

УДК 621.396.1

Р.В. КОЛЕСНИК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФЛУКТУИРУЮЩЕГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА

Описана модель флуктуирующего радиолокационного объекта дистанционного зондирования. Рассмотрена поляризационно-спектральная структура отраженного радиолокационного сигнала. Любой флуктуирующий объект, который отражает радиолокационный сигнал, можно представить в виде набора элементарных отражателей. Флуктуации элементарных отражателей приведут к амплитудной, фазовой и частотной модуляции отраженного сигнала. 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 и графические 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

Введение

Характеристики отраженных электромагнитных волн от целей, обнаруженных радиолокационной станцией (РЛС), имеют существенное значение для классификации целей. Процесс классификации зависит от признаков отраженного сигнала, характеризующих различные классы целей. Для этого необходимо выполнять моделирование цели. Полное электромагнитное моделирование целей, как правило, обходится дорого с точки зрения затрат времени и стоимости. Эти обстоятельства побуждают разработчика искать такое математическое описание обратного рассеяния, которое верно характеризует конкретные цели.

1. Постановка задачи

Любой флуктуирующий объект, который отражает радиолокационный сигнал, можно представить в виде набора элементарных отражателей. Колебания элементарных отражателей приведут к амплитудной, фазовой и частотной модуляции отраженного сигнала. 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. Если различные элементарные отражатели цели вибрируют в пространстве с различными скоростями, возможно выделение поляризационных свойств отдельных элементов объекта. При этом преобразование поляризации волны каждым элементарным отражателем полностью описывается поляризационной матрицей рассеяния (ПМР). Анализ ее поляризационно-спектральной структуры позволяет выделить характерные особенности флуктуирующего объекта.

2. Поляризационно-спектральная модель флуктуирующего объекта

Зависимость параметров поляризации отраженной электромагнитной волны (ЭМВ) от поляризации зондирующих сигналов \ddot{E}_t для соответствующих сочетаний параметров поляризации передающей и приемной антенн РЛС может быть выражена с помощью $\dot{S}_{HH}, \dot{S}_{HV}, \dot{S}_{VH}, \dot{S}_{VV}$ - комплексных коэффициентов отражения объекта радиолокационного дистанционного зондирования (ДЗ). Совокупность этих коэффициентов образует ПМР [4].

Преобразование поляризации отраженного сигнала вызывается вторичным излучением наведенных токов. Эти токи определяют все характеристики отраженной электромагнитной волны, в том числе и ее поляризацию. Поэтому поляризационные свойства объекта ДЗ зависят от диэлектрической и магнитной проницаемостей и проводимости, ЭПР и направления облучающей и отраженной волн [1,2].

2.1. Математическая модель цели

Рассмотрим объект, движущийся в пространстве с линейной скоростью Ω_3 , который обладает гармоническим движением Ω_2 в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ЭМВ, а также вращается вокруг своей продольной оси в этой же плоскости с доплеровской частотой Ω_1 , пропорциональной скорости вращения (рис. 1).

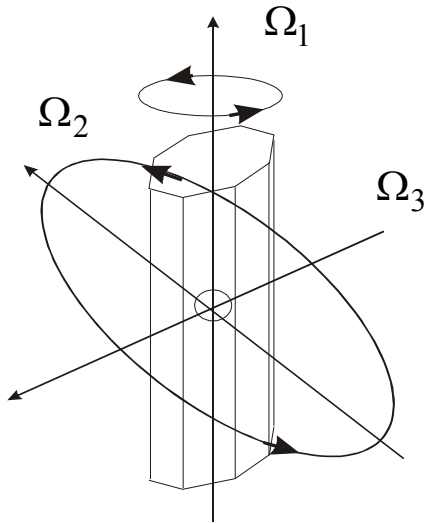


Рис. 1. Поляризационно-спектральная модель объекта ДЗ

Аналитическая запись принятого радиолокационного сигнала \ddot{E}_r от цели такого типа имеет вид

$$\ddot{E}_r = \ddot{S} \cdot \ddot{E}_t, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{E}_H \\ \dot{E}_V \end{pmatrix}_r = \begin{pmatrix} \dot{S}_{HH} & \dot{S}_{HV} \\ \dot{S}_{VH} & \dot{S}_{VV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{E}_H \\ \dot{E}_V \end{pmatrix}_t. \quad (2)$$

Пусть в фазовой плоскости электромагнитной

волны расположен один элементарный отражатель с действующей высотой (длиной) h_1 . Ориентация этого диполя относительно выбранной прямоугольной системы координат определяется углом θ_o . Элементарный отражатель представляет собой многогранный электропроводящий цилиндр. Фаза колебаний, наводимых падающей волной в элементарном отражателе, равна φ_o . Разные значения φ_o будем трактовать как результат различия физических свойств цели. Поскольку объект движется, его можно рассматривать как модулятор с законами модуляции, соответствующими форме движения. Излучаемый сигнал в двойном комплексном поле имеет следующий вид [1]:

$$\ddot{E}_t = e^{-ij\varphi_1} e^{i\theta_1} e^{j\omega t}, \quad (3)$$

где φ_1, θ_1 - параметры поляризации ЭМВ, ω - частота зондирующего сигнала.

Так как цилиндр многогранный, то полное обратное рассеяние $S_1(t)$ в плоскости вращения вокруг продольной оси будет определяться суммой отраженных сигналов каждой гранью в период его вращения:

$$S_1(t) = \sum_{k=1} A_k \cos(k\Omega_1 t). \quad (4)$$

Предположим, что физические свойства объекта ДЗ (диэлектрические и магнитные проницаемости и проводимости) постоянны, тогда угол эллиптичности φ_o будет постоянным.

Объект вращается в плоскости, перпендикулярной плоскости распространения отраженного сигнала, что приводит к модуляции угла ориентации поляризационного эллипса зондирующего сигнала по закону траекторного движения Ω_2 .

Аналитическая запись модели отраженного сигнала имеет вид

$$\ddot{E}_r = h_1 \cdot e^{-ij\varphi_0} e^{i(\theta_0 + \cos(\Omega_2 t))} * e^{j \sum_{k=1} \cos(k\Omega_1 t)} e^{j\Omega_3 t} \cdot \ddot{E}_t. \quad (5)$$

Для облегчения исследования поляризационно-спектральной модели отраженного сигнала примем зондирующий сигнал линейно-поляризованным с вертикальной поляризацией

$$\ddot{E}_t = e^{i\frac{\pi}{2}} e^{j\omega t}. \quad (6)$$

Конечное аналитическое выражение модели в двойном комплексном поле примет вид

$$\begin{aligned} \ddot{E}_r &= h_1 \cdot e^{-ij\varphi_0} e^{i(\theta_0 + \cos(\Omega_2 t))} * \\ &* e^{j \sum_{k=1} \cos(k\Omega_1 t)} e^{j\Omega_3 t} * e^{i\frac{\pi}{2}} e^{j\omega t} = \\ &= h_1 \cdot e^{-ij\varphi_0} e^{i(\theta_0 + \cos(\Omega_2 t) + \frac{\pi}{2})} * \\ &* e^{j \left(\sum_{k=1} \cos(k\Omega_1 t) + \Omega_3 t + \omega t \right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

После ряда тригонометрических операций математическое выражение примет вид

$$\begin{aligned} \dot{E}_{HH} &= \cos(\varphi_0) \cos(x_1) \cos(x_2) - \\ &- \sin(\varphi_0) \sin(x_1) \sin(x_2), \\ \dot{E}_{HV} &= \sin(\varphi_0) \sin(x_1) \cos(x_2) + \\ &+ \cos(\varphi_0) \cos(x_1) \sin(x_2), \\ \dot{E}_{VH} &= \cos(\varphi_0) \sin(x_1) \cos(x_2) + \\ &+ \sin(\varphi_0) \cos(x_1) \sin(x_2), \\ \dot{E}_{VV} &= \cos(\varphi_0) \sin(x_1) \sin(x_2) - \\ &- \sin(\varphi_0) \cos(x_1) \cos(x_2), \end{aligned} \quad (8)$$

где $x_1 = \theta_0 + \frac{\pi}{2} + \cos(\Omega_2 t)$,

$x_2 = \sum_{k=1} \cos(k\Omega_1 t) + (\Omega_3 + \omega)t$.

Элементы ПМР в выбранной системе координат представляют собой функции параметров предлагаемой модели, которые характеризуются семейством четырех комплексных параметров $\dot{S}_{HH}, \dot{S}_{HV}, \dot{S}_{VH}, \dot{S}_{VV}$.

Проведем исследование поляризационно-спектральной структуры модели радиолокационного объекта, движущегося в пространстве.

Во всех рассмотренных случаях амплитуды сигналов нормированы относительно максимальной амплитуды сигнала одного из каналов.

2.2. Исследование поляризационного спектра модели цели

Случай 1. Цель движется с постоянной скоростью в плоскости распространения ЭМВ. Доплеровское смещение частоты Ω_3 ($F = 2$ кГц) пропорционально скорости движения. К тому же цель вращается вокруг продольной оси с доплеровской частотой Ω_1 ($F = 520$ Гц). Спектр отраженного сигнала принятого в канале VV, изображен на рис. 2.

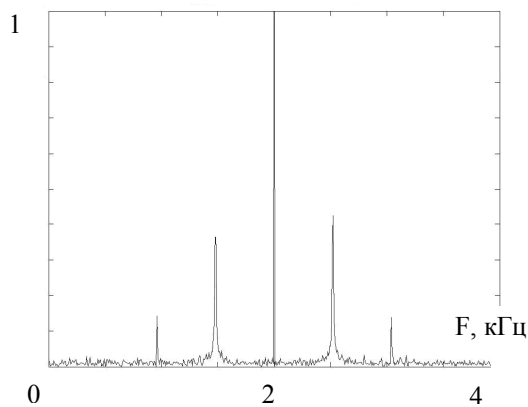


Рис. 2. Поляризационный спектр модели в канале VV (1)

Спектр сигнала, принятого каналом VH, представлен на рис. 3. В поляризационно-ортогональных каналах наблюдается амплитудная модуляция. Несущая частота модуляции является основной доплеровской частотой движения объекта в одной плоскости с РЛС. Модулирующей является частота вра-

щения объекта вокруг своей оси. Спектры в поляри-

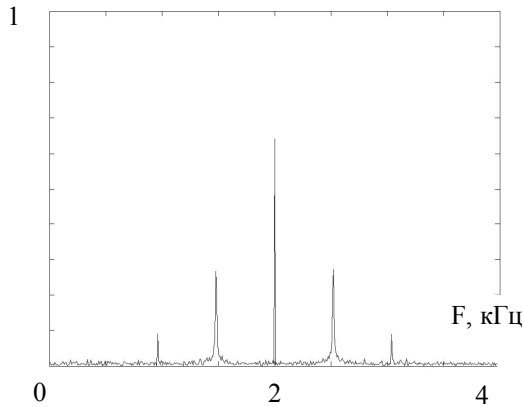


Рис. 3. Поляризационный спектр модели в канале VH (1)

зационно-ортогональных каналах подобны.

Сигнал, принятый на поляризации зондирующей ЭМВ, превосходит амплитуду других каналов на 30-40 %. Частота вращения Ω_1 в сигнале присутствует до 2-й гармоники. Аналитическая запись спектра принятого сигнала в каналах VV, VH имеет вид

$$\begin{aligned} S_{VH} &= \Omega_3 \pm n\Omega_1, n = 1, 2; \\ S_{VV} &= \Omega_3 \pm n\Omega_1, n = 1, 2. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, если в отраженном радиолокационном сигнале наблюдается подобный спектр, то можно предположить, что объект не только движется, но и вращается вокруг центра масс.

Случай 2. Цель движется в плоскости распространения ЭМВ с постоянной скоростью, пропорциональной доплеровскому смещению частоты Ω_3 ($F = 2$ кГц), и вращается в плоскости, перпендикулярной плоскости распространения ЭМВ, с частотой Ω_2 ($F = 300$ Гц). Спектр отраженного сигнала, принятого в канале VV, изображен на рис. 4, а в канале VH – на рис. 5. В обоих случаях присутствует амплитудная модуляция, но спектры в каналах приемника различны.

В канале VV наблюдается несущая частота,

равная доплеровскому смещению Ω_3 . Модулирующей частотой является Ω_2 . В этом канале присутствуют четные гармоники модулирующего сигнала.

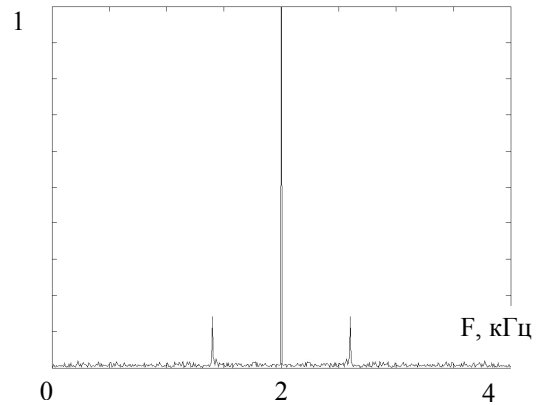


Рис. 4. Поляризационный спектр модели в канале VV (2)

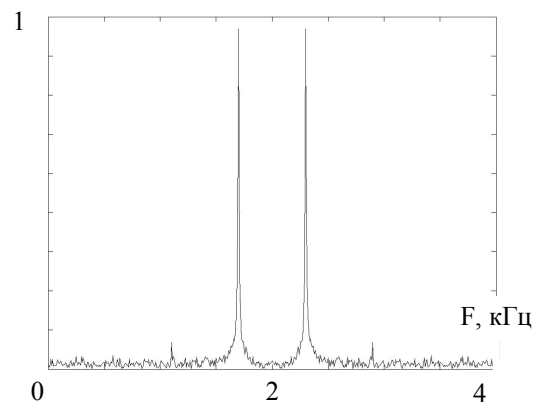


Рис. 5. Поляризационный спектр модели в канале VH (2)

В VH-канале доплеровская частота движения объекта, которая является несущей, отсутствует, а присутствуют только нечетные гармоники частоты вращения объекта в плоскости, перпендикулярной плоскости распространения ЭМВ. Такой вариант модуляции может рассматриваться как поляризационная модуляция по углу ориентации поляризационного эллипса, кроме того, в принятом радиолокационном сигнале присутствуют линейно-поляризованные спектральные компоненты модулирующего сигнала с частотой $n\Omega$, $n = 1, 2, 3$. Если на выходе приемника РЛС наблюдается сигнал, обладающий спектром

$$\begin{aligned} S_{VH} &= \pm(2n-1)\Omega_2, \quad n = 1, 2, 3; \\ S_{VV} &= \Omega_3 \pm \sum_{n=1} 2n\Omega_2, \end{aligned} \quad (10)$$

то можно полагать, что объект не только движется, но и вращается в плоскости, перпендикулярной плоскости распространения ЭМВ.

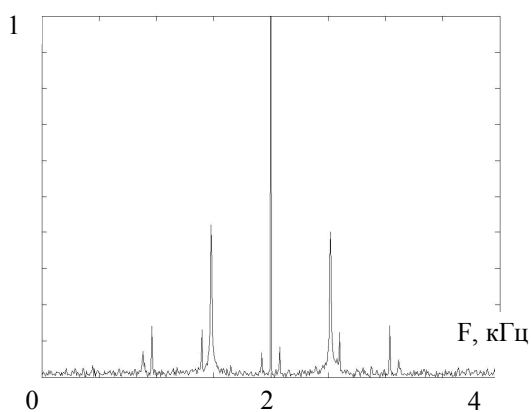


Рис. 6. Поляризационный спектр модели в канале VV (3)

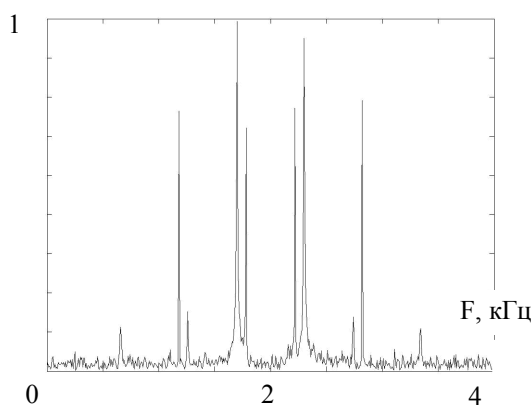


Рис. 7. Поляризационный спектр модели в канале VH (3)

Случай 3. Этот случай представляет наибольший интерес. Объект движется в плоскости распространения ЭМВ. Доплеровская частота Ω_3 ($F = 2$ кГц) пропорциональна скорости движения объекта в этой плоскости. К тому же объект вращается в плоскости, перпендикулярной плоскости распространения ЭМВ, с частотой Ω_2 ($F = 300$ Гц) и вокруг продольной оси со скоростью, пропорциональной доплеровскому смещению частоты Ω_1 ($F = 520$ Гц).

Спектр отраженного сигнала, принятого в канале VV, изображен на рис. 6, а в канале VH – на рис. 7. На рис. 8 изображена разница спектра принятого сигнала в разных каналах.

Сигнал, отраженный объектом исследования, является амплитудно-модулированным. Спектры сиг-

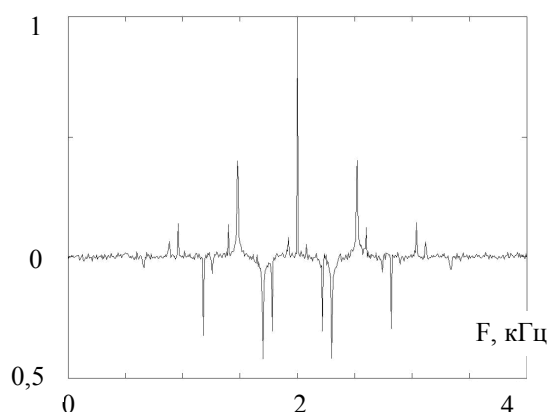


Рис. 8. Разница спектра сигнала в разных каналах (3)

налов в поляризационно-ортогональных каналах в этом случае различны. В канале VV наблюдается несущая частота, равная доплеровскому смещению Ω_3 . Модулирующими частотами являются Ω_2 , Ω_1 . Но добавляется еще одна амплитудная модуляция с несущей частотой Ω_2 , модулирующим сигналом которой является Ω_1 . В этом канале присутствуют все гармоники частоты Ω_1 и четные гармоники частоты Ω_2 .

В VH-канале приемника доплеровская частота движения объекта отсутствует, а присутствуют только нечетные гармоники частоты вращения объекта в плоскости, перпендикулярной плоскости распространения ЭМВ. Эта частота поперечного вращения модулирована частотой Ω_1 . В отраженном сигнале присутствуют все линейно-поляризованные спектральные компоненты модулирующей частоты.

В отраженном от объекта радиолокационном сигнале, имеющем спектр

$$S_{VH} = \pm(\Omega_2 \pm n\Omega_1), \quad n = 1, 2;$$

$$S_{VV} = \Omega_3 \pm \left[\sum_{n=1}^2 n\Omega_1 + \sum_{n=1}^1 (2n\Omega_2 \pm n\Omega_1) \right], \quad (11)$$

присутствует двойная амплитудная модуляция.

В случае, если отраженный сигнал содержит такой спектр, можно полагать, что объект не только движется, а еще вращается и в плоскости, перпендикулярной плоскости распространения ЭМВ, и вокруг своей оси.

При дистанционном зондировании информация об объекте радиолокационного наблюдения содержится в соотношении амплитуд и фаз четных и нечетных гармоник. Для измерения ПМР объекта достаточно измерять амплитуды и фазы поляризационно-ортогональных компонент на частотах $\pm n\Omega_k$, где $n = 1, 2, 3$; $k=1, 2, 3$ [2, 3].

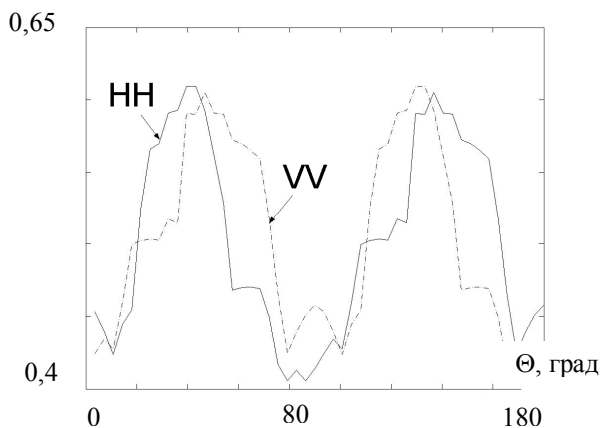


Рис. 9. Зависимость максимума энергии от ориентации поляризации ЭМВ (3)

Проведем исследование изменения энергетического потенциала отраженного сигнала, при котором в измеряемых спектральных компонентах сосредоточится максимум энергии сигнала. Зависимости амплитуд спектральных составляющих от ориентации поляризационного эллипса зондирующего сигнала $\theta = 0 \dots \pi$ представлены на рис. 9. При наличии движения объекта во всех исследуемых плоскостях энергия принятого сигнала в приемных поляризационно-ортогональных каналах практически одинакова. Существенное изменение энергии сигнала

наблюдается при $\theta = 0 \dots \frac{\pi}{2}$.

Затем закон изменения повторяется до $\theta = \pi$. Максимум энергии отраженного сигнала сосредоточился при $\theta = \frac{\pi}{4} + n\frac{\pi}{2}$, $n = 0, 1$. Таким образом, энергия отраженного сигнала перераспределяется в поляризационно-ортогональных каналах в зависимости от ориентации поляризационного эллипса зондирующего сигнала.

Заключение

Исследования поляризационно-спектральных компонент сигнала, отраженного от объекта дистанционного зондирования, показали, что изменения формы движения объекта отражаются в поляризационном спектре сигнала. Поляризационные характеристики отраженного сигнала зависят от поляризации зондирующей ЭМВ. При поляризационно-спектральном анализе отраженных сигналов могут быть получены дополнительные признаки для идентификации флуктуирующих объектов.

Литература

1. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция. - М.: Сов. радио, 1974. - 288 с.
2. Р.В. Колесник, А.В. Попов. Оптимизация глубины модуляции угла эллиптичности поляризационно-модулированного сигнала радиолокационной системы дистанционного зондирования // Технология приборостроения - 2001. - № 1-2. - С. 71-75.
3. Р.В. Колесник. Радиолокационные сигналы для измерения параметров поляризационной матрицы рассеяния // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». - 2002. - Вып. 15. - С. 114-119.

Поступила в редакцию 15.01.04

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