

DOI:10.7652/xjtuxb201408006

双/多基地合成孔径雷达前视三维 分辨力研究及运动参数设计

孟自强, 李亚超, 李浩林, 邢孟道, 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 为了准确获取高空高速双/多基地合成孔径雷达(B/M-SAR)目标回波的二维空变特性,建立了空间几何运动构型,借助梯度法和模糊函数理论,对B/M-SAR的前视三维成像能力和分辨特性进行了分析和研究,并基于分辨力的变化特性,设计了影响成像分辨力的主要运动参数。研究表明:B/M-SAR具有前视三维成像能力,成像场景存在最佳成像区域和发射机平台最佳飞行时段;多普勒分辨力和地距分辨力均具有二维空变性,目标纵坐标的增大会引起地距分辨能力增强,且在发射机旋转角度 270° 处达到最优;高度向分辨力不具有位置空变性,在接收机运行至目标区域正上方时分辨性能最佳;要达到1 m的地距分辨力和2 m的高度分辨力,应选择234.7 MHz的发射信号带宽。

关键词: 合成孔径雷达;前视三维成像;分辨特性;参数设计

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)08-0029-07

Capability Study of Three-Dimensional Forward-Looking Resolution and Motion Parameter Design for Bistatic/Multi-Static Synthetic Aperture Radar

MENG Ziqiang, LI Yachao, LI Haolin, XING Mengdao, BAO Zheng

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A study is conducted on three-dimensional (3D) forward-looking imaging capability and resolution property of bistatic/multi-static synthetic aperture radar (B/M-SAR) in high-space and high-speed state to accurately obtain two-dimensional (2D) variance characteristics of target echo in this configuration. A geometric model is built, and the gradient method and the ambiguity function method are adopted in analysis and simulations. And main motion parameters that affect resolution significantly are designed. The analysis and simulation results show that B/M-SAR possesses the 3D forward-looking imaging capability and there exist the optimal resolution area in the imaging area and the optimal motion period of transmitter. Both the Doppler resolution and the range resolution have 2D variant, but the range resolution becomes better as the y-axis of target increases and reaches the best performance at the transmitter rotation angle of 270° . Height resolution is invariant in location and performs the best as receiver moves on the right above of the target area. Transmitting signal bandwidth of 234.7 MHz should be chosen to obtain range resolution of 1 meters and height resolution of 2 meters.

Keywords: synthetic aperture radar; three-dimensional forward-looking imaging; resolution property; parameter design

收稿日期: 2013-12-05。 作者简介: 孟自强(1988—),男,博士生;李亚超(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61001211,61303035);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(K5051202016)。

网络出版时间: 2014-06-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140618.1143.011.html>

高空高速双/多基地合成孔径雷达(SAR)协同组网成像构型在接收机前视模式下具有潜在的前视三维成像能力,作为未来合成孔径雷达的一种发展趋势,在军事对地侦察、无人机协同作战以及民用环境监测等领域具有巨大的应用潜力^[1-2]。因具备收发平台分置、几何关系配置灵活和抗干扰能力强等特点,双/多基地雷达的协同组网技术引起了越来越多的关注。

不同的 SAR 构型会对成像机理、成像性能以及回波信号特性产生影响,因此需要对不同构型下的 SAR 成像机理、成像性能和回波信号特性进行研究,从理论上反映场景的成像可能性及构型对目标的分辨能力。作为一种双基雷达组网方式,双基前视圆周 SAR 相对于传统单/双基直线 SAR,在运动过程中可以对正前方目标进行多视角观测^[3],在获得距离和方位向二维分辨力的同时又可得到目标的高度维信息^[4-5]。

本文以双基前视圆周 SAR(BF-CSAR)为研究对象,基于文献[6-8]中的方法,对双/多基地 SAR 的前视三维成像能力进行了研究,建立了运动几何关系,并根据梯度法和模糊函数理论,给出了场景任意位置点目标分辨特性的精确解析式;仿真得到的分辨特性曲线验证了分析方法的有效性和场景成像可能性,以便选取最佳成像区域和飞行时段。本文对影响成像分辨力的主要运动参数进行了设计,为今后开展双/多基地 SAR 构型下整体系统设计和前视三维成像算法的研究奠定了理论基础。本文的研究结果,可应用于双/多基地 SAR 协同组网成像构型的性能研究。

1 BF-CSAR 前视三维成像能力分析

传统的直线 SAR 只能形成二维分辨力,不能反映目标高度对雷达与目标间斜距的贡献,而传统的单基圆周 SAR 可具备三维成像能力^[3]。本文基于单基圆周 SAR 的运动特性,重点分析双基前视圆周 SAR 构型下的前视三维分辨能力。

在双基前视圆周 SAR 构型下,场景中心位于坐标原点,发射机 T 以场景中心为圆心,以雷达在目标平面的垂足到场景中心的距离为半径作逆时针匀速圆周运动,波束中心指向场景中心;接收机 R 沿 y 轴方向飞行,前视接收成像区域回波信号;发、收机飞行高度分别为 H_T 和 H_R ,发射机运行圆周半径为 R_T ,角速度为 ω ,接收机飞行速度为 V_R ;两波束共同覆盖范围内存在点目标 $P(x, y, z(x, y))$,其中

$z(x, y)$ 表示目标高度,发射机、接收机的波束照射范围分别为 A, B 区域。双基前视圆周 SAR 的运动几何关系如图 1 所示。本文为突出重点、简化推导,将收、发机飞行高度均设为常量。

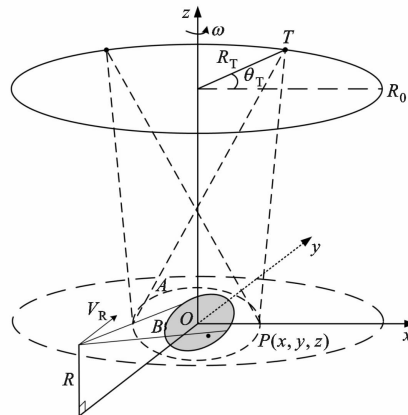


图1 双基前视圆周 SAR 的运动几何关系示意图

定义发射机位于图中 T_0 位置的时刻为方位 0 时刻,此时接收机位于 (x_{R0}, y_{R0}, H_R) 。在某一方位 η 时刻,发射机旋转角度为 θ_T ,点目标到两平台的瞬时斜距分别为 $d_{T,\eta}$ 和 $d_{R,\eta}$,此时雷达到目标之间的双基斜距可表示为

$$d_{bi} = d_{T,\eta} + d_{R,\eta} = \sqrt{(x - R_T \cos \theta_T)^2 + (y - R_T \sin \theta_T)^2 + (z(x, y) - H_T)^2}^{1/2} + \sqrt{(x - x_{R0})^2 + (y - y_{R0} - V_R \eta)^2 + (z(x, y) - H_R)^2}^{1/2} \quad (1)$$

式中:下标 bi 表示双基平台。

假设地形起伏幅度远小于雷达至目标的距离,定义 θ_1 和 θ_2 分别表示发、收机相对于目标的俯视角,则式(1)存在如下近似

$$d_{bi} \approx d_{bi0}(x, y) - z(x, y)(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad (2)$$

式中

$$d_{bi0}(x, y) = \sqrt{(x - R_T \cos \theta_T)^2 + (y - R_T \sin \theta_T)^2 + H_T^2}^{1/2} + \sqrt{(x - x_{R0})^2 + (y - y_{R0} - V_R \eta)^2 + H_R^2}^{1/2} \quad (3)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{H_T}{\sqrt{(x - R_T \cos \theta_T)^2 + (y - R_T \sin \theta_T)^2 + H_T^2}^{1/2}} \quad (4)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{H_R}{\sqrt{(x - x_{R0})^2 + (y - y_{R0} - V_R \eta)^2 + H_R^2}^{1/2}} \quad (5)$$

假设成像区域的目标分布函数为 $f(x, y)$,雷达发射信号为 $p(t)$,则雷达发射机在旋转角度为 θ_T 、距离时间为 t 时获得的 SAR 回波信号为

$$s(t, \theta_T) = \iint_{y,x} f(x, y) p\left(t - \frac{d_{bi}}{c}\right) dx dy \quad (6)$$

式中: c 为光速。对式(6)取傅里叶变换,可得到

$$s(f, \theta_T) = P(f) \exp[j2\pi f z(x, y)(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)/c] \int_{y_0} \int_x f(x, y) \exp(-j2\pi f \frac{d_{\text{bi0}}}{c}) dx dy \quad (7)$$

式中: $P(f)$ 为发射信号 $p(t)$ 的频谱; $\exp[j2\pi f z(x, y)(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)/c]$ 表示目标高度在收、发平台与目标距离连线上的投影所导致的信号相位偏移,当不存在此项时即可利用常规算法反解出目标分布函数 $f(x, y)$, 此项的存在会导致目标区域的图像散焦。如果在对目标区域成像前,先对高度 $z(x, y)$ 处的信号进行相位补偿,得到补偿后的接收信号

$$s_{\text{com}}(f, \theta_T) = s(f, \theta_T) \exp[-j2\pi f \cdot z(x, y)(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)/c] \quad (8)$$

再对相位补偿后的数据进行成像,即可在不同高度 $z(x, y)$ 处获得聚焦的成像结果。为实现对该项的补偿,可采用迭代搜索取最大相关值的方法,也可采用投影空间转换的思想^[9] 计算得到目标的高度参量,从而构造相位补偿函数。

由以上分析可知,双基前视圆周 SAR 可实现正前方目标的三维成像,相对传统单/双基直线 SAR 及单基圆周 SAR,具有独特优势。

2 分辨特性研究

基于前文对双基前视圆周 SAR 三维成像能力的分析,本节从地距分辨力、多普勒分辨力以及高度向分辨力 3 个方面进行分析和讨论。首先从斜距平面内分析二维分辨特性,然后投影到水平面上得到水平面内相应的地距分辨力和多普勒分辨力,再从模糊函数的角度分析高度向分辨力,最后给出三维分辨力的理论精确解析式并分析指出影响分辨力的参量。如前文所述,相对于传统直线 SAR 的二维分辨能力,双基前视圆周 SAR 的优势在于对不同高度目标的分辨能力,所以这里重点分析高度向分辨力。

2.1 地距分辨力

利用文献[10]的梯度理论,方位 η 时刻的地距分辨力可表示为

$$\rho_g = \frac{c}{2B \cos(\beta_g/2)} = \frac{(c/B)/[(K_1 \cos\theta_P - K_2 \cos\theta_T + \sin\theta_R)^2 + (K_1 \sin\theta_P - K_2 \sin\theta_T + \cos\theta_R \sin\phi_R)^2]^{1/2}}{1} \quad (9)$$

式中: B 为信号带宽; β_g 为双基夹角 β 在水平面内的投影,下标 g 表示地平面; θ_P 表示目标与 O 的连线与 x 轴的夹角,如图 2 所示; θ_R 和 ϕ_R 分别为接收机相对目标的瞬时斜视角和瞬时下视角,可表示如下

$$\theta_R = \arcsin \frac{x}{d_{R,\eta}}; \quad \phi_R = \arccos \frac{H_R}{d_{R,\eta} \cos\theta_R} \quad (10)$$

K_1 和 K_2 为角度系数,可表示为

$$K_1 = \cos\phi_T \tan\varphi \cos\delta + \sin\phi_T \cos\alpha; \quad K_2 = \cos\phi_T \tan\varphi \quad (11)$$

其中, φ 为雷达下视角, ϕ_T 表示发射机相对目标的瞬时视角, δ 表示图 2 中三角形 $\Delta POT'$ 中线段 OT' 、 OP 之间的夹角, T' 为发射机 T 在水平面的投影, α 为线段 PO 、 PT' 之间的夹角。角度 φ 、 ϕ_T 、 δ 及 α 可表示如下

$$\varphi = \arctan \frac{R_T}{H_T}; \quad \phi_T = \arccos \frac{H_T}{d_{T,\eta}} \quad (12)$$

$$\delta = \arccos \frac{x \cos\theta_T + y \sin\theta_T}{(x^2 + y^2)^{1/2}} \quad (13)$$

$$\alpha = \arccos \frac{x(x - R_T \cos\theta_T) + y(y - R_T \sin\theta_T)}{d_{R,\eta} \sin\phi_R (x^2 + y^2)^{1/2}} \quad (14)$$

不失一般性,当点目标 P 位于原点时, $\Delta POT'$ 则退化为单个点,此时令 $\cos\delta=0$, $\cos\alpha=0$ 。

地距分辨力 ρ_g 反映了系统构型在水平面内分辨 2 个目标的能力,在给定发射信号带宽 B 时, ρ_g 与投影角 β_g 有关。对于某一点目标,在不同的方位时刻,相对收发机的斜视角和雷达视角数值也不相同,即 ρ_g 具有方位时变性,而对于不同位置的点目标,目标参数 θ_P 、 ϕ_T 、 θ_R 、 ϕ_R 等也会发生变化,即 ρ_g 又具有空变性。

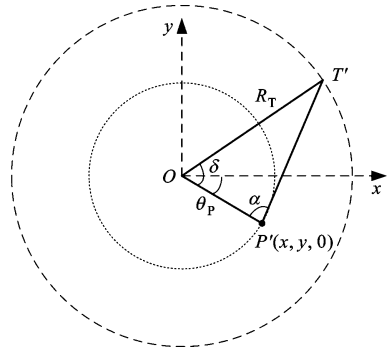


图 2 发射机水平面投影几何关系

2.2 多普勒分辨力

多普勒分辨力可表示为

$$\rho_d = (\lambda/T) / \{ [\omega_T \sin\theta_T + \omega_T K_1 \sin(\theta_P - \theta_T) \cdot (K_1 \cos\theta_P - K_2 \cos\theta_T) + \omega_R \Theta_2]^2 + [\omega_T \cos\theta_T + \omega_T K_1 \sin(\theta_P - \theta_T) \cdot (K_1 \sin\theta_P - K_2 \sin\theta_T) - \omega_R \Theta_1]^2 \}^{1/2} \quad (15)$$

式中: T 为相干积累时间; ω_T 和 ω_R 表示点目标相对于发射机和接收机的瞬时角速度; Θ_1 和 Θ_2 为角

系数。

$$\begin{aligned} w_T &= \frac{\omega R_T}{d_{T,\eta}}; \quad \Theta_1 = 1 - \cos^2 \theta_R \sin^2 \phi_R; \\ w_R &= \frac{V_R}{d_{R,\eta}}; \quad \Theta_2 = \sin \theta_R \cos \theta_R \sin \phi_R \end{aligned} \quad (16)$$

多普勒分辨力 ρ_d 与信号波长 λ 、相干积累时间 T 、运动平台的瞬时角频率以及收发平台角度等参数有关。与地距分辨力类似,多普勒分辨力也具有方位时变性和位置空变性。

2.3 高度向分辨力

本文借助文献[11]中模糊函数的概念对 BF-CSAR 的高度向分辨力进行分析研究。该构型下的广义模糊函数可写为

$$\chi(d_{bi}, d_{ref}) = \iint p\left(t - \frac{d_{bi}}{c}\right) p^*\left(t - \frac{d_{ref}}{c}\right) dt d\theta_T \quad (17)$$

式中: d_{ref} 为参考点 $d_{ref}(x_0, y_0, z_0(x, y))$ 到收发机两端的距离和, 类比式(2), d_{ref} 存在如下近似

$$d_{ref} \approx d_{bi0}(x_0, y_0) - z_0(x, y)(\sin \theta_3 + \sin \theta_4) \quad (18)$$

式中: θ_3, θ_4 分别为发、收机相对于参考点的俯视角。

根据帕斯瓦尔定理, 式(15)又可表示如下

$$\begin{aligned} \chi(d_{bi}, d_{ref}) &= \frac{1}{2\pi\omega} \iint \frac{1}{|\alpha|} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\pi|\alpha|^2} \alpha_1 + \right. \\ &\quad \left. j \frac{\omega}{c} \Delta d\right] d\omega d\theta_T = \int \frac{2^{1/2} T_p}{2} \exp\left[j \frac{\omega_0}{c} \Delta d - \right. \\ &\quad \left. \frac{\pi}{2c^2} \left(\frac{1}{T_p^2} + B^2\right) (\Delta d)^2\right] d\theta_T \end{aligned} \quad (19)$$

式中: T_p 表示信号脉冲宽度; B 为信号带宽; $\alpha_1 = 1/T_p^2$; $\alpha = 1/T_p^2 + jB/T_p$ 。

高度向分辨力可由以下归一化模糊函数得到

$$N(d_{bi}, d_{ref}) = \left| \frac{\chi(d_{bi}, d_{ref})}{\chi(d_{ref}, d_{ref})} \right| \quad (20)$$

假设散射点与参考点的横纵坐标均相同, 即 $x = y = x_0 = y_0 = 0$, 记 $z(x, y) = z, z_0(x, y) = z_0$, 并令 $\Delta d = d_{bi} - d_{ref} = \Delta h(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)$, $\Delta h = z - z_0$, 将 Δd 代入式(18), 可得到如下关系

$$\begin{aligned} N(d_{bi}, d_{ref}) &\propto \\ \exp\left[-\frac{\pi}{2c^2} \left(\frac{1}{T_p^2} + B^2\right) (\Delta h(\sin \theta_1 + \sin \theta_2))^2\right] \end{aligned} \quad (21)$$

定义 $N(d_{bi}, d_{ref})$ 衰减至 e^{-1} 时的 Δh 为 BF-CSAR 的高度向分辨力^[11], 考虑到雷达信号 $BT_p \gg 1$ 的特性, 则高度向分辨力为

$$\rho_h = \frac{2^{1/2} c}{B\pi^{1/2}(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)} \quad (22)$$

ρ_h 反映了系统构型在高度维分辨 2 个目标的能力。由式(22)可知: θ_1 表示雷达下视角 φ 的余

角; $\sin \theta_2$ 是 η 的函数, 表示接收机平台运行高度在接收机相对场景中心斜距上的投影。因此, 在给定发射信号带宽 B 时, ρ_h 既受到发射机平台下视角 φ 的影响, 同时也随方位时间变化; 与水平面方向分辨力(包括 ρ_g 和 ρ_a)不同的是, ρ_h 与目标参数 $\theta_p, \phi_T, \theta_R, \phi_R$ 等无关, 即 ρ_h 不具有位置空变性。

上述对 ρ_g, ρ_d 和 ρ_h 的理论表达式, 可普适地用于在发射机处于不同旋转角度 θ_T 下对场景任意位置点目标的双基前视成像。发射机旋转角度在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化, 按照每个阶段 90° 划分, 可分为 4 个不同阶段(分别称为 1、2、3、4 阶段), 在每个阶段内场景中点目标分辨力特性各不相同, 下面将进行详细分析和仿真实验验证。

根据 ρ_g 和 ρ_d 的方位时变性和空变性以及 ρ_h 的方位时变性特点可知: 场景中存在最佳成像区域, 运动平台也会存在最佳飞行时段。由于 ρ_d 理论值很小^[12], 在发射机运行周期内变化也很小, 对成像影响较大的是 ρ_g , 因此本文主要针对 ρ_g 分析最佳成像区域和最佳飞行时段。根据式(9)和(15), ρ_g 和 ρ_d 与目标高度无关, 故可将各个点目标向水平面投影并按照 x (横坐标)、 y (纵坐标)轴方向划分为 4 个象限。由式(9)可知: 在同一方位时刻, 场景中目标纵坐标的增大会引起 ρ_g 减小; 位于 y 轴上的点目标的 ρ_g 在第 1、2 阶段单调递增, 在第 2、3 阶段单调递减, 且在旋转角度 270° 处达到最小。不在 y 轴上的点目标的 ρ_g , 其最优时刻会有所偏移。关于 ρ_h , 由式(22)可知: 当发射机在运行过程中, 接收机运行至目标场景正上方时, 高度向分辨力达到最优。

基于以上理论分析, 可根据实际具体分辨力的要求选择合适的成像区域或平台飞行时段。关于场景中不同位置点目标和不同飞行时段的分辨特性在后面进行了仿真和分析。

3 分辨特性仿真及分析

为使分析更具普遍性和适用性, 这里选取位于场景中心和不同象限内具有不同高度的 9 个目标点, 取发射机处于图 1 中 T_0 点时为方位 0 时刻, 针对发射机处于不同飞行阶段的分辨特性进行了仿真, 其中参数设置如表 1 所示。图 3 为三维方向上场景目标点的分布位置图, 其中 O 点为场景中心, A, B, C, D 这 4 个目标点处于同一高度, E, F, G, H 这 4 个目标点处于同一高度, 场景各目标位置点的 ρ_d 和 ρ_g 的变化规律如图 4 所示。

表 1 双基前视圆周 SAR 仿真参数

收、发机	运行速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	平台高 度/km	方位波束 角/ $^{\circ}$	俯仰波束 角/ $^{\circ}$	下视 角/ $^{\circ}$	脉冲宽 度/ μs	中心频 率/GHz	信号带 宽/MHz
发射机	4 500	10	3	3	30	45	9.65	140
接收机	150	5	3	3	62	45	9.65	140

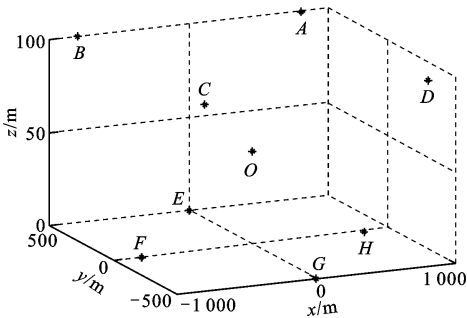
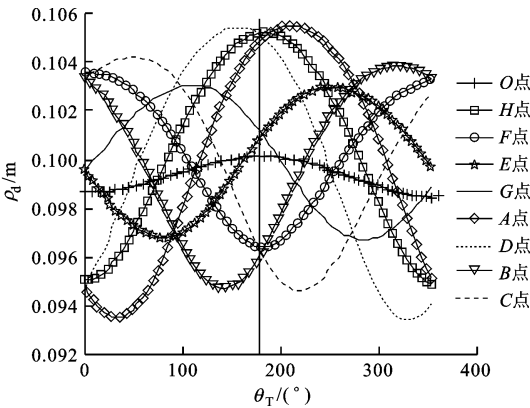
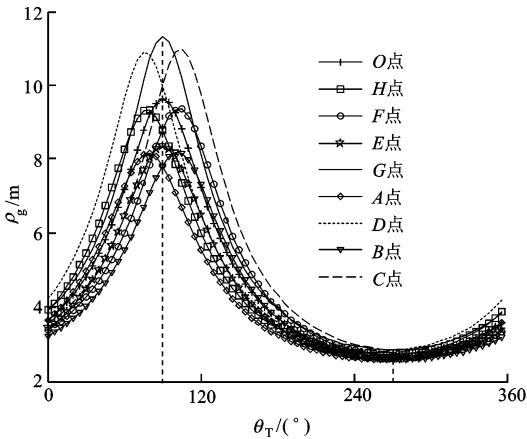


图 3 场景目标点分布位置图

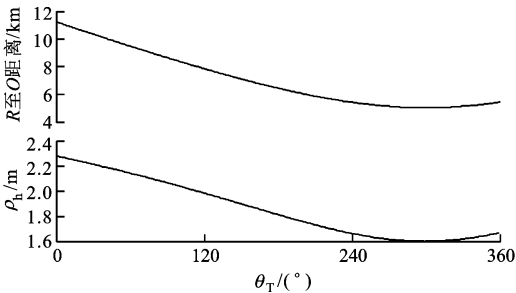
由图 4a 可以看出:关于 x 轴对称的 F 、 H 两目标点,其 ρ_d 变化曲线均关于旋转角度 180° 处对称,但变化规律相反;图 4b 中,分布在 y 轴上的目标点的 ρ_g ,在第 1、4 阶段分辨能力变弱,在第 2、3 阶段分辨能力增强,且在 90° 处分辨性能最差,在 270° 处最佳,如 E 、 O 和 G 目标点。



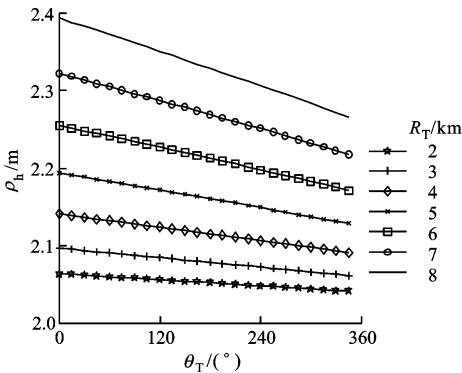
(a)多普勒分辨力变化规律



(b)地距分辨力变化规律



(c)高度向参数变化规律



(d)发射机运行半径对高度向分辨力的影响

图 4 场景目标位置点的分辨特性变化规律

纵坐标较大的 A 、 B 、 E 点处的 ρ_g 明显小于其他目标点,纵坐标最小的 C 、 D 、 G 点处的 ρ_g 最大。另外,场景中不在 x 、 y 轴上的目标点,其水平面方向的分辨力曲线会发生相应的偏移。例如,位于 x 负半轴两侧的 B 和 C 相对于 F 分别在 145° 和 220° 处取得最小 ρ_d ;位于 y 负半轴两侧的 C 和 D 相对于 G 分别在 101° 和 79° 处取得最大 ρ_g 。

为更好地验证 ρ_h 随旋转角度的变化规律,本文仿真时将接收机速度取为 $1\,500\text{ m/s}$,接收机波束一直照射场景区域,其他参数与表 1 相同。由于 ρ_h 不具有空变性,所以场景中 9 个目标点的高度向分辨力随方位时间的变化曲线重合在一起,如图 4c 所示。当接收机从 0 时刻运行到目标场景正上方(对应图中 300°)的过程中,分辨能力增强;当接收机远离目标区域时,分辨能力减弱。但应注意的是,接收

机在实际前视接收过程中,一般在到达场景正上方之前就已完成对回波信号的录取,可见在实际飞行过程中高度向分辨能力在一直增强。图4d为 ρ_h 随发射机圆周半径的变化规律,发射机飞行高度不变,圆周半径从2 km到8 km的增大会引起雷达下视角增大,进而导致 ρ_h 变大,分辨能力减弱。

4 运动参数设计

根据以上对分辨力的分析研究和仿真验证结果,下面给出影响分辨力主要运动参数的设计思想,为后续整体系统设计和算法研究奠定基础。运动参数主要包括:波束下视角、发射机运行圆周半径、发射机圆周线速度、接收机速度、信号带宽等。

设收发平台的高度均为 H ,波束中心的下视角均为 φ ,到场景中心斜距为 d_s ,俯仰波束宽度 β_r 。图5是雷达俯仰照射示意图。

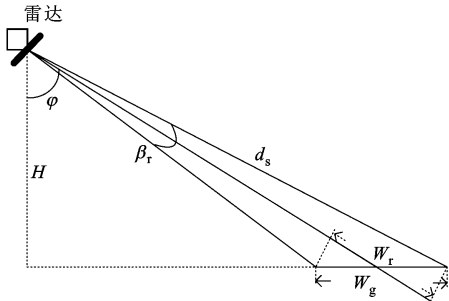


图5 雷达俯仰照射示意图

合成孔径长度可表示为

$$L = \beta_r d_s = \beta_r H / \cos \varphi \tag{23}$$

根据几何关系确定发射机运行圆周半径

$$R_T = H \tan \varphi \tag{24}$$

以及接收机速度

$$V_R = L / T_a = H \beta_r / (T_a \tan \varphi) \tag{25}$$

式中: T_a 为合成孔径时间,可由多普勒分辨力要求确定。在 T_a 时间内发射机转过的角度可表示为

$$\Delta \theta = V_T T_a / (H \tan \varphi) \tag{26}$$

发射机平台速度可根据式(26)确定

$$V_T = \Delta \theta H \tan \varphi / T_a \tag{27}$$

若平台高度 $H = 10$ km,俯仰波束宽度 $\beta_r = 10^\circ$,合成孔径时间 $T_a = 5$ s,合成孔径时间内 $\Delta \theta = 45^\circ$,为了保证目标有一定能量的散射回波,对于不同的波束下视角所对应的平台速度和发射机圆周半径的设计参数如表2所示。

由前文所述,信号带宽 B 主要影响地距分辨力和高度向分辨力。为确定发射信号带宽,将式(9)和式(22)重写如下

表2 平台速度和圆周半径设计参数

编号	$\varphi / (^\circ)$	$V_T / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_R / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	R_T / km
1	30	906.9	604.6	5.774
2	40	1 318.1	416.0	8.391
3	50	1 872.0	292.9	11.918

$$\rho_g = \frac{a_r c}{2B \cos(\beta_g/2)} \tag{28}$$

$$\rho_h = \frac{2^{1/2} a_r c}{B \pi^{1/2} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)} \tag{29}$$

式中: a_r 为加权后分辨力的扩展因子,一般可取 $a_r = 1.47$ 。由式(28)和(29)即可确定发射带宽

$$B = \max \left[\frac{a_r c}{2 \rho_g \cos(\beta_g/2)}, \frac{2^{1/2} a_r c}{\rho_h \pi^{1/2} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)} \right] \tag{30}$$

结合图1运动几何构型, $\sin \theta_1$ 和 $\sin \theta_2$ 分别由式(4)和下式确定

$$\begin{aligned} \frac{H_R}{[(-H_R \tan(\varphi + \beta_r/2) + V_R T/2)^2 + H_R^2]^{1/2}} &\leq \sin \theta_2 \leq 1 \end{aligned} \tag{31}$$

对应不同的分辨力要求,具体选择的发射信号带宽如表3所示。

表3 发射信号带宽设计参数

编号	ρ_g / m	ρ_h / m	B / MHz
1	10	10	23.5
2	5	5	46.9
3	1	2	234.7
4	0.3	0.5	782.2

需要指出,在给定 ρ_g 和 ρ_h 情况下,发射信号带宽选择越宽,分辨力的富余量越大,并且允许较重的加权处理以减小旁瓣,但是频带越宽,要求的采样率就会越高,导致数据变大,系统灵敏度下降。因此,在选择频宽时要加以综合权衡。

5 结束语

相对于传统单/双基直线SAR,B/M-SAR成像构型具有高度向分辨的优势,可实现对目标的前视三维成像。本文针对高速高空B/M-SAR的成像性能和分辨特性进行了研究,可有效指导成像场景最佳成像区域和平台最佳飞行时段的选取,以及对影响分辨力主要参数的设计,为后续该构型下整体系统设计和算法研究工作提供理论依据。

参考文献:

- [1] 闵锐. 机载 SAR 三维成像理论及关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [2] 郭冠斌, 方青. 雷达组网技术的现状与发展 [J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(4): 193-198.
GUO Guanbin, FANG Qing. Current status and development of radar netting technique [J]. Radar Science and Technology, 2005, 3(4): 193-198.
- [3] 宋千, 李杨寰, 梁福来, 等. 圆迹合成孔径雷达成像分辨力分析 [J]. 计算机仿真, 2011, 28(10): 18-23.
SONG Qian, LI Yanghuan, LIANG Fulai, et al. Analysis of circular SAR time-domain imaging resolution [J]. Computer Simulation, 2011, 28(10): 18-23.
- [4] PONCE O, PRATS-IRAOLA P, PINHEIRO M, et al. Fully polarimetric high-resolution 3-D imaging with circular SAR at L-band [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3074-3090.
- [5] LIN Yun, HONG Wen, TAN Weixian, et al. Airborne circular SAR imaging: results at P-band [C] // Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 5594-5597.
- [6] QIU Xiaolan, HU Donghui. Some reflections on bistatic SAR of forward-looking configuration [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 735-739.
- [7] AI Xiaofeng, ZOU Xiaohai, LIU Jin. Bistatic high range resolution profiles of precessing cone-shaped targets [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2013, 7(6): 615-622.
- [8] ZENG Tao, CHERNIAKOV M, LONG Teng. Generalized approach to resolution analysis in BSAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(2): 461-474.
- [9] PARK S H, KIM H T, KIM K T. Cross-range scaling algorithm for ISAR images using 2-D Fourier transform and polar mapping [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(2): 868-877.
- [10] CARDILLO G P. On the use of gradient to determine bistatic SAR resolution [C] // Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1990: 1032-1035.
- [11] ISHIMARU A, CHAN T K, KUGA Y. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1524-1530.
- [12] WU Junjie, YANG Jianyu, YANG Haiguang, et al. Optimal geometry configuration of bistatic forward-looking SAR [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1117-1120.

(编辑 刘杨)

(上接第 11 页)

- [11] 李建东. 信息网络理论基础 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [12] DEVECIANA G. Leaky buckets and optimal self-tuning rate control [C] // Proceedings of IEEE Global Telecommunication Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-5.
- [13] KELLY F P. Reversibility and stochastic networks [M]. New York, USA: Wiley, 1979.
- [14] TENG J. A study of optical burst switched networks with the jumpstart just-in-time signaling protocol [D]. Raleigh, NC, USA: North Carolina State University, 2004.
- [15] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [16] KENDALL A, HAN Weimin. Elementary numerical analysis [M]. New York, USA: Wiley, 2004: 72-120.

[本刊相关文献链接]

- 李建东, 姜建, 刘鑫一. 采用时延限制和资源预测的异构无线网络选择策略. 2014, 48(2): 74-79. [doi: 10.7652/xjtuxb201402013]
- 卢冀, 肖嵩, 吴成柯. 无线网络中应用机会式网络编码的广播重传方法. 2011, 45(2): 68-72. [doi: 10.7652/xjtuxb201102014]
- 司江勃, 李赞, 刘增基. 无线协作网络中存在干扰时的中继选择协议. 2010, 44(2): 72-76. [doi: 10.7652/xjtuxb201002015]
- 吕政, 余志军, 刘海涛. 协作通信中联合信信道-网络编码的性能分析与资源分配. 2012, 46(4): 83-87. [doi: 10.7652/xjtuxb201204014]
- 魏全端, 刘俊, 韩九强. 改进的无线传感器网络无偏距离估计与节点定位算法. 2014, 48(6): 1-6. [doi: 10.7652/xjtuxb201406001]

(编辑 刘杨)