

双站SAR系统的信号分析

闵锐, 姚刚, 周非, 黄顺吉

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】以双站SAR系统的空间几何布局为出发点,分析了双站SAR系统的距离史和距离变化率史,并将其与单站系统进行了比较,说明了它的特殊性和复杂性。通过对双站SAR系统的点目标信号的分析,推导出它的相位变化史及其特性,为双站SAR系统信号处理的研究提供了理论依据。

关键词 双站; 点目标; 单站; 信号处理
中图分类号 TN955.1 **文献标识码** A

Signal Analysis of Bi-Static SAR Systems

MIN Rui, YAO Gang, ZHOU Fei, HUANG Shun-ji

(School of Electronic Engineering, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract Firstly, the model about space geometry layout of bi-static SAR system is given, its range history and range change rate history are analyzed as well. Comparison of the result to the mono-static SAR demonstrates its specialty and complexity. Lastly, the point target signal of bi-static SAR system is analyzed, and its phase variation history and its character are derived, which provide the theory reference for the signal processing research of bi-static SAR system.

Key words bi-static; point target; mono-static; signal processing

双站SAR是一种发射机和接收机分离的SAR系统,也是一种斜视模式下的移变系统。由于双站SAR系统具有良好的灵活性和隐蔽性,吸引了众多研究者的注意。但目前的研究大多是针对一些特殊的几何布局,这些几何布局在某种程度上可以称之为单站布局,因此不具备普遍意义^[1-5]。

本文根据双站SAR系统的几何布局特点,推导了双站SAR系统的距离史和距离变化率史,建立了普遍适用的双站SAR系统点目标信号模型,并通过仿真试验验证了该信号模型。

1 双站SAR系统几何布局模型

双站SAR系统是多站SAR系统的一种基本形式,其发射机和接收机分别安装在不同的平台上。这两个平台可按不同的速度沿各自的航迹飞行,形成多个可能的几何布局,如图1所示。图中, τ 为方位时间; $\xi_1(\tau)$ 和 $\xi_2(\tau)$ 分别是发射机平台和接收机平台的位置矢量; $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$ 分别是发射机平台和接收机平台的速度矢量; τ_{01} 和 τ_{02} 分别是当发射机和接收机处于与某一点目标P最近距离点上观察到该点目标的方位时刻; ρ_{01} 和 ρ_{02} 分别是在 τ_{01} 和 τ_{02} 时刻发射机与点目标P的斜距矢量。

在实际情况下,如果只考虑较小的一段时间,可认为两平台的航迹基本上为直线,且航速各自为恒定值,从图1容易得到:

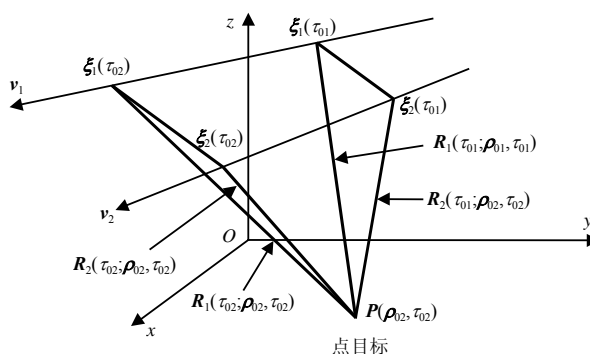


图1 双站SAR系统几何布局

$$R_1(\tau; \rho_{01}, \tau_{01}) = R_1(\tau_{01}; \rho_{01}, \tau_{01}) - v_1(\tau - \tau_{01}) \tag{1}$$

$$\mathbf{R}_2(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) = \mathbf{R}_2(\tau_{02}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) - \mathbf{v}_2(\tau - \tau_{02}) \quad (2)$$

2 双站SAR系统的距离史

双站SAR系统的瞬时双站全距离定义为在给定的时刻, 从发射机平台到一特定点目标的瞬时距离 $R_1(\tau)$ 与从该点目标到接收机平台的瞬时距离 $R_2(\tau)$ 的矢量和。以接收机平台航迹为基准, 双站SAR系统对该点目标的距离史可以表示为:

$$\mathbf{R}_b(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) = \mathbf{R}_1(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) + \mathbf{R}_2(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \quad (3)$$

同时, 按照图1所示的几何布局的基本模型可得:

$$\mathbf{R}_1(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) = \mathbf{R}_2(\tau_{02}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) - \mathbf{v}_1 \cdot (\tau - \tau_{02}) + \boldsymbol{\eta}(\tau_{02}) \quad (4)$$

式中 $\boldsymbol{\eta}(\tau_{02}) = \boldsymbol{\xi}_2(\tau_{02}) - \boldsymbol{\xi}_1(\tau_{02})$, 它表示在 τ_{02} 时刻接收机与发射机之间的矢量距离。

进一步, 结合式(3)可得到发射机平台对点目标 P 的标量距离史表达式为:

$$\left| \mathbf{R}_1(\tau_{01}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \right|^2 = \left| \mathbf{R}_2(\tau_{02}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) + \boldsymbol{\eta}(\tau_{02}) \right|^2 + \left| \mathbf{v}_1 \cdot (\tau_{02} - \tau_{01}) \right|^2 \quad (5)$$

可类推:

$$\mathbf{u}_1(\tau_{02}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) = \frac{\mathbf{R}_1(\tau_{02}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02})}{\left| \mathbf{R}_1(\tau_{02}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \right|}, \quad \mathbf{u}_2(\tau_{02}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) = \frac{\mathbf{R}_2(\tau_{02}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02})}{\left| \mathbf{R}_2(\tau_{02}; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \right|} \quad (6)$$

式中 \mathbf{u}_1 , \mathbf{u}_2 分别为在 τ_{02} 时刻发射机和接收机平台对点目标 P 方向的单位矢量。

3 双站SAR系统的距离变化率史

双站SAR系统的距离变化率定义为双站SAR系统距离史对方位时间 τ 的导数, 它与双站SAR系统的方位多普勒史成比例。求这一导数时有两种途径, 一种是以接收机平台航迹为基准, 另一种是以发射机平台航迹为基准。由于它们描述的客观对象是相同的, 所以求导出的距离变化史是一致的。

首先讨论以接收机平台航迹为基准的情况。由式(3)可以得到:

$$\frac{d}{d\tau} \left[\mathbf{R}_b(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \right] = \frac{d}{d\tau} \left[\mathbf{R}_1(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \right] + \frac{d}{d\tau} \left[\mathbf{R}_2(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \right] \quad (7)$$

因此, 双站系统的全距离变化率史为:

$$\frac{d}{d\tau} \left[\mathbf{R}_b(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \right] = -\mathbf{v}_1 \mathbf{u}_1(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) - \mathbf{v}_2 \mathbf{u}_2(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \quad (8)$$

从式(8)中可以直观地看出, 双站SAR系统与单站SAR系统在距离变化率史上存在着本质的区别。双站SAR系统的距离变化率史模型中包含了两个分母中都具有绝对值形式的不同项之和, 而单站系统只有一个这样的项。

4 双站SAR系统的点目标分析

双站SAR系统的点目标响应是该系统回波信号的基本模型, 也是该系统信号处理的基本依据。所以针对双站SAR系统的信号分析, 也是以点目标响应为手段的^[6]。

假设发射机和接收机平台已实现同步(包括空间、时间和相位同步), 而且两平台的航迹和姿态都处于无误差的理想状态。又设雷达发射脉宽为 T_1 , 调频率为 μ 的线性调频脉冲信号:

$$s_1(t) = \exp[j\pi\mu t^2] \quad \text{当 } 0 \leq t < T_1 \quad (9)$$

设在位置 $(\boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02})$ 有一点散射体, 其散射率为1。双站SAR系统来自该点目标的接收信号经下变频, 并略去常量幅度因子后可表示为:

$$s_2(t, \tau, \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) = w(\tau - \tau_{cb}) s_1 \left[t - t_b(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \right] \exp \left[-j2\pi f_0 t_b(\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \right] \quad (10)$$

式中 $w(\tau - \tau_{cb})$ 是公共方位窗函数, 其中心点位于方位时间轴 τ_{cb} , 该窗函数表示了该点目标能被发收两波束同时照射到的方位时间范围。

经二维傅里叶变换, 从式(10)可得到双站SAR系统的点目标响应为:

$$S_2(f, f_\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) = S_1(f) \cdot H(f, f_\tau; \boldsymbol{\rho}_{02}, \tau_{02}) \quad (11)$$

式中 $H(f, f_r; \rho_{02}, \tau_{02})$ 为双站系统对位于点目标的基准谱:

$$H(f, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau - \tau_{cb}) \exp[-j\Phi_{\Sigma}(\tau, f_r; \rho_{02}, \tau_{02})] d\tau \quad (12)$$

$$\Phi_{\Sigma}(\tau, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) = \Phi_1(\tau, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) + \Phi_2(\tau, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) \quad (13)$$

由式(12)、(13)可知:

$$H(f, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau - \tau_{cb}) \exp[-j(\Phi_1(\tau, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) + \Phi_2(\tau, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}))] d\tau \cong \\ \exp[-j(\Phi_1(\tau_{1k}, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) + \Phi_1(\tau_{2k}, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}))] H_2(f, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) \quad (14)$$

式中 $H_2(f, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) = \int_{-\infty}^{\infty} -w(\tau - \tau_{cb}) \exp\left[-\frac{j}{2}\left(\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \tau^2}(\tau_{1k})(\tau - \tau_{1k})^2 + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial \tau^2}(\tau_{2k})(\tau - \tau_{2k})^2\right)\right] d\tau$; τ_{1k} 和 τ_{2k} 分别是发射相位史和接收相位史的驻留相位点。根据驻留相位原理, 可得到双站系统基准谱的近似表达式为:

$$H(f, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) \cong w(\tau_k - \tau_{cb}) \exp[-j\Psi_a(f, f_r)] \times \\ \exp\left[-\frac{j}{2}\Psi_b(f, f_r)\right] \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \tau^2}(\tau_{1k}) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \tau^2}(\tau_{2k})}} \exp\left(-j\frac{\pi}{4}\right) \quad (15)$$

式中 $\Psi_a(f, f_r) = \Phi_1(\tau_{1k}, f_r; \rho_{02}, \tau_{02}) + \Phi_1(\tau_{2k}, f_r; \rho_{02}, \tau_{02})$; $\Psi_b(f, f_r) = \frac{\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \tau^2}(\tau_{1k}) \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial \tau^2}(\tau_{2k})}{\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \tau^2}(\tau_{1k}) + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial \tau^2}(\tau_{2k})} (\tau_{1k} - \tau_{2k})^2$;

$\tau_k = \frac{\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \tau^2}(\tau_{1k})\tau_{1k} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial \tau^2}(\tau_{2k})\tau_{2k}}{\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial \tau^2}(\tau_{1k}) + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial \tau^2}(\tau_{2k})}$ 为公共(双站)驻留相位点。

从式(15)可见, 双站SAR系统的基准谱包含了 $\Psi_a(f, f_r)$ 和 $\Psi_b(f, f_r)$ 两个相位项, 并由它们形成了两个指数项。第一个指数项表示双站系统点目标响应基准谱中的一个等效单站谱分量, 称为等效单站项。等效单站项并不表示它是一个标准的单站分量, 它与双站布局有关, 布局越复杂, 它越不同于标准的单站分量, 但它仍可看成一个等效的单站项, 它主要影响方位多普勒质心附加偏移, 相当于单站系统引入一个斜视角。第二个指数项称为双站畸变项, 由 $\Psi_b(f, f_r)$ 可以看出, 它由对应于各驻留相位点的相位二阶导数组成, 并与发射驻留相位点和接收驻留相位点的方位时间差 ($\tau_{1k} - \tau_{2k}$) 有关。双站畸变项表示方位相位史因双站系统布局而引入的高阶导数的情况, 它主要影响双站系统的方位多普勒带宽, 布局越复杂, 其影响越大, 即方位多普勒带宽将越窄。

5 仿真试验与仿真结果

本文对理论分析进行了仿真试验^[7], 所用的仿真参数如下: 接收机平台高度2 km; 发射机平台高度为6、10或30 km; 天线的波束宽度为3°; 接收机平台速度为90 m/s; 发射机平台速度为80 m/s。图中所有Y轴对应的值皆为实际值减去了其最小值。

图2是双站SAR不同轨道夹角距离史的变化曲线图, 其角度分别为0、0.63、1.26和1.88 rad, 每条距离线已经减去了最小距离值。可以看出, 所有双站距离史已偏离标准双曲线形状。这是因为双站SAR系统的距离史是两条双曲线之和, 已变为平顶双曲线。如果发收两平台的航速和航向不同, 双站系统距离的最小值的方位点(即 τ 点)是随 ρ_{02} 变化的, 而双站距离史的曲线形状也随之改变。因此, 双站SAR系统距离与单站SAR系统距离史存在本质的区别, 在一般意义上, 双站SAR系统的处理不可能简单地用单站SAR系统的方法来实现。图3为双站SAR距离变化率史的仿真示意图, 表征的是距离变化率史随速度变化的曲线图。在单站SAR中, 如果速度恒定不变, 其距离变化率应为恒定值。而在双站SAR中, 由于发收两平台的速度对距离变化率史都有影响。在图3的仿真中, 发射机的速度恒定不变, 接收机的速度分别为50、70和100 m/s。从图中明显可以看出, 速度的不同对距离变化率史的影响也不同, 从而增加了距离微处理的复杂性。

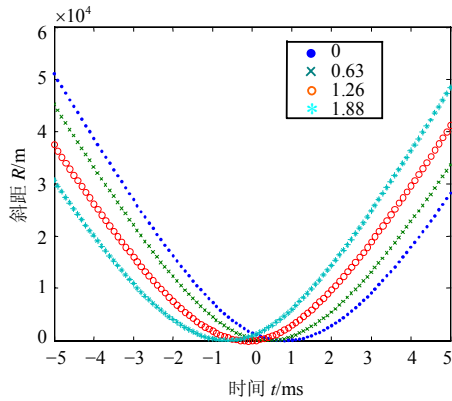


图2 不同轨道夹角的距离变化史

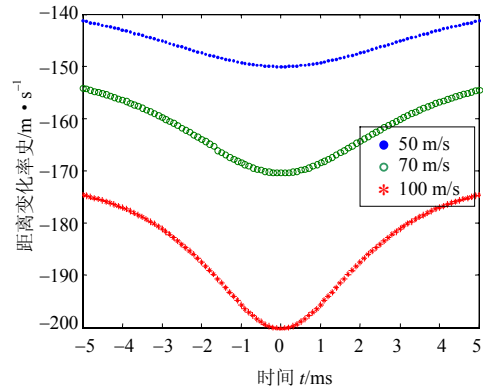


图3 不同速度的距离变化率史

图4、图5是 $w(\tau - \tau_{cb})$ 采取矩形近似窗函数的情况下所得出的仿真结果。可以看出双站SAR系统点目标响应基准谱多出了一个双站畸变项，而等效单站项并不等于一个标准的单站分量。

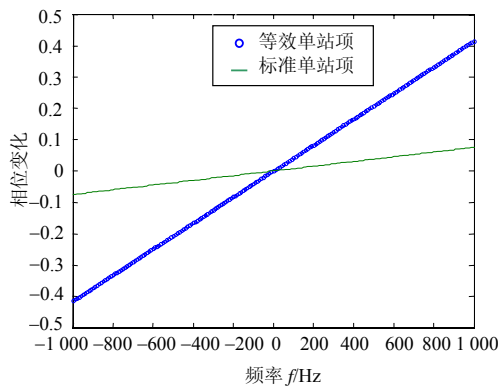


图4 等效单站项变化史

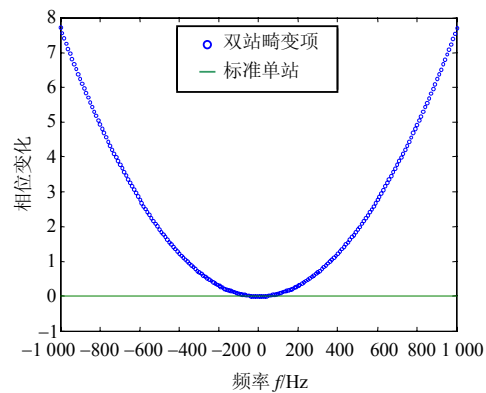


图5 双站畸变项变化史

6 结论

通过本文的研究工作，可以得出结论：

(1) 双站SAR系统中点目标响应函数基准谱中的等效单站项是两个单站半相位史之和，即接收机单程相位史和发射机单程相位史之和。随着布局的一般化，两个单站的单程相位史的曲线也不相同，导致等效单站项越来越不同于标准的单站分量。(2) 双站SAR系统中点目标响应函数基准谱中的双站畸变项，主要是由因布局关系而引入的高阶导数项引起的。由于它在距离/方位时间域内呈现一段椭圆弧，所以它和等效单站项在频域相乘等价于一个等效单站距离史和一小段椭圆弧在时域内的卷积。即不同的布局情况下双站畸变项的复杂程度不同，其信号处理的复杂程度也不同。

参 考 文 献

- [1] Ender J H G. A step to bistatic processing[C]// EUSAR-2004, Berlin, 2004.
- [2] 高翔, 王建国. 单通道SAR的动目标检测[J]. 实验科学与技术, 2005, 3(4):33-34.
- [3] Walterscheid I, Brener A R, Ender J H G. Geometry and system aspects for a bistatic airborne SAR-experiment[C]// EUSAR-2004, Berlin, 2004.
- [4] 李洁群, 王建国. 合成孔径雷达的干扰参数分析[J]. 实验科学与技术, 2006, 4(2): 111-114.
- [5] Loffeld O, Nies H, Peters V, et al. Models and useful relation for bistatic SAR processing[J]. IEEE Trans on GRS, 2004, 42(10): 2 031-2 038.
- [6] Bamler R. A comparison of range-doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. IEEE Trans on GRS, 1992, 30(4): 706-713.
- [7] 汤志伟, 赵志钦, 黄顺吉. SAR原始数据的模拟研究[J]. 电子科技大学学报, 2000, 29 (1): 17-19.

编辑 漆蓉