

文章编号:1001-9014(2009)03-0198-06

箔条云的全极化频谱特性

李金梁, 王雪松, 李永祯

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 基于箔条螺旋下降的运动模型, 研究了箔条的转动和平动对箔条云回波信号造成的影响, 用统计方法研究了箔条云的全极化频谱特性. 首先介绍了箔条螺旋下降的运动模型, 给出了转动偶极子的极化散射矩阵, 在此基础上分析了箔条云散射矩阵元的自相关函数和互相关函数, 给出了散射矩阵元的功率谱和交叉功率谱的表达式, 然后给出了均匀取向和水平取向箔条云回波频谱的数值结果.

关键词: 箔条; 转动; 极化; 相关函数; 功率谱

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

FULL-POLARIMETRIC SPECTRAL CHARACTERISTICS OF CHAFF CLOUDS

LI Jin-Liang, WANG Xue-Song, LI Yong-Zhen

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the spiral descending model of chaff, the effect of both rotation and translational motion of chaff on radar echo of chaff clouds was studied and the full-polarimetric spectral characteristics of radar echoes from chaff clouds were investigated by using statistical method. Firstly, spiral descending model of chaff was described, and the Sinclair matrix of a dipole with rotation was given. Based on the above analysis, auto correlation and cross-correlation functions of the Sinclair Matrix elements were investigated and further power spectrum and cross-power spectrum were derived. At last, some numerical results of radar echo spectra for randomly oriented and horizontally oriented chaff clouds were presented.

Key words: chaff; rotation; polarization; correlation function; power spectrum

引言

无源干扰是对抗各种红外、雷达传感器的重要手段, 包括烟雾、箔条、假诱饵、角反射器等^[1-3], 其中箔条干扰的应用最为广泛. 箔条云是由大量随机取向的偶极子组成的. 当箔条偶极子在空中投放后, 由于投放力、自身不平衡及其它动力学性质的影响, 使箔条的运动除了平动还有转动. 关于箔条的转动和平动对箔条云回波信号的影响, 以前有过这方面的研究^[4-6]. 但以前的研究都是假定单根箔条在垂直于某一转轴的平面内转动, 并且假定该转轴的取向服从球面均匀分布. 最近的研究证明^[7], 箔条在下降过程达到稳态后, 箔条的俯仰角基本不变, 存在垂直扩散速度分量和水平扩散速度分量, 在水平面内箔条存在一个角速度, 箔条的运动形式为螺旋

下降. 在实际的应用中, 为了增加箔条的驻留时间, 箔条的取向往往集中在水平面附近, 因此对水平取向的箔条云的频谱特性应加以分析.

本文基于箔条螺旋下降的转动模型, 研究了箔条的转动和平动对箔条云回波信号造成的影响, 用统计的方法研究了箔条云的全极化频谱特性. 本文共分5节, 其中第一节为引言部分, 对本文的研究背景和主要研究内容进行了介绍; 第二节首先介绍了箔条螺旋下降的运动模型, 并给出了转动箔条偶极子的极化散射矩阵; 第三节导出了箔条云散射矩阵元的自相关函数和互相关函数, 给出了各极化通道箔条云回波的功率谱和交叉功率谱的表达式; 在第四节, 针对箔条取向服从均匀分布和水平分布的两种典型情况, 给出了功率谱和交叉功率谱的数值结果, 分析了平动和转动的概率分布参数对箔条回波

收稿日期: 2008-09-15, 修回日期: 2009-03-18

Received date: 2008-09-15, revised date: 2009-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672033), 全国优秀博士论文专项基金资助项目(08100101)

作者简介: 李金梁(1982-), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要研究方向为无源干扰、极化信息处理.

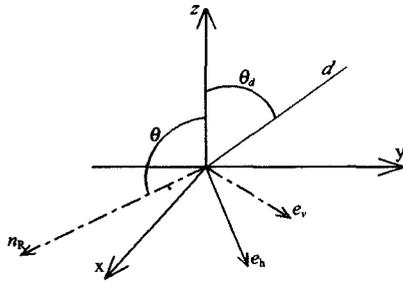


图1 空间坐标系下偶极子散射示意图
Fig.1 Sketch map of scattering by dipole in space coordinates

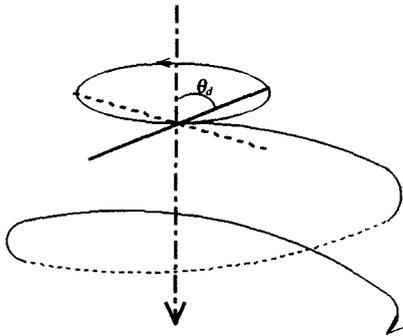


图2 旋转下降的偶极子
Fig.2 spiral descending dipole

的影响;第五节对本文的主要结果进行了概括.

1 转动偶极子的极化散射矩阵

1.1 箔条螺旋下降的转动模型

建立空间坐标系如图1所示:坐标原点处于箔条中心,Z轴为垂直向上,XOY平面为水平面,Y轴可选为正东方向.假定箔条的取向矢量为 d ,其方位角为 ϕ_d ,与Z轴正向的夹角为 θ_d .散射电场的方向为 n_R ,其方位角为 ϕ ,与Z轴正向的夹角为 θ .图1为在空间坐标系下箔条偶极子电磁散射的示意图.极化坐标系按照BSA约定定义: $e_h = e_\phi, e_v = e_\theta$.

单根箔条偶极子具有一定空间取向,空间取向随时间作一定规律的变化.根据文献[7]和[8],认为箔条在下降过程达到稳态后,箔条的俯仰角不变,有垂直下降的垂直扩散速度分量和水平面内的水平扩散速度分量,此外在水平面内箔条存在一个角速度.箔条在空中旋转下降,运动轨迹如图2所示.

根据图2所示的箔条运动模型可知,箔条空间取向 (θ_d, ϕ_d) 的变化规律为:

$$\phi_d(t) = \phi_0 + \omega_r t, \quad (1)$$

$$\theta_d(t) = \theta_0, \quad (2)$$

其中, ω_r 为箔条转动的角速度, ϕ_0 为箔条在空中的

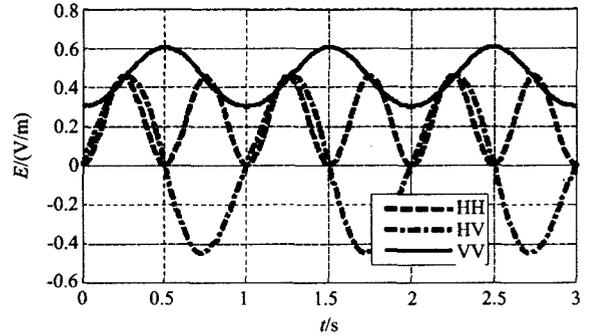


图3 转动偶极子各极化通道回波信号的变化曲线
Fig.3 The curves of echo in different polarization channels scattered by rotating dipole
($\theta_0 = 45^\circ, \theta = 10^\circ, \phi_0 = 0^\circ, \phi = 0^\circ, \omega_r = 2\pi$)

初始方位角,为一随机角度,均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 内.

1.2 转动偶极子的极化散射矩阵

根据文献[9],单个箔条偶极子的极化散射矩阵可以表示为:

$$S = G \begin{bmatrix} (d \cdot e_h)^2 & (d \cdot e_h)(d \cdot e_v) \\ (d \cdot e_h)(d \cdot e_v) & (d \cdot e_v)^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, $G = \frac{\eta L}{\sqrt{\pi z_0}}$, η 为自由空间的特性阻抗, L 为偶

极子的特征长度, z_0 为偶极子的辐射阻抗,“ \cdot ”表示两矢量取内积.(需要说明的是,式(3)的推导过程中用短电偶极子方向性函数来近似箔条偶极子的方向性函数).在图1所示的坐标系中,可得

$$d \cdot e_h = \sin\theta_d \sin(\phi_d - \phi) \quad (4)$$

$$d \cdot e_v = \cos\theta_d \sin\theta_d \cos(\phi_d - \phi) - \sin\theta_d \cos\theta_d$$

假设满足远场条件,则在箔条运动的过程中,入射电场的方向是不变的.另外,常数 G 只会对箔条回波的幅度带来影响,对相关函数和功率谱不会带来影响,转动偶极子的取向 d 是时变的.为了研究的方便,将 G 忽略,极化散射矩阵简化为:

$$S(t) = \begin{bmatrix} (d(t) \cdot e_h)^2 & (d(t) \cdot e_h)(d(t) \cdot e_v) \\ (d(t) \cdot e_h)(d(t) \cdot e_v) & (d(t) \cdot e_v)^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

图3给出了箔条取向变化引起的单根箔条回波信号的起伏曲线.

由图3可以看出,3个极化通道的回波都为周期信号,其中HH通道的回波信号的周期为0.5倍转动周期,含有一定的直流分量;HV和VV通道回波信号的周期都等于转动周期,HV通道回波信号在零点上下起伏,基本不含直流分量,VV通道回波信号含有一部分直流分量.将式(4)代入式(5),以 ω_r 为基频对各极化通道的回波信号进行傅里叶级

数展开,可得:

$$\begin{aligned} a_{HH} &= (d(t) \cdot e_h)^2 = C_1 + D_1 e^{j2(\phi_d - \phi)} \\ &\quad + D_1^* e^{-j2(\phi_d - \phi)} + E_1 e^{j(\phi_d - \phi)} + E_1^* e^{-j(\phi_d - \phi)} \\ a_{HV} &= (d(t) \cdot e_h)(d(t) \cdot e_v) = C_2 + D_2 e^{j2(\phi_d - \phi)} \\ &\quad + D_2^* e^{-j2(\phi_d - \phi)} + E_2 e^{j(\phi_d - \phi)} + E_2^* e^{-j(\phi_d - \phi)} \\ a_{VV} &= (d(t) \cdot e_v)^2 = C_3 + D_3 e^{j2(\phi_d - \phi)} \\ &\quad + D_3^* e^{-j2(\phi_d - \phi)} + E_3 e^{j(\phi_d - \phi)} + E_3^* e^{-j(\phi_d - \phi)} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\sin^2 \theta_d}{2} \\ C_2 = 0 \\ C_3 = \sin^2 \theta \cos^2 \theta_d + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta_d}{2} \\ D_1 = -\frac{\sin^2 \theta_d}{4} \\ D_2 = \frac{\sin^2 \theta_d \cos \theta}{4j} \\ D_3 = \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta_d}{4} \\ E_1 = 0 \\ E_2 = -\frac{\sin \theta \sin \theta_d \cos \theta_d}{2j} \\ E_3 = -\sin \theta \cos \theta \sin \theta_d \cos \theta_d \end{cases}, \quad (7)$$

式中, C_1 、 C_2 和 C_3 分别代表了 HH 通道、HV 通道和 VV 通道回波信号的直流分量的幅度; D_1 、 D_2 和 D_3 分别代表了 HH 通道、HV 通道和 VV 通道回波信号中角频率为 $2\omega_r$ 的分量(2 倍频分量)的振幅; E_1 、 E_2 和 E_3 分别代表了 HH 通道、HV 通道和 VV 通道回波信号中角频率为 ω_r 的分量(基频分量)的振幅。

考虑到箔条的平动产生的多普勒效应,式(5)应修正为:

$$S(t) = \begin{bmatrix} a_{HH} & a_{HV} \\ a_{HV} & a_{VV} \end{bmatrix} e^{j(\omega_d t + \psi_0)}, \quad (8)$$

其中, $\omega_d = 2\pi v/\lambda$ 为箔条平动产生的多普勒角频移, v 为平动速度的径向分量, λ 为雷达波长, ψ_0 为箔条偶极子散射的变相位效应和传播引起的相位延迟之和。

2 散射矩阵元的功率谱和交叉功率谱

2.1 散射矩阵元的自相关和互相关函数

为了研究箔条云回波的频谱特性,首先分析极化散射矩阵的协方差矩阵^[1]

$$K(\tau) = E \left\{ \begin{bmatrix} S_{HH}(t)S_{HH}^*(t-\tau) & S_{HH}(t)S_{HV}^*(t-\tau) & S_{HH}(t)S_{VV}^*(t-\tau) \\ S_{HV}(t)S_{HH}^*(t-\tau) & S_{HV}(t)S_{HV}^*(t-\tau) & S_{HV}(t)S_{VV}^*(t-\tau) \\ S_{VV}(t)S_{HH}^*(t-\tau) & S_{VV}(t)S_{HV}^*(t-\tau) & S_{VV}(t)S_{VV}^*(t-\tau) \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示统计平均. 协方差矩阵的对角线元素代表极化散射矩阵元的自相关函数,非对角线元素表示散射矩阵元之间的互相关函数. 将式(6)代入式(9),可得

$$K(\tau) = M(\tau) [\tilde{C} + 2\text{Re}(N(2\tau)\tilde{D}) + 2\text{Re}(N(\tau)\tilde{E})], \quad (10)$$

其中, $M(\tau) = E_{\omega_d} \{ e^{j\omega_d \tau} \}$, $N(t) = E_{\omega_r} \{ e^{j\omega_r \tau} \}$ 分别为 $p(\omega_d)$ 和 $p(\omega_r)$ 的特征函数, $p(\omega_d)$ 为偶极子由平动产生的多普勒角频移的分布密度, $p(\omega_r)$ 为偶极子角速度分布密度. 矩阵 \tilde{C} 、 \tilde{D} 、 \tilde{E} 是对箔条的所有取向统计平均.

$$\begin{cases} \tilde{C} = E \left\{ \begin{bmatrix} |C_1|^2 & 0 & C_1 C_3^* \\ 0 & 0 & 0 \\ C_3 C_1^* & 0 & |C_3|^2 \end{bmatrix} \right\} \\ \tilde{D} = E \left\{ \begin{bmatrix} |D_1|^2 & D_1 D_2^* & D_1 D_3^* \\ D_2 D_1^* & |D_2|^2 & D_2 D_3^* \\ D_3 D_1^* & D_3 D_2^* & |D_3|^2 \end{bmatrix} \right\} \\ \tilde{E} = E \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & |E_2|^2 & E_2 E_3^* \\ 0 & E_3 E_2^* & |E_3|^2 \end{bmatrix} \right\} \end{cases}. \quad (11)$$

$M(\tau)$ 代表了箔条的平动对回波信号相关函数的影响, $N(\tau)$ 和 $N(2\tau)$ 分别表示了箔条的转动带来的基频分量和 2 倍频分量对回波信号相关函数的影响. \tilde{C} 代表了各极化通道回波信号的直流分量的相关函数分量,第二项 $2\text{Re}(N(2\tau)\tilde{D})$ 代表了各极化通道回波信号的 2 倍频分量的相关函数,第三项 $2\text{Re}(N(\tau)\tilde{E})$ 代表了各极化通道回波信号的基频分量的相关函数,直流分量、2 倍频分量和基频分量彼此之间是不相关的。

2.2 散射矩阵元的功率谱和交叉功率谱

假设平动产生的多普勒角频移分量和转动角速度均服从高斯分布^[6],平动产生的多普勒角频移分量的均值和方差分别为 $\bar{\omega}_d$ 和 σ_d^2 ,转动角速度的均值和方差分别为 $\bar{\omega}_r$ 和 σ_r^2 ,则二者的概率密度函数如下式所示:

$$p_d(\omega_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp \left[-\frac{(\omega_d - \bar{\omega}_d)^2}{2\sigma_d^2} \right],$$

$$p_r(\omega_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{(\omega_r - \bar{\omega}_r)^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (12)$$

由于 $M(\tau)$, $N(\tau)$ 分别为 $p(\omega_d)$ 和 $p(\omega_r)$ 的特征函数, 不难求得 $M(\tau)$ 和 $N(\tau)$ 的表达式如下所示

$$\begin{aligned} M(\tau) &= \exp\left(j\bar{\omega}_d\tau - \frac{1}{2}\sigma_d^2\tau^2\right) \\ N(\tau) &= \exp\left(j\bar{\omega}_r\tau - \frac{1}{2}\sigma_r^2\tau^2\right) \end{aligned} \quad (13)$$

对式(10)进行傅里叶变换, 可得极化散射矩阵元的功率谱矩阵, 其中对角线元素表示极化散射矩阵元的功率谱, 非对角线元素表示极化散射矩阵元之间的交叉功率谱。

$$\begin{aligned} G(\omega) &= \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_d} e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d)^2}{2\sigma_d^2}} \tilde{C} \\ &+ \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\sigma_d^2 + 4\sigma_r^2}} \left(e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d - 2\bar{\omega}_r)^2}{2(\sigma_d^2 + 4\sigma_r^2)}} \tilde{D} + e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d - 2\bar{\omega}_r)^2}{2(\sigma_d^2 + 4\sigma_r^2)}} \tilde{D} \right) \quad (14) \\ &+ \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_r^2}} \left(e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d - \bar{\omega}_r)^2}{2(\sigma_d^2 + \sigma_r^2)}} \tilde{E} + e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d - \bar{\omega}_r)^2}{2(\sigma_d^2 + \sigma_r^2)}} \tilde{E} \right) \end{aligned}$$

令

$$\begin{cases} F_1(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_d} e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d)^2}{2\sigma_d^2}} \\ F_{21}(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\sigma_d^2 + 4\sigma_r^2}} e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d - 2\bar{\omega}_r)^2}{2(\sigma_d^2 + 4\sigma_r^2)}} \\ F_{22}(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\sigma_d^2 + 4\sigma_r^2}} e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d - 2\bar{\omega}_r)^2}{2(\sigma_d^2 + 4\sigma_r^2)}} \\ F_{31}(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_r^2}} e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d - \bar{\omega}_r)^2}{2(\sigma_d^2 + \sigma_r^2)}} \\ F_{32}(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_r^2}} e^{-\frac{(\omega - \bar{\omega}_d - \bar{\omega}_r)^2}{2(\sigma_d^2 + \sigma_r^2)}} \end{cases} \quad (15)$$

则式(14)变为

$$\begin{aligned} G(\omega) &= F_1(\omega) \tilde{C} + (F_{21}(\omega) \tilde{D} + F_{22}(\omega) \tilde{D}) \\ &+ (F_{31}(\omega) \tilde{E} + F_{32}(\omega) \tilde{E}) \end{aligned} \quad (16)$$

和文献[1]中的结果比较, 上式多了最后一项 $F_{31}(\omega) \tilde{E} + F_{32}(\omega) \tilde{E}$. 上式中的第一项 $F_1(\omega) \tilde{C}$ 只受箔条平动的影响, 不受箔条转动的影响. 第二项 $F_{21}(\omega) \tilde{D} + F_{22}(\omega) \tilde{D}$ 为箔条转动引起的 2 倍频分量与箔条平动的共同作用, 第三项 $F_{31}(\omega) \tilde{E} + F_{32}(\omega) \tilde{E}$ 为箔条转动引起的基频分量与箔条平动的共同作用. 其中 $F_{21}(\omega)$ 和 $F_{31}(\omega)$ 为只有平动时的箔条频谱向右平移和展宽, $F_{22}(\omega)$ 和 $F_{32}(\omega)$ 为只有平动时

的箔条频谱向左平移和展宽. 综上所述, 箔条的转动会对箔条的频谱产生平移和展宽的作用.

3 均匀和水平取向箔条云回波功率谱的数值结果

3.1 均匀取向箔条云回波的频谱特性

若箔条的空间取向服从均匀分布, 即 (θ_d, ϕ_d) 服从球面均匀分布, 式(11)对箔条的所有取向求统计平均的结果为

$$\tilde{C} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 + \cos^2\theta \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 + \cos^2\theta & 0 & 3\sin^4\theta + 2\cos^2\theta \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\tilde{D} = \frac{1}{30} \begin{bmatrix} 1 & -j\cos\theta & \cos^2\theta \\ j\cos\theta & \cos^2\theta & -j\cos^3\theta \\ \cos^2\theta & j\cos^3\theta & \cos^4\theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\tilde{E} = \frac{1}{30} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin^2\theta & -j2\sin^2\theta\cos\theta \\ 0 & j2\sin^2\theta\cos\theta & 4\sin^2\theta\cos^2\theta \end{bmatrix} \quad (19)$$

将式(17)~(19)代入式(16), 可得 S_{HH} 的功率谱的表达式为:

$$G_{HH}(\omega) = \frac{2}{15} F_1(\omega) + \frac{1}{30} (F_{21}(\omega) + F_{22}(\omega)) \quad (20)$$

S_{HV} 的功率谱的表达式为:

$$\begin{aligned} G_{HV}(\omega) &= \frac{\cos^2\theta}{30} (F_{21}(\omega) + F_{22}(\omega)) \\ &+ \frac{\cos^2\theta}{30} (F_{31}(\omega) + F_{32}(\omega)) \end{aligned} \quad (21)$$

S_{VV} 的功率谱的表达式为:

$$\begin{aligned} G_{VV}(\omega) &= \frac{3\sin^4\theta + 2\cos^2\theta}{15} F_1(\omega) \\ &+ \frac{\cos^4\theta}{30} (F_{21}(\omega) + F_{22}(\omega)) \\ &+ \frac{4\sin^2\theta\cos^2\theta}{30} (F_{31}(\omega) + F_{32}(\omega)) \end{aligned} \quad (22)$$

S_{HH} 和 S_{HV} 的交叉功率谱的表达式为:

$$G_{HH,HV}(\omega) = \frac{j\cos^3\theta}{30} (F_{21}(\omega) - F_{22}(\omega)) \quad (23)$$

S_{HV} 和 S_{VV} 的交叉功率谱的表达式为:

$$\begin{aligned} G_{HV,VV}(\omega) &= \frac{1 + \cos^2\theta}{15} F_1(\omega) + \frac{\cos^2\theta}{30} (F_{21}(\omega) \\ &+ F_{22}(\omega)) \end{aligned} \quad (24)$$

S_{HH} 和 S_{VV} 的交叉功率谱的表达式为:

$$\begin{aligned} G_{HH,VV}(\omega) &= -\frac{j\cos^3\theta}{30} (F_{21}(\omega) - F_{22}(\omega)) \\ &- \frac{j2\sin^2\theta\cos\theta}{30} (F_{31}(\omega) - F_{32}(\omega)) \end{aligned} \quad (25)$$

由式(20)~(25)可以看出,箔条云回波的频谱,除了 S_{HH} 的功率谱,其它都和雷达视线的方向有关,这点有别于文献[4]~[6]中得到的结论.这是因为箔条的转动沿一个锥面,锥面的对称轴为垂直方向,这点决定了箔条云的频谱只在方位向上具有各向同性,在入射电场的俯仰向上不再具有各向同性.由于水平极化始终位于水平面内,俯仰向上不发生变化,所以 S_{HH} 的功率谱不随雷达视线而变化.图4给出了箔条回波的频谱在不同俯仰角(实线,虚线和点划线分别对应俯仰角为 $10^\circ, 45^\circ, 80^\circ$)下的曲线,其中参数的设置为: $\bar{\omega}_r = 39.3 \text{ rad/s}, \sigma_r = \bar{\omega}_r, \bar{\omega}_d = 17 \text{ rad/s}$ (一般 MTI 雷达采用补偿措施使 $\bar{\omega}_d = 0$), $\sigma_d = 17 \text{ rad/s}$.由图4可以看出除了 S_{HH} 的功率谱,其它都和雷达视线的俯仰角有关.

图5~图6给出了箔条取向服从均匀分布时功率谱和交叉功率谱的数值结果,图5分析了 σ_r 对功率谱的影响,图6分析了 σ_d 对功率谱的影响.其中各参数的设置为:雷达视线的俯仰角为 10° ,对应于入射电场矢量的 $\theta = 100^\circ$,箔条转动和平动的参数为: $\bar{\omega}_r = \beta_1 * 39.3 \text{ rad/s}, \sigma_r = \bar{\omega}_r, \bar{\omega}_d = 0, \sigma_d = \beta_2 * 17 \text{ rad/s}$. $\beta_2 = 1, \beta_1 = 0.5, 1, 2$,分别对应图5中的实线、虚线和点划线. $\beta_1 = 1, \beta_2 = 0.5, 1, 2$,分别对应图6中的实线、虚线和点划线.

根据式(20)、(22)和(24)可知,HH的功率谱, VV的功率谱和HH和VV的交叉功率谱中 $F_1(\omega)$ 分量占主要地位,所以这三者的频谱曲线形状都近似为均值为 $\bar{\omega}_d = 0$,方差为 σ_d^2 的高斯曲线.这三者

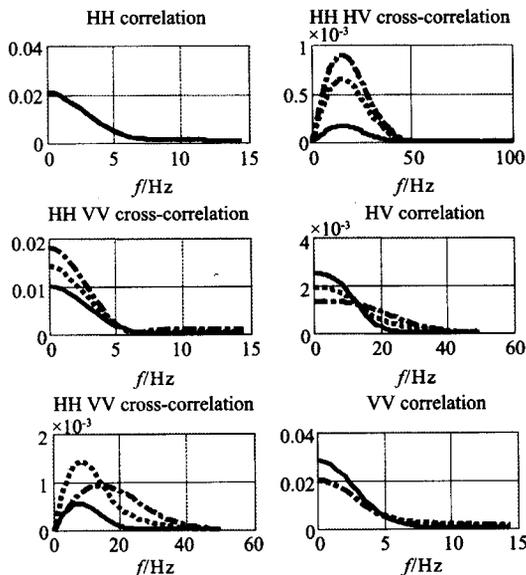


图4 雷达俯仰角对箔条频谱的影响
Fig.4 The influence of radar elevation angle on chaff spectra

的中心频率都为零,能量主要集中在低频部分,3dB带宽大约为 $0.8\sigma_d$.由图5可知, σ_r 的大小对HH的功率谱, VV的功率谱以及HH和VV的交叉功率谱影响很小,这是因为 $F_1(\omega)$ 中不含 σ_r 参数.由图6可知, σ_d 越大,曲线的下降速度越慢,谱宽越大.

对HV的功率谱函数,由式(21)可知, $F_{21}(\omega) + F_{22}(\omega)$ 和 $F_{31}(\omega) + F_{32}(\omega)$ 分量所占的比例相同. $F_{21}(\omega) + F_{22}(\omega)$ 和 $F_{31}(\omega) + F_{32}(\omega)$ 的最大值都在零点附近,不过二者衰减的快慢不同, $F_{31}(\omega) + F_{32}(\omega)$ 衰减的更快. HV功率谱的谱宽主要取决于 $\sigma_d^2 + 4\sigma_r^2, \sigma_d^2 + 4\sigma_r^2$ 越大,曲线在峰值右侧衰减到零的速度越慢,谱宽越大.由图5可知, σ_r 越大, HV的功率谱的带宽越大.由图6可知, σ_d 的大小对HV的功率谱的带宽影响相对较小.

对HH和HV的交叉功率谱,只包含 $(F_{21}(\omega) - F_{22}(\omega))$ 分量, HH和HV的交叉功率谱可认为是带限信号,功率谱的谱峰位置大约在 $\bar{\omega}_r/\pi \text{ Hz}$ 位置,在峰值右侧曲线衰减的快慢取决于 $\sigma_d^2 + 4\sigma_r^2, \sigma_d^2 + 4\sigma_r^2$ 越大,曲线在峰值右侧衰减到零的速度越慢.这点在图5和图6中的HH和HV的交叉功率谱子图中可以看出.

对HV和VV的交叉功率谱, $F_{31}(\omega) - F_{32}(\omega)$ 分量占优势,所以功率谱的谱峰位置大约在 $\bar{\omega}_r/2\pi \text{ Hz}$ 位置,在峰值右侧曲线衰减的快慢取决于 $\sigma_d^2 + \sigma_r^2, \sigma_d^2 + \sigma_r^2$ 越大,曲线在峰值右侧衰减到零的速度越慢.这在图5和图6中的HV和VV的交叉功率

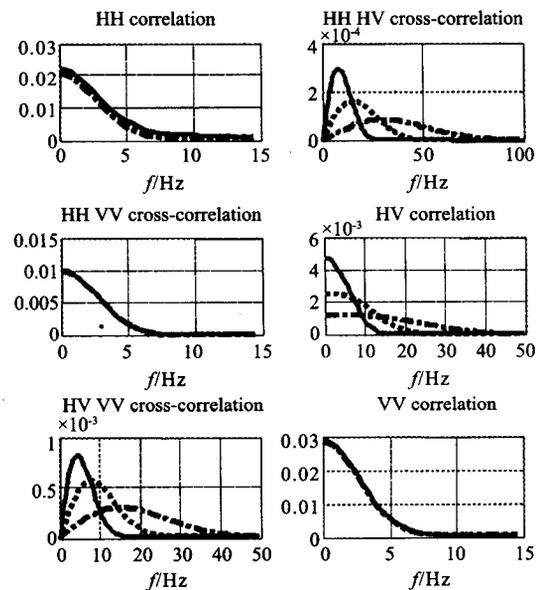


图5 σ_r 对功率谱的影响
Fig.5 The influence of σ_r on spectra

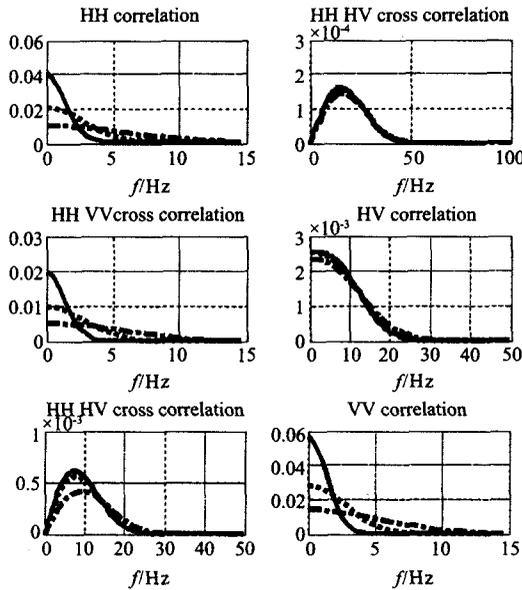


图 6 σ_d 对功率谱的影响
Fig. 6 The influence of σ_d on spectra

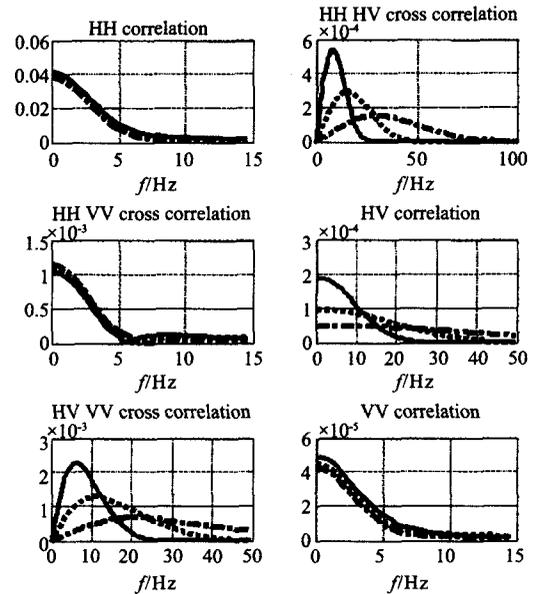


图 7 σ_r 对功率谱的影响
Fig. 7 The influence of σ_r on spectra

谱子图中可以看出. 通过 HH, HV 的交叉功率谱子图和 HV, VV 的交叉功率谱子图的比较, 可以发现, 后者的峰值点的位置大概在前者的二分之一位置, 并且二者的曲线形状大致相同.

总体而言, 同极化通道 (HH、VV) 的功率谱和 HH 和 VV 的交叉功率谱受转动的影响较小. 交叉极化通道的自功率谱虽然受到转动的影响, 但中心频率仍为零, 只是带宽展宽. 同极化通道和交叉极化通道之间的交叉功率谱可看成是与中心频率与转动角速度成比例的带限信号.

3.2 水平取向箔条云回波的频谱特性

在实际应用中, 为了增加箔条的驻空时间, 箔条的取向往往集中在水平面附近. 假设箔条的俯仰角为 φ (水平面对应 $\varphi = 0^\circ$), φ 的概率密度分布如下式所示

$$W_\varphi = \frac{2}{\varphi_c} \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_c} \right), 0 \leq \varphi \leq \varphi_c. \quad (26)$$

散射矩阵元的功率谱和交叉功率谱的具体表达式由式(14)不难求得, 本文不一一给出. 假设 $\varphi_c = 5^\circ$, 其它的参数设置与箔条取向服从均匀分布时相同, 图 7 给出了箔条取向服从水平分布时功率谱的数值结果, 主要分析 σ_r 对功率谱的影响. $\beta_2 = 1, \beta_1 = 0.5, 1, 2$ 分别对应图 7 中的实线, 虚线和点划线.

箔条取向服从水平分布与箔条取向服从均匀分布的情况相比, 各曲线的形状类似, 转动对各极化通道的功率谱和交叉功率谱的影响与均匀分布时类

似. 不同之处主要在于各极化通道之间的相对幅度. 对水平分布的箔条云, 其 HH 分量的强度要远大于 VV 分量的强度, 这点也在图 7 中得到了体现. 其它参数 (如雷达视线的俯仰角和 σ_d) 对水平取向箔条云频谱的影响, 限于篇幅在此不一一给出.

4 结论

本文基于箔条螺旋下降的运动模型, 分析了偶极子的平动和转动对箔条云回波频谱的影响, 得到了各极化通道功率谱和交叉功率谱的表达式, 分析了转动对箔条云各极化通道回波信号的功率谱的影响.

本文的理论分析结果对于箔条云干扰回波信号的建模, 分析箔条云与目标散射特性的异同以及评估箔条云对雷达的干扰效果是非常有意义的. 各极化通道箔条云回波信号的差异也有望为利用极化信息增加雷达抗箔条干扰的能力提供一些思路. 这些内容将陆续在以后的研究中开展.

REFERENCES

[1] Chen Jing. Principles of radar chaff jamming [M]. Beijing: National defense industry press (陈静. 雷达箔条干扰原理. 北京: 国防工业出版社), 2007.
[2] Xue Hai-Zhong. Analysis of Jamming characteristics of satellite-borne infrared detectors [J]. J. Infrared Millim. Waves (薛海中. 星载红外探测器干扰特征分析. 红外与毫米波学报), 2008, 27(4): 313—316.

表 4 不同数据形式的辨识精度

Table 4 Identification accuracy of different transformations of R_λ

| 数据形式 transformations of R_λ | R_λ | $\log(1/R_\lambda)$ | $d^1[\log(1/R_\lambda)]$ (波长间隔为 9nm) | |
|--|---------------|---------------------|---|---------------------------------|
| 辨识精度 Identification accuracy | 74.8% | 60.5% | 85.6% | |
| 数据形式 transformations of R_λ | $1/R_\lambda$ | $N(R_\lambda)$ | $\log[1/N(R_\lambda)]$ | $d^1(R_\lambda)$ (波长间隔为 9nm) |
| 辨识精度 Identification accuracy | 73.5% | 78.7% | 70.1% | 82.3% |

表 5 7 种果树的辨识准确率

Table 5 Identification results for unknown samples by BP model

| 树种编码 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 辨识准确率(±0.15) (Accuracy rate) | 100% | 60% | 80% | 80% | 100% | 100% | 100% |
| 辨识准确率(±0.30) (Accuracy rate) | 100% | 80% | 80% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 辨识准确率(±0.45) (Accuracy rate) | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

的值域设为 ±0.15 时,有 6 种果树的辨识准确率均在 80% 以上,仅有红嘎那苹果树(编码为 2)的辨识准确率较低,为 60%,7 种果树总的辨识准确率为 88.5%。当预测值偏差的值域设为 ±0.3 或 ±0.45 时,7 种果树总的辨识准确率为 94.3% 或 100%。

4 结论

通过上述分析,得出了以下结论:(1)6 种卫星传感器辨识果树树种的效能由强到弱的排列顺序为:MODIS、ETM+、QUICKBIRD、IKONOS、HRG、ASTER;(2)在 4 种植被指数中,RVI 对果树树种的辨识效能最强,其次是 NDVI,SAVI 与 DVI 的辨识效能相对较弱;(3)用 MODIS 或 ETM+ 传感器的近红外通道与蓝光通道上的反射率数据,求算的 RVI 与

NDVI 对果树树种的辨识效能相对较强;(4)在 R_λ 及其 22 种变换数据中,波长间隔设为 9nm 的 $d^1[\log(1/R_\lambda)]$,是建立 BP 神经网络模型的首选数据形式;(5)网络结构为 38(输入)-27(隐含)-1(输出)的 3 层 BP 神经网络模型对果树树种的辨识精度较高。

REFERENCES

[1] AN Gui-Yang. Apple leaf nutrient content of the standard and its impact factors [D]. Shaanxi yangling : Northwest Agriculture and Forestry University (安贵阳. 苹果叶营养元素含量的标准值及其影响因素研究. 陕西 杨凌:西北农林科技大学),2004.

[2] SHAO Yong-Ni, HE Yong. Method for predicting acidity of bayberry juice by using vis/near infrared spectra [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邵咏妮,何勇. 可见/近红外光谱预测杨梅汁酸度的方法研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(6):478—480.

[3] Malthus T J, Maderia A C. spectral reflectance of field bean leaves infected by botrytis fabae [J]. *Remote Sens. Environ*, 1993, **45**:107—116.

[4] GONG Peng, PU Rui-Liang, YU Bin. Conifer species recognition with seasonal hyperspectral data [J]. *Journal of Remote Sensing* (宫鹏,浦瑞良,郁彬. 不同季相针叶树种高光谱数据识别分析. *遥感学报*), 1998, **2**(3):211—217.

[5] ZHAO Chen, QU Hai-Bin, CHENG Yi-Yu. A new approach to the fast measurement of content of amino acids in cordyceps sinensis by ANN-NIR [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (赵琛,瞿海斌,程翼宇. 虫草氨基酸的人工神经网络-近红外光谱快速测定方法. *光谱学与光谱分析*), 2004, **24**(1):50—53.

[6] WU Yan, WAN Wei. Method on designing and training of artificial neural network based on genetic algorithm [J]. *J. Infrared Millim Waves* (武妍,王伟. 基于遗传算法设计和训练人工神经网络的方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1):65—68.

[7] SHAO Yong-Ni, CAO Fang, HE Yong. Discrimination years of rough rice by using visible/near infrared spectroscopy based on independent component analysis and BP neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邵咏妮,曹芳,何勇. 基于独立组分分析和 BP 神经网络的可见/近红外光谱稻谷年份的鉴别. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(6):433—436.

(上接 203 页)

[3] SHEN Tao, SONG Jian-She. Research on test and effectiveness evaluation of smoke interference [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (沈涛,宋建社. 烟雾干扰的效果评价方法与测试研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2):157—160.

[4] ZHAO Xun-jie, CHEN Jing. Spectral and polarization characteristics of random orientation of dipole scatterers [J]. *ACTA electronica sinica* (赵勋杰,陈静. 随机取向偶极子云的频谱和极化特性. *电子学报*), 1991, **19**(2):113—116.

[5] Ioannidis C A. Model for spectral and polarization characteristics of chaff [J]. *IEEE Trans on AES*, 1979, **5**(5):723—726.

[6] Wong J L, Reed I S, Kaprielian Z A. A model for the radar

echo from a random collection of rotating dipole scatterers [J]. *IEEE on AES*, 1967, **3**(2):171—178.

[7] Marcus S W. Dynamics and radar cross section density of chaff clouds [J]. *IEEE Trans on AES*, 2004, **40**(1):93—102.

[8] Chaff aerodynamics. ADA019 525

[9] LI Jin-Liang, WANG Xue-Song, LI Yong-Zhen. Polarization characteristics of Gaussian oriented chaff clouds [J]. *Chinese journal of radio science* (李金梁,王雪松,李永祯. 正态空间取向箔条云的极化特性. *电波科学学报*), 2008, **23**(3):389—395.