

星载分布式 SAR 地面动目标精确聚焦的互谱 MUSIC 法

李晨雷 刘梅* 赵博文 张雷

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 该文提出一种新的参数化聚焦算法, 该算法采用互谱 MUSIC(Cross Spectrum MUSIC, CSMUSIC)技术, 能够在星载分布式 SAR 上得到精确聚焦的地面运动目标图像。首先, 利用方位向回波信号的空时特性推导出扩展空时模型(Extended Space-Time Model, ESTM); 根据该模型, 提出一种基于子空间理论的参数估计方法, 通过该方法能够精确地得到的动目标方位向速度, 从而得到精确聚焦的图像, 该方法比传统的星载 SAR 动目标聚焦方法具有更高的估计精度和更小的运算量。仿真实验将该方法与传统的动目标聚焦方法进行对比, 以证明该文所提方法的上述优势。

关键词: 分布式 SAR; 参数估计; 互谱 MUSIC; 动目标聚焦

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)08-1905-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01456

Cross Spectrum MUSIC Method of Finely Focusing Ground Moving Target on Spaceborne Distributed SAR

Li Chen-lei Liu Mei Zhao Bo-wen Zhang Lei

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A novel parametric focusing algorithm, using the Cross Spectrum MUSIC (CSMUSIC) method, is presented to obtain a finely focused image of ground moving target on spaceborne distributed SAR. By exploiting the space-time property of the azimuth echo signal, an Extended Space-Time Model (ESTM) is firstly introduced. Then on the basis of this model, a parametric estimating method based on subspace theory is presented to estimate the azimuth velocity of moving target and to obtain an image of finely focused. The proposed method has higher precision and lower calculation burden than the conventional algorithms. The simulation results indicate that the proposed method is verified to be more efficient in contrast with the conventional algorithms.

Key words: Distributed SAR; Parameter estimation; Cross Spectrum MUSIC (CSMUSIC); Moving target focusing

1 引言

星载分布式 SAR 由若干个小卫星构成, 这些小卫星组成某种空间立体构型的星座形状以相同的速度飞行, 星座的构型需满足 Hill 方程^[1], 常见的小卫星星座有车轮(Cartwheel)、钟摆(Pendulum)等构型^[2]。在飞行过程中一颗卫星发射电磁波, 其余卫星(也可包含发射卫星)接收地面后向散射回波, 并且经过协同工作对信号进行相干处理, 获得在宽测绘带高分辨成像^[3]、超分辨成像^[4]、3 维成像^[5]、地面动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)^[2]等方面的高性能, 这些任务在传统的单站 SAR 上很难实现。其中, GMTI 技术对战场环境中识别敌方车辆或救灾抢险时提供更精准的灾情信

息, 都具有重要意义。该技术的输出端是以地面场景为背景的聚焦动目标图像并在图像中指示出其速度, 主要有杂波抑制、动目标检测与聚焦成像等步骤。文献[2]提出了任意构型星载分布式 SAR-GMTI 的辅助波束法, 本文则提出了空间立体构型的星载分布式 SAR 杂波抑制的 3 维空时自适应处理(Three Dimensional Space Time Adaptive Processing, 3D-STAP)方法^[6]与动目标检测的最大似然法^[7], 而在该雷达体制下动目标聚焦成像技术的研究目前鲜见于文献。

动目标的方位向速度(记作 v_x , 亦称为沿航向速度)的取值影响多普勒调频率 K_a , 从而影响图像的聚焦程度。准确地估计 v_x 的值是获得聚焦动目标图像的一种途径。这种参数化聚焦方法的难点在于, 卫星的飞行速度远高于 v_x , 传统的参数估计方法难以达到理想的性能。例如, 文献[8]通过搜索匹配滤波的输出最大值而确定 v_x 的取值, 这种直接搜索的

2013-09-24 收到, 2014-03-12 改回

国家自然科学基金(61271343)和高等学校博士学科点专项科研基金(20122302110012)资助课题

*通信作者: 刘梅 liumei@hit.edu.cn

方法有运算量的瓶颈,且实际处理的信号是有限长数字信号,难以达到较高的搜索精度,致使参数估计准确性受到很大限制。同时,在一般情况下,卫星的航速远高于飞机的飞行速度,导致对于机载SAR有效的参数估计方法却在星载平台上达不到所需的估计精度。例如,文献[9]通过求解距离走动曲线的倾角而估计出 v_x 的值,但在卫星平台上,该倾角接近零度,方法的前提被破坏;文献[10]采用分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FrFT)方法,但该算法对有限长数字信号的谱分辨率不足以满足星载SAR的精度要求。基于多通道处理的参数估计方法比以上单通道处理方法具有更高的精度,如偏置相位中心天线(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)方法^[8]与沿航迹干涉(Along Track Interferometry, ATI)方法^[11],然而这两种方法目前只适用于线阵分布式SAR,无法处理空间立体构型的分布式SAR回波信号;文献[12]用压缩感知的方法应用于多站SAR,但为保证参数估计精度所建立的高维超完备字典导致信号重构所需的运算量巨大,目前在PC平台上只能对距离、方位向几十个采样点的区域进行处理,数百乃至上千个采样点的处理需借助大型机完成,较经典信号处理方法与实际应用的需求差距尚远。

文献[13]指出,将阵列处理方法结合到SAR信号处理中,是一条很有意义的途径。在这种思路的启发下,文献[14]提出了距离向速度估计的阵列处理方法,从而论证了星载分布式SAR在参数估计方面具有独特优势。本文则提出一种方位向速度估计的阵列处理方法,暨动目标聚焦的参数化方法,利用子空间理论突破传统方法对参数分辨率的限制,进而提高参数估计精度。首先,利用SAR回波信号的空时特性,推导一种适用于非均匀空间立体构型的星载分布式SAR的方位向信号扩展空时模型(Extended Space-Time Model, ESTM)。接下来,在这个模型的基础上,提出互谱MUSIC(Cross Spectrum MUSIC, CSMUSIC)方法,该方法能够解决方位向信号中的空-时耦合问题,并突破参数估计分辨率的瑞利限^[15]。最后,仿真实验验证该方法的有效性,并且通过与传统的动目标聚焦方法的对比,证明本文所提方法在参数估计精度、运算量等方面具有优势,从而实现动目标精确聚焦。

2 扩展空时模型(ESTM)

图1为星载分布式SAR观测地面动目标的示意图。为便于表述,这里只画出3颗卫星,实际的各分布式SAR系统所具有的卫星个数不尽相同。假设

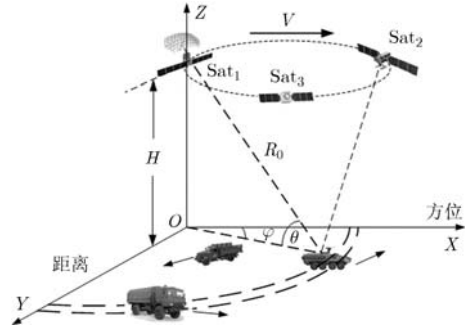


图1 星载分布式SAR观测地面动目标的示意图

其中的第1颗卫星(Sat_1)发射电磁波, N 颗卫星(含 Sat_1)接收回波。 X - Y - Z 轴分别代表沿航向、切航向和垂直向,且构成左手系。所有卫星沿 X 方向以速度 V 飞行。在 t_m 时刻,第 n 颗卫星的坐标为 $(B_{an} + Vt_m, B_{rn}, H + B_{vn})$,其中 H 表示飞行高度, B_{an} , B_{rn} 和 B_{vn} 分别表示第 n 颗卫星的基线 B_n 沿航向、切航向和垂直向的投影, θ 和 φ 表示高度角和方位角, $n = 1, \dots, N$ 。特别地, $B_{a1} = B_{r1} = B_{v1} = 0$ 。假设平坦的地面上有一个速度为 v 的动目标, v 可以分解为沿 X 轴(方位向)和 Y 轴(距离向)的分量 (v_x, v_y) ,在 $t_m = 0$ 时刻的初始位置是 $(x_0, y_0, 0)$ 。

如图1所示,星载分布式SAR可以被看作若干对收发分置的双基SAR的组合(这些双基SAR共用一个发射卫星)。文献[16]指出,每对双基SAR回波信号可等效为一个位于相位中心的单站观测信号,该相位中心即基线中点。因此,经距离压缩处理后,可将第 n 个相位中心的动目标方位向信号表示为

$$s_a(n, t_m) = \exp\left[-j \frac{4\pi R_n(t_m)}{\lambda}\right] \quad (1)$$

为简化讨论,此处省略了动目标的散射系数与常数相位。其中,第 m 个脉冲的时刻 t_m 与脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)的关系为 $t_m = m / \text{PRF}$,且

$$R_n(t_m) = \left((x_0 + v_x t_m - B_{an} - Vt_m)^2 + (y_0 + v_y t_m - B_{rn})^2 + (H + B_{vn})^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

在一个最短斜距为 R_0 的距离门内,式(2)中的距离 $R_n(t_m)$ 可展开为

$$\begin{aligned} R_n(t_m) \approx & R_0 - (Vt_m - v_x t_m + B_{an}) \cos \theta \cos \varphi \\ & + \frac{1}{2R_0} (Vt_m - v_x t_m + B_{an})^2 \\ & + (v_y t_m - B_{rn}) \cos \theta \sin \varphi \\ & + \frac{1}{2R_0} (v_y t_m - B_{rn})^2 + B_{vn} \sin \theta + \frac{B_{vn}^2}{2R_0} \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $R_0 = H / \sin \theta$, $x_0 = R_0 \cos \theta \cos \varphi$, $y_0 = R_0 \cos \theta$

· $\sin \varphi$ 。式(3)在 $(B_{\text{an}}, B_{\text{rn}}, B_{\text{vn}}, t_m)=(0, 0, 0, 0)$ 处的四元二阶泰勒展开式为

$$s_n(n, t_m) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R_0 \right\} \cdot \exp \left\{ j2\pi \left(f_{\text{spsa}} B_{\text{an}} + f_{\text{spr}} B_{\text{rn}} + f_{\text{spv}} B_{\text{vn}} - \frac{B_n^2}{\lambda R_0} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda R_0} (\tilde{k} t_m^2 - \lambda R_0 f_{\text{dc}} t_m) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi \tilde{f}_{0n} t_m}{\lambda R_0} \right\} \quad (4)$$

其中 $B_n = \sqrt{B_{\text{an}}^2 + B_{\text{rn}}^2 + B_{\text{vn}}^2}$ ，方位、距离和高度空间频率分别为 $f_{\text{spsa}} = 2 \cos \theta \cos \varphi / \lambda$ ， $f_{\text{spr}} = 2 \cos \theta \sin \varphi / \lambda$ ， $f_{\text{spv}} = -2 \sin \theta / \lambda$ ，非归一化调频率为 $\tilde{k} = (V - v_x)^2 + v_y^2$ ，多普勒中心频率为 $f_{\text{dc}} = 2[(V - v_x) \cdot \cos \theta \cos \varphi - v_y \cos \theta \sin \varphi] / \lambda$ ，空时耦合频率为 $\tilde{f}_{0n} = B_{\text{an}}(V - v_x) - B_{\text{rn}} v_y$ ，并且式(4)的展开余项为零。式(4)突出了方位向信号的空-时特性，并且除了空间导向(右边第 2 项)、时间导向(右边第 3 项)之外，还含有空时耦合项(右边第 4 项)，因此本文将式(4)命名为扩展空时模型(ESTM)。

由上面的推导过程可见，ESTM 的模型误差来自于式(3)对式(2)的展开余项，该余项用 ΔR 表示。经计算， ΔR 的数量级大约在 $10^{-2} \sim 10 \text{ m}$ 。根据文献[17]的研究可知，分米级的阵列误差对于分布式 SAR 的动目标检测任务的影响已不可忽略，同理，对于距离 R_n 的展开误差 ΔR 若达到分米级，则势必影响动目标参数的估计，因此需要在对分布式 SAR 阵列构型进行设计时，将该误差考虑进去，使得所设计的基线长度既满足动力学方程，又要使 ΔR 足够小。很多实际的分布式 SAR 系统中，各卫星在沿航迹飞行的同时，还以几何中心为虚拟中心或以发射主星为中心进行缓慢的绕飞运动；虽然卫星群的相对几何构型不变，但基线的 3 维投影是缓慢变化的(对于 GMTI 工作模式而言，短暂的观测时间内可认为 3 维基线投影是固定的)，因此有余地选择合适的基线投影长度值，使 ΔR 在分米量级以下的时间段进行 GMTI 工作。注意到，若要求 ΔR 保持在分米级以下，则阵列构型的设计将受到很大制约，然而实际上的相位为 $-4\pi R_n / \lambda = -4\pi(\bar{R}_n + \Delta R) / \lambda$ ，其中 \bar{R}_n 为真实斜距，将 ΔR 表示成 $\Delta R = u\lambda/4 + \delta R$ ($u = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)， δR 为 ΔR 的“主值”， $|\delta R| < \lambda/4$ ，若在该时间段内 δR 保持在 $\lambda/4$ 以内，则相位误差也可以保持很小，便可满足 ESTM 的准确性要

求。具体的操作办法是，根据某一观测时刻的基线 3 维投影(B_{an} , B_{rn} 和 B_{vn})，计算场景中所观测的距离门到基线中点 M 之间距离 $R_n^{(0)}$ 的展开余项主值 $\delta R^{(0)}$ ，这相当于计算场景中静止散射点的斜距长度。对于星载 SAR 而言，静止散射点的 $\delta R^{(0)}$ 与运动目标的 $\delta R^{(0)}$ 近似相等(至少在同一数量级)，因此对 $\delta R^{(0)}$ 的限制相当于间接控制了 δR 。换言之，若在某一观测时刻 $\delta R^{(0)}$ 足够小，则其所在的(短暂的)观测时间段内 ESTM 有效，可用于后面的参数估计方法进行处理；若在该观测时刻 $\delta R^{(0)}$ 超过限定阈值，则该时间段的 ESTM 无效。

3 基于互谱 MUSIC 的参数估计

实际情况下，在距离压缩后，方位向信号仍伴有噪声干扰，假设噪声为加性高斯白噪声，则方位向信号可表示为

$$x_a(n, t_m) = s_a(n, t_m) + w(n, t_m) \quad (5)$$

其中 $w(n, t_m)$ 为第 n 颗卫星在 t_m 时刻的噪声。

根据式(4)，方位向信号被展开成阵列信号形式，有助于采用阵列信号方法进行参数估计。然而式(4)右边含有一个空时耦合项，即时变的空时耦合项 $\tilde{f}_{0n} \cdot t_m$ ，这使得传统的子空间算法性能降低。为解决该问题，本文采用分段解线调方法：将方位向信号等分为 3 段， $0 \sim \tau$ ， $\tau \sim 2\tau$ ， $2\tau \sim 3\tau$ ，然后按式(6a)，式(6b)，式(7)分别解线调：

$$y_a(n, t_m) = x_a(n, t_m + \tau) x_a^*(n, t_m) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda R_0} \tilde{f}_{0n} \tau \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda R_0} \tau \tilde{k} t_m - j \frac{2\pi}{\lambda R_0} \tilde{k} \tau^2 + j2\pi f_{\text{dc}} \tau \right\} + s_a(n, t_m + \tau) w^*(n, t_m) + s_a^*(n, t_m) \cdot w(n, t_m + \tau) + w(n, t_m + \tau) w^*(n, t_m) \quad (6a)$$

由于 $w(n, t_m)$ 为高斯白噪声，因此对于 $\tau \neq 0$ ， $w(n, t_m + \tau) w^*(n, t_m) = 0$ 。令

$$w_y(n, t_m) = s_a(n, t_m + \tau) w^*(n, t_m) + s_a^*(n, t_m) w(n, t_m + \tau)$$

则

$$y_a(n, t_m) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda R_0} \tilde{f}_{0n} \tau \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda R_0} \tau \tilde{k} t_m - j \frac{2\pi}{\lambda R_0} \tilde{k} \tau^2 + j2\pi f_{\text{dc}} \tau \right\} + w_y(n, t_m) \quad (6b)$$

同理，可得

$$\begin{aligned}
z_a(n, t_m) &= x_a(n, t_m + 2\tau)x_a^*(n, t_m + \tau) \\
&= \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda R_0}\tilde{f}_{0n}\tau\right\} \\
&\quad \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda R_0}\tau\tilde{k}t_m - j\frac{2\pi}{\lambda R_0}3\tilde{k}\tau^2 + j2\pi f_{dc}\tau\right\} \\
&\quad + w_z(n, t_m) \tag{7}
\end{aligned}$$

其中符号*表示共轭计算； $w_y(n, t_m)$ 和 $w_z(n, t_m)$ 为含有噪声项的共轭相乘结果。很明显式(6)和式(7)已不含有空时耦合项 $\exp\{-j4\pi\tilde{f}_{0n}t_m/(\lambda R_0)\}$ ，其右边的信号成分已表示成时不变的空间导向和时间快拍信号项，即标准的阵列信号形式。然而由于含有信号项的成分， $w_y(n, t_m)$ 和 $w_z(n, t_m)$ 不是高斯白噪声，可看作色噪声。这种色噪声的存在使得仅适用于高斯白噪声干扰的传统子空间算法失效。为此，本文在这里引入一种可用于处理色噪声干扰的子空间算法——互谱 MUSIC(CSMUSIC)，来估计参数，从而避免预白化处理的步骤^[18]；此外，这也是本文将信号分为 3 段的原因：在解线调之后，输出的两部分式(6)，式(7)作为 CSMUSIC 的输入，可得到互相关矩阵为

$$\begin{aligned}
\mathbf{R}_{yz} &= E[\mathbf{Y}(l) \cdot \mathbf{Z}^H(l)] \\
&= \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{Y}(l) \mathbf{Z}^H(l) \\
&= \begin{pmatrix} r_{yz}(0) & \cdots & r_{yz}(-N+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{yz}(N-1) & \cdots & r_{yz}(0) \end{pmatrix} \tag{8}
\end{aligned}$$

其中 $\mathbf{Y}(l) = [y_a(1, l) \cdots y_a(N, l)]^T$ ， $\mathbf{Z}(l) = [z_a(1, l) \cdots z_a(N, l)]^T$ ， $l=1, 2, \dots, L$ ， L 为每段信号的长度，其中的互相关函数为

$$(r_{yz})_{i,k} = r_{yz}(i-k) = E[y_a(i, l)z_a^*(k, l)] \tag{9}$$

由于 $w_y(n, t_m)$ 与 $w_z(n, t_m)$ 近似不相关，它们的互相关期望随着采样数的增加而趋于零。则 \mathbf{R}_{yz} 的奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)为

$$\mathbf{R}_{yz} \approx \mathbf{U} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{V}^H \tag{10}$$

其中 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别为左奇异矩阵和右奇矩阵， $\Sigma_1 = \text{diag}[\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_Q]$ ， σ_q ， $q=1, 2, \dots, Q$ 为非零奇异值(Q 为信号源数目，此处 $Q=1$)。

最终，本文得到子空间的谱函数为

$$\mathbf{P}(\hat{\eta}) = 1 / \sum_{i=2}^N |\mathbf{V}_i^* \mathbf{\Omega}_i(\hat{\eta})|^2 \tag{11}$$

其中

$$\mathbf{\Omega}_i = \left[\exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda R_0}\tau\tilde{f}_{01}\right\}, \dots, \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda R_0}\tau\tilde{f}_{0N}\right\} \right]^T$$

待估参数 $\hat{\eta} = \hat{v}_x$ 可以由搜索 $\mathbf{P}(\hat{\eta})$ 的最大值得到。

上述互谱 MUSIC 方法的核心步骤是子空间理论中的 MUSIC 算法，其对阵列构型没有特殊要求^[15]，只要构型的设计满足不引起栅瓣的条件。本文中，导向矢量 $\exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda R_0}\tilde{f}_{0n}\tau\right\} = \exp\left\{-j2\pi\frac{2}{\lambda R_0}(B_{\text{an}}(V - v_x) - B_{\text{rn}}v_y)\tau\right\}$ ，其中 $\frac{2B_{\text{an}}}{\lambda R_0}\tau$ 的数量级在 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ Hz，远小于引起栅瓣的 1/2 Hz，因此可进行无模糊的参数估计。

4 实验结果与分析

假设杂波抑制处理已采用文献[6]的方法完成，动目标已经被检测出来，且动目标所在距离门、初始方位 x_0 和距离向速度 v_y 都已由文献[14]的方法求得。实验参数为：系统参数：发射时宽 40 μs ，发射带宽 20 MHz，载频 5.3 GHz，脉冲重复频率 PRF=1400 Hz。卫星运动参数：轨道高度 $H=800$ km，航速 $V=7$ km/s。分布式 SAR 两种星座构型：(1)车轮构型：长轴 280 m，轨道倾角 60° ；(2)钟摆构型：长轴 280 m，轨道倾角 30° 。在地面的两个距离门内，分别有两个运动目标被分布式 SAR 观测，其中 $v_{x1}=3$ m/s， $v_{x2}=30$ m/s。

4.1 验证 ESTM 的有效性

如第 2 节所述，选取星载分布式合适的时间段(一般一个合成孔径时间 1~2 s)，可使缓慢自转中的星座构型的 ESTM 误差保持足够小，从而使后面的阵列信号处理不至于因模型误差的影响而失效。图 2 给出了已知 $\delta R^{(0)}$ 足够小的情况下，回波方位向信号与 ESTM 计算出的信号的距离误差曲线。由图 2 可见，该时间段内，各卫星等效相位中心到动目标的距离误差不超过毫米量级，均在可接受范围内，因此该时间段内的 ESTM 模型符合精度要求，可以用于本文的阵列处理方法。

4.2 验证 CSMUSIC 算法的有效性

首先，我们给出动目标的 CSMUSIC 谱。图 3 给出 v_y 已知或已精确求解情况下，对 v_x 进行估计的 CSMUSIC 谱。其中实线表示 SNR=20 dB 的情况，点划线表示无噪声的情况。图 3(a)，图 3(b)为车轮构型下，对两个动目标的方位向速度分别进行估计的结果，图 3(c)，图 3(d)为钟摆构型下，对两个动目标的方位向速度分别进行估计的结果。由图 3 可见，谱的宽度随着噪声增加而展宽，但有噪声和无噪声情况下，谱峰的位置都与预设值基本吻合。这表明，CSMUSIC 方法可以有效地估计动目标方位向速度。

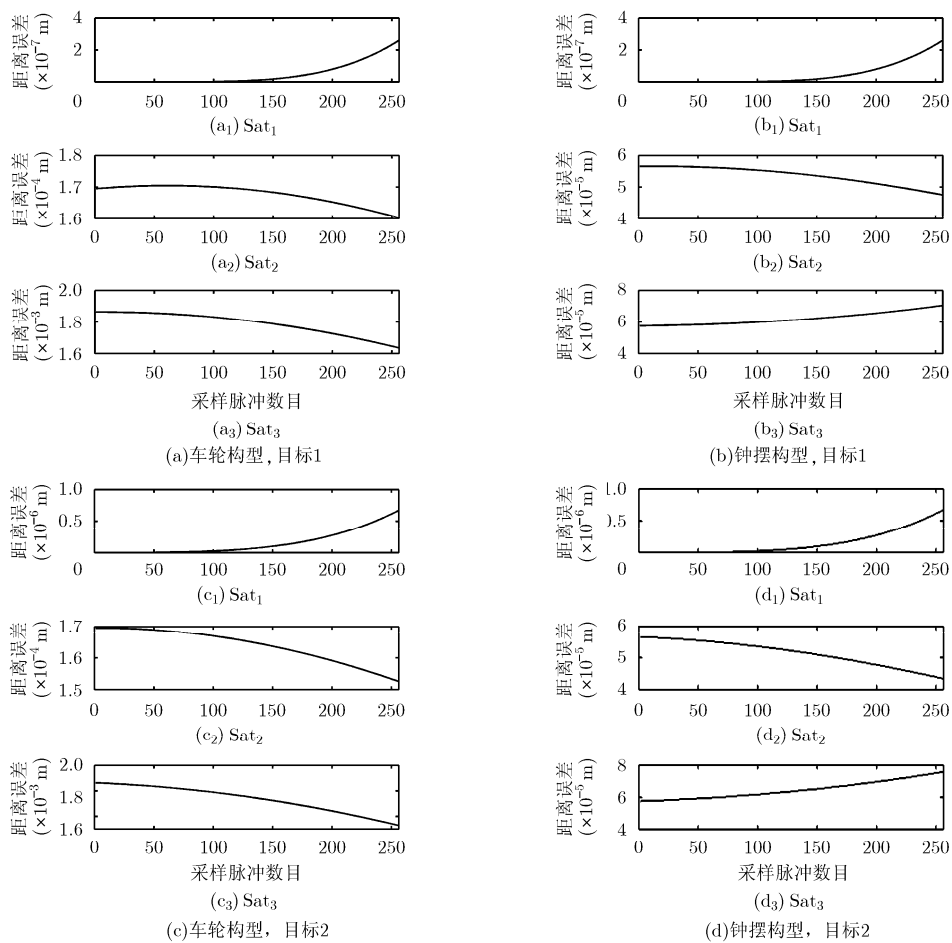


图 2 动目标的距离误差曲线

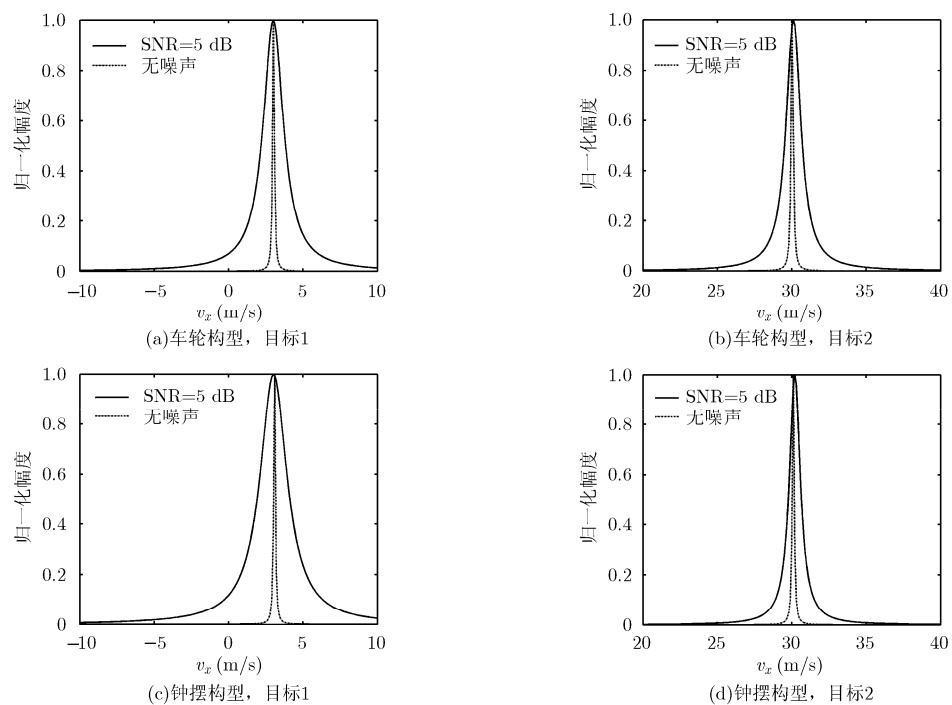


图 3 CSMUSIC 谱

然后, 本文研究 CSMUSIC 方法的统计特性。经过 500 次蒙特卡洛实验, 均方根误差(RMSE)曲线如图 4 所示。各均方差曲线随 SNR 的增加而不断接近克拉美-罗限(CRB), 可见该方法统计有效。

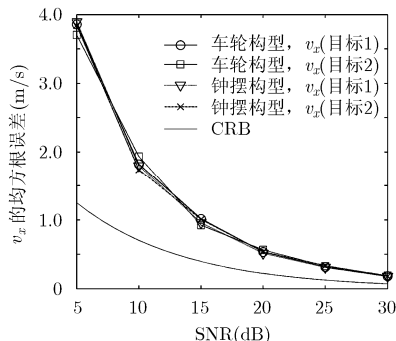


图 4 CSMUSIC 方法的均方差曲线

接下来, 本文对比 CSMUSIC 方法与传统方法的性能。表 1 给出了 SNR=5 dB 下的估计量的期望值, 分别用传统的匹配滤波搜索法、FrFT 法和本文所提的 CSMUSIC 方法。很明显, 从方位向调频率 K_a 的估值来看, 各方法的差别并不大, 但本文的方法可以较传统方法更准确地估计 v_x , 尤其对于 v_x 较小的情况, CSMUSIC 的精度优势更加明显, 如表 1 第 2 列所示。由此验证了引言中所论述的, 对于实际接收的有限长数字信号而言, 仅仅靠线性变换 (FrFT、匹配滤波都是线性变换) 的参数分辨率是受到信号长度限制的; 而子空间方法则可以突破这一限制, 大大提高参数估计精度。

表 1 中, N_a 为方位向成像所需采样点数; $M=3L$ 为本文方法所需的方位向采样点数, $M < N_a$; N 为卫

表 1 各方法的比较

	v_x (m/s)	K_a (Hz/s)	v_x (m/s)	K_a (Hz/s)	运算量
预设值	3.0	-1.9392×10^3	30.0	-1.9242×10^3	-
匹配滤波法	2.5	-1.9394×10^3	30.7	-1.9238×10^3	$K(2N_a \log_2 N_a + N_a)$
FrFT	6.0	-1.9375×10^3	31.5	-1.9234×10^3	$KO(M \log_2 M)$
CSMUSIC	3.2	-1.9391×10^3	29.9	-1.9243×10^3	$2M/3 + N^2 M/3 + 4N^2 + KN$

星个数, 本文中 $N=3$; K 为 v_x 的搜索区间长度, 若满足 0.1 m/s 的搜索精度则至少满足 $K > 10$, 一般取 K 为 100 以上。则表 1 中 CSMUSIC 的运算量为 $2M/3 + 3M + 36 + 3K \approx O(8M/3 + 3K) \ll KO(M \log_2 M) < K(2N_a \log_2 N_a + N_a)$, 即 CSMUSIC 的运算量 $<$ FrFT 的运算量¹⁾ $<$ 匹配滤波法的运算量。

最后, 由图 5 给出目标 1 的聚焦结果, 实线和虚线分别为 CSMUSIC 法和 FrFT 法的方位向成像截面图。从该截面图的对比可见, FrFT 法的主瓣略有展宽且旁瓣较高, CSMUSIC 法的聚焦程度好于 FrFT 法。而由表 1 可得出 CSMUSIC 法的运算量远小于匹配滤波法, 因此综合来看, CSMUSIC 法更优。

5 结束语

本文利用非均匀空间立体构型的星载分布式 SAR 的空-时特性, 推导了回波方位向信号的扩展空时模型 (ESTM), 并且在该模型的基础上提出了一种互谱 MUSIC (CSMUSIC) 参数估计方法。经过理论分析和仿真实验可知, 本文所推导的 ESTM 模型误差可控。所提出的 CSMUSIC 方法在估计方位向速

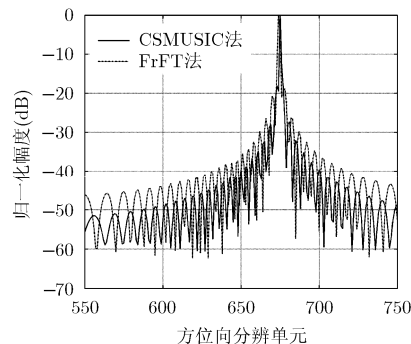


图 5 慢速目标的聚焦结果

度时, 较传统方法的准确性更高、运算量更小, 并且具有统计有效性, 均方误差随信噪比增加而逐渐接近克拉美-罗限。因此, 该方法更好地实现了对地面动目标的精确聚焦。

参考文献

- [1] 楼良盛, 刘志铭, 李崇伟. 卫星编队 InSAR 基线的确定方法[J]. 遥感信息, 2013, 28(2): 9-11, 23.
Lou Liang-sheng, Liu Zhi-ming, and Li Chong-wei. Technique of determining base-line for InSAR based on formation-flying satellites[J]. *Remote Sensing Information*, 2013, 28(2): 9-11, 23.
- [2] Maori D C and Ender J H G. Performance analysis of

¹⁾其中 FrFT 的数字处理方法 DFrFT 采用的是采样型或线性加权型算法, 若采用特征分解型算法, 则相应的运算量为 $KO(M^2)$ 。

- multistatic configurations for spaceborne GMTI based on the auxiliary beam approach[C]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(2): 96-103.
- [3] 黄平平. 两发两收 SAR 系统互相关噪声消除方法研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 91-95.
Huang Ping-ping. Method of removing the cross-correlation noise for dual-input and dual-output SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 91-95.
- [4] 闫鸿慧, 王岩飞, 张冰尘. 利用频谱合成实现分布式 SAR 高分辨力成像[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(2): 345-349.
Yan Hong-hui, Wang Yan-fei, and Zhang Bing-chen. Distributed satellites SAR high resolution imaging via spectral synthesis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(2): 345-349.
- [5] 庞礴, 代大海, 邢世其, 等. SAR 层析成像技术的发展和展望[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(7): 1421-1429.
Pang Bo, Dai Da-hai, Xing Shi-qi, *et al.* Development and perspective of tomographic SAR imaging technique[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(7): 1421-1429.
- [6] Liu Mei, Zhang Lei, and Li Chen-lei. Nonuniform three-dimensional configuration distributed SAR signal reconstruction clutter suppression[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(3): 423-429.
- [7] Zhang Lei, Liu Mei, and Li Chen-lei. Nonuniform 3D configuration distributed SAR phase compensation maximum likelihood GMTI method[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(8): 3151-3158.
- [8] Dragosevic M V, Burwash W, and Chiu S. Detection and estimation with RADARSAT-2 moving-object detection experiment modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(9): 3527-3543.
- [9] Li Ya-ke, Wang Yan-fei, and Liu Chuang. Detect and autofocus the moving target by its range walk in time domain[C]. *International Conference on Wireless Communication and Signal Processing*, Nanjing, China, 2011: 1-5.
- [10] Sun Hong-bo, Liu Guo-sui, Gu Hong, *et al.* Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2002, 38(4): 1416-1424.
- [11] Zheng Ming-jie, Yang Ru-liang, Wang R, *et al.* A novel nonparameteric method of ground moving target indication based on bi-channel SAR-ATI[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Munich, 2012: 3999-4002.
- [12] Zhang Lei, Liu Mei, Zhao Bo-wen, *et al.* Distributed SAR moving targets 3D imaging based on compressed sensing[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2014, 10(2): 619-626.
- [13] Krim H and Viberg M. Two decades of array signal processing research: the parametric approach[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 13(4): 67-94.
- [14] Liu Mei, Li Chen-lei, and Zhao Shu-qing. Joint space-time-frequency method based on fractional fourier transform to estimate moving target parameters for multistatic synthetic aperture radar[J]. *IET Signal Processing*, 2013, 7(1): 71-80.
- [15] 张兴良, 王可人, 樊甫华. 典型阵列快速 MUSIC 算法研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 149-156.
Zhang Xing-liang, Wang Ke-ren, and Fan Fu-hua. Study on fast MUSIC algorithm with typical array[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 149-156.
- [16] 仇晓兰, 丁赤飏, 胡东辉. 双站 SAR 成像处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 94-96.
- [17] 刘颖. 分布式 SAR 运动目标检测雷达阵列误差估计方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2007.
- [18] Zhang Zhong, Sun Xiao-jun, and Yuan Ye-shu. Application of pre-whitened-constrained-MUSIC in ship-borne radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2004, 15(2): 147-152.
- 李晨雷: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为微波雷达成像、阵列信号处理、时频分析等.
- 刘梅: 女, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、多传感器数据融合、无线通信等.
- 赵伯文: 男, 1993 年生, 本科生, 研究方向为数字信号处理.
- 张雷: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、空时自适应处理、压缩感知等.