

星-弹双基 SAR 建模及成像特性分析

郭 苹, 焦晓阳, 王安义, 王 静

(西安科技大学通信与信息工程学院, 西安, 710054)

摘要 针对星-弹双基合成孔径雷达(SMB-BiSAR)这一特殊成像结构,根据卫星-导弹的空间几何模型,对收发平台的成像模型进行矢量描述,得到目标的距离历程以及回波信号模型。然后,利用距离等值线与多普勒等值线的正交关系,对接收站的飞行路径约束条件进行分析,并根据距离分辨率和多普勒分辨率与两者梯度的关系,得到 SMB-BiSAR 空间分辨率的计算公式。仿真实验表明:通过合理地规划导弹的飞行路径,SMB-BiSAR 具备对目标区域的大前斜和前视高分辨成像的能力,并且其空间分辨率受双基几何构型影响较大。发射站和接收站位置夹角越大,距离分辨的效果越差;当二者位置重合时即单基模式,距离分辨率效果最佳。而发射站和接收站运动方向的夹角越大,方位分辨率越差。当二者运动方向相同时,方位分辨率效果最佳。

关键词 弹载;星载;双基 SAR;分辨率分析

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.04.005

中图分类号 TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)04-0029-07

Analysis of Space-Missile Borne Bistatic SAR Modeling and Imaging Characteristics

GUO Ping, JIAO Xiaoyang, WANG Anyi, WANG Jing

(College of Communication and Information Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract As a special bistatic configuration, the imaging model of space-missile borne bistatic synthetic aperture radar (SMB-BiSAR) is firstly constructed in vector according to the geometry of satellite and missile the range history and the echo signal model being obtained. Then, the constraint of the missile flight path is analyzed based on the orthogonality of iso-range and iso-Doppler contours. Finally, the spatial resolution expression of SMB-BiSAR is derived by the gradient of range history and Doppler frequency. The simulations show that SMB-BiSAR has the ability to obtain the high-resolution image of target area in the case of large squint angle and forward-looking by the path planning of missile. In addition, the bistatic geometry has greatly effects in spatial resolution. The greater the bistatic angle between transmitter and receiver is, the worse the range resolution becomes. When both the transmitter and the receiver overlap, i. e. the range resolution, is the best. The larger the angle between moving direction of transmitter and re-

收稿日期: 2019-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(61701393, 61971329);陕西省教育厅科学研究计划(19JK0531, 19JK0527);西安科技大学博士启动金(2018QDJ034)

作者简介: 郭 苹(1988—),女,山东德州人,讲师,博士,主要从事单基和双基 SAR 成像研究。E-mail:guoping@xust.edu.cn

引用格式: 郭苹, 焦晓阳, 王安义, 等. 星-弹双基 SAR 建模及成像特性分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(4): 29-35.
GUO Ping, JIAO Xiaoyang, WANG Anyi, et al. Analysis of Space-Missile Borne Bistatic SAR Modeling and Imaging Characteristics [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(4): 29-35.

ceiver is, the worse the azimuth resolution is obtained. And the azimuth resolution is the best, when the motion direction is consistent.

Key words missile borne; space borne; bistatic SAR; resolution analysis

随着低成本火箭发射技术、微小卫星平台技术和载荷技术的迅猛发展,实现全球信息,特别是天基信息共享的“天地一体化”体系正在全世界范围内引发广泛研究^[1]。双基地合成孔径雷达(BiSAR)将收发站放置在 2 个不同平台上,结合了双基雷达和 SAR 的特点,具有隐蔽性强、抗干扰、信息获取丰富、可前视成像等诸多优点^[2-5]。与传统的 BiSAR^[6-9]不同,SMB-BiSAR 的接收机安装在距离战场较近的导弹上,而发射机位于距离战场较远的空间卫星上,将卫星平台独特的空间特性与导弹的机动灵活优势相结合,使得弹载 SAR 可以有效获取包含背景在内的目标景象进行图像匹配处理,实现精确定位、制导等功能,提高打击能力。另外,导弹作为接收端无需发射大功率信号其被检测概率大大降低,从而增强了系统的抗干扰、抗侦察能力^[10]。在“天地一体化”体系的背景下,研究 SMB-BiSAR 成像很有意义。然而 SMB-BiSAR 的优势是以结构复杂性为代价的,卫星如何协助导弹成像将成为新的挑战。

在 SAR 成像研究中,成像机理、成像性能以及信号特性,可从理论上反映场景目标的成像可能性和分辨能力,且与后期成像算法的研究和系统参数的设计密切相关^[10-11]。关于传统 BiSAR,例如机载 BiSAR,星载 BiSAR 的研究起步较早,成像处理技术也相对比较成熟。在传统的 BiSAR 系统中,飞行平台通常要求做匀速直线飞行。无论对于发射平台还是接收平台,经典的双曲线模型假设都可以很好地直接应用^[5-6]。由于不同平台结合带来的优势,近年来,关于混合 BiSAR,例如星-机级联 SAR 的成像特性及成像算法的研究也逐渐增多^[12-13]。但是,考虑到收发平台的复杂几何结构及飞行特性,对于曲线飞行的卫星、飞机及导弹平台而言,直接应用经典的双曲线模型将会带来较大的相位误差,在文献^[14]和^[15]中提出了利用切比雪夫多项展开式代替泰勒级数展开式的方法提高距离模型的精度。在文献^[8]中对星-机双基地 SAR 的空间几何关系及信号模型进行了研究。孙稚超等人对地球同步轨道星-机双基 SAR 的性能以及构型设计进行分析,明确了在空间分辨率和成像信噪比约束下机载接收站的路径规划^[12]。文献^[16]从模糊函数的角度,推导了通用双基 SAR 的分辨率表达式。然而,与机载 SAR 相比,导弹运动存在较大空间三维速度和加速

度,尤其在末端俯冲下降段,以导弹作为接收机的成像几何构型会更加复杂^[17-18],但目前关于 SMB-BiSAR 这一双基构型的研究较少。只有文献^[19]进行了简单的研究。

本文针对 SMB-BiSAR 这一特殊成像体制,分别在地心固定坐标系和参考点本地坐标系中,构建空间几何模型,对收发平台的成像模型进行矢量描述,得到目标的距离历程以及回波信号模型。然后,利用距离等值线与多普勒等值线的正交关系,对接收站的飞行路径约束条件进行分析。最后,根据距离分辨率与多普勒分辨率及两者梯度的关系,得到 SMB-BiSAR 距离和方位分辨率的计算公式,并进行仿真验证。

1 空间几何关系及信号模型

考虑卫星轨道差异、导弹机动飞行等复杂情形,相比于常规单、双基模式,星/弹 SAR 几何模型发生较大的变化,首先在地心固定坐标系中对 SMB-BiSAR 的空间几何进行分析,得到卫星的位置矢量和运动矢量,然后选取在更适合成像处理的参考点本地坐标系中建立信号模型进行特性分析。图 1 为 SMB-BiSAR 空间几何关系。

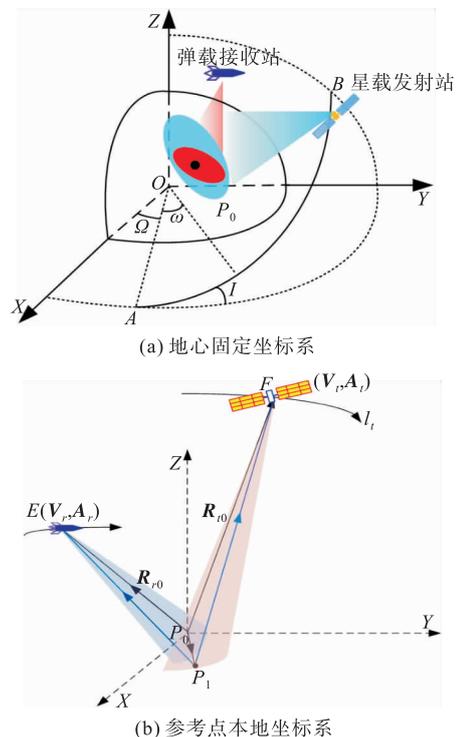


图 1 SMB-BiSAR 空间几何关系

在 SMB-BiSAR 几何构型中,卫星作为发射站沿椭圆轨道运动。在地心固定坐标系中,卫星的位置矢量以及运动矢量可以通过轨道六要素以及坐标系转换计算得到。如图 1(a)所示,在地心固定坐标系中卫星沿 \widehat{AB} 运动,假设卫星的位置矢量为 \mathbf{R}_s ,卫星的速度和加速度矢量分别为 \mathbf{V}_s 和 \mathbf{A}_s (本文中仅考虑到 2 阶运动参数,可根据实际精度需要扩展到更高阶)。 P_0 为参考时刻波束中心照射点,其经纬度 (θ_a, θ_e) 信息可以通过参考时刻卫星位置,天线波束指向,卫星姿态和地球模型计算得到。

由于在地心固定坐标系中进行距离历程和回波相位的分析比较复杂,所以我们建立了参考点本地坐标系,如图 1(b)所示。在参考点本地坐标系中,波束中心点 P_0 变为坐标原点, Z 轴由地心指向参考点方向。

利用坐标系转换,首先将地心固定坐标系 Z 轴逆时针旋转 θ_a ,然后再绕 Y 轴顺时针旋转 $\pi/2 - \theta_e$,最后沿 Z 轴将坐标系平移地球半径长度 R_e ,得到以波束中心为坐标原点的参考点本地坐标系。在该坐标系中,卫星的位置矢量 \mathbf{R}_{r0} 和运动矢量 $(\mathbf{V}_r, \mathbf{A}_r)$ 可以分别表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{r0} = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_0 \cdot \mathbf{R}_s - [0, 0, R_e]^T \\ \mathbf{V}_r = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_0 \cdot \mathbf{V}_s \\ \mathbf{A}_r = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_0 \cdot \mathbf{A}_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:旋转矩阵 \mathbf{M}_0 和 \mathbf{M}_1 分别可以表示为:

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \sin \theta_a & 0 \\ -\sin \theta_a & \cos \theta_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \sin \theta_e & 0 & -\cos \theta_e \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_e & 0 & \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (3)$$

在合成孔径时间内,卫星和导弹分别沿轨迹 l_s 和 l_r 运动。 \mathbf{P}_t 是任意点目标 P 的位置矢量。点 E 和点 F 分别为参考时刻 ($\eta=0$) 发射站和接收站的位置。在任意方位 η 时刻,发射站和接收站的位置矢量分别为 $\mathbf{R}_t(\eta)$ 和 $\mathbf{R}_r(\eta)$,即:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_t(\eta) = \mathbf{R}_{r0} + \mathbf{V}_r \eta + \frac{1}{2} \mathbf{A}_r \eta^2 \\ \mathbf{R}_r(\eta) = \mathbf{R}_{r0} + \mathbf{V}_r \eta + \frac{1}{2} \mathbf{A}_r \eta^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_{r0} 为接收站即导弹的初始位置矢量; \mathbf{V}_r 和 \mathbf{A}_r 分别是导弹的速度矢量和加速度矢量。从物理学运动的角度出发,斜距模型是对雷达平台与观测目标之间相对运动的准确描述,因此,斜距建模是开展后续信号模型、多普勒参数分析、图像几何分辨率评估和成像方法等研究的必要条件。基于上述分析,在

参考点本地坐标系中,任意点目标 P 的距离历程可以表示为:

$$r(\eta) = |\mathbf{R}_T(\eta)| + |\mathbf{R}_R(\eta)| = |\mathbf{R}_t(\eta) - \mathbf{P}_t| + |\mathbf{R}_r(\eta) - \mathbf{P}_t| \quad (5)$$

式中: $|\cdot|$ 为取模操作符。

假设发射信号是线性调频信号(LFM),则目标的回波信号可以表示为:

$$s(t, \eta) = \omega_r(t) \omega_a(\eta) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} r(\eta)\right) \cdot \exp\left(j\pi\gamma \left(t - \frac{r(\eta)}{c}\right)^2\right) \quad (6)$$

式中: t 为快时间; c 为光速; λ 为波长; $\omega_r(\cdot)$ 和 $\omega_a(\cdot)$ 分别是距离和方位窗函数。

根据文献[20]可知,利用泰勒级数展开对距离历程进行矢量分析,其物理含义更明确,为了便于特性分析,将式(5)在 $\eta=\eta_0$ 时刻进行泰勒级数展开:

$$r(\eta, \mathbf{P}_t) = \sum_{n=0}^3 \frac{1}{n!} \kappa_n(\mathbf{P}_t) \eta^n \quad (7)$$

式中: κ_n 是展开系数, $\kappa_n(\mathbf{P}_t) = \mu_n(\mathbf{R}_{r0}, \mathbf{P}_t) + \mu_n(\mathbf{R}_{t0}, \mathbf{P}_t)$,则展开式可表示为:

$$\begin{cases} \mu_0(\mathbf{R}, \mathbf{P}_t) = |\mathbf{R} - \mathbf{P}_t| \\ \mu_1(\mathbf{R}, \mathbf{P}_t) = \mu_0(\mathbf{R})^{-1} \langle \mathbf{R} - \mathbf{P}_t, \mathbf{V} \rangle \\ \mu_2(\mathbf{R}, \mathbf{P}_t) = \mu_0(\mathbf{R})^{-1} (\langle \mathbf{R} - \mathbf{P}_t, \mathbf{A} \rangle + \langle \mathbf{V}, \mathbf{V} \rangle - \mu_1(\mathbf{R})^2) \\ \mu_3(\mathbf{R}, \mathbf{P}_t) = \mu_0(\mathbf{R})^{-1} [3\langle \mathbf{V}, \mathbf{A} \rangle - 3\mu_1(\mathbf{R})\mu_2(\mathbf{R})] \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{R} 是距离矢量。当 \mathbf{R} 代表发射站距离矢量时, \mathbf{V} 和 \mathbf{A} 指的是 η_0 时刻发射站的运动参数;当 \mathbf{R} 代表接收站距离矢量时, \mathbf{V} 和 \mathbf{A} 表示为 η_0 时刻接收站的运动参数。

如图 2 所示,式(7)带来的相位误差的最大值远小于 $\pi/4$,这表示对距离模型采取三阶泰勒级数近似带来的相位误差对最终成像质量造成的影响可以忽略。

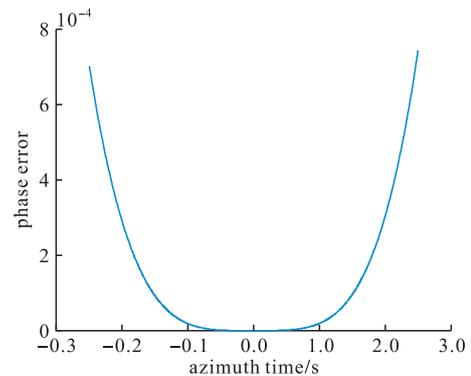


图 2 三阶泰勒级数展开相位误差

2 飞行路径约束分析

在 SMB-BiSAR 系统中,卫星的运行轨道固定,

但导弹的运动方式相对比较灵活,从而保证了系统的灵活性。作为 SMB-BiSAR 系统成像指标中重要参数之一,空间分辨率与收发平台的相对位置、运动状态都息息相关。文献[9]中通过将无人机路径规划问题建模为多目标优化问题,获得最适合的无人机路径实现 GEO-UAV 星机双基 SAR 成像任务。因此,为了保证在待成像区域获得高分辨的二维成像,导弹的飞行路径显然也必须满足一定的约束条件以获得更好的空间分辨率。这里我们从双基几何构型的角度对导弹的飞行路径约束条件进行简单的分析。由于距离等值线和多普勒等值线在成像场景中的分隔特性可以反映在不同区域的成像能力,我们首先对距离等值线或多普勒等值线进行分析。在方位 η 时刻,场景中双站距离和为 R_η 的距离等值线或多普勒频率和为 f_{d_η} 的多普勒等值线可以表示为:

$$\begin{cases} r(\eta, \mathbf{P}_t) = |\mathbf{R}_T(\eta) - \mathbf{P}_t| + |\mathbf{R}_R(\eta) - \mathbf{P}_t| = R_\eta \\ f_d(\eta) = -\frac{1}{\lambda} \frac{\partial r(\eta, \mathbf{P}_t)}{\partial \eta} = f_{d_\eta} \end{cases} \quad (9)$$

如果希望在待成像区域获得高分辨的二维成像,要遵循的直观构型设计原则是使得距离等值线或多普勒等值线正交或准正交^[2]。由于梯度方向即距离等值线或多普勒等值线的法向量方向,所以我们首先分析两者梯度的正交性。距离梯度和多普勒梯度可以表示为:

$$\begin{aligned} \nabla R_\eta &= \nabla [|\mathbf{R}_T(\eta)| + |\mathbf{R}_R(\eta)|] = \\ &= \nabla |\mathbf{R}_T(\eta)| + \nabla |\mathbf{R}_R(\eta)| = \\ &= \mathbf{U}_T(\eta) + \mathbf{U}_R(\eta) = \mathbf{U}_\Sigma(\eta) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\nabla f_{d_\eta} = \nabla \frac{\partial r(\eta, \mathbf{P}_t)}{\partial \eta} = \frac{\partial \nabla r(\eta, \mathbf{P}_t)}{\partial \eta} = \frac{\partial [\mathbf{U}_\Sigma(\eta)]}{\partial \eta} \quad (11)$$

式中: ∇ 为梯度算子; $\mathbf{U}_T(\eta) = \frac{\mathbf{R}_T(\eta)}{|\mathbf{R}_T(\eta)|}$ 和 $\mathbf{U}_R(\eta) = \frac{\mathbf{R}_R(\eta)}{|\mathbf{R}_R(\eta)|}$ 分别为 $\mathbf{R}_T(\eta)$ 和 $\mathbf{R}_R(\eta)$ 的单位矢量。据式(8)可知,在 $\eta=0$ 时刻,距离等值线和多普勒等值线与距离历程泰勒级数展开系数 κ_0 和 κ_1 有关,则:

$$\begin{cases} \nabla R_\eta|_{\eta=0} = \nabla \kappa_0 \\ \nabla f_{d_\eta}|_{\eta=0} = \nabla \kappa_1 \end{cases} \quad (12)$$

地距平面空间可以看作由单位向量 \mathbf{h} 及 λ 为基的向量空间,其中 \mathbf{h} 和 λ 分别表示 $\nabla \kappa_0$ 和 $\nabla \kappa_1$ 在地距平面空间的投影,则 \mathbf{h} 和 λ 分别正交于距离等值线或多普勒等值线。因此,等距线及等多普勒线的夹角可以表示为:

$$\Omega = \cos^{-1} \left\{ \frac{|\langle \mathbf{h}, \lambda \rangle|}{|\mathbf{h}| \cdot |\lambda|} \right\} \quad (13)$$

式中: $0 \leq \Omega \leq \pi/2$, 可以利用式(13)设计 BiSAR 的几何构型。当探测区域的 Ω 接近 90° 时,聚焦结果较好,反之聚焦性能降低。与单基 SAR 相比, BiSAR 具有更为灵活的设计优势,通过合理选择系

统几何构型,使探测区域的 Ω 接近 90° , 获得更好的等距线与等多普勒线的正交性。因此,可以根据 Ω 对导弹的飞行路径进行简单的约束限制。

3 空间分辨率分析

分辨率特性是 BiSAR 系统的重要理论基础,该体制雷达的核心就是要获取目标的高分辨率图像。由于 SMB-BiSAR 与传统的 BiSAR 模式不同,我们有必要对该新构型的距离和方位分辨率的计算公式进行新的推导。根据文献[21]和[22]可知,距离分辨率与多普勒分辨率与两者梯度有关,则距离分辨率可以表示为:

$$\rho_r = \frac{0.886c}{B_r |\nabla r|} \quad (14)$$

式中: B_r 是发射信号带宽。将式(10)代入到式(14)可得:

$$\rho_r = \frac{0.886c}{B_r |\mathbf{U}_\Sigma|} = \frac{0.886c}{2B_r \cos(\beta/2)} \quad (15)$$

式中: β 是 \mathbf{U}_T 和 \mathbf{U}_R 之间的双基地角。距离分辨率反映了 2 个点目标在距离方向上的分辨能力。当 B_r 一定, ρ_r 与双基地角 β 有关。由于卫星和导弹的相对运动,在整个成像场景中的双基地角是变化的,因此距离分辨率随目标位置而变化。

SAR 的方位分辨率是衡量多普勒频率差异的能力。因此,多普勒频率差对于方位分辨率的推导是重要的。由于方位分辨率与多普勒频率的梯度有关^[17],可以表示为:

$$\rho_a = \frac{0.886\lambda}{|\nabla f_d(\eta, \mathbf{P}_t)| T_a} \quad (16)$$

式中: T_a 为合成孔径时间。将式(11)代入式(16),方位分辨率可表示为:

$$\rho_a = \frac{0.886\lambda}{\left| \int_{-\frac{T_a}{2}}^{\frac{T_a}{2}} \frac{\partial \mathbf{U}_\Sigma(\eta)}{\partial \eta} d\eta \right|} = \frac{0.886\lambda}{|\mathbf{U}_\Sigma(T_a/2) - \mathbf{U}_\Sigma(-T_a/2)|} \quad (17)$$

根据半角公式,可以得到:

$$|\mathbf{U}_T(T_a/2) - \mathbf{U}_T(-T_a/2)| = 2\sin(\theta_T/2) \approx \theta_T \quad (18)$$

$$|\mathbf{U}_R(T_a/2) - \mathbf{U}_R(-T_a/2)| = 2\sin(\theta_R/2) \approx \theta_R \quad (19)$$

式中: θ_T 和 θ_R 分别是发射站和接收站的方位合成角或者相干积累角,分别与发射站和接收站的方位分辨率有关,则方位分辨率可表示为:

$$\rho_a = \frac{0.886\lambda}{|\theta_T \mathbf{e}_T + \theta_R \mathbf{e}_R|} = \frac{0.886\lambda}{|\theta_T^2 + \theta_R^2 + 2\theta_T \theta_R \cos \alpha|} \quad (20)$$

式中: \mathbf{e}_T 和 \mathbf{e}_R 分别是发射站和接收站在方位方向上的单位矢量; α 为 \mathbf{e}_T 和 \mathbf{e}_R 夹角。可以看出,方位

分辨率由发射站和接收站的分辨率以及发射站和接收站的运动方向共同决定,我们可以通过设置合理的导弹运动方向,得到高分辨的 SMB-BiSAR 构型。

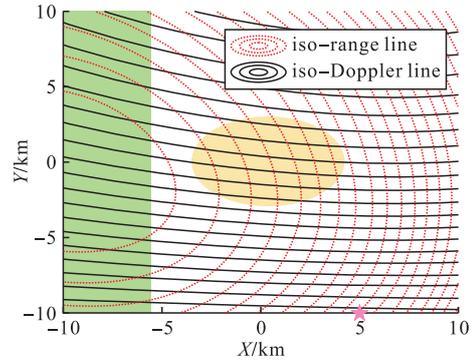
4 仿真分析

在 SMB-BiSAR 系统中,如果正确规划了接收站的运动路径,则可以构造多种成像模式。除了采用这种新型双基地构型的传统宽带成像模式外,还可以实现前视和大斜视模式成像。这里首先对本文中飞行路径约束的分析进行验证,然后对 SMB-BiSAR 的前视分辨能力进行仿真,参考点本地坐标系中的收发平台的参数信息由表 1 给出。

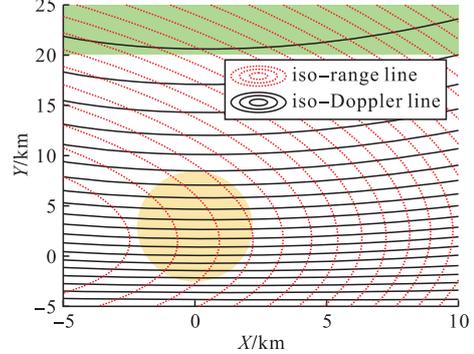
表 1 仿真参数收发平台参数信息

参数	发射平台	接收平台 1	接收平台 2
雷达位置/km	(-500,300,650)	(5,-10,20)	(0,-4,15)
速度/(m·s ⁻¹)	(40,7 000,-350)	(0,1 000,0)	(0,1 750,-500)
加速度/(m·s ⁻²)	(2,1,1)	(5,-10,-20)	(0,-5,20)
波长/m	0.03	0.03	0.03
带宽/MHz	200	200	200
PRF/kHz	3	3	3
脉冲宽度/ μ s	2	2	2
场景大小/km	3×3	3×3	3×3
采样频率/MHz	300	300	300

图 3 表示利用表 1 中的参数进行仿真得到的 SMB-BiSAR 等距离/等多普勒线示意图,图中紫色五角星表示接收站,场景中心点位于坐标原点(0,0)位置。红色虚线和黑色实线分别是距离等值线和多普勒等值线。在图 3(a)中可以看到,绿色条带状区域的距离等值线与多普勒等值线夹角 Ω 都相对较小,甚至接近零,这意味着该区域的距离方位耦合严重,对于回波数据的处理较难。而位于接收站大前斜方向的椭圆区域中,红色和黑色线条构成的矩形或近似矩形区域表示距离等值线和多普勒等值线正交或者近似正交,这说明通过调整接收站的位置,SMB-BiSAR 可以实现对成像区域的大前斜视成像。同理,由图 3(b)中可以看到,绿色条带状区域的距离等值线与多普勒等值线夹角 Ω 都相对较大,甚至接近 180°,同样说明该区域的距离方位耦合严重,难以实现二维成像处理。而位于接收站正前方的椭圆区域中,距离等值线和多普勒等值线正交或者近似正交,这说明 SMB-BiSAR 在前视模式下具有二维成像分辨率的能力。



(a) 接收平台1仿真结果



(b) 接收平台2仿真结果

图 3 SMB-BiSAR 等距离等多普勒线

为了验证分辨率分析的正确性,利用表 1 中接收站 1 的参数,对距离分辨率和方位分辨率的计算进行仿真。由于距离分辨率与传统双基模式计算方法相同,这里只对距离分辨率与目标位置及双基夹角的变化关系进行分析,如图 4 所示。

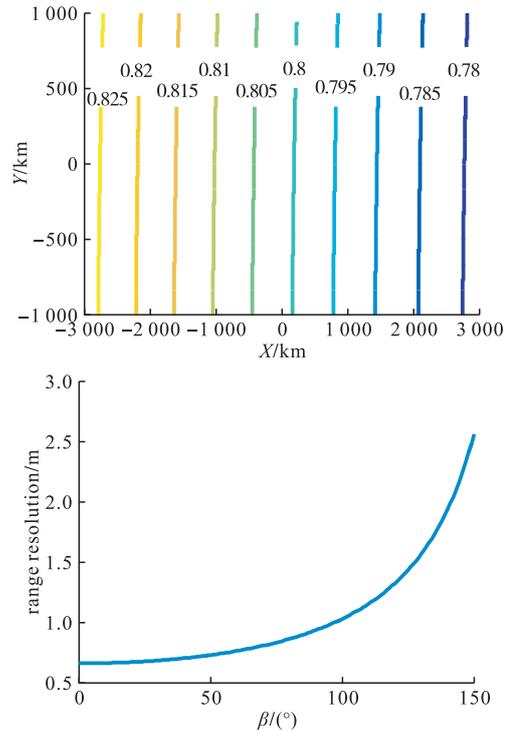
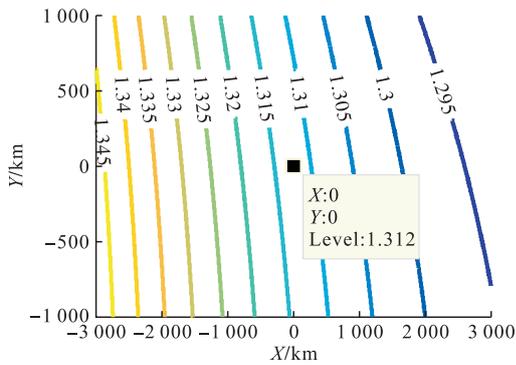


图 4 SMB-BiSAR 距离分辨率

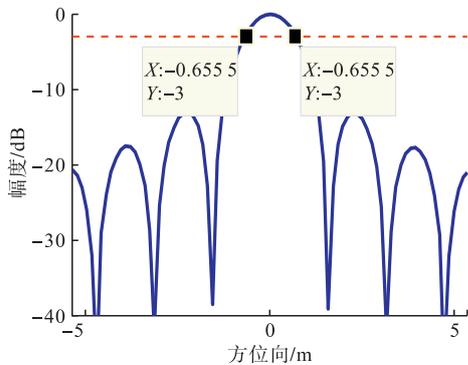
距离分辨率随目标位置而变化,沿距离向变化大而沿方位向的变化小;另外,当发射站和接收站之

间的夹角 β 越大时,距离分辨的效果越差,而当夹角 $\beta=0$ 时,收发站位置重合,变为单基情况,距离分辨率效果最佳。

图 5 给出了方位分辨率的计算结果,并利用后向投影算法(Back Projection Algorithm, BPA)聚焦结果进行对比。如图 5(a)所示,利用式(17)计算得到场景中心点目标(0,0)的分辨率数值为 1.312 m,而根据 3 dB 波束宽度计算得到的方位分辨率理论值为 1.311 m,如图 5(b)所示。通过对比可知,利用本文推导方法计算得到方位分辨率误差为 0.076%,满足误差要求。



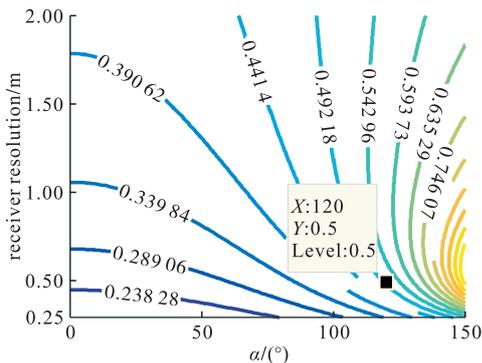
(a) 式(17)计算结果



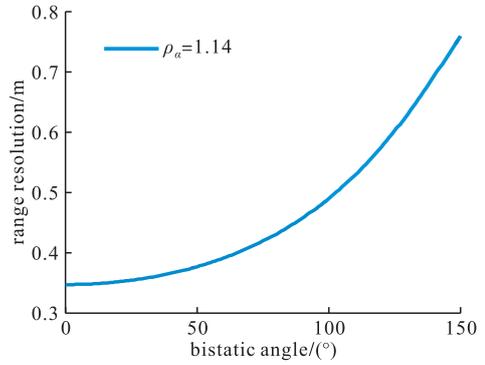
(b) BPA 匹配结果

图 5 SMB-BiSAR 方位分辨率

图 6 给出了方位分辨率随接收站和双基角的变化示意图, Y 轴表示单基情况下导弹的方位分辨率, X 轴表示夹角 α 。给定接收站的方位分辨率,当 α 小于某一数值时, SMB-BiSAR 可以实现优于单基情况的分辨率。



(a) 单基情况下



(b) 双基情况下

图 6 方位分辨率随夹角 α 的变化关系

例如,假设单基情况下导弹的方位分辨率为 0.5 m,当 α 小于 120° 时, SMB-BiSAR 的方位分辨率优于单基情况的导弹方位分辨率。当单基方位分辨率大于 1 m 时,大部分情况 SMB-BiSAR 的方位分辨率是更优于单基导弹的方位分辨率。另外,由单基情况下导弹的方位分辨率 $\rho_a=1.14$ m 的方位分辨率图可知,发射站和接收站运动方向的夹角越大,方位分辨率越差。当 $\alpha=0$ 时,发射站和接收站运动方向相同,方位分辨率效果最佳。

5 结语

SMB-BiSAR 作为一种特殊的成像模型,将卫星平台独特的空间特性与导弹的机动灵活优势相结合,可以实现对目标区域的精确定位、制导等功能。本文针对 SMB-BiSAR 这一特殊成像体制,分别在地心固定坐标系和参考点本地坐标系中,构建空间几何模型,对收发平台的成像模型进行矢量描述,得到目标的距离历程以及回波信号模型。然后,利用距离等值线与多普勒等值线的正交关系,对接收站的飞行路径约束条件进行分析,根据距离分辨率与多普勒分辨率与两者梯度的关系,得到 SMB-BiSAR 距离和方位分辨率的计算公式。最后,通过仿真实验对 SMB-BiSAR 的大前斜和前视成像能力进行验证。仿真结果验证了本文分析方法的有效性。

参考文献

[1] 张乃通, 赵康健, 刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230.

[2] 杨建宇. 双基地合成孔径雷达技术[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(4): 482-501.

[3] 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.

[4] ZHA Y B, PU W, HUANG Y L. Fast Factorized

- Backprojection Imaging Algorithm Integrated with Motion Trajectory Estimation for Bistatic Forward-Looking SAR [C]//2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan: IEEE, 2019.
- [5] ENDER J H, WALTERSCHEID I, BRENNER A R. New Aspects of Bistatic SAR: Processing and Experiments [C]//IGARSS. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2004: 1758-1762.
- [6] 陈麒, 祝明波, 邹小海, 等. 一般构型双基地 SAR 成像分辨特性分析 [J]. 信号处理, 2017, 33(6): 775-780.
- [7] NIES H, LOFFELD O, NATROSHVILL K. Analysis and Focusing of Bistatic Airborne SAR Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3342-3349.
- [8] 周鹏, 皮亦鸣. 星机双基地 SAR 空间几何关系与信号模型 [J]. 遥感学报, 2008, 12(5): 750-758.
- [9] 孙稚超. 基于 GEO 辐射源的星机 SAR 成像理论与方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [10] 孟自强, 李亚超, 胡奇, 等. 弹载双基前视 SAR 建模及运动/同步误差分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(3): 523-531.
- [11] 刘文康, 孙光才, 陈溅来, 等. 高轨星机 BiSAR 分辨率分析及成像参数优化设计 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3152-3158.
- [12] SUN Z C, WU J J, PEI J F. Inclined Geosynchronous Spaceborne-Airborne Bistatic SAR: Performance Analysis and Mission Design [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(1), 343-357.
- [13] YANG Y, ZHANG X, ZUO Z, et al. An Imaging Method and the Correction of Distortion for Spaceborne-Airborne Bistatic SAR [C]// IEEE IGARSS. Cape Town, South Africa: IEEE, 2009: 625-628.
- [14] CLEMENTE C, SORAGHAN J J. Approximation of the Bistatic Slant Range Using Chebyshev Polynomials [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 682-686.
- [15] 陈麒, 李相平, 祝明波, 等. 基于切比雪夫多项式的双基地前视 SAR 成像算法 [J]. 控制与决策, 2019, 34(6): 1241-1246.
- [16] ZENG T, CHERNIAKOW M, LONG T. Generalized Approach to Resolution Analysis in BiSAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(2): 461-474.
- [17] CHEN S, YUAN Y, ZHANG S N. A New Imaging Algorithm for Forwarding-Looking Missile Borne Bistatic SAR [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, 2016, 9(4): 1543-1552.
- [18] 梅海文, 李亚超, 邢孟道. 机-弹双基前视 SAR 俯冲段轨迹设计方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 752-758.
- [19] 吴雪微. 星弹双基 SAR 前视成像研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [20] 唐世阳. 曲线运动轨迹 SAR 成像方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- [21] CARDILLO G P. On the Use of Gradient to Determine Bistatic SAR Resolution [C]//International Symposium on Antennas and Propagation Society. Dallas, TX, USA: IEEE, 1990: 1032-1035.
- [22] GUO P, ZHANG L R, Tang S Y. Resolution Calculation and Analysis in High-Resolution Spaceborne SAR [J]. Electronic Letter, 2015, 51(15): 1199-1201.

(编辑:徐楠楠)