

T/R-R 双基地雷达进动目标参数估计与 ISAR 成像

艾小锋¹, 邹小海¹, 李浩智², 李永祯¹, 肖顺平¹

(1. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 北京系统工程研究所, 北京 100101)

摘要: 以锥体目标为研究对象, 建立了双基地雷达进动目标宽带回波模型, 提出了基于两个接收站观测的 1 维距离像序列和扩展 Hough 变换的进动参数联合估计方法; 建立了进动目标双基地 ISAR 成像模型, 推导了双基地 ISAR 成像最佳时间, 并通过前述参数估计结果选择对应的 1 维距离像, 采用 FFT 实现横向压缩获得了进动目标双基地 ISAR 像; 采用 FEKO 软件计算了一个锥体模型的单/双基地散射系数并进行动态仿真, 仿真结果验证了本文方法的有效性.

关键词: 双基地雷达; 进动; 参数估计; 逆合成孔径雷达

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012)06-1148-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.013

Parameter Estimation and ISAR Imaging of Precession Targets Using T/R-R Bistatic Radars

AI Xiao-feng¹, ZOU Xiao-hai¹, LI Hao-zhi², LI Yong-zhen¹, XIAO Shun-ping¹

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

2. Beijing Research Institute of Systems Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: The wideband bistatic echo of a precession cone-shaped target is modeled and the precession parameter estimation method is proposed based on the monostatic and bistatic high resolution range profile (HRRP) sequences and extended Hough transform. Then, the bistatic ISAR imaging model of precession target is introduced and the optimum imaging time is derived. By selecting the optimum bistatic HRRPs, a clear bistatic ISAR is obtained via the classical fast Fourier transform processing. Finally, the dynamic simulation results based on the monostatic and bistatic scattering coefficients of a cone-shaped model calculated via the FEKO software validate the proposed method.

Key words: bistatic radar; precession; parameter estimation; inverse synthetic aperture radar

1 引言

微动特征用于弹道目标识别是当前的研究热点, 微动特征获取的方法主要有 RCS 序列分析、1 维距离像和 ISAR 像序列分析等^[1~5]. 现有报道中, 弹道目标的进动频率估计方法较多, 如自相关、时频分析等, 但是进动角的估计仍比较困难, 通常需要已知某些结构参数, 如目标长度、半锥角等. 文献[6]研究了基于极化信息的进动参数估计方法, 不需要知道目标的结构参数, 但是不适用于常规雷达, 且对器件水平要求很高. 另一方面, 多视角观测信息融合有利于目标特征提取和识别, 因此备受关注^[7~9]. 文献[7, 8]研究了基于多视角 1 维距离像目标识别问题, 指出同时利用多视角 1 维距离像有利于目标识别; 文献[9]研究了多视角 ISAR 成像参数估计问

题, 进一步拓展了多视角观测的应用. 本文通过研究发现通过 T/R-R 双基地雷达同时观测的 1 维距离像序列可同时估计目标进动角, 雷达视线角以及目标长度等参数, 有利于目标的分类和识别, 同时能为进动目标成像提供支撑.

另外, 弹道目标 ISAR 像能够提供更加精细的目标特征, 有利于目标识别. ISAR 成像主要有两种思路, 一是利用弹道目标平动引起视角的偏移形成横向分辨率, 但是大的积累角需较长的观测时间, 不利于目标拦截; 二是利用目标微动获得方位像的分辨率, 只需很短的观测时间, 因此弹道目标成像主要采用微动成像^[5, 6]. 但是单基地雷达很容易受到主瓣干扰, 严重影响雷达成像质量, 甚至不能成像. 而对于被动接收的双基地雷达, 由于干扰方无法准确获得接收站位置, 通常只能产生副瓣

干扰,因此双基地雷达目标成像具有明显的优势^[10].近年来,宽带双基地雷达相关理论受到极大关注.文献[11,12]研究了双基地雷达目标 2 维 ISAR 成像基本理论,研究对象主要为低空目标,但空间进动目标的双基地 ISAR 成像还未见报道.

本文在上述研究基础之上,提出了基于 T/R-R 双基地雷达同时观测的 1 维距离像序列和扩展 Hough 变换的进动参数估计新方法,并建立了进动目标的双基地 ISAR 成像模型,最后通过电磁计算数据动态仿真验证了本文方法的有效性,所得结论对拓展宽带双基地雷达的应用具有参考意义.

2 双基地雷达目标进动模型

如图 1 所示,单基地雷达 T/R 站位于 T_x ,双基地接收站 R 位于 R_x ,旋转对称圆锥目标后向散射特性主要由三个散射中心(A, B, C)贡献, B, C 为 T/R 站视线与目标轴构成的平面与圆锥底面边缘的交点^[2],而圆锥目标双基地散射特性主要由三个散射中心(A, D, E)贡献, D, E 为双基地角平分线与目标轴构成的平面与圆锥底面边缘的交点^[13].通常情况下 T/R 站和双基地接收站 R 所观测的散射中心位置不同.建立如图 1 所示的直角坐标系,其中参考坐标系为 $O-XYZ$,坐标原点 O 位于目标质心, OZ 与目标的进动轴重合, OX 轴位于雷达视线和进动轴构成的平面内, OY 与 OX, OZ 构成右手直角坐标系;目标本地坐标系为 $O'-xyz$, O' 位于锥体底面圆心, $O'z$ 轴与目标对称轴重合, $O'x$ 轴沿 $O'B$ 方向, $O'y$ 与 $O'x, O'z$ 构成右手直角坐标系.T/R 站视线俯仰角为 γ_T (即 $\angle T_x OZ$),T/R 站雷达与质心的距离为 R_T , R 站视线方位角和俯仰角分别为 β_R 和 γ_R (即 $\angle R_x OZ$), R 站到质心的距离为 R_R ,T/R 站视线与 R 站视线的夹角为 β (即双基地角, $\angle T_x O R_x$),目标轴线对应的初始方位角和俯仰角分别为 ϕ_0 和 θ (即进动角, $\angle ZOz$),目标长度为 h ,底面半径为 r , $|OO'| = b$.T/R 站雷达视线与目标轴向夹角 $\angle T_x OZ$ 用 θ_T 表示, R 站雷

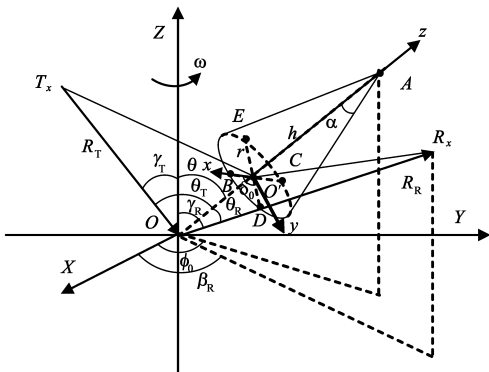


图1 双基地进动目标观测几何示意图

达视线与目标轴向夹角即 $\angle R_x OZ$ 用 θ_R 表示.

T/R 站和 R 站视线与目标轴夹角分别满足^[3]

$$\cos\theta_T = \cos\theta\cos\gamma_T + \sin\theta\sin\gamma_T\cos(\omega t + \phi_0) \quad (1)$$

$$\cos\theta_R = \cos\theta\cos\gamma_R + \sin\theta\sin\gamma_R\cos(\omega t + \phi_0 - \beta_R) \quad (2)$$

根据空间几何关系, R 站视线在目标本地坐标系中的方位角 φ_R 可近似为

$$\cos\varphi_R \approx \frac{\cos\beta - \cos\theta_T\cos\theta_R}{\sin\theta_T\sin\theta_R} \quad (3)$$

其中, $\cos\beta = \sin\gamma_T\sin\gamma_R\cos\beta_R + \cos\gamma_T\cos\gamma_R$.

远场条件下,散射中心 A, D, E 对应的距离和可分别近似表示为

$$\begin{cases} R_{S_A} \approx R_R + R_T - (b + h)(\cos\theta_R + \cos\theta_T) \\ R_{S_D} \approx R_R + R_T - b(\cos\theta_R + \cos\theta_T) - r(\cos\psi_R + \cos\psi_T) \\ R_{S_E} \approx R_R + R_T - b(\cos\theta_R + \cos\theta_T) + r(\cos\psi_R + \cos\psi_T) \end{cases} \quad (4)$$

其中, ψ_T 和 ψ_R 分别表示角度 $\angle DO'T_x$ 和 $\angle DO'R_x$,且 $\cos\psi_T = \cos\delta_0\sin\theta_T$, $\cos\psi_R = \cos(\varphi_R - \delta_0)\sin\theta_R$, δ_0 为散射中心 D 在本地坐标系中的方位角,且 $\cos\delta_0$ 和 $\sin\delta_0$ 可以通过 φ_R, θ_T 和 θ_R 求解,如下式所示^[13].

$$\begin{cases} \cos\delta_0 = \frac{\sin\theta_T + \sin\theta_R\cos\varphi_R}{\sqrt{\sin^2\theta_T + 2\sin\theta_T\sin\theta_R\cos\varphi_R + \sin^2\theta_R}} \\ \sin\delta_0 = \frac{\sin\theta_R\sin\varphi_R}{\sqrt{\sin^2\theta_T + 2\sin\theta_T\sin\theta_R\cos\varphi_R + \sin^2\theta_R}} \end{cases} \quad (5)$$

根据式(4)可知,双基地雷达观测进动目标时,各散射中心的运动规律表达式较为复杂,但是可以看作两部单基地雷达观测距离之和,因此同样符合单基地雷达观测的规律,通常情况下可以近似为正弦规律^[3].

3 双基地雷达联合进动参数估计

进动锥体目标需要估计的参数包括目标进动参数和结构参数,主要有进动频率,进动角,雷达视线与进动轴的夹角,目标长度等,其中目标长度和进动角对目标识别尤为重要,但单基地雷达通常不能同时获得,而通过双基地雷达联合观测可以同时估计这两个参数.对于圆锥弹头目标,通常情况下 $h \gg r$,则双基地雷达观测的目标长度可近似定义为:

$$L_B \approx \frac{1}{2} | h [\cos\theta\cos\gamma_T + \sin\theta\sin\gamma_T\cos(\omega t + \phi_0) + \cos\theta\cos\gamma_R + \sin\theta\sin\gamma_R\cos(\omega t + \phi_0 - \beta_R)] | \quad (6)$$

当 $\beta_R = 0, \gamma_T = \gamma_R$ 时,对应 T/R 站单基地雷达观测的目标长度可近似表示为:

$$L_M \approx | h \cos\theta\cos\gamma_T + h \sin\theta\sin\gamma_T\cos(\omega t + \phi_0) | \quad (7)$$

从式(6)、(7)可以看出,双基地雷达和单基地雷达观测目标长度序列均近似服从绝对正弦曲线规律,更重要的两个接收站观测的目标长度中包含了共同的变

量(h, θ, γ_T), 因此可以用于联合参数估计.

扩展 Hough 变换(Extended Hough Transform, EHT)具有检测任意曲线的能力, 且具有抗噪能力, 即使曲线出现不连续也具有良好的性能, 因此广泛应用曲线检测. 扩展 Hough 变换在雷达信号和数据处理应用也很广泛, 文献[14]采用 EHT 在时间-距离像分布图中成功提取了目标微动特征. 对于获得的进动目标 1 维距离像长度序列, 服从正弦曲线规律, 考虑到目标运动引起 1 维距离像的起伏, 提取的长度可能起伏和断续, 因此本文引入 EHT, 利用两个接收站观测的 1 维距离像长度序列, 联合估计目标进动参数. 本文假设进动频率已经通过其它方法获得^[1].

单基地雷达要提取的曲线方程在长度-时间域(l_M, t)可表示为:

$$l_M = |l_{M,1} + l_{M,2} \cos(\omega t + \phi_0)| \quad (8)$$

其中, $l_{M,1} = h \cos \theta \cos \gamma_T$, $l_{M,2} = h \sin \theta \sin \gamma_T$.

即通过式(8)可将曲线上任意一点(l_M, t)映射到 3 维参数空间($l_{M,1}, l_{M,2}, \phi_0$), 则基于 EHT 的参数估计过程描述如下:

(1) 根据 1 维像长度序列确定参数空间($l_{M,1}, l_{M,2}, \phi_0$);

(2) 根据取值范围及参数估计精度要求将参数空间离散化, 并构建 3 维零矩阵;

(3) 按顺序取参数空间($l_{M,1}, l_{M,2}, \phi_0$)中的一组值, 通过式(8)将其映射为时间序列 $\tilde{l}_M(t)$;

(4) 计算序列 $\tilde{l}_M(t)$ 与 $l_M(t)$ 的距离 Δl_M , 如式(9)所示, 并将 $\frac{1}{\Delta l_M}$ 放入参数空间矩阵对应位置;

$$\Delta l_M = \sqrt{\sum_{k=1}^N [\tilde{l}_M(k\Delta t) - l_M(k\Delta t)]^2} \quad (9)$$

其中, Δt 为取样间隔, N 为取样点数.

(5) 重复步骤(3)、(4), 直到遍历整个参数空间;

(6) 在参数空间对应矩阵中搜索最大值, 对应坐标即为参数估计值($\tilde{l}_{M,1}, \tilde{l}_{M,2}, \tilde{\phi}_0$);

(7) 将($\tilde{l}_{M,1}, \tilde{l}_{M,2}, \tilde{\phi}_0$)代入双基地雷达对应的曲线方程(6), 得以如下方程

$$L_B = \frac{1}{2} | \tilde{l}_{M,1} + \tilde{l}_{M,2} \cos(\omega t + \tilde{\phi}_0) + \tilde{l}_{M,1} \frac{\cos \gamma_R}{\cos \gamma_T} + \tilde{l}_{M,2} \frac{\sin \gamma_R}{\sin \gamma_T} \cos(\omega t + \tilde{\phi}_0 - \beta_R) | \quad (10)$$

(8) 通过(1)~(6)类似的步骤可获得参数($\gamma_T, \gamma_R, \beta_R$)的估计值, 分别记为($\tilde{\gamma}_T, \tilde{\gamma}_R, \tilde{\beta}_R$);

(9) 计算目标长度和进动角的估计值

$$\begin{cases} \tilde{h} = \sqrt{\frac{\tilde{l}_{M,1}^2}{\cos^2 \tilde{\gamma}_T} + \frac{\tilde{l}_{M,2}^2}{\sin^2 \tilde{\gamma}_T}} \\ \tilde{\theta} = \arctg\left(\frac{\tilde{l}_{M,2}}{\tilde{l}_{M,1}} \text{ctg} \tilde{\gamma}_T\right) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\tilde{h}, \tilde{\theta}$ 分别表示目标长度和进动角的估计值.

至此便获得了基于双基地雷达观测的进动目标参数估计新方法, 需要注意的是式(10)中(γ_T, γ_R)满足条件时, ($\pi - \gamma_T, \pi - \gamma_R$)同样满足, 但是将估计参数代入式(6)和式(7)分别计算一维距离像长度, 然后与提取的一维距离像长度序列作比较, 理论上只有一组参数计算结果与提取结果吻合, 因此可确定正确值. 从参数估计过程可以看出, 本方法要求较大的进动角和高的距离分辨率, 从而使获取的 1 维距离像长度序列满足正弦规律; 参数空间的取值和划分间隔影响参数估计精度和计算量; 另外双基地雷达的几何配置也会影响参数估计结果, 通常情况下双基地角越大, T/R 和 R 站的参数差别越大, 参数估计的精度相对增加, 但是双基地角不能太大否则双基地 1 维距离像分辨率会下降, 影响 1 维距离像长度的提取精度.

4 双基地 ISAR 成像

本文信号模型基于如下的假设条件:(1) 目标平动已经完全补偿;(2) 观测时间内双基地角变化可以忽略;(3) 时间和相位同步满足成像要求. 根据式(4)各散射中心相对于质心的距离变化值可分别表示为

$$\begin{cases} \Delta R_{S_A} = R_{S_A} - R_S \approx -(b+h)(\cos \theta_R + \cos \theta_T) \\ \Delta R_{S_D} = R_{S_D} - R_S \approx -b(\cos \theta_R + \cos \theta_T) \\ \quad - r(\cos \delta_0 \sin \theta_T + \cos(\varphi_R - \delta_0) \sin \theta_R) \\ \Delta R_{S_E} = R_{S_E} - R_S \approx -b(\cos \theta_R + \cos \theta_T) \\ \quad + r(\cos \delta_0 \sin \theta_T + \cos(\varphi_R - \delta_0) \sin \theta_R) \end{cases} \quad (12)$$

假设发射站采用的信号为线性调频信号, 其表达式如下

$$s(\hat{t}, \tau) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2\right)\right] \quad (13)$$

其中, $\text{rect}(t) = 1, |t| < 1/2$, 其余为零; f_0, T, k 分别表示载频、脉宽、调频率; \hat{t}, τ 表示快时间和慢时间, 且 $t = \hat{t} + \tau$. 通过 stretch 处理和运动补偿, 双基地回波信号频谱可表示为

$$S(f, \tau) = T \sum_i \sigma_i \text{sinc}\left[T\left(f + \frac{k}{c} \Delta R_{S_i}(\tau)\right)\right] e^{-j(2\pi/\lambda) \Delta R_{S_i}(\tau)} \quad (14)$$

其中, ΔR_{S_i} 表示散射中心 i 偏离参考相位中心的距离, 文中 $i = A, D, E$.

另一方面, 假设双基地角平分线上有一部单基地雷达, 那么其观测的散射中心与双基地接收站观测的散射中心位置相同(A, D, E), 则其观测的散射中心偏离参考中心的距离可表示为

$$\begin{cases} \Delta R_{M_A} \approx -(b+h) \cos \theta_{Bi} \\ \Delta R_{M_D} \approx -b \cos \theta_{Bi} - r \sin \theta_{Bi} \\ \Delta R_{M_E} \approx -b \cos \theta_{Bi} + r \sin \theta_{Bi} \end{cases} \quad (15)$$

其中, ΔR_{M_A} , ΔR_{M_D} 和 ΔR_{M_E} 分别表示三个散射中心 (A , D , E) 偏离参考中心的距离, θ_{Bi} 为双基地角平分线与目标轴夹角, 满足

$$\cos \theta_{Bi} = \cos \theta \cos \gamma_{Bi} + \sin \theta \sin \gamma_{Bi} \cos(\omega t + \phi_0 - \phi_{Bi}) \quad (16)$$

其中, ϕ_{Bi} 和 γ_{Bi} 分别表示双基地角平分线在参考坐标系中的方位和俯仰角, 可用下式计算

$$\begin{cases} \cos \phi_{Bi} = \frac{\sin \gamma_T + \sin \gamma_R \cos \beta_R}{\sqrt{\sin^2 \gamma_T + 2 \sin \gamma_T \sin \gamma_R \cos \beta_R + \sin^2 \gamma_R}} \\ \sin \phi_{Bi} = \frac{\sin \gamma_R \sin \beta_R}{\sqrt{\sin^2 \gamma_T + 2 \sin \gamma_T \sin \gamma_R \cos \beta_R + \sin^2 \gamma_R}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \cos \gamma_{Bi} = \frac{\cos \gamma_T + \cos \gamma_R}{\sqrt{2 + 2 \sin \gamma_T \sin \gamma_R \cos \beta_R + 2 \cos \gamma_T \cos \gamma_R}} \\ \sin \gamma_{Bi} = \frac{\sqrt{\sin^2 \gamma_T + 2 \sin \gamma_T \sin \gamma_R \cos \beta_R + \sin^2 \gamma_R}}{\sqrt{2 + 2 \sin \gamma_T \sin \gamma_R \cos \beta_R + 2 \cos \gamma_T \cos \gamma_R}} \end{cases} \quad (18)$$

比较式(12)和式(15), 通过推导可以得到如下关系

$$\begin{cases} \Delta R_{S_A} \approx 2 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \Delta R_{M_A} \\ \Delta R_{S_D} \approx 2 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \Delta R_{M_D} \\ \Delta R_{S_E} \approx 2 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \Delta R_{M_E} \end{cases} \quad (19)$$

其说明双基地观测的散射中心偏离参考中心的距离与双基地角平分线上单基地观测值相差一个比例因子 $2 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)$, 将式(19)带入式(14), 双基地回波信号频谱表达式重写为

$$S(f, \tau) = T \sum_i \sigma_i \text{sinc} \left[T \left(f + \frac{2k \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{c} \Delta R_{M_i}(\tau) \right) \right] e^{-j(4\pi/\lambda) \cos(\beta/2) \Delta R_{M_i}(\tau)} \quad (20)$$

其中, $\Delta R_{M_i}(\tau) \approx r_i \cos(\theta_{Bi}(\tau) + \Delta \theta_i)$, $i = A, D, E$, $r_A = -(b+h)$, $\Delta \theta_A = 0$, $r_D = -\sqrt{b^2 + r^2}$, $\Delta \theta_D = -\arctg\left(\frac{r}{b}\right)$,

$$\ddot{\theta}_{Bi}(\tau) = \frac{\omega^2 \sin \gamma_{Bi} \sin \theta \cos(\omega \tau + \phi_0 - \phi_{Bi}) + [\dot{\theta}_{Bi}(\tau)]^2 [\cos \theta \cos \gamma_{Bi} + \sin \gamma_{Bi} \sin \theta \cos(\omega \tau + \phi_0 - \phi_{Bi})]}{\sqrt{1 - [\cos \theta \cos \gamma_{Bi} + \sin \gamma_{Bi} \sin \theta \cos(\omega \tau + \phi_0 - \phi_{Bi})]^2}} \quad (23)$$

令 $\ddot{\theta}_{Bi}(\tau) = 0$, 得

$$\cos(\omega \tau + \phi_0 - \phi_{Bi}) = \begin{cases} \frac{\text{tg } \theta}{\text{tg } \gamma_{Bi}}, & \theta < \gamma_{Bi} \\ \frac{\text{tg } \gamma_{Bi}}{\text{tg } \theta}, & \theta > \gamma_{Bi} \end{cases} \quad (24)$$

此时 $\theta_{Bi}(\tau)$ 达到最大值或最小值, $\theta_{Bi}(\tau)$ 近似为线性的, 即此时回波相位为线性的, 取该时间附近的 1 维距离像序列, 可以采用 FFT 方法实现横向压缩获得清晰的 ISAR 像. $\gamma_T = \gamma_R$, $\beta_R = 0$ 时, $\phi_{Bi} = 0$, $\gamma_{Bi} = \gamma_T$, 对应于 T/R 站单基地雷达成像最佳时间, 可见通常情况下 T/R

$$r_E = -\sqrt{b^2 + r^2}, \Delta \theta_E = \arctg\left(\frac{r}{b}\right).$$

为了使用 FFT 方法实现横向压缩获得清晰的 ISAR 像, 要求式(20)的相位在成像时间内是线性变化的, 如果满足 $\theta_{Bi}(\tau) \approx \theta_{Bi}(0) + \dot{\theta}_{Bi}(0) \tau$, 根据式(20)可得各个散射中心对应的相位可近似为

$$\begin{aligned} \varphi_i(\tau) &\approx -\frac{4\pi}{\lambda} r_i \cos(\beta/2) [-\cos(\theta_{Bi}(0) + \Delta \theta_i) \\ &\quad + \sin(\theta_{Bi}(0) + \Delta \theta_i) \dot{\theta}_{Bi}(0) \tau] \\ &= y_i + x_i \dot{\theta}_{Bi}(0) \tau \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $y_i = \frac{4\pi}{\lambda} r_i \cos(\beta/2) \cos(\theta_{Bi}(0) + \Delta \theta_i)$, $x_i = -\frac{4\pi}{\lambda} r_i \cos(\beta/2) \sin(\theta_{Bi}(0) + \Delta \theta_i)$.

此时的成像平面如图 2 所示, 双基地角平分线为距离向 Y_1 , 目标轴向偏离双基地角平分线的角速度矢量 $\dot{\theta}_{Bi}$ 与双基地角平分线矢量的叉乘确定方位向 X_1 .

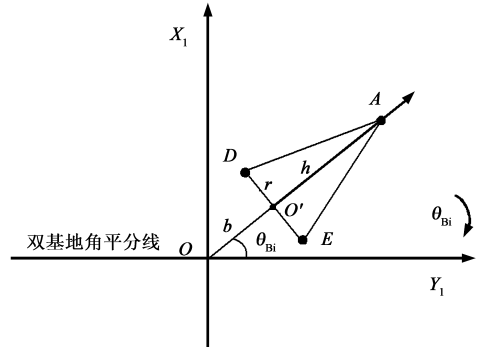


图2 双基地雷达进动目标成像平面

为满足上述近似条件, 则要求 $\dot{\theta}_{Bi}(0)$ 为常数, 即其变化率为 0, 则 $\ddot{\theta}_{Bi}(\tau) = 0$. 对式(16)求时间的一、二阶导数, 可得

$$\dot{\theta}_{Bi}(\tau) = \frac{\omega \sin \gamma_{Bi} \sin \theta \sin(\omega \tau + \phi_0 - \phi_{Bi})}{\sqrt{1 - [\cos \theta \cos \gamma_{Bi} + \sin \gamma_{Bi} \sin \theta \cos(\omega \tau + \phi_0 - \phi_{Bi})]^2}} \quad (22)$$

站和 R 站成像的最佳时间不同. 实际情况下, 雷达观测时间内目标可能进动了多个周期, 因此存在多个最佳成像时间, 可以在最小时间上增加半个周期即为下一个最佳成像时间, 依次类推, 可以得到多幅 ISAR 像.

5 仿真与分析

为验证上述理论分析的正确性, 通过 FEKO 软件设计一钝头锥体模型^[15], 其高度为 3m, 底面半径为 0.5m, 锥顶半径为 0.05m, 频率范围 9.5GHz ~ 10.5GHz, 取值间隔 25MHz, 入射场俯仰角为 30° ~ 50°, 接收角范围(0°,

$180^\circ) \times (0^\circ, 180^\circ)$, 入射极化为水平极化, 采用快速多层多极子方法计算得到了水平极化接收时的单/双基地散射系数, 为一个 4 维复矩阵(入射俯仰, 接收俯仰, 接收方位和频率各一维). 同时按相同尺寸的锥体目标进行仿真, 进动周期为 1s, 进动角为 10° , 目标轴线初始方位角 $\phi_0 = 0^\circ$, T/R 站俯仰角 $\gamma_T = 40^\circ$, R 站方位和俯仰角分别为 $\gamma_R = 100^\circ$, $\beta_R = 0^\circ$, 双基地角可计算为 60° , 脉冲重复频率为 500Hz, 观测时间为 2s. 进动过程中计算各个时刻的 $(\theta_T, \theta_R, \varphi_R)$, 用于查找电磁计算数据中对应的散射系数, 即一个时刻对应一个目标姿态, 对应一组散射系数(不同频率), 对这组数据进行 IFFT 处理则获得对应的 1 维距离像, 将 1 维距离像在时间排列如图 3 所示. 其中图 3(a) 为单基地一维距离像序列构成的时间-距离分布, 从中可以观测到两个散射中心, 锥顶和底面边缘各一个, 底面边缘散射强度弱于锥顶散射强度, 两个散射中心的运动轨迹近似为正弦曲线, 图 3(b) 为双基地一维距离像序列构成的时间-距离分布, 从中同样观测到两个散射中心, 底面边缘散射强度强于锥顶散射强度, 单/双基地一维距离像差异较大.

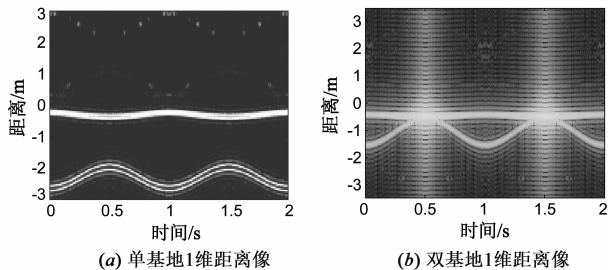


图3 电磁计算数据动态仿真1维距离像

采用门限检测法获得单/双基地 1 维距离像长度如图 4 所示, 可以看出 1 维距离像长度序列近似为正弦规律, 与理论推导基本一致, 但由于双基地 1 维距离像中散射中心的幅值起伏较大, 提取的 1 维距离像长度在某些角度出现较大的起伏和断裂. 采用本文方法第一次 EHT 变换后通过峰值获得参数为 $\bar{l}_{M,1} = 2.39$, $\bar{l}_{M,2} = 0.35$, $\bar{\phi}_0 = -1^\circ$, 对应的参数空间如图 5(a) 所示, 图中只给出了角度 $\bar{\phi}_0 = -1^\circ$ 时的二维分布图, 峰值对应的取

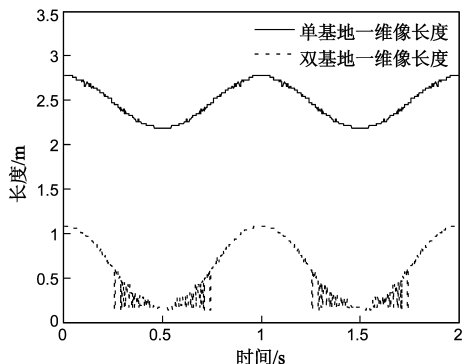


图4 电磁计算数据动态仿真1维距离像长度

值即为估计结果. 利用获得的估计参数进行第二次 EHT 变换后通过峰值检测得到参数 $(\bar{\gamma}_T, \bar{\gamma}_R, \bar{\beta}_R) = (40^\circ/140^\circ, 98^\circ/82^\circ, -1^\circ)$, 对应参数空间如图 5(b) 所示, 图中只给出了角度 $\bar{\beta}_R = -1^\circ$ 时的二维分布图. 将两组参数带入式(11)可得目标长度和进动角分别 3.1786m 和 9.5916° , 根据目标长度估计值和 T/R 站 1 维像长度序列容易判断 T/R 站和 R 站的俯仰角应分别为 40° 和 98° . 所有参数的估计值与真实值相比, 误差均较小.

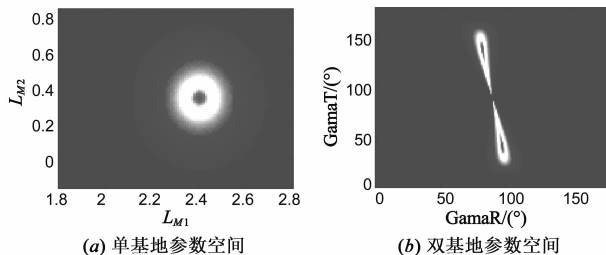


图5 EHT参数空间

根据上述参数估计的结果, 双基地成像最小值最佳时间为 0.24s , 其余最佳成像时间分别为 0.74s , 1.24s , 1.74s . 设需要的横向积累角度为 5° , 根据参数估计结果可以获得需要的观测时间为 0.1s , 则取最佳时刻前后 0.05s 时间段的 1 维距离像进行方位向压缩获得 2D ISAR 像如图 6 所示, 其中 (a)、(b) 分别为 0.24s 和 0.74s 时刻成像结果, 两者极为相似, 由于遮挡效应只能观测到两个散射中心, 且锥顶散射强度弱于底面边缘散射强度. 由于 1.24s 和 1.74s 时刻成像结果理论上与前面两个时刻一致, 限于篇幅文中没有给出.

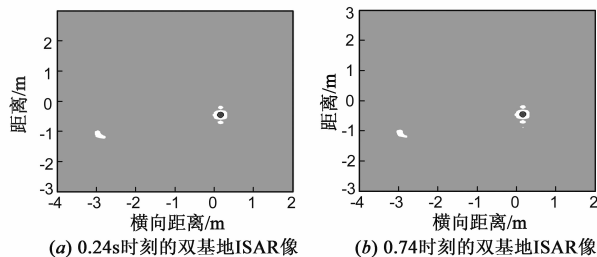


图6 电磁计算数据动态仿真双基地ISAR像

6 结论

双基地雷达应用于空间目标探测具有重要的实际意义. 论文基于宽带 T/R-R 双基地雷达联合观测, 实现了进动目标的运动参数与结构参数的同时估计, 在参数估计基础上, 选择最佳时间实现了进动目标双基地 ISAR 成像, 并通过电磁计算数据动态仿真验证了理论分析的正确性. 然而, 双/多基地雷达应用于空间目标成像还处于探索阶段, 还有很多值得研究的问题, 比如目标高速运动引起双基地角变化和存在同步误差时的 ISAR 成像; 另外利用多基地雷达同时观测回波信号相干积累, 缩短观测时间, 提高横向分辨率等.

参考文献

- [1] 魏玺章,姚辉伟,等.变区间分组检验相乘积累进动周期估计[J].电子学报,2010,38(1):135-140.
Wei Xi-zhang, Yao Hui-wei, et al. Estimation of precession period based on nonparametric statistics [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 135-140. (in Chinese)
- [2] 牛杰,刘永祥,等.一种基于经验模态分解的锥体目标雷达微动特征提取新方法[J].电子学报,2011,39(7):1712-1715.
Niu Jie, Liu Yong-xiang, et al. A new method of radar micro-motion feature extraction of cone target based on empirical mode decomposition [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1712-1715. (in Chinese)
- [3] 朱玉鹏,王宏强,等.基于一维距离像序列的空间弹道目标微动特征提取[J].宇航学报,2009,30(3):1133-1140.
Zhu Yu-peng, Wang Hong-qiang, et al. Micro-motion feature extraction of spatial ballistic target based on HRRP sequence [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(3): 1133-1140. (in Chinese)
- [4] 马梁,王涛,等.旋转目标距离像长度特性及微运动特征提取[J].电子学报,2008,36(12):2273-2279.
Ma Liang, Wang Tao, et al. The characteristic of range profile and micro-motion feature extraction for rotary target [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2273-2279. (in Chinese)
- [5] 金光虎,高勋章,等.基于 ISAR 像序列的弹道目标进动特征提取[J].电子学报,2010,38(6):1-6.
Jin Guang-hu, Gao Xun-zhang, et al. Precession feature extraction of ballistic targets based on dynamic ISAR image sequence [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1-6. (in Chinese)
- [6] Tao Wang, Xuesong Wang, et al. Estimation of precession parameters and generation of ISAR images of ballistic missile targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1983-1995.
- [7] Vespe M, Baker C, et al. Radar target classification using multiple perspectives [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2007, 1(4): 300-307.
- [8] Zhu F, Zhang X-D, et al. Nonstationary hidden markov models for multiaspect discriminative feature extraction from radar targets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5): 203-2214.
- [9] Ye Chun-mao, Xu Jia, et al. Key parameter estimation for radar rotating object imaging with multi-aspect observations [J]. Science in China: Information Sciences, 2010, 53(8): 1641-1652.
- [10] Cherniakov M. Bistatic Radar: Principles and Practice [M]. San Francisco: John Wiley, 2007. 190-192, 326-331.
- [11] Martorella M, Palmer J, et al. On bistatic inverse synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1125-1134.
- [12] Martorella M. Analysis of the robustness of bistatic inverse synthetic aperture radar in the presence of phase synchronization errors [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2673-2689.
- [13] 艾小锋,邹小海,等.旋转对称目标双基地一维距离像特性分析[J].电子与信息学报,2011,33(11):2727-2734.
Ai Xiao-feng, Zou Xiao-hai, et al. Characteristic of bistatic high-range resolution profiles of rotational symmetry targets [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(11): 2727-2734. (in Chinese)
- [14] Zhang Qun, Yeo Tat-soon, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the hough transform [J]. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291-299.
- [15] 黄培康,殷红成,许小剑.雷达目标特性[M].北京:电子工业出版社,2005:86-95.

作者简介



艾小锋 男,1983年5月出生于四川省安岳县.现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生,主要从事双/多基地雷达目标成像与特征提取研究.

E-mail: anxifu2001@163.com



邹小海 男,1982年3月出生于湖北省公安县.现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生,主要从事双/多基地雷达目标微动特征提取研究.

E-mail: zouxiaohai2000@sina.com.cn