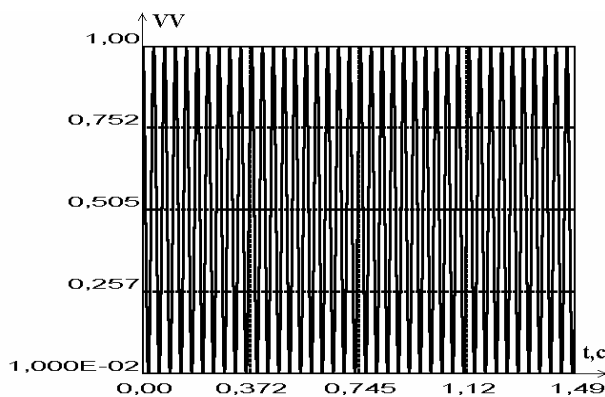


Рис. 7. Расчетная нормированная амплитуда сигнала (V–излучение, V–прием)

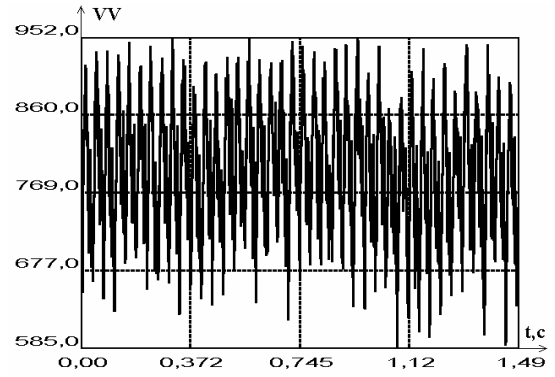


Рис. 8. Измеренная амплитуда сигнала (VV)

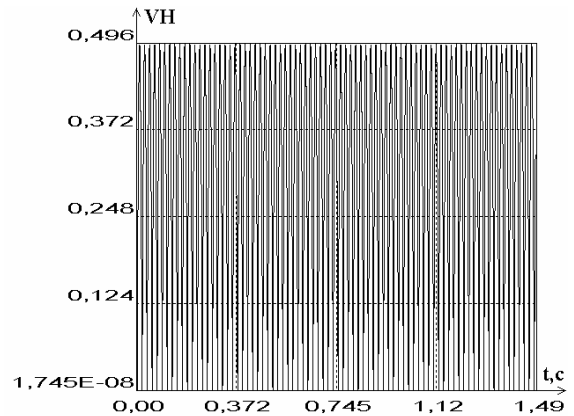


Рис. 9. Расчетная нормированная амплитуда сигнала (V–излучение, H–прием)

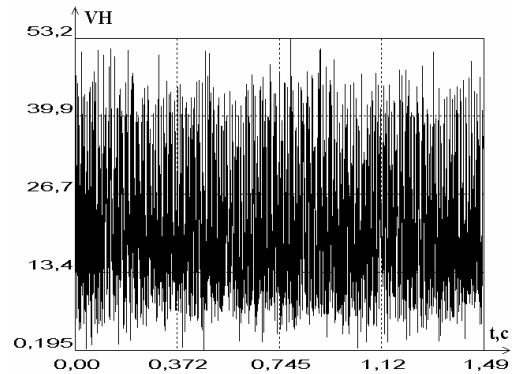


Рис. 10. Измеренная амплитуда сигнала (VH)

Для каждого отсчета амплитуды и фазы сигнала определялась ПМР вида (7), для отсчетов которой вычислялись стандартными процедурами собственные числа (8) и собственные вектора (9), определяющие собственные поляризации объекта радиолокационного наблюдения [8]. Поскольку собственные поляризации $\ddot{\zeta}_E = \zeta(\phi_E, \theta_E)$ характеризуются отсутствием в отраженном сигнале компонент, поляризованных ортогонально облучающей волне [3], оценка ориентации собственной поляризации объекта θ_E будет являться искомой оценкой ориентации объекта.

На рис. 11 представлена оценка изменения ориентации вращающегося объекта (рис. 3) во времени $\hat{\theta}(t)$, полученная в результате обработки экспериментальных данных. Анализ рис. 11 показывает, что скорость изменения угла θ соответствует скорости вращения металлического штыря, вид зависимости $\hat{\theta}(t)$ соответствует модели вращения с постоянной угловой скоростью $\theta(t) = \Delta\theta \cdot t$. Зашумленность зависимости $\hat{\theta}(t)$ (см. врезку на рис. 11) объясняется наличием помех и шумов в сигнале, а ее нелинейность – нестабильностью частоты вращения объекта.

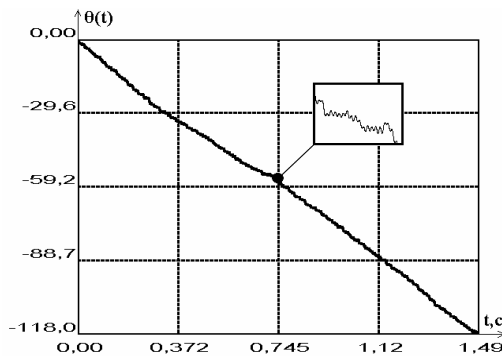


Рис. 11. Оценка ориентации вращающегося объекта по экспериментальным данным

В процессе обработки данных оценивались все параметры оператора рассеяния (10). В качестве примера на рис. 12 приведены результаты оценки собственной эллиптичности объекта ϕ_T , теоретически равной нулю. Анализ результатов показывает, что погрешность оценки данного параметра не превышает 4° или 5% (с учетом возможного диапазона значений угла эллиптичности $\pm 45^\circ$). Основной вклад в погрешность оценки параметров движения объекта вносят шумы измерительной системы и помехи по сети питания (с частотами, кратными частоте 50 Гц).

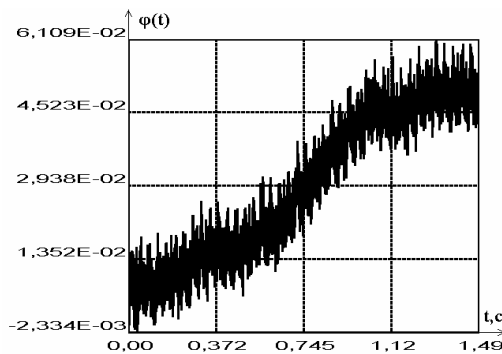


Рис. 12. Оценка эллиптичности вращающегося объекта по экспериментальным данным

5. Результаты экспериментальных исследований в натуральных условиях

Для исследования возможности определения характера движения реальных стационарных технических объектов методами радиолокационной поляриметрии проводились натурные эксперименты по измерению сигналов, отраженных мачтой телецентра (г. Харьков). Исследования производились с помощью автоматизированного радиолокационного поляриметра 3-х см диапазона [5], обеспечивающего измерение полной поляризационной матрицы рассеяния объекта (7) в ортогонально линейном (H, V) поляризационном базисе (рис. 13). Поляриметр размещался на крыше здания на высоте 20 м, дальность до измеряемого объекта составляла 3990 м. Наведение антенн осуществлялось на вершину мачты с целью уменьшения влияния местных предметов. Соотношение сигнал/фон составляло в эксперименте не менее 30 дБ, соотношение сигнал/шум – более 50 дБ (по мощности).



Рис. 13. Радиолокационный поляриметр

Анализ экспериментальных данных показал, что мачту телецентра в первом приближении можно считать вертикально ориентированным цилиндром:

- среднее отношения S_{HV}/S_{VV} находится в пределах $-7...-8$ дБ;
- среднее отношения S_{VV}/S_{HH} – $3...4$ дБ.

Однако необходимо отметить, что элементы ПМР данного объекта подвержены флуктуациям, дисперсия которых существенно зависит от метеорологических условий, в частности – от силы ветра. При скорости ветра ориентировочно 5 м/с флуктуации S_{VV} составляют $4...5$ дБ, S_{HH} – $5...7$ дБ, а флуктуации S_{HV} достигают 20 дБ. На рис. 14 приведен фрагмент (8192 отсчета) флуктуаций элементов ПМР (S_{HH} , S_{HV} и S_{VV}) за время наблюдения 41 с (частота измерений – 200 Гц).

Анализ данных, приведенных на рис. 14, показывает, что флуктуации отраженного объектом сиг-

нала носят квазипериодический характер. Корреляционный анализ данных показал, что сигнал содержит несколько периодических компонент с основным периодом порядка 12 с. Такая периодичность отраженного объектом сигнала может быть объяснена его качкой под воздействием ветра.

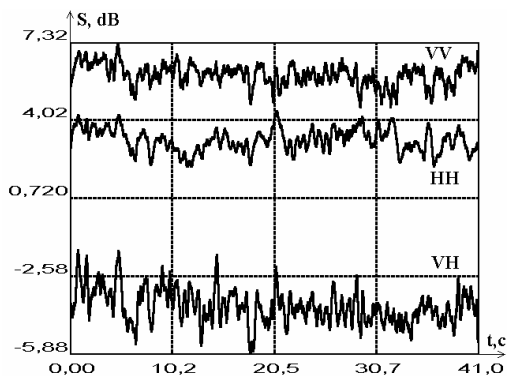


Рис. 14. Фрагмент реализации измеренной ПМП

Проведенный поляриметрический анализ экспериментальных данных для модели объекта вида (10) показал, что все собственные поляризационные инварианты объекта имеют периодический характер. Собственная ориентация θ_T объекта периодически изменяется в пределах $-3^\circ \dots +1^\circ$ (погрешность оценки – менее 1°). Изменения собственной эллиптичности объекта φ_T не синфазны с изменением его ориентации θ_T . На рис. 15 приведен фрагмент (10 с) поляризационной траектории объекта – зависимости эллиптичности φ_T , вносимой объектом в сигнал, от его ориентации θ_T (за 0 ориентации принята вертикаль), свидетельствующий о наличии нескольких типов колебаний объекта. На рис. 15 представлен неполный период колебаний, отчетливо наблюдается начало колебания, возврат объекта из наклоненного на 2° положения в вертикальное, колебания вокруг вертикали, повторный наклон до -3° и т.д. Анализ зависимости смещения фазового центра объекта ψ_T от угла ориентации θ_T (рис. 16), построенной синхронно с рис. 15, показывает, что колебания объекта происходят не в плоскости волнового фронта, а несинфазность колебаний φ_T и ψ_T свидетельствует о наличии эллиптической прецессии. Следует отметить, что в экспериментальных данных, полученных при отсутствии ветра, подобных процессов практически не наблюдается.

Таким образом, поляризационная декомпозиция (10) ПМП объекта (7) позволяет выделить ряд инвариантов объекта, флуктуации которых взаимосвязаны с изменениями ориентации объекта в про-

странстве, что дает возможность оценки параметров траектории движения объекта по данным поляриметрического дистанционного зондирования.

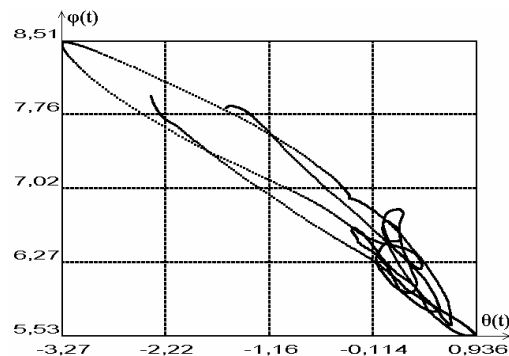


Рис. 15. Поляризационная траектория

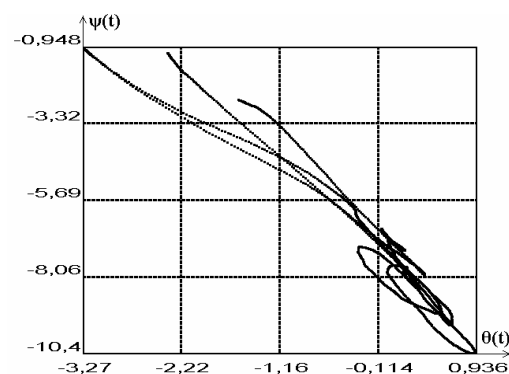


Рис. 16. Зависимость изменения положения фазового центра объекта от его ориентации

Заключение

Методы дистанционного зондирования могут быть применены для решения задач дистанционной технической диагностики объектов. Вращение, колебания и вибрации элементов конструкции технических объектов приводят к амплитудной, фазовой, частотной и поляризационной модуляции отраженного сигнала.

Использование поляризационно многоканальных средств ДЗ обеспечивает получение полной радиолокационной информации об объектах, а анализ их инвариантных поляризационных характеристик позволяет оценить вид траектории движения и ее параметры.

Экспериментальная проверка предложенного в [8] метода обработки данных показала хорошее соответствие полученных результатов теоретическим моделям и подтвердила возможность дистанционного определения типа и траектории движения объекта дистанционного зондирования.

Одним из направлений дальнейших исследований должны стать экспериментальные исследования подвижных объектов сложной формы.

Литература

1. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей / под ред. С.Н. Конюхова, В.И. Драновского, В.Н. Цимбала. – К.: НАНУ, 2007. – 440 с.

2. Колесник Р.В. Применение поляризационно-доплеровских сигналов для технической диагностики объектов авиационной техники / Р.В. Колесник, А.В. Попов, С.А. Ребров // Радиотехнические и компьютерные системы. – 2007. – № 7 (22). – С. 14-18.

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. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция / К.Г. Гусев, А.Д. Филатов, А.П. Сополев. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.

5. 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. 42-45.

6. Попов А.В. Экспериментальная проверка корреляционно-спектрального метода оценки параметров движения объектов радиолокационного наблюдения / А.В. Попов, Р.В. Колесник, Е.И. Скрыпник // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – №3 (60). – С. 76-82.

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. Попов А.В. Операторное описание поляризационных характеристик объектов активного дистанционного зондирования / А.В. Попов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – №5 (62). – С. 94-102.

9. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров): пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

Поступила в редакцию 26.11.2009

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

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБ'ЄКТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗА ДАНИМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ПОЛЯРИМЕТРА

А.В. Попов, Р.В. Колесник

Вимір параметрів руху радіолокаційного об'єкта традиційно ґрунтується на оцінці параметрів спектра відбитого їм сигналу. Пропонується поляриметричний метод оцінки траєкторії руху об'єкта на основі аналізу інваріантних поляризаційних характеристик об'єкта, одержуваних шляхом когерентної декомпозиції його поляризаційної матриці розсіювання. Представлено результати моделювання та експериментальних досліджень у безвіддунній камері та у натурних умовах поляризаційних характеристик об'єктів зі складною траєкторією руху. Показано, що запропонований метод забезпечує визначення характеру руху об'єкта й оцінку параметрів його траєкторії.

Ключові слова: радіолокаційний об'єкт, поляризаційна модуляція, інваріанти поляризаційної матриці розсіювання, декомпозиція.

ESTIMATION OF REMOTE SENSING OBJECTS MOTION PARAMETERS USING RADAR POLARIMETER DATA

A.V. Popov, R.V. Kolesnik

Measuring a radar object motion parameters is traditionally based on estimating the spectrum parameters of the reflected signal. For estimating an object's motion trajectory it is suggested a polarimetric method based on analysis of invariant polarization characteristics, derived by coherent decomposition of the object's polarization scattering matrix. The results of modeling and experimental researches in an anechoic room and in full-scale conditions of polarization characteristics for objects with complicated motion trajectory are presented. It is shown that the suggested method allows to define an object's motion characteristics and estimate it's trajectory parameters.

Key words: radar object, polarization modulation, backscattering matrix invariants, decomposition.

Попов Анатолій Владиславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри производства радиотехнических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, E-mail: a.v.popov@inbox.ru.

Колесник Роман Викторович – старший преподаватель кафедры производства радиотехнических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.