

分布式SAR系统中运动目标检测定位技术

曾磊¹, 曾斌², 韩迪²

(1. 电子科技大学科技处 成都 610054; 2. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】建立了分布式卫星SAR系统运动目标检测定位和测速模型,提出了一种基于改进的ESPRIT算法的多通道动目标检测定位和测速方法。该方法用DPCA技术检测动目标,再利用改进的ESPRIT算法确定动目标数并定位,提取运动参数。理论和仿真结果表明该方法能正确检测动目标并确定运动参数,与传统FFT方法比较,尤其对于成像后在一个方位分辨单元内的多个动目标情况,该方法具有明显优越性。

关键词 分布式卫星合成孔径雷达; 相位中心偏置天线; 超分辨算法; 动目标检测
中图分类号 TN958 **文献标识码** A

GMTI and Location Based on Improved ESPRIT in Distributed Satellite SAR

ZENG Lei¹, ZENG Bin², HAN Di²

(1. Department of Science and Technology; Univ. Eletron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054;
2. School of Electronic Engineering, Univ. Eletron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract The model of detection, location and measuring velocity of the moving targets is constructed under the condition of distributed satellite SAR. A new multi-channel GMTI algorithm based on improved ESPRIT is proposed. At first, DPCA is employed to detect the moving targets. Then ESPRIT is used to precisely estimate their number and calculate the position and velocity. The theoretical analysis and simulation results show the new algorithm is effective and can not only detect the moving targets but also estimate their motion parameters precisely.

Key words distributed satellite SAR; displaced phase centre antenna; super resolution algorithm; MTI

分布式卫星合成孔径雷达(Synthetic Aperture Rader, SAR)系统是一种全新SAR系统,由若干小卫星分布在一定形状轨道上,协同工作完成单一卫星功能。该系统可扩展SAR用途,灵活性强,可靠性高,尤其利用多通道、多基线组合,可实现目标的测高、测速和定位,是近年来国际上的研究热点^[1-3]。

慢动目标检测与成像是SAR的关键技术,目前常使用沿航迹干涉(ATI)和中心相位偏置天线(DPCA)方法。文献[4]介绍了一种基于DPCA的三孔径动目标检测方法,该方法在对消杂波后,采用快速傅里叶变换(FFT)技术确定目标运动参数。但由于分辨率低,在目标运动参数估计上效果较差,尤其是动目标在SAR图像中会产生方位位置偏移,导致不同径向速度的目标在SAR图像中处于一个分辨单元内。这时采用FFT不能分辨出不同目标,从而造成方位向坐标和速度的错误估计。

基于此,本文建立了分布式卫星SAR系统动目

标检测定位和测速模型,提出了一种基于超分辨成像算法(ESPRIT)的多通道目标检测定位方法。

1 分布式SAR多通道动目标检测算法

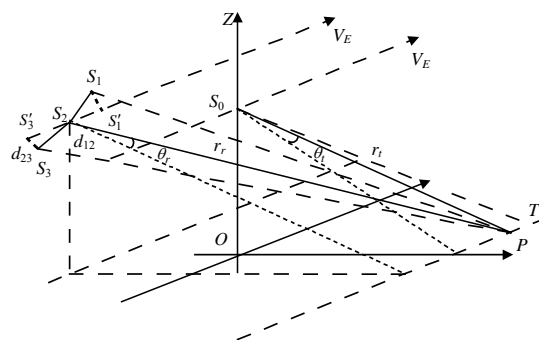


图1 主星伴随小卫星工作几何关系图

图1是主星伴随小卫星等效平行轨迹斜视模型示意图。图中, S_0 为主星,发射信号; S_1 、 S_2 、 S_3 接收回波。将 S_1 、 S_2 和 S_3 投影到沿航迹直线上,投

影点分布为 S'_1 、 S'_2 、 S'_3 , 得有效基线 $d_{12} = \left\| \overline{S'_1 S'_2} \right\|_2$ 和 $d_{23} = \left\| \overline{S'_2 S'_3} \right\|_2$ 。其他参数如图 1 所示。采用矢量分析法, 可推导发射机和三个小卫星到目标的斜距^[5], 则天线 1、2 和 3 的方位回波信号分别为:

$$s_1(s) = \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} r_t + r_r + x_0(\sin \theta_t + \sin \theta_r) - \\ d_{12} \sin \theta_r + \frac{x_0^2}{2r_t} + \frac{(d_{12} - x_0)^2}{2r_r} - \\ \frac{x_0 V_E}{r_t} s + \frac{(d_{12} - x_0) V_E}{r_r} s + \\ v_r (\cos \theta_t + \cos \theta_r) s - \\ V_E (\sin \theta_t + \sin \theta_r) s \end{pmatrix} \right) \times \exp(-j\pi f_{dr} s^2) \quad (1)$$

$$s_2(s) = \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} r_t + r_r + x_0(\sin \theta_t + \sin \theta_r) \\ + \frac{x_0^2}{2r_t} + \frac{x_0^2}{2r_r} - x_0 V_E \left(\frac{1}{r_t} + \frac{1}{r_r} \right) s \\ + v_r (\cos \theta_t + \cos \theta_r) s \\ - V_E (\sin \theta_t + \sin \theta_r) s \end{pmatrix} \right) \times \exp(-j\pi f_{dr} s^2) \quad (2)$$

同理可得 $s_3(s)$, s 表示慢时间。其中:

$$f_{dr} = \frac{V_E^2}{\lambda} \left(\frac{\cos^2 \theta_t}{r_t} + \frac{\cos^2 \theta_r}{r_r} \right)$$

将天线 2 的回波时延 m 个脉冲, $\tau_1 = m / prf = d_{12} / (2V_E)$, 然后补偿天线位置偏差造成的相位差, 再与天线 1 回波进行 DPCA 对消:

$$s_{21}(s) = s_2(s + \tau_1) G_1 - s_1(s) \approx \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} r_t + r_r + \frac{x_0^2}{2r_t} + \frac{(d_{12} - x_0)^2}{2r_r} + \\ x_0 (\sin \theta_t + \sin \theta_r) \end{pmatrix} \right) \times \left(\exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} -d_{12} x_0 + d_{12} x_0 + \\ v_r (\cos \theta_t + \cos \theta_r) \tau_1 \end{pmatrix} \right) - 1 \right) \times \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} -\frac{x_0 V_E}{r_t} s + \frac{(d_{12} - x_0) V_E}{r_r} s + \\ v_r (\cos \theta_t + \cos \theta_r) s - \\ V_E (\sin \theta_t + \sin \theta_r) s \end{pmatrix} \right) \times \exp(-j\pi f_{dr} s^2) \quad (3)$$

$$\text{式中 } G_1 = \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{d_{12}^2}{8} \left(\frac{1}{r_t} - \frac{3}{r_r} \right) - \frac{d_{12}}{2} (\sin \theta_t - \sin \theta_r) \right) \right)$$

为补偿函数。同理, 将天线 3 回波延迟 n 个脉冲, 得: $s_{32}(s) = s_3(s + \tau) G_2 - s_2(s)$ 。其中:

$$G_2 = \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{d_{23}^2}{8} \left(\frac{1}{r_t} + \frac{1}{r_r} \right) - \frac{d_{23}}{2} (\sin \theta_t - \sin \theta_r) \right) \right)$$

将式(3)乘以相位补偿因子, 再去斜率处理, 则:

$$s'_{21}(s) = s_{21}(s) \cdot C_1(s) C(s) \approx \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} r_t + r_r + \frac{x_0^2}{2r_t} + \frac{(d_{12} - x_0)^2}{2r_r} + \\ x_0 (\sin \theta_t + \sin \theta_r) \end{pmatrix} \right) \times \left(\exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} -d_{12} x_0 + d_{12} x_0 + \\ v_r (\cos \theta_t + \cos \theta_r) \tau_1 \end{pmatrix} \right) - 1 \right) \times \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} -\frac{x_0 V_E}{r_t} s - \frac{x_0 V_E}{r_r} s \\ + v_r (\cos \theta_t + \cos \theta_r) - \\ V_E (\sin \theta_t + \sin \theta_r) s \end{pmatrix} \right) \quad (4)$$

式中: $C_1(s) = \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_{12} V_E}{r_r} s \right)$, 参考函数为:

$$C(s) = \exp \left(j \frac{\pi V_E^2}{\lambda} \left(\frac{\cos^2 \theta_t}{r_t} + \frac{\cos^2 \theta_r}{r_r} \right) s^2 \right)$$

同理可得 $s'_{32}(s) = S_{32}(s) \cdot C(s)$ 。

对于静止目标, $v_s = 0$, $s'_{21}(s)$ 和 $s'_{32}(s)$ 为 0, 地杂波被完全对消, 动目标信息被保留下来。

2 基于改进超分辨算法多动目标定位

2.1 多个动目标定位和测速模型

检测到动目标后, 还需确定动目标个数, 以及方位坐标、速度等运动参数。对径向坐标相同, 方位坐标不同的 p 个动目标, 其回波经对消后为:

$$s_{21}(s) = \sum_{i=1}^p B_i \exp(jw_i s) \quad (5)$$

其中:

$$B_i = \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} r_t + r_r + \frac{x_i^2}{2r_t} + \frac{(d_{12} - x_i)^2}{2r_r} + \\ x_i (\sin \theta_t + \sin \theta_r) \end{pmatrix} \right) \times \left(\exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \begin{pmatrix} -d_{12} x_i + d_{12} x_i + \\ v_i (\cos \theta_t + \cos \theta_r) \tau_1 \end{pmatrix} \right) - 1 \right) \quad (6)$$

$$w_i = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(-\frac{x_i V_E}{r_t} - \frac{x_i V_E}{r_r} + v_i (\cos \theta_t + \cos \theta_r) - V_E (\sin \theta_t + \sin \theta_r) \right) \quad (7)$$

同样：

$$s_{32}(s) = \sum_{i=1}^p B_{2_i} \exp(jw_i s) \quad (8)$$

$$B_{2_i} = \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\left(r_i + r_r + \frac{x_i^2}{2r_i} + \frac{x_i^2}{2r_r} + x_i(\sin\theta_i + \sin\theta_r)\right)\right) \times \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{-d_{23}x_i}{2r_i} + \frac{d_{23}x_i}{2r_r} + v_i(\cos\theta_i + \cos\theta_r)\tau\right) - 1\right) \quad (9)$$

可见，动目标信号是一系列复正弦信号的叠加，正弦信号的个数为动目标个数。这时可采用 ESPRIT 超分辨算法估计动目标个数及各正弦信号复振幅。将式(5)、式(8)进行干涉处理，可得：

$$\Delta\Phi = \arg(B_{1_i} \cdot B_{2_i}^*) = -\frac{\pi}{\lambda}\left(\frac{d_{12}^2 - 2d_{12}x_i}{r_r}\right) + \frac{\pi}{\lambda}\left(\frac{d_{23} - d_{12}}{2r_i}x_i - \frac{d_{23} - d_{12}}{2r_r}x_i + v_r(\cos\theta_i + \cos\theta_r)(\tau_1 - \tau_2)\right) \quad (10)$$

在判定了动目标个数后，利用式(7)和式(10)联立方程组可分别得到动目标的方位位置和速度。

2.2 基于改进的ESPRIT算法的动目标检测

ESPRIT算法是一种谐波估计算法，与MUSIC等高分辨算法相比，该算法处理时效更快^[6]。

在距离压缩后某距离单元内的回波信号为：

$$\bar{s}(p) = \sum_{i=0}^{N-1} g(i) \exp(jp\omega_i) + w(p) \quad p = 0, 1, \dots, P \quad (11)$$

式中 N 为某一距离单元内的散射点数； $g(i)$ 为第 i 个散射点的散射矩阵。设成像范围内采样 $P+1$ 个， $w(p)$ 为零均值，方差为 σ^2 复高斯白噪声过程。定义一个新过程 $s_1(p) = s(p+1)$ ，并引入向量与旋转算符 A ：

$$\left\{ \begin{aligned} e(\omega_i) &= [\exp(j0\omega_i), \exp(j1\omega_i), \dots, \exp(j(p-1)\omega_i)]^T \\ a &= [g(0), g(1), \dots, g(N-1)]^T \\ \bar{s} &= [\bar{s}(0), \bar{s}(1), \dots, \bar{s}(P-1)]^T \\ \bar{s}_1 &= [\bar{s}(1), \bar{s}(2), \dots, \bar{s}(P)]^T \\ \Phi &= [e(\omega_0), e(\omega_1), \dots, e(\omega_{N-1})] \\ A &= \text{diag}[\exp(j\omega_0), \exp(j\omega_1), \dots, \exp(j\omega_{N-1})] \\ w &= [w(0), w(1), \dots, w(P-1)]^T \\ w' &= [w(1), w(2), \dots, w(P)]^T \end{aligned} \right.$$

由式(11)可得： $\bar{s} = \Phi a + w$ ， $\bar{s}_1 = \Phi A a + w'$ 。因信号与噪声的正交性，不同频率余弦正交性，求得向量 \bar{s} 自相关矩阵和 \bar{s} 与 \bar{s}_1 的互相关矩阵为：

$$\left\{ \begin{aligned} R_{ss} &= E[\bar{s}\bar{s}^H] = \Phi A \Phi^H + \sigma^2 I \\ R_{ss_1} &= E[\bar{s}\bar{s}_1^H] = \Phi A A^H \Phi^H + \sigma^2 Z \end{aligned} \right.$$

式中 $A = \text{diag}[|g(0)|^2, |g(1)|^2, \dots, |g(N-1)|^2]$ ； I 为单位阵； Z 为一特殊对角阵。设

$$\begin{cases} C_{ss} = R_{ss} - \sigma^2 I \\ C_{ss_1} = R_{ss_1} - \sigma^2 Z \end{cases}, \text{ 矩}$$

阵束 $\{C_{ss}, C_{ss_1}\}$ 的广义特征值，就是 Φ 的对角线元素，即为需要估计的频率值。因此，通过对各复特征值求相位，可得到对各频率的估计值。在得到矩阵 Φ 的估计值后，可利用最小二乘法来估计 a 的值：

$$\hat{a} = (\Phi^H \Phi)^{-1} \Phi^H s \quad (12)$$

在求解 C_{ss} 相对于 C_{ss_1} 的广义特征值时，存在病态问题。当 C_{ss} 和 C_{ss_1} 不满秩时，存在相交的零子空间，常规的 ESPRIT 算法并不可行。为此，将奇异值分解(SVD)与最小二乘法(TLS)相结合，得到一种改进方法，可有效避免常规 ESPRIT 算法的病态问题。具体过程为：首先对矩阵 C_{ss} 进行奇异值分解：

$$C_{ss} = U \Sigma V^H = [U_1, U_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^H \\ V_2^H \end{bmatrix}$$

式中 Σ_1 是 $M \times M$ 的对角矩阵， M 是谐波个数估计值。再计算出矩阵束 $\{\Sigma_1, U_1^H \hat{R}_{ss_1} V_1\}$ 的广义特征值 $\lambda_i (i=0, 1, \dots, N-1)$ ，求各特征值相位值就可以得到散射点的频率估计值。

图 2 为动目标定位测速流程框图。

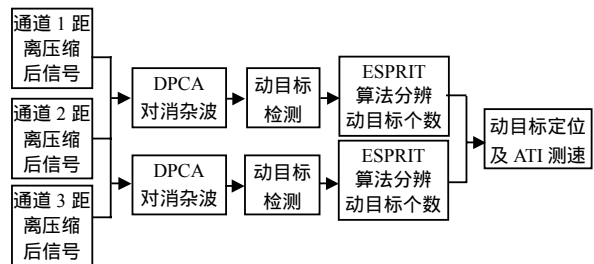


图2 动目标定位测速算法流程框图

3 计算机仿真

为验证方法的有效性，进行了两组试验。设系统参数为：卫星高度 800 km、飞行速度 7 000 m/s、脉冲重复频率 2 000 Hz、载频 10 GHz、脉宽 10 μ s、带宽 50 MHz，合理设定主星和小卫星等效斜视角。

表1 估计的目标运动参数一

	目标个数	方位坐标/m	径向速度/m·s ⁻¹
FFT法	2	目标1	-1.41
		目标2	105.40
超分辨法	2	目标1	-1.40
		目标2	105.00

(1) 设两动目标的速度相同(径向 2 m/s、方位

0 m/s), 方位向相隔 108 m, 分辨率 8.9 m。则成像后方位间距仍大于分辨率。该情况两种方法均能正确检测 2 个动目标, 得到的动目标参数如表 1 所示。FFT 结果和 ESPRIT 结果分别如图 3 和图 4 所示。

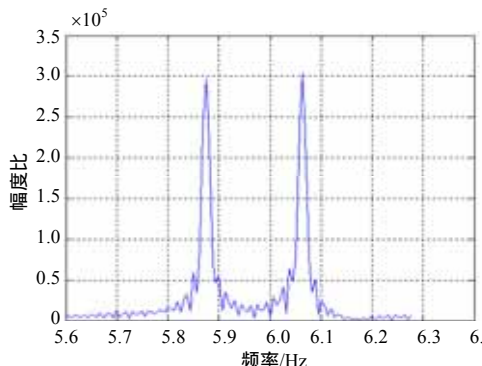


图3 FFT结果

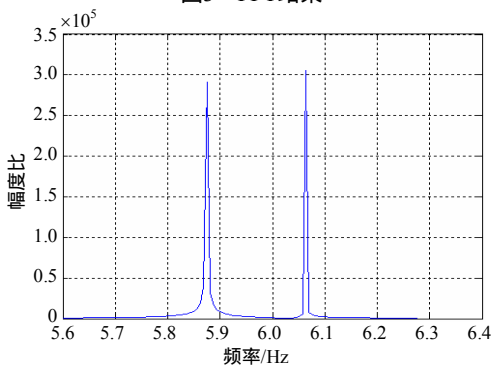


图4 ESPRIT结果

(2) 设两动目标径向速度不相等(径向分别为 2 m/s、3 m/s, 方位都为 0 m/s), 其他参数与情况(1)相同, 真实方位向间距大于方位向分辨率。因速度不等, 成像后方位偏移不同, 使两动目标方位间距小于方位向分辨率(<8.9 m)。图5是FFT的结果, 图中只能判断动目标个数为1, 得到的动目标参数见表 2, 明显误差大。图6是采用超分辨算法的结果, 图中分辨出两个动目标, 并且得到更精确的运动参数。

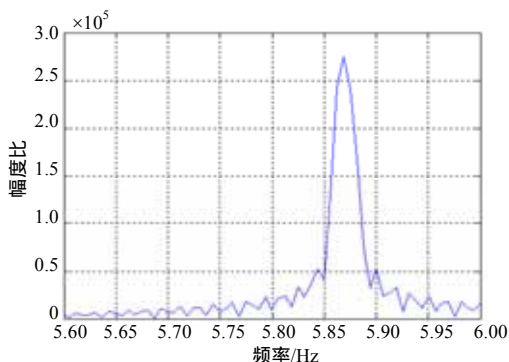


图5 FFT结果

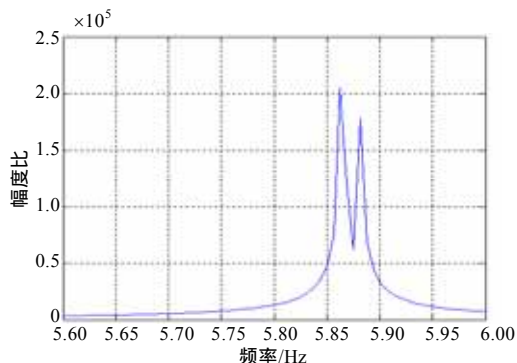


图6 ESPRIT结果

表2 估计的目标运动参数二

	目标个数	方位坐标/m	径向速度/m·s ⁻¹
FFT法	1	36.17	2.391
超分辨法	2	目标1	-0.54
		目标2	103.98
			2.944

4 结 论

本文建立了分布式卫星SAR系统中多通道动目标检测定位及测速模型。将ESPRIT算法用于多动目标检测定位, 提供了一种改进的超分辨动目标检测定位方法, 能得到动目标的个数及更精确地估计动目标参数。理论分析和仿真结果表明, 该方法能够有效检测运动目标, 并能进行定位和测速。该方法与DPCA和ATI中所采用的FFT方法比较, 其优势在于: 能够分辨出处于SAR图像中同一分辨单元的多个动目标, 且能获得更准确的目标运动参数。

参 考 文 献

- [1] KRIEGER G, MOREIRA A. Multistatic SAR satellite formations: Potentials and challenges[C]//Proceedings of IGARSS, Seoul, 2005: 2680-2684.
- [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] 吕 辉, 陈大麒. 一种SAR的点目标回波生成方法[J]. 实验科学与技术, 2006, 4(1): 27-30.
- [4] 郑明洁. 基于DPCA和干涉技术的SAR动目标检测[J]. 电子与信息学报, 2003, 11(25): 1525-1530.
- [5] ZENG Bin, ZHANG Xiao-ling, HUANG Shun-ji. Study of along track interferometric technology for the bistatic SAR[C]//Proceedings of IGARSS, Seoul, 2005: 4615-4618.
- [6] ROY R, PAULRAJ A. ESPRIT-A subspace rotation approach to estimation of parameter of cisoids in noise[J]. IEEE Trans, 1986, ASSp-34(8): 1340-1342.

编辑 漆 蓉