

УДК 621.391

А.В. ПОПОВ, Р.В. КОЛЕСНИК, Е.И. СКРЫПНИК

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Измерение параметров движения радиолокационного объекта основано на оценке параметров спектра отраженного им сигнала. Предложен корреляционно-спектральный метод оценки параметров сигналов, отраженных объектом со сложной траекторией движения. Представлены результаты экспериментальных исследований взаимной корреляционной функции спектров исследуемого и эталонного многомерных сигналов. Показано, что предложенный метод обеспечивает определение характера движения объекта и оценку параметров его траектории.

Ключевые слова: радиолокационный объект, поляризационная модуляция, спектр, корреляционная функция.

Введение

Современные методы аэрокосмического дистанционного зондирования (ДЗ) позволяют решать широкий круг актуальных задач [1], таких как картографирование поверхности Земли и других планет, экологический мониторинг, обеспечение поисково-спасательных работ и др. Радиотехнические системы дистанционного зондирования (РТС ДЗ) обеспечивают измерение характеристик объектов по параметрам отраженного сигнала, что позволяет применить методы ДЗ для решения задач технической диагностики объектов, в частности, объектов аэрокосмической техники, одной из характеристик технического состояния которых являются вибрации элементов конструкции [2]. Дистанционное измерение вибраций объекта в направлении средства ДЗ приводит, как известно, к появлению доплеровских составляющих в спектре отраженного объектом сигнала, однако к аналогичным эффектам приводит вращение объекта и его вибрации в плоскости волнового фронта. Для однозначного дистанционного определения характера и параметров вибрации объекта необходимо использование многоканальных РТС ДЗ, обеспечивающих получение дополнительной информации об объектах радиолокационного наблюдения [3].

Известно [1, 4], что любой отражающий объект можно представить в виде набора элементарных отражателей. Колебания элементарных отражателей приводят к амплитудной, фазовой, частотной и поляризационной модуляции отраженного сигнала. Получение полной информации об объектах ДЗ возможно за счет измерения полной поляризацион-

ной матрицы рассеяния (ПМР) объектов [4]. Одним из путей измерения полной ПМР является применение поляризационно модулированных сигналов (ПМС) [5], что позволяет при последующей обработке сигналов выделить информативные характеристики радиолокационных объектов (РЛО) [6]. Поляризационные характеристики отраженного сигнала зависят при этом как от параметров облучающей волны, так и от геометрических, физических свойств РЛО, а спектральная структура сигнала определяется характеристиками флуктуаций его параметров. Как правило, отраженные ПМС обладают сложной спектральной структурой [3], а совместная оценка всех модулирующих функций таких сигналов является сложной задачей [7].

Постановка задачи исследований

Существует классический подход оценки параметров модулирующих функций сигналов, основанный на использовании взаимной корреляционной функции (ВКФ) между исследуемым и эталонным сигналами [8]. Данный подход предполагает оценку ВКФ отдельно для каждого канала. В случае оценки параметров ПМС при использовании ВКФ возникает неопределенность, поскольку данный вид сигналов обладает пространственным спектром с различными типами модуляции ортогонально поляризованных компонент [3, 5].

В данной работе предлагается корреляционно-спектральный метод оценки параметров модулирующих функций сигналов со сложной пространственно-частотной структурой, основанный на оценке взаимной корреляции спектров исследуемого и эта-

лонного сигналов. Данный метод предполагает оценку взаимной корреляции спектров одновременно в нескольких каналах при наличии в общем случае нескольких модулирующих функций.

Целью данной работы является проверка корреляционно-спектрального метода оценки параметров ПМС, отраженных движущимся РЛО, как на теоретических моделях, так и на экспериментальных данных, а также проверка соответствия теоретических и экспериментальных результатов.

1. Математическая модель сигнала

Под аналитическим представлением радиолокационных сигналов понимают описание электромагнитной волны (ЭМВ) с использованием вектора-столбца ортогонально поляризованных компонент [4]:

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

где \dot{E}_H, \dot{E}_V – комплексные амплитуды проекций на оси выбранной системы координат (H, V);

ω – несущая частота зондирующего сигнала.

Сигнал вида (1) может быть представлен на двойной комплексной плоскости [5] в виде

$$\ddot{E}(t) = E \cdot e^{-ij\varphi} e^{i\theta} e^{j(\omega t + \psi)}, \quad (2)$$

где E – амплитуда сигнала; φ – эллиптичность ЭМВ; θ – ориентация ЭМВ; ψ – фаза сигнала.

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

$$\dot{E}_R = \dot{S} \cdot \dot{E}_S. \quad (3)$$

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

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{aa} & \dot{S}_{ab} \\ \dot{S}_{ba} & \dot{S}_{bb} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

а квадраты модулей ее элементов соответствуют эффективным поверхностям рассеяния объекта. Для моностатической радиолокации $\dot{S}_{ab} = \dot{S}_{ba}$. В матрице (4) 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. На практике обычно используют вертикальную (V) и горизонтальную (H) поляризации [5]. Отраженный радиолокационный сигнал может быть представлен в виде:

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

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

эллиптичности ЭМВ, обусловленное взаимным перемещением элементарных отражателей объекта; $\theta(t)$ – изменение ориентации объекта; $\psi(t)$ – фазовая модуляция сигнала, вызванная перемещением объекта вдоль линии визирования.

В данной работе исследуется частный случай – модуляция отраженного сигнала за счет изменения ориентации РЛО в плоскости волнового фронта. При этом выражение (5) принимает вид:

$$\ddot{E}_R(t) = E(t) e^{-ij\varphi} e^{i(\theta + S(t))} e^{j\omega t}. \quad (6)$$

$S(t)$ представляет собой закон изменения ориентации объекта вокруг своего центра. Если рассматривать случай вращения объекта в плоскости волнового фронта с постоянной угловой скоростью $\Delta\theta$, то $S(t) = \Delta\theta \cdot t$, и вращение объекта приводит к модуляции поляризации отраженного сигнала по закону

$$e^{i(\theta_0 + \Delta\theta \cdot t)},$$

где θ_0 – начальная ориентация РЛО; $\Delta\theta$ – скорость его вращения.

Однако необходимо обратить внимание на тот факт, что изменение ориентации объекта помимо модуляции параметра поляризации ЭМВ приводит к дополнительной модуляции амплитуды рассеянного сигнала. Таким образом, наблюдается сложный вид смешанной модуляции ЭМВ, в которой присутствует поляризационная модуляция угла ориентации по линейному закону и амплитудной модуляции рассеянной волны

$$E_R(t) = E \cdot \cos(\theta_0 + \Delta\theta \cdot t).$$

По своему внешнему виду поляризационно-модулированные сигналы похожи на сигналы с амплитудной и фазовой модуляцией, но отличаются своей спектральной структурой (рис. 2, 3). Как видно из представленных спектров, информация о наличии поляризационной модуляции в сигнале содержится в соотношении амплитуд и фаз четных и нечетных гармоник в поляризационно ортогональных каналах.

При зондировании простейшего радиолокационного объекта – диполя, вращающегося с постоянной угловой скоростью вокруг своего центра масс, математические модели сигналов, принятых двухканальным по поляризации приемником, \dot{E}_H и \dot{E}_V имеют следующий вид [1]:

$$\dot{E}_H = E \cdot \sin(\Delta\theta \cdot t + \theta_0) \cdot \cos(\Delta\theta \cdot t + \theta_0), \quad (7)$$

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

где E – полная амплитуда сигнала.

2. Корреляционно-спектральный метод

Известен традиционный метод оценки параметров сигналов, поступающих на вход РТС, осно-

ванный на использовании ВКФ между исследуемым и эталонным сигналом [8]:

$$R(\bar{\tau}) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t, \bar{\xi}) \cdot e(t, \bar{\tau}) dt. \quad (8)$$

Данная функция характеризует степень подобия двух сигналов, исследуемого $x(t, \bar{\xi})$ и эталонного $e(t, \bar{\tau})$, и достигает своего максимума при совпадении параметров сигналов ($\bar{\tau} = \bar{\xi}$). Таким образом, задача оценки параметров сигнала сводится к задаче поиска максимума ВКФ.

Вычисление ВКФ требует значительных временных затрат, поэтому на практике используется алгоритм ее вычисления с использованием обратного преобразования Фурье от произведения спектров сигналов [8]:

$$R(\bar{\tau}) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(f, \bar{\xi}) \cdot \dot{E}(f, \bar{\tau}) \cdot e^{j2\pi f \cdot \bar{\tau}} df. \quad (9)$$

Но с учетом спектральной структуры ПМ сигнала (рис. 1) и того, что его энергия перераспределяется в поляризационно-ортогональных каналах в зависимости от начальной фазы модулирующей функции, возникает проблема обработки таких двумерных сигналов.

Предлагаемый в данной работе корреляционно-спектральный метод основан на оценке взаимной корреляции спектров исследуемого и эталонного сигналов [7]:

$$C(\bar{\tau}) = \operatorname{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(f, \bar{\xi}) \cdot \dot{E}(f, \bar{\tau}) df \right\}. \quad (10)$$

Применительно к двумерным сигналам вида (5) выражение (10) может быть представлено как

$$C(\bar{\tau}) = \sum_{k=H, V} \operatorname{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(f, \bar{\xi}|_k) \cdot \dot{E}(f, \bar{\tau}|_k) df \right\}. \quad (11)$$

Искомый коэффициент корреляции $C(\bar{\tau})$, по сути дела, является суммой произведения оцениваемого и эталонного пространственных спектров. Предполагается, что максимум коэффициента корреляции (11) будет достигнут при совпадении реальных и мнимых частей спектров сигналов.

3. Проверка метода на теоретической модели

Для проверки эффективности метода в качестве объекта исследования был взят ПМ сигнал вида (7). Был рассчитан спектр, которым должен обладать ПМС с известными параметрами (например, см. рис. 1, 2) и выбран соответствующий эталон с неизвестными параметрами. Согласно (11), была определена взаимная корреляция спектров. Оцениваемыми пара-

метрами в данном случае являются: частота $\Delta\theta$ и фаза модулирующего сигнала θ_0 . При вычислении (11) исследуемые спектры нормируются по амплитуде.

Зависимости взаимной корреляции спектров от оцениваемых параметров сигналов представлены на рис. 3, 4. Из рисунков следует, что при полном совпадении параметров оцениваемого и эталонного спектров максимум взаимной корреляции спектров достигает значения, равного единице.

Для точного определения параметров, при которых взаимная корреляция спектров достигает своего максимума, необходимо использовать оптимизационный алгоритм. Так как представленная на рис. 3 графическая зависимость является многомодальной функцией, то остается не до конца решенной задача точной локализации экстремальных значений коэффициента корреляции спектров, необходимая для выбора стартовых точек для использования алгоритма оптимизации, поэтому целесообразно находить оценки параметров в два этапа. На первом этапе проводится предварительный анализ данных функциональных зависимостей с целью локализации главного максимума ВКФ, а на втором – уточнение оцениваемых параметров.

4. Экспериментальная проверка корреляционно-спектрального метода

В целях экспериментальной проверки возможности оценки параметров движения объектов радиолокационного наблюдения была разработана экспериментальная радиолокационная система (РЛС), представляющая собой когерентный доплеровский поляриметр 3-х см диапазона. Структура РЛС представлена на рис. 11.

Сигнал СВЧ генератора (G1) поочередно подключается коммутатором поляризации (КП) к передающим антеннам вертикальной и горизонтальной поляризации и одновременно поступает на систему автоподстройки частоты (АПЧ) через смеситель (СМ1) и полосовой фильтр (ПФ1) гетеродина (G2).

Отраженный сигнал поступает на приемные антенны вертикальной и горизонтальной поляризации, подвергается двукратному преобразованию частоты и после усиления преобразуется в цифровой вид. Развязка передающих и приемных антенн обеспечивается поглощающим экраном (рис. 12), степень подавления которого подобрана таким образом, чтобы уровень сигнала передатчика, попадающего в приемники, был соизмерим с сигналом гетеродина. За счет этого обеспечивается подача в приемник опорного сигнала передатчика, что дает возможность получения стабильной второй промежуточной частоты 8 кГц, измерение сигнала на которой дает возможность полного восстановления отраженного сигнала в виде (6).

В качестве объекта радиолокационного наблюдения, изменяющего свою ориентацию в пространстве, использовался металлический штырь длиной 20 мм, закрепленный на оси электродвигателя, как показано на рис. 13. Измерения сигнала, отраженного двигателем без штыря показали, что фоновые отражения не превышают уровня собственных шумов РЛС.

Объект исследований (рис. 13) 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. 14.

В эксперименте фиксировались сигналы с горизонтальной (H) и вертикальной (V) поляризацией, отраженные вращающимся РЛЮ, при его зондировании сигналом вертикальной поляризации. Фрагмент реализации сигнала представлен на рис. 6.

Примеры спектрального состава сигнала, отраженного от вращающегося диполя, в канале V и в канале H представлены на рис. 6 – 9.

При обработке экспериментальных данных в качестве эталона использовалась математическая модель (7). Несущая частота и фаза эталонного сигнала были приняты равными несущей частоте и фазе принятого сигнала, определенным по его спектру. Оценке подлежали параметры модулирующей функции $S(t)$ в (6): ее частота $\Delta\theta$ и начальная фаза θ_0 .

Коэффициент корреляции спектров определялся согласно (11). Зависимость коэффициента корреляции от частоты сигнала представлена на рис. 10. Из приведенных графиков видно, что максимальное значение коэффициента корреляции не достигает значения, равного единице. Причинами этого являются:

- высокий уровень шумов в сигнале;
- нестабильность частоты вращения диполя;
- недостаточно точное определение несущей частоты.

Не смотря на указанные трудности, модулирующая частота сигнала определена достаточно точно и приблизительно равна 18 Гц, что соответствует данным системы стабилизации частоты вращения двигателя. Кроме того, выявленная при обработке данных нестабильность частоты вращения диполя свидетельствует о медленном изменении скорости вращения двигателя, что было подтверждено экспериментальными данными.

Заключение

Методы дистанционного зондирования могут быть применены для решения задач дистанционной

технической диагностики объектов. Вращение и вибрации элементов конструкции объектов аэрокосмической техники приводят к амплитудной, фазовой, частотной и поляризационной модуляции отраженного сигнала.

Использование многоканальных РТС ДЗ обеспечивает получение полной радиолокационной информации об объектах, а анализ взаимной корреляции пространственных спектров с набором эталонов позволяет оценить все модулирующие функции отраженного сигнала.

Экспериментальная проверка предлагаемого корреляционно-спектрального метода обработки данных показала хорошее соответствие полученных результатов теоретическим моделям и подтвердила эффективность предлагаемого метода в условиях наличия нескольких модулирующих функций сигнала. Одним из направлений дальнейших исследований должны стать экспериментальные исследования объектов со сложным характером движения.

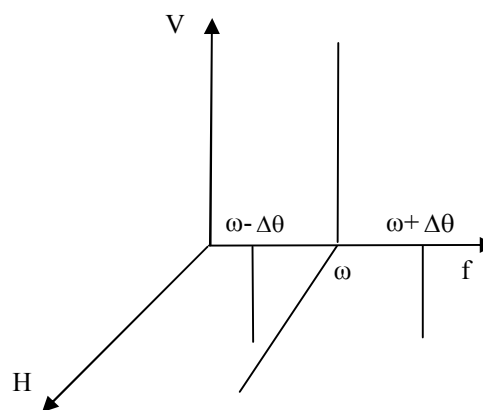


Рис. 1. Реальная часть спектра ПМС

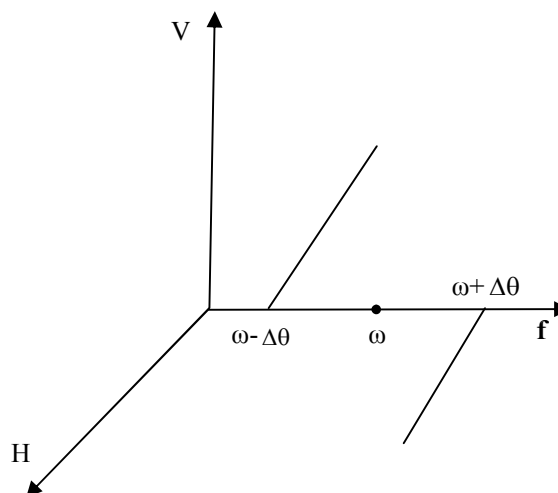


Рис. 2. Мнимая часть спектра ПМС

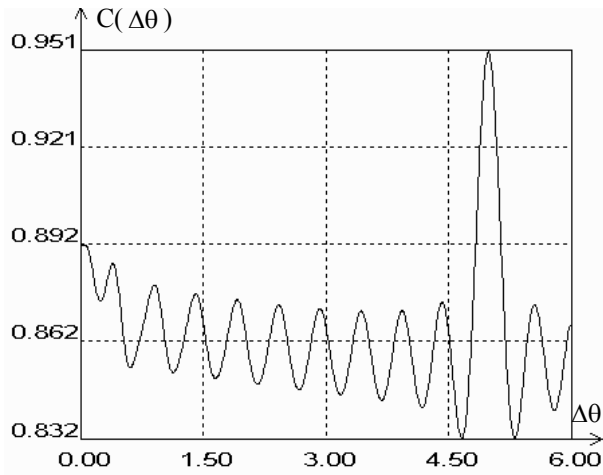


Рис. 3. Зависимость взаимной корреляции спектров от частоты ПМС

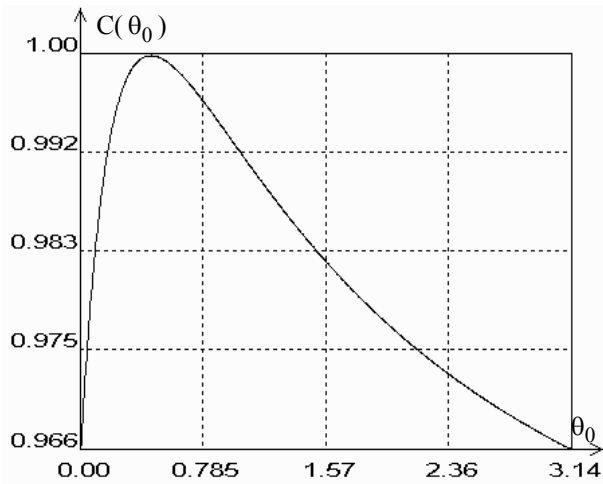


Рис. 4. Зависимость взаимной корреляции спектров от начальной фазы ПМС

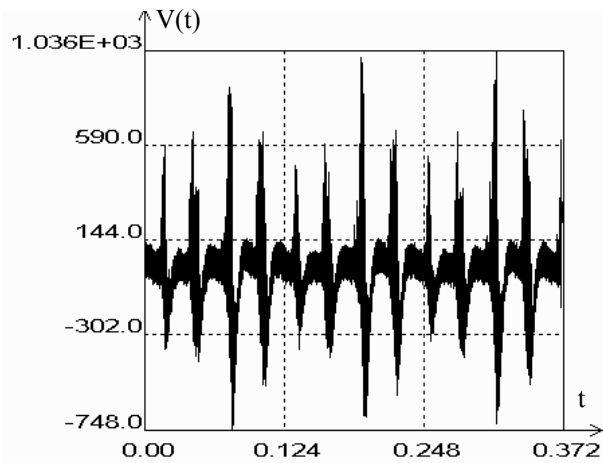


Рис. 5. Фрагмент реализации ПМС в канале V

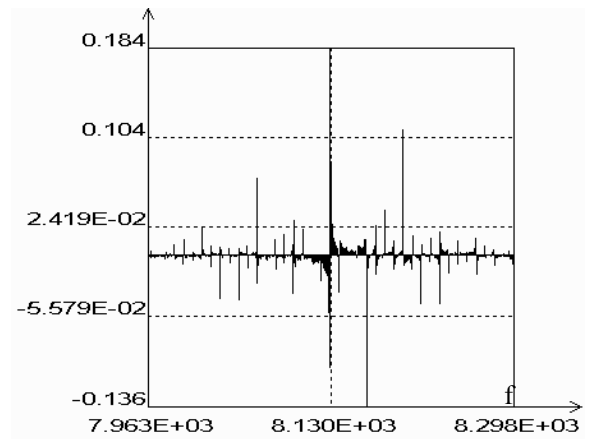


Рис. 6. Реальная часть спектра ПМС в канале V

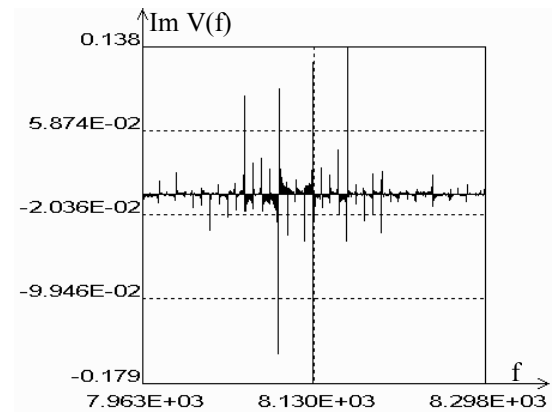


Рис. 7. Мнимая часть спектра ПМС в канале V

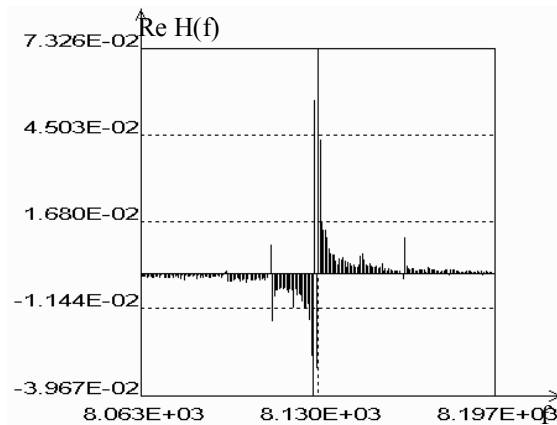


Рис. 8. Реальная часть спектра ПМС в канале H

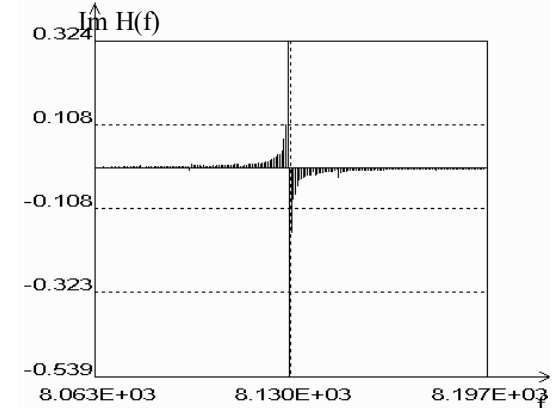


Рис. 9. Мнимая часть спектра ПМС в канале H

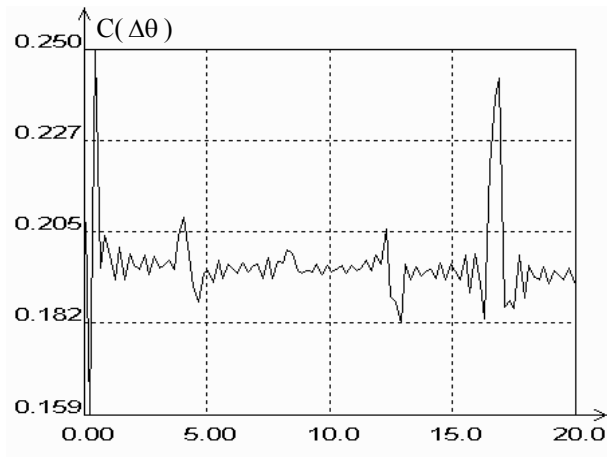


Рис. 10. Зависимость взаимной корреляции спектров от частоты ПМС



Рис. 12. Измерительная РЛС

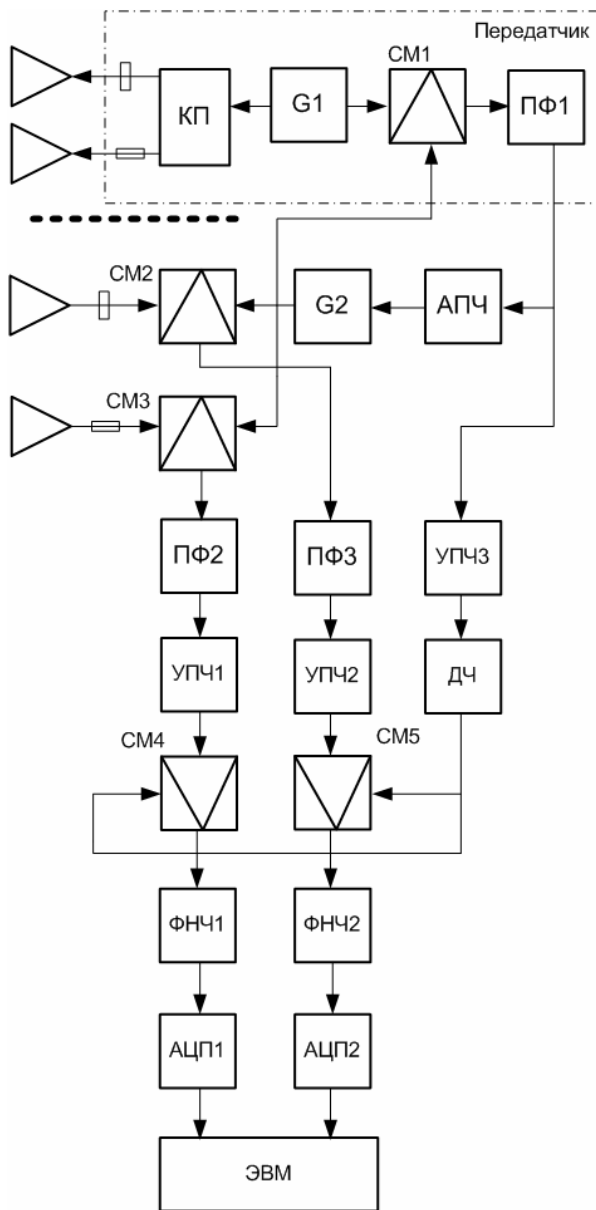


Рис. 11. Структура экспериментальной РЛС

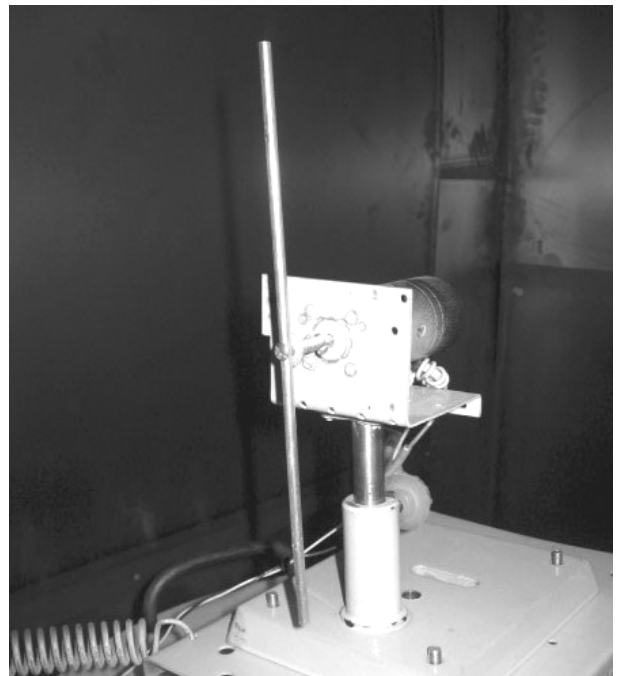


Рис. 13. Объект исследований

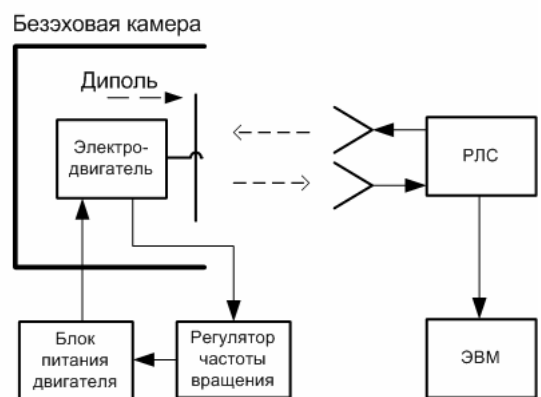


Рис. 14. Структура измерительного стенда

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. Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб.: Изд. СПб Государственного морского технического университета, 2000. – 169 с.
3. 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.
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. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция / К.Г. Гусев, А.Д. Филатов, А.П. Сополев. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
6. 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.
7. Скрыпник Е.И. Оценка параметров сигнала корреляционно-спектральным методом / Е.И. Скрыпник // Интегральные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2008: тез. докл. Междунар. научно-техн. конф. 2008 г. – Харьков, 2008. – С. 191.
8. 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.

Поступила в редакцию 28.04.2009

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА КОРЕЛЯЦІЙНО-СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБ'ЄКТІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

А.В. Попов, Р.В. Колесник, К.І. Скрыпник

Вимірювання параметрів руху радіолокаційного об'єкту базується на оцінці параметрів спектра відображеного ним сигналу. Запропоновано кореляційно-спектральний метод оцінки параметрів сигналів, відображених об'єктом з тяжкою траєкторією руху. Представлені результати експериментальних досліджень взаємної кореляційної функції спектрів сигналу, що досліджується, та еталонного багатовимірного сигналу. Показано, що запропонований метод забезпечує визначення характеру руху об'єкта та оцінку параметрів його траєкторії.

Ключові слова: радіолокаційний об'єкт, поляризаційна модуляція, спектр, кореляційна функція.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE CORRELATION – SPECTRAL METHOD FOR MOTION PARAMETERS OF RADAR SENSING OBJECTS ESTIMATION

A.V. Popov, R.V. Kolesnik, E.I. Scrypnic

Measuring of motion characteristics of a radar target is based on estimation of reflected signal spectrum parameters. The correlation-spectral method is suggested for parameters of signals reflected by an object with complicated motion path estimation. The results of experimental investigation of spectrums' cross-correlation functions for the investigated and the etalon multidimensional signals are presented. It is shown that the suggested method ensures an object's motion character definition and its path parameters estimation.

Key words: radar object, polarization modulation, spectrum, correlation function.

Попов Анатолий Владиславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры 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.

Скрыпник Екатерина Ивановна – студентка кафедры производства радиотехнических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.