

УДК 621.396.1

Р.В. КОЛЕСНИК, С.А. РЕБРОВ, А.В. ПОПОВ

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

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ДОПЛЕРОВСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБЪЕКТОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрена взаимосвязь вибрации двигателя, как реакция системы на действие периодических возмущающих сил, и поляризационно-модулированного сигнала, поляризационный спектр которого имеет комбинированную структуру, представляющую композицию широкополосного виброшума (фона) и линейчатого спектра. Двигатель рассматривается как флуктуирующий объект, который рассеивает радиолокационный сигнал, и может состоять в виде набора элементарных отражателей. Поляризационные характеристики отраженного сигнала зависят при этом как от параметров облучающей волны, так и от геометрических свойств объекта дистанционного наблюдения, а спектральная структура сигнала определяется характеристиками флуктуаций. Приведены аналитические результаты исследований, показывающие, что при поляризационно-спектральном анализе отраженных сигналов могут быть получены дополнительные признаки для идентификации флуктуирующих объектов.

**поляризация, поляризационно-спектральный анализ, доплеровская частота, поляризационная матрица рассеяния, техническая диагностика**

### Введение

К диагностике по вибросостоянию относятся оценка и прогнозирование динамической нагруженности конструкции, выявление опасных колебаний, их причин и источников, а так же выявление и оценка опасных динамических воздействий на конструкцию, оценка факторов, влияющих на колебания, идентификация объектов авиационной техники (АТ).

Вибрации и шум объекта несут информацию о состоянии, режиме работы его отдельных узлов и даже о предстоящем разрушении какого-либо узла или детали. Использование информация о вибрациях и шумах дает возможность прогнозировать состояния АТ [1].

Определить параметры вибрации можно для точки на объекте, области, для всего объекта в целом, рассматривая его как группу локальных точек с индивидуальными параметрами, для семейства объектов. Можно это сделать как для фиксированного режима работы, так и для различных режимов и условий эксплуатации.

Если различные элементарные отражатели объекта вибрируют в пространстве с различными скоростями, возможно выделение поляризационных свойств отдельных элементов объекта. При этом преобразование поляризации волны каждым элементарным отражателем может быть выражено с помощью комплексных коэффициентов отражения объекта дистанционного зондирования (ДЗ), которые в совокупности представляют поляризационную матрицу рассеяния (ПМР). Анализ ее поляризационно-спектральной структуры позволяет выделить характерные особенности объекта, что напрямую связано с его техническим состоянием.

### 1. Взаимосвязь вибрации АТ и отраженного радиолокационного сигнала

Вибрация двигателя как реакция системы на действие периодических возмущающих сил характеризуется спектром, имеющим комбинированную структуру и представляющим композицию широкополосного виброшума (фона) и линейчатого спектра.

Основным источником шумов являются аэродинамические возмущающие факторы, а гармонической составляющей – факторы, связанные с вращением деталей механизма.

В общем случае для АТ можно выделить несколько видов источников возникновения вибрации [1]:

- роторная вибрация;
- вибрация аэродинамического происхождения;
- вибрация, возбуждаемая редукторами и зубчатыми передачами;
- вибрация подшипниковых узлов;
- колебания лопаток и дисков.

Характеристики электромагнитных волн (ЭМВ), рассеянных от вибрирующих объектов, имеют существенное значение для классификации объектов. Процесс классификации зависит от характерных признаков отраженного сигнала, таким образом, для построения бесконтактной дистанционной системы технической диагностики объектов по вибрационным параметрам возможно использовать методы поляризационной селекции отраженных сигналов.

Получение полной поляризационной информации об объектах ДЗ возможно за счет измерения ПМР, что позволяет при последующей обработке отраженных сигналов выделять эффективные признаки объектов вибрации.

Измерение полной ПМР обеспечивают поляризационно-модулированные сигналы [2 – 4].

Вибрирующий объект можно представить в виде совокупности элементарных отражателей:

$$\ddot{E}_r(t) = \sum_i^N h_i \ddot{E}_i(i, j, t), \quad (1)$$

где  $\ddot{E}_r(t)$  – сигнал, отраженный от объекта дистанционного зондирования;

$h$  – элементарный отражатель;

$N$  – количество отражателей;

$i, j$  – параметры поляризации электромагнитной волны (эллиптичность и ориентация в пространстве соответственно).

Если учесть, что каждый отражатель может рассеять ЭМВ формой сигнала  $S(t)$  и изменить представление поляризованной ЭМВ, то выражение (1) можно представить в следующем виде:

$$\ddot{E}_r(t) = \sum_i^N h_i \ddot{E}_i(i, j, S(t), t), \quad (2)$$

где  $S(t)$  можно рассматривать, как модулирующий сигнал, который модулирует в отдельности каждый отражатель и основные параметры поляризации суммарной рассеянной ЭМВ.

Колебания элементарных отражателей приводят к различным видам модуляции отраженного сигнала. Преобразование поляризации отраженного сигнала вызывается вторичным излучением наведенных токов. Эти токи определяют все характеристики отраженной ЭМВ, в том числе и ее поляризацию. Поляризационные характеристики отраженного сигнала зависят при этом как от параметров облучающей волны, так и от геометрических размеров объекта ДЗ, диэлектрической и магнитной проницаемостей и проводимости, эффективной площади рассеяния (ЭПР) и направлений распространения облучающей и отраженной волн, а спектральная структура сигнала определяется характеристиками вибрации.

Для формирования признаков вибрирующего объекта необходимо определить параметры поляризации, которые формируются в матрице рассеяния. Аналитическая запись принятого радиолокационного сигнала  $\ddot{E}_r$  от цели для случая однопозиционной радиолокации имеет вид [2, 3]:

$$\ddot{E}_R = \ddot{S} \cdot \ddot{E}_T. \quad (3)$$

Матрица  $\ddot{S}$  представляет собой совокупность поляризационных параметров, влияющих на зондирующий сигнал, и, следовательно, является поляризационной матрицей рассеяния (ПМР). Выражение (3) может быть представлено в виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{E}_H \\ \dot{E}_V \end{pmatrix}_R = \begin{pmatrix} \dot{S}_{HH} & \dot{S}_{HV} \\ \dot{S}_{VH} & \dot{S}_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{E}_H \\ \dot{E}_V \end{pmatrix}_T, \quad (4)$$

где  $\dot{S}_{HH}, \dot{S}_{HV}, \dot{S}_{VH}, \dot{S}_{VV}$  – комплексные элементы ПМР, определяющие проекцию ЭМВ в пространстве на ортогональные компоненты.

Отраженный радиолокационный сигнал (4) в двойном комплексном поле имеет следующий вид:

$$\ddot{E}_R(t) = [\dot{E}_H(t) + i\dot{E}_V(t)]e^{j\omega t}. \quad (5)$$

Компоненты  $\dot{E}_H(t), \dot{E}_V(t)$  представляют комплексные элементы рассеянной ЭМВ в ортогональной системе координат, отвечающие проекциям на горизонтальную и вертикальную составляющие соответственно.

$$\dot{E}_H(t) = E_1(t) \cos(\psi_1(t)), \quad (6)$$

$$\dot{E}_V(t) = E_2(t) \cos(\psi_2(t)), \quad (7)$$

где  $E_1(t), \psi_1(t)$  – амплитуда и фаза принятого сигнала в канале  $H$ ;

$E_2(t), \psi_2(t)$  – амплитуда и фаза принятого сигнала в канале  $V$ .

В терминологии двойной комплексной плоскости в предположении, что интенсивность гармонической несущей равна единице, и модулирующее колебание не имеет постоянной составляющей, выражение (5) может быть представлено в виде [3]:

$$\ddot{E}_R(t) = E(t)e^{-ij\varphi(t)}e^{i\theta(t)}e^{j\omega t}, \quad (8)$$

где  $E(t)$  – амплитуда принятого поляризованного сигнала на приемной антенне до поляризационного разделителя;

$\varphi(t), \theta(t)$  – угол эллиптичности и угол ориентации ЭМВ соответственно.

Если учесть, что движение исследуемого объекта или элементарных отражателей, из которых он может состоять, вызывает изменение ориентации и формы ЭМВ в пространстве, то это приводит к изменению параметров поляризации ЭМВ во времени. Это, в свою очередь, вызывает модуляцию параметров поляризации рассеянной ЭМВ.

Таким образом, выражение (8) может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{E}(t) &= e^{-ij[\varphi_0 + \Delta\varphi S(t)]}e^{i\theta_0}e^{j\omega t}, \\ \ddot{E}(t) &= e^{-ij\varphi_0}e^{i[\theta_0 + \Delta\theta S(t)]}e^{j\omega t}, \\ \ddot{E}(t) &= e^{-ij[\varphi_0 + \Delta\varphi S(t)]}e^{i[\theta_0 + \Delta\theta S(t)]}e^{j\omega t}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $S(t)$  – модулирующее колебание;

$\Delta\varphi, \Delta\theta$  – девиация угла эллиптичности и угла ориентации;

$\varphi_0, \theta_0$  – параметры поляризации немодулированной гармонической несущей;

$\omega$  – частота зондирующего сигнала;

$e^{j\omega t}$  – несущая зондирующего сигнала.

Одним из путей измерения полной ПМР является применение поляризационно-модулированных сигналов (ПМС), аналитическая запись которых соответствует (9). Представителями такого класса сигналов являются поляризационно-модулированный сигнал с модуляцией угла эллиптичности  $\varphi$ , с модуляцией угла ориентации  $\theta$  и с модуляцией угла эллиптичности  $\varphi$  и ориентации  $\theta$ .

Исходя из вышесказанного, можно полагать, что изменения поляризационных параметров рассеянного радиолокационного сигнала необходимо рассматривать приемной системой, как полезную информацию, а не фактор шума. Принятый сигнал необходимо детектировать как сигнал поляризационно-модулированный с параметрами модуляции по углу эллиптичности и ориентации.

Параметры сигнала  $E, \varphi, \theta$  в (8) зависят от времени, таким образом, необходимо рассматривать их мгновенные изменения, а усреднение по времени может привести к ложному восприятию динамики изменения параметров. ПМР представлена в (4) также описывается параметрами  $E, \varphi, \theta$ .

Приведем аналитические выражения для расчета  $\varphi(t), \theta(t)$ , которые могут быть положены в основу построения радиотехнической системы (РТС) для приема сигнала [3].

Определение угла эллиптичности поляризационного эллипса ЭМВ:

$$\sin 2\varphi(t) = 2E_1(t)E_2(t)\sin(\psi_1(t) - \psi_2(t)), \quad (10)$$

$$\varphi(t) = \frac{\arcsin 2\varphi(t) \cdot 180^\circ}{2\pi}, \quad (11)$$

где  $E_1(t), E_2(t)$  – амплитуды сигналов в приемном ортогональном  $H$  канале,  $V$  канале соответственно;

$\psi_1(t), \psi_2(t)$  – фазы сигналов в приемном ортогональном  $H$  канале,  $V$  канале соответственно;

$\varphi(t)$  – угол эллиптичности, измеряется в градусах в пределах  $[-90^\circ; +90^\circ]$ .

Определение угла ориентации поляризационного эллипса ЭМВ:

$$\operatorname{tg}\theta(t) = \frac{\sin \theta'(t)}{\cos \theta'(t)}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sin \theta'(t) = & (E_1^2(t) \cos 2\psi_1(t) - \\ & - E_2^2(t) \cos 2\psi_2(t)) \sin 2\varphi(t) + \\ & + 2E_1(t)E_2(t) \sin(\psi_1(t) + \psi_2(t)); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta'(t) = & (E_1^2(t) \sin 2\psi_1(t) - \\ & - E_2^2(t) \sin 2\psi_2(t)) + (E_1^2(t) \sin 2\psi_1(t) + \\ & + E_2^2(t) \sin 2\psi_2(t)) \cos 2\varphi - \\ & - 2E_1(t)E_2(t) \cos(\psi_1(t) + \psi_2(t)) \sin 2\varphi; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \theta(t) = & \frac{\operatorname{arctg}\theta(t) \cdot 180^\circ}{\pi} = \\ = & \operatorname{arcsin} \left( \frac{\theta(t)}{\sqrt{1 + \theta^2(t)}} \right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $E_1(t), E_2(t), \psi_1(t), \psi_2(t)$  – амплитуды и фазы сигналов в приемном ортогональном  $H$  канале,  $V$  канале соответственно;

$\varphi(t)$  – угол эллиптичности (параметр получен из (10), (11));

$\theta(t)$  – угол ориентации, измеряется в градусах в пределах  $(-90^\circ; +90^\circ)$ .

Помимо элементов ПМР необходимо оценивать относительные поляризационные характеристики (коэффициенты) радиолокационного объекта (РЛО):

– деполаризация квазимонохроматической волны:

– по каналу  $H$ :

$$K_H = \frac{S_{HV}}{S_{HH}}, \quad (16)$$

– по каналу  $V$ :

$$K_V = \frac{S_{VH}}{S_{VV}},$$

– асимметрия:

$$A = \frac{S_{VV}}{S_{HH}}, \quad (17)$$

– анизотропия:

$$Q = \frac{S_{HH} \cdot S_{VV}}{S_{HH} + S_{VV}}. \quad (18)$$

Расчет элементов ПМР приведем ниже.

$$\begin{aligned} S_{HH} = & \cos(\varphi_1) \cos(\theta_0) \cos(\omega t) - \\ & - \sin(\varphi_1) \sin(\theta_0) \sin(\omega t); \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} S_{HV} = & \sin(\varphi_1) \sin(\theta_0) \cos(\omega t) + \\ & + \cos(\varphi_1) \cos(\theta_0) \sin(\omega t); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} S_{VH} = & \cos(\varphi_1) \sin(\theta_0) \cos(\omega t) + \\ & + \sin(\varphi_1) \cos(\theta_0) \sin(\omega t); \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} S_{VV} = & \sin(\varphi_1) \cos(\theta_0) \cos(\omega t) - \\ & - \cos(\varphi_1) \sin(\theta_0) \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (22)$$

Модулирующий сигнал  $S(t)$ , описывающий параметры вибрации исследуемого объекта, является одним из составляющих переменных расчетных фаз  $\varphi_1, \theta_0$ .

$$\begin{aligned} \varphi_1 = & \varphi_0 + \Delta\varphi \cdot S(t); \\ \theta_1 = & \theta_0 + \Delta\theta \cdot S(t). \end{aligned} \quad (23)$$

Детектирование признаков, характерных объекту, усложняется тем, что изначально в рассеянном сигнале присутствует неизвестный вид поляризационной модуляции.

Модуляция может состоять как из модуляции одного параметра, так и из модуляции суммы всех параметров поляризации ЭМВ.

Детектирование по заранее заданному виду поляризационной модуляции может привести к неправильному выделению модулирующего сигнала.

Детектирование должно состоять из нескольких этапов, в которых необходимо сначала определить вид модуляции, а затем выполнить детектирование

соответствующим видом поляризационно-модулированного сигнала. Необходимо учесть, что детектированный сигнал может быть дополнительно модулирован по известным видам модуляции (ЧМ, ФМ, ЛЧМ и т.д.).

Таким образом, возникает сложный вид модуляции, который можно представить, как модуляция поляризации ЭМВ и внутри этой модуляции – модуляция известными законами.

### Заключение

Необходимо рассматривать любой вибрирующий объект как природный модулятор, который модулирует поляризационный сигнал не только за счет собственных электрических и физических свойств, а и за счет вибрации и движения.

Методы вибродиагностики оказываются эффективными для обнаружения дисбаланса, дефектов вибрирующих деталей.

Построение такой аппаратуры позволяет выполнить бесконтактную предстартовую диагностику АТ, что может обеспечить повышение безопасности полетов, уменьшение простоя летного парка на этапе диагностики. Включение системы вибродиагностики в единую систему технической диагностики ЛА может позволить оценивать состояние АТ и его элементов, полностью автоматизировать процесс диагностирования.

### Литература

1. Чигрин В.С., Симбирский Д.Ф., Белогуб А.В. Виброакустика авиационных двигателей: учебн. пособ. – Х.: ХАИ, 2000. – 118 с.
2. Колесник Р.В., Попов А.В. Оптимизация глубины модуляции угла эллиптичности поляризационно-модулированного сигнала радиолокационной системы дистанционного зондирования // Технологии приборостроения: Сб. научн. тр. – Х., 2001. – Вып. № 1-2. – С. 71-75.
3. Колесник Р.В. Радиолокационные сигналы для измерения параметров поляризационной матрицы рассеяния // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. – Х.: ХАИ, 2002. – Вып. 15. – С. 114-119.
4. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
5. Ширман Я.Д. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров. – М.: Сов. радио, 1962. – 203 с.
6. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.

*Поступила в редакцию 22.08.2007*

**Рецензент:** канд. техн. наук, доцент В.В. Борцов, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных сил, Харьков.