

PoSAR 有源假目标干扰的鉴别与对消

代大海, 王雪松, 肖顺平, 李永祯

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 本文针对分时极化测量体制, 研究了极化合成孔径雷达(PoSAR)有源假目标干扰的鉴别与对消问题. 首先建立了真实雷达目标和有源假目标干扰的极化信号模型, 指出了真实雷达目标和有源假目标干扰的极化特性差异. 在此基础上, 提出了一种在慢时间多普勒域进行有源假目标干扰鉴别和对消的原理和方法, 并给出了抗有源假目标干扰的 PoSAR 成像的工程实现流程. 仿真实验验证了该方法的有效性.

关键词: 极化合成孔径雷达; 分时极化测量; 有源假目标; 雷达成像; 相位补偿; 多普勒域

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)09-1779-05

Discrimination and Suppression of Active Decoys Jamming in PoSAR

DAI Da hai, WANG Xue song, XIAO Shu ping, LI Yong zhen

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

Abstract: For time division polarization measurement, the problem of discrimination and suppression of active decoys jamming in Polarimetric Synthetic Aperture Radar(PoSAR) is studied. Firstly, the signal models of real targets and active decoys for PoSAR are presented. Then, their differences in polarization domain are analyzed. Based on their difference of polarization characteristics, a novel method for discrimination and suppression of active decoys jamming in Doppler domain is proposed. Finally, the scheme of the PoSAR image formation which can remove active decoys jamming is proposed. Its validity is proved by the simulated experimental results.

Key words: PoSAR(Polarimetric Synthetic Aperture Radar); time division polarization measurement; active decoys; radar image; phase compensation; Doppler domain

1 引言

合成孔径雷达(SAR)在军事领域发挥着日益重要的作用, SAR 干扰和抗干扰技术的研究也引起了国内外雷达界的广泛关注^[1-8]. 然而, 由于 SAR 采用相干处理体制, 故而对 SAR 实施常规噪声压制式干扰所需要的功率很大、代价很高^[2,3]. 随着现代微波技术、数字射频存储技术(DREM)^[9]以及微电子等技术的快速发展, SAR 有源假目标干扰因其极高的性价比而日益受到青睐, 近年来国内外学者对 SAR 有源假目标干扰的概念、原理及具体实施方案进行了深入的阐述^[5-7]. 由于 SAR 有源假目标干扰系统能够以灵活多变的方式自主转发雷达信号, 它能高效地达到欺骗或甚至压制等目的, 这使得研究如何有效对抗有源假目标干扰的任务也提上日程. 基于单极化 SAR 系统, 文献[8]提出利用脉冲随机相位波形调制技术来对抗有源假目标干扰, 并提出一种称为“惩罚函数”的方法实现对有源假目标干扰抑制.

该方法实质上属于脉冲捷变体制的抗干扰方法, 要求在发射信号带宽不变的前提下, 对每个发射信号波形都要进行不同的调制操作, 增加了信号调制和信号收发的难度, 同时也大大增加了成像处理的复杂性, 在现阶段实施起来有相当难度.

具有全极化测量能力的极化合成孔径雷达(PoSAR)逐渐成为当前 SAR 发展的一个主流方向^[10], 极化信息的利用为对抗有源干扰提供了一条很有潜力的技术途径. 文献[11, 12]分析了简单形体目标与固定极化干扰的散射特征差异, 实现了常规雷达的有源多假目标鉴别处理. 理论上讲, PoSAR 成像过程中, 真实雷达目标回波和有源假目标干扰的极化特性也存在着明显差异——目标是无源的散射体, 其回波与雷达发射极化、接收极化和目标极化特性有关, 而有源假目标干扰仅取决于干扰机的极化和雷达接收极化, 而与雷达发射极化无关. 然而, 与常规雷达相比, PoSAR 又有很多不同之处. 前者探测的一般是空间目标, 往往只需进行窄带工

作, PolSAR 需要对感兴趣的地面区域进行全极化二维高分辨成像。此外, SAR 有源假目标干扰同常规窄带概念上的雷达有源假目标干扰相比, 也有其特殊性。如何利用极化信息, 实现成像系统中有源假目标的鉴别和对消尚未见诸报道。

实现全极化成像可以采取时分、频分、编码等不同的极化测量体制, 不过由于波形设计和器件水平等方面的限制, 现有 PolSAR 系统仍以分时极化测量体制居多。基于上述背景, 本文针对分时极化测量体制, 首次研究了 PolSAR 有源假目标干扰的鉴别和对消问题, 并提出了相应的抗干扰成像方案。

2 PolSAR 目标和干扰的信号模型

2.1 雷达目标的信号模型

不失一般性, 设正交天线分别为水平和垂直极化(记为 H 和 V)。设发射信号形式为 $p(t)$, 则雷达接收的真实雷达目标信号模型可表示为

$$v_{rt}(t_m, \tau) = \beta_n \mathbf{h}_r^T \mathbf{S} \mathbf{h}_t p\left(\tau - \frac{2R(t_m)}{C}\right) + n_{rt}(t_m, \tau) \quad (1)$$

式中, v 为雷达接收信号电压; 下标 r, t 为接收和发射极化状态; t_m, τ 分别代表慢时间和快时间; $\beta_n =$

$\sqrt{\frac{2P_t G_t G_r \lambda}{(4\pi)^3 R^4 L}}$ 在成像处理期间近似为常数, P_t 为发射功率, G_t 和 G_r 分别为发射和接收天线增益, λ 为波长, $R(t_m)$ 目标到雷达的距离, L 为系统损耗; $n_{rt}(t)$ 为测量

噪声; $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$ 为散射矩阵; $\tau = \frac{2R(t_m)}{C}$ 为回波时延, C 为光速; $\mathbf{h}_t, \mathbf{h}_r$ 分别为发射和接收天线的 Jones 矢量^[10]。

分时极化测量过程即交替发射 H 和 V 极化, 同时接收。不妨设奇数脉冲发射 H 极化, 测得 HH 和 VH 回波; 偶数脉冲发射 V 极化, 测得 VV 和 HV 回波。经过距离向匹配滤波和距离徙动校正处理后^[11], 各极化通道的目标回波可表示为(略去了测量噪声项, 下同)

$$\begin{cases} v_{HH}(t_{m1}, \tau) = \beta_{HH} S_{HH} \exp\left\{\frac{-j4\pi R(t_{m1})}{\lambda}\right\} p f_{\tau} \left\{\tau - \frac{2R_0}{c}\right\} \\ v_{VH}(t_{m1}, \tau) = \beta_{VH} S_{VH} \exp\left\{\frac{-j4\pi R(t_{m1})}{\lambda}\right\} p f_{\tau} \left\{\tau - \frac{2R_0}{c}\right\} \\ v_{HV}(t_{m2}, \tau) = \beta_{HV} S_{HV} \exp\left\{\frac{-j4\pi R(t_{m2})}{\lambda}\right\} p f_{\tau} \left\{\tau - \frac{2R_0}{c}\right\} \\ v_{VV}(t_{m2}, \tau) = \beta_{VV} S_{VV} \exp\left\{\frac{-j4\pi R(t_{m2})}{\lambda}\right\} p f_{\tau} \left\{\tau - \frac{2R_0}{c}\right\} \end{cases} \quad (2)$$

其中, 距离向匹配滤波即 $v_M(t_m, \tau) = v(t_m, \tau) \circledast p^*(-\tau)$, \circledast 代表卷积, $*$ 为取共轭, 在不引起混淆的前提下, 记处理后的回波仍为 $v(t_m, \tau)$; $p f_{\tau}(\tau) = p(\tau) \circledast p^*(-\tau)$, 即距离向点扩展函数; $t_{m2} = t_{m1} + T_r$, T_r 为脉冲重复周期; R_0 为目标到雷达航线的垂直距离。

2.2 有源假目标干扰的接收信号模型

在雷达接收天线端口处有源假目标干扰信号可表示为

$$v_{rj}(t_m, \tau) = \mathbf{h}_j^T \mathbf{h}_j(t_m) p_J(t_m, \tau) \quad (3)$$

其中, $p_J(t_m, \tau)$ 为假目标干扰的调制信号, 可为任意波形, 为了避免被雷达从时域和频域识别, 其特性应与真实雷达目标回波的调制特性相近; $\mathbf{h}_j(t_m) = [h_{jH}(t_m), h_{jV}(t_m)]^T$ 为干扰信号的 Jones 矢量。由文献[6, 7]可知, 假目标干扰信号的波形、能量与真实目标基本一致, 即

$$p_J(t_m, \tau) = \sum_{n=1}^N \gamma_n p\left(\tau - \frac{2R_n(t_m)}{c}\right) \quad (4)$$

其中, γ_n 为第 n 假目标的幅度调制系数, R_n 为假目标的调制距离(为简便记, 以下只考虑一个假目标情形)。

经过距离向匹配滤波和距离徙动校正之后, 各极化通道的假目标干扰信号可表示为

$$\begin{cases} v_{HH_j}(t_{m1}, \tau) = \gamma_{Hj} h_{jH}(t_{m1}) \exp\left\{\frac{-j4\pi R_d(t_{m1})}{\lambda}\right\} p f_{\tau} \left\{\tau - \frac{2R_{d0}}{c}\right\} \\ v_{VH_j}(t_{m1}, \tau) = \gamma_{Vj} h_{jV}(t_{m1}) \exp\left\{\frac{-j4\pi R_d(t_{m1})}{\lambda}\right\} p f_{\tau} \left\{\tau - \frac{2R_{d0}}{c}\right\} \\ v_{HV_j}(t_{m2}, \tau) = \gamma_{Hj} h_{jH}(t_{m2}) \exp\left\{\frac{-j4\pi R_d(t_{m2})}{\lambda}\right\} p f_{\tau} \left\{\tau - \frac{2R_{d0}}{c}\right\} \\ v_{VV_j}(t_{m2}, \tau) = \gamma_{Vj} h_{jV}(t_{m2}) \exp\left\{\frac{-j4\pi R_d(t_{m2})}{\lambda}\right\} p f_{\tau} \left\{\tau - \frac{2R_{d0}}{c}\right\} \end{cases} \quad (5)$$

2.3 真实雷达目标和有源假目标干扰的极化特性

在很短的时间内(雷达的脉冲重复周期一般在毫秒量级甚至更小), 干扰机极化可以认为是缓慢变化的, 即

$$\mathbf{h}_j(t_m) \approx \mathbf{h}_j(t_{m+1}) \quad (6)$$

在此期间目标的姿态变化很小, 雷达目标的极化散射特性变化微乎其微, 目标散射系数矩阵满足互易性原理, 即

$$S_{HV} = S_{VH} \quad (7)$$

利用上述关系, 代入式(2)和(5)可得, 真实雷达目标和假目标干扰信号具有下列性质:

①对于真实雷达目标来说, HV 和 VH 两通道的相邻单元接收到的信号只相差一个相位项 $\Delta\phi$, 即

$$v_{HV}(t_{m2}) = v_{VH}(t_{m1}) \exp(j\Delta\phi) \quad (8)$$

其中, $\Delta\phi = -4\pi\Delta R/\lambda$, $\Delta R = R(t_{m2}) - R(t_{m1})$ 。对于假目标干扰, 这一般不成立^[11, 12]。实际中, 利用这一特性可以用来鉴别是否存在有源假目标干扰。

②对于假目标干扰来说, HV 和 HH 两通道的相邻单元接收到的信号只相差一个相位项 $\Delta\phi$, VV 和 VH 两通道也是如此, 即

$$v_{HV_j}(t_{m2}) = v_{HH_j}(t_{m1}) \exp(j\Delta\phi) \quad (9)$$

$$v_{VV_j}(t_{m2}) = v_{VH_j}(t_{m1}) \exp(j\Delta\phi) \quad (10)$$

值得说明的是, 上述两个关系, 对于真实目标而言一般是不成立^[10], 而且事实上对于真实雷达目标而言, 共极化往往比交叉极化强很多, 这一特性将为抗干扰成像提供基础。

3 有源假目标干扰的鉴别与对消方法

3.1 多普勒域相位补偿关系

由于 $R_0 \gg V_m$, 可认为目标从远场以近似平面波入射到合成孔径阵列上(见图 1), 两通道相邻单元的间距为 $d = VT_r$, 那么目标到两通道相邻单元的单程波程差为 $\Delta R = -d \sin \theta$, 则

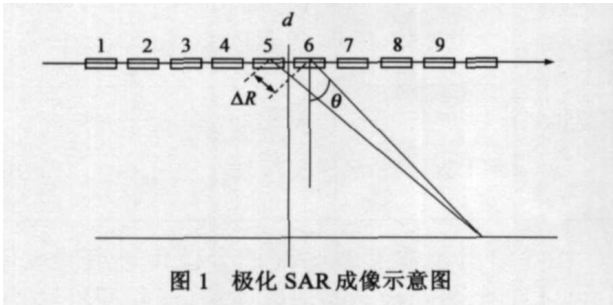


图 1 极化 SAR 成像示意图

$$\Delta \phi = \frac{4\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (11)$$

然而, 上述相位差随着目标的方位角变化而变化, 直接在慢时间域或者成像后的复图像域, 上述两通道之间的相位差都是无法补偿的。不过, SAR 方位向成像原理表明, 目标回波的多普勒频率与目标的方位视角存在固定关系, 即

$$f_a = \frac{2V}{\lambda} \sin \theta \quad (12)$$

目标方位角与目标慢时间多普勒频率之间的关系

$$\sin \theta = \frac{\lambda f_a}{2V} \quad (13)$$

利用这一关系, 将式(8)~(10)变换到慢时间多普勒域, 得

(1) 真实目标情形

$$V_{HV}(f_a) = V_{VH}(f_a) \exp \left\{ j2\pi f_a \frac{d}{V} \right\} \quad (14)$$

(2) 有源假目标干扰情形

$$V_{HH_j}(f_a) = V_{HH_j}(f_a) \exp \left\{ j2\pi f_a \frac{d}{V} \right\} \quad (15)$$

$$V_{VV_j}(f_a) = V_{VH_j}(f_a) \exp \left\{ j2\pi f_a \frac{d}{V} \right\} \quad (16)$$

3.2 有源假目标干扰的极化鉴别方法

式(14)说明, 经过距离压缩和距离徙动校正之后的真实目标信号变换到慢时间多普勒域后, HV 和 VH 通道回波只相差一个常数相位项。将 HV 和 VH 两通道信号作对消处理

$$V_{VHHV}(f_a) = V_{VH}(f_a) - V_{HV}(f_a) \exp \left\{ -j2\pi f_a \frac{d}{V} \right\} \quad (17)$$

进一步, 对对消后的信号进行方位向成像处理, 得到残差图像 I_{VHHV} 。该残差图像中真实地面目标被对消, 显然, 这对于鉴别有源假目标干扰是有利的。

为降低鉴别虚警, 提高鉴别的正确率, 可采用双门限检测鉴别方案。首先根据残差图像和虚警概率设定第一门限, 若残差图像中有像素值大于该门限, 即该处可能存在有源假目标干扰, 进入第二门限检测。第二门限检测的设定是为了降低鉴别虚警, 具体操作即比较残差图像和正常未对消的图像 I_{HV} 或 I_{VH} , 若残差图像比未对消之前的图像信号功率低 12dB 以上, 则认为该单元不是有源假目标干扰, 而是极强的真实目标对消后的剩余功率。若鉴别结果表明 PolSAR 已受到有源假目标干扰, 则转入下面有源假目标干扰对消处理, 否则继续进行常规的 PolSAR 成像处理。

3.3 有源假目标干扰的极化对消方法

式(15)、(16)说明, 有源假目标干扰信号变换到慢时间多普勒域后, 存在两组信号(分别为 HV、HH 或 VV、VH)也只相差一个固定的相位项, 补偿相位后相减, 即可对消掉有源假目标干扰。即

$$V_{HHHV}(f_a) = V_{HH}(f_a) - V_{HV}(f_a) \exp \left\{ +j2\pi f_a \frac{d}{V} \right\} \quad (18)$$

$$V_{VVVH}(f_a) = V_{VV}(f_a) - V_{VH}(f_a) \exp \left\{ -j2\pi f_a \frac{d}{V} \right\} \quad (19)$$

文献[13]指出, 一般空中或空间目标散射的同极化分量要比交叉极化散射强 4~16dB。考虑到 PolSAR 成像的地物目标和上述目标性质可能有所不同, 我们选取 Pr-SAR 在日本新泄入海口附近的某实测 PolSAR 数据进行验证。为使得数据统计结果具有较广泛的代表性和较高的可信度, 选取了 4000×4000 的大尺度图像, 图中包括城市、农村、森林、海洋、河流等多种地貌。图 2 分别给出了实测图像中的 HH 和 HV 图像, 同时还给出了 HH 减去 HV 的成像结果。表 1 给出了实测数据的共极化通道和交叉极化通道散射特性的统计特征比较, 其中各通道的散射系数单位为 dB, 定义为 $\sigma = 20 \lg(|s|)$; 图 3 给出了实测数据的共极化通道和交叉极化通道散射特性的统计直方图比较结果。表 1、图 2 和图 3 的结果表明: ①对于 PolSAR 地物目标而言, 共极化通道平均比交叉极化高出 7dB, 即文献[13]的结论对于地物目标也是成立的; ②HH 减去 HV 的成像结果与原来 HH 极化成像结果统计特性相近, VV 减去 VH 的成像结果与原来 VV 极化成像结果统计特性相近。

表 1 实测数据的共极化通道和交叉极化通道散射特性的统计特征比较

	σ_{HH}	σ_{HV}	σ_{VV}	σ_{HH-HV}	σ_{VV-VH}
均值	-14.15	-21.94	-14.2823	-13.51	-13.66
均方差	6.578	6.373	6.559	6.538	6.514



图 2 Pi-SAR 在日本新泄入海口地区的实测成像结果图

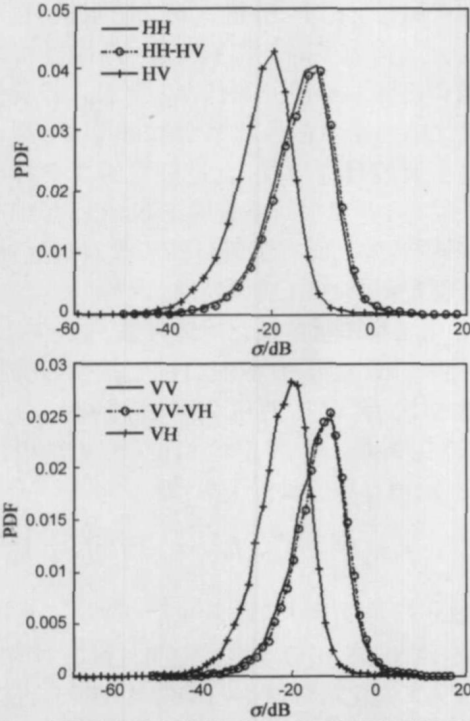


图 3 实测数据的共极化通道和交叉极化通道散射特性的统计分布比较

这说明经过对消处理之后, 真实雷达目标可以得到很好的保留. 另外, 值得值出的是, 经过式 (18)、(19) 的干扰对消处理, 剩余回波信号的方位向频谱特性并没有改变, 这说明可以利用与常规方位成像一样的处理方法, 对上述对消之后的信号进一步作方位成像处理, 即可得到抗有源假目标干扰的极化 SAR 成像结果, 而不增加成像处理的难度.

3.4 抗有源假目标干扰的 PolSAR 成像处理流程

综合上述讨论可得, 抗有源假目标干扰的 PolSAR 成像方法流程如图 4:

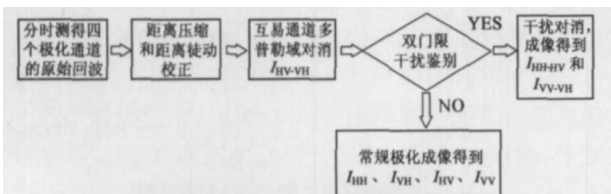


图 4 抗有源假目标干扰的极化 SAR 成像处理流程图

4 实验结果与分析

为验证本文方法的有效性, 本文利用表 2 设置的参数进行了仿真验证. 其中真实目标点五个, 在仿真场景

中沿斜线排列, 散射矩阵见表 2. 干扰机极化状态为左旋圆极化, 产生假目标 4 个, 在仿真场景中沿方位向水平排列, 假目标的幅度调制大小为 1. 场景杂波选取了树木、灌木以及草地三类, 其极化协方差矩阵 $\Sigma =$

$$\sigma_{HH}^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & \gamma_C \\ 0 & 2\alpha_C & 0 \\ \gamma_C^* & 0 & \beta_C \end{bmatrix}$$

参数见表 2.

表 2 主要仿真参数表

中心频率	10GHz				
分辨率	3m × 3m				
目标散射矩阵	$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $S_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ $S_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0.2i \\ 0.2i & -1 \end{bmatrix}$, $S_5 = \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & -1 \end{bmatrix}$				
极化参数 ^[14]		σ_{HH}^2	α_C	β_C	γ_C
树木		0.256	0.08	0.89	0.61
灌木丛		0.098	0.095	1.08	0.60
草地		0.086	0.095P	1.03	0.53

图 5 给出了常规 PolSAR 四个极化通道的成像结果. 可以看出, 每个极化通道成像均受到了假目标干扰的影响, 这无疑对导致后续的目标检测、分类、图像判

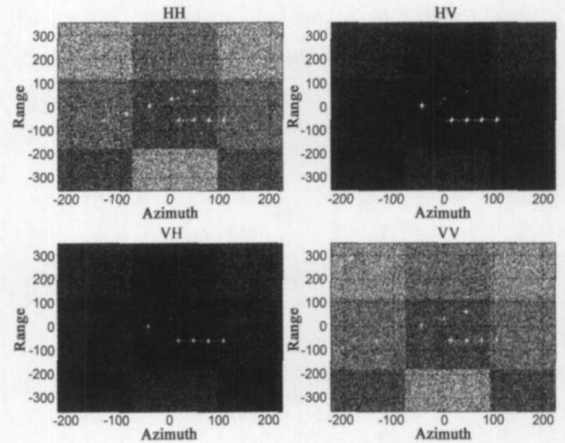


图 5 传统极化 SAR 成像结果图

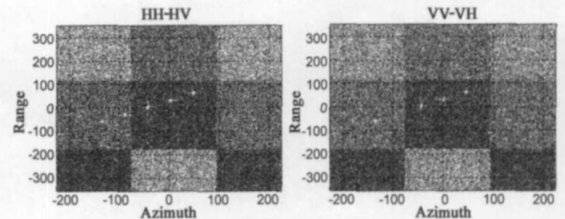


图 6 抗有源假目标干扰的极化 SAR 成像结果图

读等出现错误. 图 6 给出了经过假目标干扰对消之后的两幅成像结果, 假目标干扰都被有效剔除了, 结果证明本文的处理方法是确实有效的. 从目测结果判断, 其中一个抗干扰成像结果 I_{HH-HV} 与原极化成像结果 I_{HH} 特性相近, 而另一个抗干扰成像结果 I_{VV-VH} 则与原极化成像结果 I_{VV} 特性相近. 仿真结果表明, 本文提出的在多普

勒域通过相位补偿来实现 PolSAR 有源假目标干扰鉴别和对消的方法是简便有效的, 抗干扰成像结果基本保留了两个共极化通道的极化特性。

5 结论

不同于噪声干扰等传统干扰模式, SAR 有源假目标干扰可以自主产生在能量、波形和相位调制等方面都与真实目标回波高度逼近的信号, 只要控制干扰机的欺骗调制方式, 它甚至能一次产生成百上千个与真实目标特征相差无几的假目标, 这使得常规的时域匹配、频域陷波等抗干扰方法均难以奏效。所幸的是, 二者的极化特性还是存在着明显区别的: 目标是无源的散射体, 其各极化通道信号不仅目标本身和接收极化有关, 也与发射极化有关; 而有源假目标干扰信号则取决于接收极化和干扰机本身的极化方式, 它无法做到与发射极化快相关。因此, 利用二者的极化特征差异研究新的有源假目标干扰鉴别和对消方法无疑成为一种很好的选择。

着眼于 SAR-ECCM 的需要, 本文详细分析了在分时极化测量条件下, PolSAR 真实目标和有源假目标干扰的极化特性差异, 导出了不同极化通道的真实目标信号和有源假目标干扰信号在多普勒域的相位关系, 得出了近似补偿公式。在此基础上, 提出了在多普勒域实现 PolSAR 有源假目标干扰的鉴别和对消新方法, 最后给出了一种能对抗有源假目标干扰的极化 SAR 成像方案, 文中还给出了实测和仿真实验验证。实验结果表明, 在多普勒域通过相位补偿来实现 PolSAR 有源假目标干扰鉴别和对消的方法是简便有效的, 抗干扰成像结果基本保留了两个共极化通道的极化特性。值得指出的是, 相比于未干扰的全极化成像结果而言, 新方法成像结果还是损失了一部分极化信息, 这是该方法的一个不足。

参考文献:

- [1] Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [2] Goj WW. Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare [M]. Boston: Artech House Inc, 1993.
- [3] 李兵, 洪文. 合成孔径雷达噪声干扰研究 [J]. 电子学报, 2004, 32(12): 2035-2037.
LI Bing, HONG Wen. Study of noise jamming to SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12): 2035-2037. (in Chinese)
- [4] Pace PE, Fouts DJ, Ekestorm S, et al. Digital false target image synthesizer for countering ISAR [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2002, 149(5): 248-257.
- [5] Pace PE, Fouts DJ, Zulaica DP. Digital image synthesizers: are

enemy sensors really seeing what's there? [J]. IEEE AES Magazine, 2006, 21(2): 3-7.

- [6] 王盛利, 于立, 倪晋麟, 等. 合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究 [J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1900-1902.
WANG Sheng li, YU Li, NI Jin lin, et al. A study on the active deception jamming to SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1900-1902. (in Chinese)
- [7] 代大海, 王雪松, 肖顺平. SAR 有源假目标欺骗干扰实施方案研究 [J]. 航天电子对抗, 2007, 23(1): 24-27.
DAI Dahai, WANG Xuesong, XIAO Shunping. Implementary schemes of SAR active decoy jamming [J]. Aerospace Electronic warfare, 2007, 23(1): 24-27. (in Chinese)
- [8] Soumekh M. SAR ECCM using phase perturbed LFM chip signals and DRFM Repeat jammer penalization [J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 191-205.
- [9] Roome S. Digital radio frequency memory [J]. IEE Electronics and communications engineering journal, 1990, 2(4): 147-153.
- [10] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [11] 李永祯, 王雪松, 王涛, 肖顺平, 庄钊文. 有源诱饵的极化鉴别研究 [J]. 国防科技大学报, 2004, 26(3): 83-88.
LI Yongzhen, WANG Xuesong, WANG Tao, et al. Polarization discrimination algorithm of active decoy and radar target [J]. Journal of national university of defense technology, 2004, 26(3): 83-88. (in Chinese)
- [12] 李永祯, 王雪松, 肖顺平, 庄钊文. GBR 防御雷达系统有源假目标极化鉴别能力分析 [A]. 贺瑞龙. 第九届全国雷达学术年会论文集 [C]. 烟台: 中国电子学会无线电定位分会, 2004. 900-903.
- [13] 王涛. 弹道中段目标极化域特征提取与识别 [D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2006.
- [14] L M Novak, M J Cardullo. Studies of target detection algorithms that use polarimetric radar data. IEEE Trans on AES, 1989, 25(2): 150-165.

作者简介:



代大海 男, 1980 年 12 月生于河南信阳, 2002 年 6 月毕业于国防科技大学电磁场与微波技术专业, 2003 年 12 月获信息与通信工程专业硕士学位, 现为国防科技大学博士研究生。研究方向为极化雷达成像、雷达信号处理与目标识别, 已发表文章 20 余篇。

E-mail: daidaihai@nudt.edu.cn

王雪松 男, 1972 年生于内蒙古包头, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, “三遥”分会委员。主要从事雷达极化信息处理、雷达电子战等领域的研究。E-mail: wxs1019@vip.sina.com