

UWB 叶簇覆盖 SAR 人造目标特征信号¹

蒋咏梅 匡纲要 梁甸农

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

摘要 穿透叶簇的 VHF/UHF 超宽带 (UWB) SAR 具有相对带宽很宽, 积累角大的特点, 能同时获得距离、方位两个方向的高分辨能力, 用于探测地面隐蔽人造目标。在 VHF/UHF 低频段, 一般的人造目标可简单模化为目标侧面与地面之间形成的一个长二面角。本文得出了二面角目标模型的散射回波信号形式, 从理论上模拟产生了人造目标 SAR 图像, 建立了特征信号库, 可用于进一步的目标检测和识别。

关键词 VHF/UHF UWB SAR, 二面角人造目标, 特征信号库, 匹配滤波成像 (MFIF)

中图分类号 TN958, TN957.7

1 引言

信号瞬时相对带宽宽于 25% 的雷达称为超宽带 (UWB) 雷达, 它的最大特点是具有极高的距离分辨率。工作在 VHF、UHF 等低频段的合成孔径雷达 (SAR) 具有很强的穿透叶簇、探测地面隐蔽目标的能力。用于探测叶簇覆盖目标的雷达就采用这样一种工作于低频段的 UWB SAR 体制。由于 SAR 工作的频率低, 为获得方位向高分辨率, 需要一个长的积分孔径 (大积累角), 因此, 这种体制的雷达有相对带宽很宽, 积累角大的特点, 能同时获得距离、方位两个方向的高分辨能力。本文从低频 UWB SAR 接收到的人造目标散射回波特点入手, 得出了正确合理的接收信号表达式, 并依据 SAR 成像原理, 从理论上模拟产生了人造目标 SAR 图像, 建立其特征信号库, 可用于进一步的目标检测和识别。

2 人造目标简单的物理描述及其散射回波特性

2.1 人造目标的二面角物理模型 VHF、UHF 等低频段电磁波波长较长, 使得绝大多数散射体处于瑞利散射区, RCS 衰减大, 这正是低频 SAR 能穿透叶簇的原因所在, 同时带来的好处是由于接收信号由小部分大的散射体散射回波组成, 雷达回波数据仅仅反映了散射体粗糙的总体轮廓信息, 我们只需对低频 SAR 中散射体进行简单的物理描述。因此, 一般的人造目标 (如军用车辆) 可简单模化为目标侧面与地表面之间形成的一个长二面角^[1]。这一简单的二面角目标模型, 使我们有可能进一步分析人造目标的散射场及其回波特性。

2.2 二面角人造目标的散射场及其散射回波特性 人造目标被简单地描述为一直的主二面角, 此二面角为一良导体, 一般长大约 10m, 考虑 200—800MHz 频段的电磁波, 波长约 1m, 人造目标散射属高频光学区。结合物理光学、几何光学, 从惠更斯原理和物理光学近似入手来计算直二面角的散射场^[2,3], 得到散射场和极化散射矩阵的准确表达式。二面角散射电场:

$$\bar{E}_{\hat{H}}(\bar{r}) = -\frac{ikE_0e^{-ikr}}{2\pi r} \left[(P^{SB} - \beta P^{DB})\hat{H} - \beta_{VH}P^{DB}\hat{V} \right], \quad (1)$$

$$\bar{E}_{\hat{V}}(\bar{r}) = -[ikE_0e^{-ikr}/(2\pi r)] \left[(P^{SB} + \beta P^{DB})\hat{V} - \beta_{HV}P^{DB}\hat{H} \right], \quad (2)$$

二面角极化散射矩阵

¹ 1997-11-14 收到, 1998-07-11 定稿

$$\sqrt{\sigma} = \frac{-ik}{\sqrt{\pi}} \begin{bmatrix} P^{SB} - \beta P^{DB} & -\beta_{HV} P^{DB} \\ -\beta_{VH} P^{DB} & P^{SB} + \beta P^{DB} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

E_0 为入射电场幅度, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $k' = k/\pi$, \hat{H} 、 \hat{V} 表示电磁场极化的极化基, θ 、 ϕ 分别为入射电磁波矢量 \vec{r} 的入射余角和方位角, β 、 β_{VH} 、 β_{HV} 均为与 θ 、 ϕ 有关的系数, P^{SB} 、 P^{DB} 分别是度量二面角目标一次反射、二次反射的散射电场的量^[3]。如图 1, 假定目标中心位于目标坐标系 (x, y, z) 的原点 o , 传感器 s (如雷达等) 位于 (r, θ, ϕ) 处, s_o 为 s 在 x, y 平面的投影。 O_s 为传感器坐标系 (x_s, y_s, z_s) 的原点, x_s 为方位向, y_s 为距离向。 h 为传感器所在高度, φ 为二面角目标的姿态角, $(-\varphi_{\max}, \varphi_{\max})$ 为二面角目标姿态角可能取值的范围, a, b 为二面角尺寸。

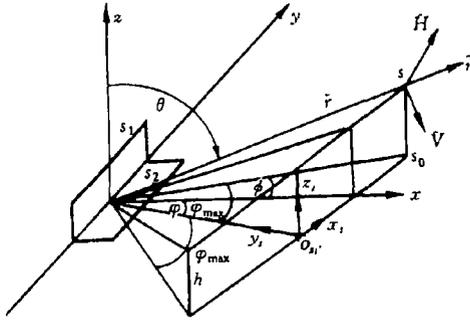
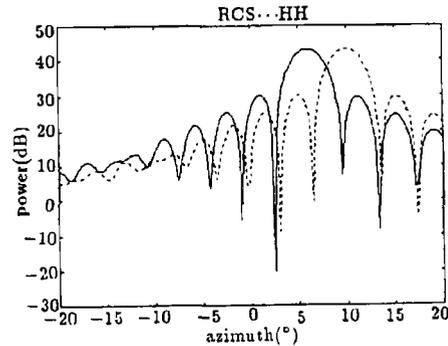


图 1 SAR 成像几何

图 2 实线为 $\varphi_1=6^\circ$ 虚线为 $\varphi_2=10^\circ$

由 (1)-(3) 式仿真, 有如下结果:

二面角的 $\sqrt{\sigma_{HH}}$ 、 $\sqrt{\sigma_{VV}}$ 相似, 在方位向呈现窄峰形状, 表明二面角散射能量集中在合成孔径的某一小段方位上, 与方位相关, 如图 2, $\phi - \varphi = 0$ 附近的 $\sqrt{\sigma_{HH}}$ 、 $\sqrt{\sigma_{VV}}$ 与频率 f 近似呈线性关系。窄峰对应的方位段中心与目标姿态 φ 有关, 窄峰的 3dB 带宽随目标尺寸增大而变窄。 $\sqrt{\sigma_{HV}}$ 、 $\sqrt{\sigma_{VH}}$ 很小, 表明二面角的互极化分量很弱。

3 二面角人造目标 SAR 成像

3.1 二面角人造目标散射回波信号和 SAR 成像 考虑低频 UWB SAR 采用线性调频 (LFM) 脉冲压缩信号, 发射、接收均采用水平极化方式, 假定发射信号为

$$s_t(t) = A_0 \text{rect} \left[\frac{t}{T_p} \right] e^{j2\pi[f_c t + k_r t^2/2]}, \quad (4)$$

式中 A_0 为发射信号幅度, T_p 为 LFM 信号的持续时间, k_r 为线性调频斜率, f_c 为 LFM 信号中心频率。 $\text{rect}[t/T_p]$ 的定义为

$$\text{rect} \left[\frac{t}{T_p} \right] = \begin{cases} 1, & -T_p/2 \leq t \leq T_p/2; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (5)$$

假定雷达位于 $(x, 0)$, 目标位于 (x_0, R) , 在空间域 (x, y) 中, x 表示方位向, y 表示距离向, 则接收信号在快时域 t 相应的频域 ω 表达式如下:

$$s_r(x, \omega) = \frac{A_0}{2\sqrt{\pi r}} \cdot \sqrt{\sigma_{HH}} \cdot P(\omega) \cdot \exp(-j2k\sqrt{(x-x_0)^2 + R^2}), \quad (6)$$

式中 $P(\omega)$ 为发射信号 $s_t(t)$ 经傅里叶变换得到的频域表达式, k 为 LFM 信号中心频率处的波数, r 为雷达与目标之间的距离。 $s_r(x, \omega)$ 对 ω 作傅里叶反变换将得到接收信号 $s_r(x, t)$, 可表示如下:

$$s_r(x, t) = f^{-1} \left(\frac{A_0}{2\sqrt{\pi r}} \cdot \sqrt{\sigma_{HH}} \right) * \left\{ \text{rect} \left[\frac{t - 2r/c}{T_p} \right] e^{j2\pi [f_c(t-2r/c) + (k_r/2)(t-2r/c)^2]} \right\}. \quad (7)$$

可以看出, 与高频窄带 SAR 中点目标不同的是, (7) 式中 $\sqrt{\sigma_{HH}}$ 不是一个常数, 而是一个与方位、频率高度相关的量。由 (3) 式知 $\sqrt{\sigma_{HH}} = P^{SB} - \beta P^{DB}$, 它是随方位、频率的不同而变化的。

由目标尺寸和方向 (姿态) 以及 SAR 图像像素采样率, 确定目标占据的分辨单元个数和范围, 多个分辨单元接收信号叠加得到二面角目标的接收信号, 将接收信号经匹配滤波的二维脉冲压缩过程^[4], 就可得到二面角目标的 SAR 图像。在极化方式、发射频带选定之下, 二面角人造目标 SAR 图像与目标姿态、尺寸有关, 选取多个不同的目标尺寸以及所有可能的目标方向对二面角目标成像, 建立人造目标的特征信号库, 用于下一步叶簇覆盖人造目标检测与识别中图像域的匹配算法。

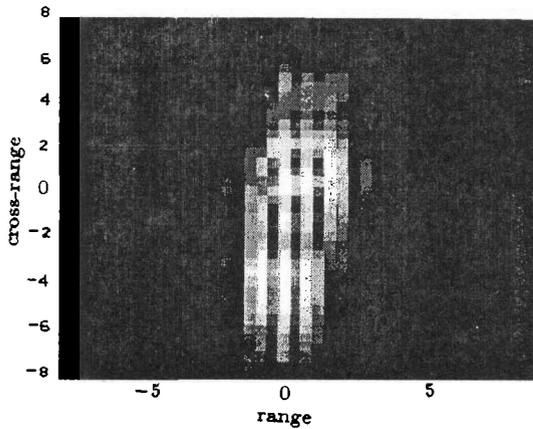
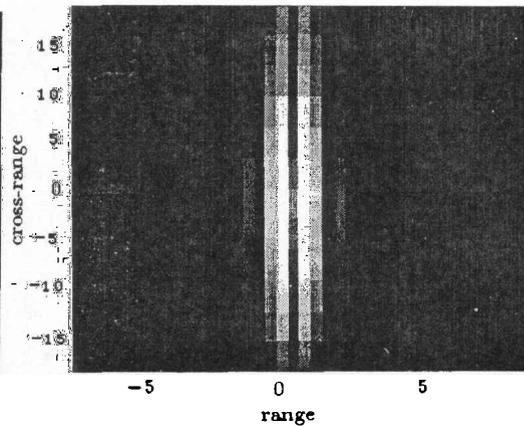
3.2 匹配滤波成像 (MFIF) 为了提高叶簇覆盖人造目标 SAR 图像的信号杂波比 (SCR), 进一步提高目标检测性能, M.I.T 林肯实验室的 Novak^[5] 和国际科学应用所的 Allen^[6] 各自独立地提出了 MFIF 成像方法。MFIF 就是对原始回波数据的二面角响应作匹配处理, 以形成 SAR 图像的每个像素。传统的 SAR 成像是对于一个理想点目标作匹配滤波, 与方位、频率无关, 而 MFIF 成像则是一种更完全意义上的匹配处理, 在用原始回波数据成像中, MFIF 充分利用二面角人造目标与叶簇背景杂波对方位角、频率以及极化相关性的不同。仅考虑方位角匹配滤波, 由 2.2 节中分析已知, 二面角人造目标散射回波在方位向呈现一窄峰, 散射能量集中在某一小段积分孔径上, 而叶簇背景杂波分布与方位角无关, 杂波能量均匀分布于整个积分孔径。如果选用目标能量集中的那一段合成孔径成像, 就能大大提高 SAR 图像的 SCR。由于目标散射能量中心未知, 选用一组滤波器, 使得滤波器组中每个滤波器成像的积分孔径长度和二面角目标方位角响应的单窄峰宽度相匹配。滤波器组输出的最大值取为像素点的像。因此 MFIF 能得到 SCR 大大提高的 SAR 图像, 这是以降低了图像的分辨率和动态范围为代价的。

4 仿真结果

据上所述原理, 模拟产生低频 UWB 人造目标 SAR 图像, 方法如下:

假设有 $b=10.5\text{m}$, $a=2.4\text{m}$; $b=8\text{m}$, $a=2.5\text{m}$; $b=6.7\text{m}$, $a=2.4\text{m}$ 三种不同目标尺寸, 目标姿态角 $\varphi \in (-15^\circ, 15^\circ)$ 有 31 种不同取值, 选取 $\varphi = -14^\circ, -12^\circ, -10^\circ, -8^\circ, -6^\circ, -4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 14^\circ$ 共 15 种不同的目标姿态, 建立人造目标特征信号库。库的大小为 45。

由成像过程分析, SAR 特征图像中目标区域的大小与图像分辨率和目标尺寸 b 有关, 代表目标的物理长度。目标区域的走向 (与方位向的夹角) 反映目标姿态角 φ 的大小。图 3 为传统成像方法得到的二面角目标特征图像, 图 4 为匹配滤波 (MFIF) 成像方法得到的二面角目标特征图像。

图3 $a=2.5\text{m}$, $b=8\text{m}$, $\varphi=12^\circ$ 图4 $a=2.4\text{m}$, $b=10.5\text{m}$, $\varphi=12^\circ$

5 结论

低频 UWB SAR 的人造目标二面角模型与传统的高频窄带点目标模型的显著区别在于,二面角人造目标特征信号与方位角、频率、极化高度相关,因而二面角人造目标 SAR 成像结果与目标尺寸和目标方向有关,目标特征信号库要将目标选取多种不同的尺寸和所有可能的方向下建立。

参 考 文 献

- [1] Allen M R, *et al.* FOPEN-SAR detection by direct use of simple scattering physics, in Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery II, Dominick A. Giglio, Editor, Proc. SPIE 2487, 1995, 45-55.
- [2] Verly J G. Physical optics polarization scattering matrix for a right-angle dihedral. AD-A293036, 1995.
- [3] 蒋咏梅. UWB 叶簇覆盖 SAR 人造目标模型. 技术报告, 长沙: 国防科技大学, 1997.
- [4] 张澄波. 综合孔径雷达——原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989, 80-86.
- [5] Novak L M, Chaney R D, Willsky A S. Coherent aspect-dependent SAR image formation, in Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, Dominick A. Giglio, editor, Proc. SPIE 2230, 1994, 256-274.
- [6] Allen M R, Hoff L E. Wide-angle wideband SAR matched filter image formation for enhanced detection performance, in Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, Dominick A. G., editor, Proc. SPIE 2230, 1994, 302-314.

UWB FOPEN SAR MAN-MADE TARGET SIGNATURE

Jiang Yongmei Kuang Gangyao Liang Diannong

(Dept. of Electronic. Tech., National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract Foliage penetrating (FOPEN) VHF/UHF SAR can image hidden man-made targets with wide-angle and ultra-wideband to achieve both range and azimuth with high resolutions. The target can be modeled by dihedral formed between its side and the ground due to the long wavelength of VHF/UHF. The paper provides the backscattering signal form of dihedral model, SAR image of man-made targets is simulated in theory and the signature library is formed which can be utilized in the subsequent stages of target detection and recognition.

Key words VHF/UHF UWB SAR, Dihedral man-made target, Signature library, Matched filter image formation

蒋咏梅: 女, 1970 年生, 博士生, 从事 SAR 目标特征信号和目标检测的研究工作。