

基于 HQBA 的平移不变双基地 SAR 成像

耿旭朴^{①②} 闫鸿慧^① 余 慧^{①②} 王岩飞^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 该文使用 HQBA(Half Quasi-Bistatic Angle)的概念和驻定相位原理, 推导平移不变双基地 SAR 点目标回波信号的二维精确频谱, 深入分析频谱中各相位项的物理意义, 提出基于 HQBA 计算的 RD 成像处理流程, 并对平移不变双基地 SAR 的 HQBA, RCM 和成像效果进行仿真。结果表明, 该方法能有效校正平移不变双基地 SAR 的距离单元徙动, 提高成像质量。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 双基地 SAR; 平移不变; 距离单元徙动

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1288-04

Image Formation of Translational-Invariant Bistatic SAR Based on HQBA

Geng Xu-pu^{①②} Yan Hong-hui^① Yu Hui^{①②} Wang Yan-fei^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: By the method of stationary phase and the concept of HQBA (Half Quasi-Bistatic Angle), an exact two-dimensional spectrum of translational-invariant bistatic SAR is derived in this paper. Based on the analysis of every exponential term in the expanded spectrum, a flow chart of Range-Doppler algorithm with the computation of HQBA is proposed. Simulation results of HQBA, RCM and focused points are also provided. As they show, the proposed method can correct the RCM accurately, and improve the imaging quality.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Bistatic SAR; Translational Invariant (TI); Rang Cell Migration (RCM)

1 引言

双基地 SAR 的发射机和接收机分别位于不同的运动平台上, 接收机寂静工作, 不容易被侦察定位, 因而具有更强的电子对抗能力, 而且双基地 SAR 获取目标的双基地雷达截面积(RCS), 图像内容更丰富, 包含了更多的目标信息^[1,2]。双基地 SAR 已成为国际微波遥感领域研究的热门课题^[1-6]。

平移不变双基地 SAR 的发射平台和接收平台以相同速度沿平行轨道飞行, 不仅可以应用于机载系统, 在一定条件下, 分布式小卫星 SAR 中的任意一对发射和接收单元, 都可以近似为一个平移不变双基地 SAR 系统^[3]。由于双基地 SAR 几何构型的复杂性, 精确求解回波信号的二维频谱非常困难。Loffeld 模型^[4]根据二次泰勒级数近似把双基地 SAR 的方位频谱表示为两个伪单基项和一个双基变项。文献[2]采用等效单基量、双基因子和加权等效距离等参数, 将双基地 SAR 转化为单基地的形式, 但由于采用了 Fresnel 近似, 精度有限。文献[5]基于 series reversion 方法, 推导了双基地 SAR 级数形式的二维频谱, 级数中包含的项数越多, 精度越高, 但成像处理只能使用有限的项数。文献[6]首次提出了

HQBA 的概念, 运用 IDW(Instantaneous Doppler Wavenumber)方法, 得到双基地 SAR 波数域响应, 并研究波数域的近似成像算法。本文在此基础上, 使用 HQBA 的概念和驻定相位原理, 推导平移不变双基地 SAR 点目标回波信号的二维精确频谱, 详细分析频谱中各相位项的物理意义, 提出了基于 HQBA 计算的 RD 成像处理流程, 并对平移不变双基地 SAR 的 HQBA, RCM 和成像效果进行深入分析和仿真。

2 回波信号模型

平移不变双基地 SAR 的几何模型如图 1 所示, 发射机和接收机平台以相同速度 v 沿平行轨道飞行, 发射机高度为 H , 接收机高度为 h , 轨道的地面间距为 w , 测绘带中任意点目标 $P(r_{0R}, s_{0R})$ 到发射机轨道和接收机轨道的最近距离分别为 r_{0T} 和 r_{0R} , 发射机和接收机经过 $P(r_{0R}, s_{0R})$ 的距离最近点(Point of Closest Approach, PCA)的时刻分别为 s_{0T} 和 s_{0R} 。如果发射机落后接收机 Δs 时间(即 $s_{0T} = s_{0R} + \Delta s$), 那么沿航迹基线长度为 $L_A = v\Delta s$, 并在平台运动过程中保持不变。

假设系统发射线性调频信号, 调频率为 k , 从点目标 $P(r_{0R}, s_{0R})$ 反射的回波经过解调后可以表示为

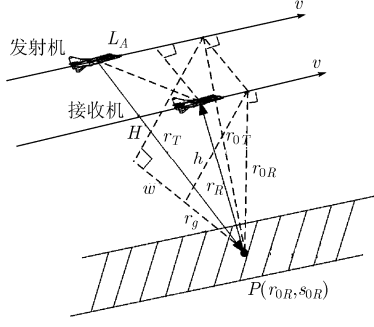


图1 平移不变双基地 SAR 几何模型

$$g(t, s, r_{0R}, s_{0R}) = \sigma(r_{0R}, s_{0R}) w_r \left(t - \frac{r}{c} \right) w_a(s - s_{cb}) \cdot \exp \left\{ j\pi k \left(t - \frac{r}{c} \right)^2 \right\} \exp \left\{ -j2\pi \frac{r}{\lambda} \right\} \quad (1)$$

式中 t 为快时间, s 为慢时间, $\sigma(r_{0R}, s_{0R})$ 为目标 RCS, $w_r(t)$ 为发射脉冲包络, $w_a(s)$ 为发射与接收的综合天线方向图, r 为发射机到目标与目标到接收机的距离和, 即

$$r = r_T + r_R = \sqrt{r_{0T}^2 + v_T^2 (s - s_{0T})^2} + \sqrt{r_{0R}^2 + v_R^2 (s - s_{0R})^2} \quad (2)$$

3 点目标的二维频谱

把式(1)作二维傅里叶变换, 得

$$G(f, f_a, r_{0R}, s_{0R}) = \sigma(r_{0R}, s_{0R}) W_r(f) \exp \left\{ -j\pi \frac{f^2}{k} \right\} \cdot \int w_a(s) \exp \left\{ -j2\pi \frac{f + f_0}{c} r - j2\pi f_a s \right\} ds \quad (3)$$

式中 $W_r(f)$ 为 $w_r(t)$ 的傅里叶变换。

令 $\varphi(s) = -2\pi \frac{f + f_0}{c} r - 2\pi f_a s$, 用驻定相位原理求解上

式中的积分

$$\left. \frac{d\varphi(s)}{ds} \right|_{s=s^*} = -2\pi \frac{f + f_0}{c} \cdot \left\{ \frac{v^2 (s^* - s_{0T})}{\sqrt{r_{0T}^2 + v^2 (s^* - s_{0T})^2}} + \frac{v^2 (s^* - s_{0R})}{\sqrt{r_{0R}^2 + v^2 (s^* - s_{0R})^2}} \right\} - 2\pi f_a = 0 \quad (4)$$

式(4)是一个关于 s^* 的一元八次方程, 根据阿贝尔定理^[7], 五次以及更高次的代数方程没有一般的代数解法, 因而难以得到该式的解析解。

令 θ_T 和 θ_R 分别为驻定相位时发射机和接收机的斜视角, 则

$$\sin \theta_T = \frac{v(s_{0T} - s^*)}{\sqrt{r_{0T}^2 + v^2 (s^* - s_{0T})^2}} \quad (5)$$

$$\sin \theta_R = \frac{v(s_{0R} - s^*)}{\sqrt{r_{0R}^2 + v^2 (s^* - s_{0R})^2}} \quad (6)$$

把式(5)和式(6)代入式(4), 得

$$\frac{cf_a}{v(f + f_0)} = \sin \theta_T + \sin \theta_R \quad (7)$$

由图1的几何关系知, 驻定相位时发射机到目标和目标到接收机的距离可以分别表示为

$$r_T = r_{0T} \cos \theta_T + v(s_{0T} - s^*) \sin \theta_T \quad (8)$$

$$r_R = r_{0R} \cos \theta_R + v(s_{0R} - s^*) \sin \theta_R \quad (9)$$

把式(7)~式(9)代入 $\varphi(s)$ 中, 化简为

$$\varphi(f, f_a, r_{0R}, s_{0R}) = -2\pi \frac{f + f_0}{c} \{ r_{0T} \cos \theta_T + r_{0R} \cos \theta_R + v(s_{0T} \sin \theta_T + s_{0R} \sin \theta_R) \} \quad (10)$$

$$\text{令 } r_\Sigma = \frac{r_{0T} + r_{0R}}{2}, \quad r_\Delta = \frac{r_{0T} - r_{0R}}{2} \text{ 和 } s_\Sigma = \frac{s_{0T} + s_{0R}}{2},$$

$$s_\Delta = \frac{s_{0T} - s_{0R}}{2}, \text{ 易得}$$

$$r_{0T} = r_\Sigma + r_\Delta, \quad r_{0R} = r_\Sigma - r_\Delta, \quad s_{0T} = s_\Sigma + s_\Delta, \quad s_{0R} = s_\Sigma - s_\Delta \quad (11)$$

把式(11)代入式(10)中, 整理得

$$\varphi(f, f_a, r_\Sigma, s_{0R}) = -2\pi \frac{f + f_0}{c} \cdot \{ r_\Sigma (\cos \theta_T + \cos \theta_R) + r_\Delta (\cos \theta_T - \cos \theta_R) + v [s_\Sigma (\sin \theta_T + \sin \theta_R) + s_\Delta (\sin \theta_T - \sin \theta_R)] \} \quad (12)$$

进一步令 $\zeta = \frac{\theta_T + \theta_R}{2}$, $\xi = \frac{\theta_T - \theta_R}{2}$, 并代入式(7)和式

(12)中, 可得

$$\frac{cf_a}{v(f + f_0)} = 2 \sin \zeta \cos \xi \quad (13)$$

$$\varphi(f, f_a, r_\Sigma, s_{0R}) = -2\pi \frac{f + f_0}{c} \cdot \{ 2r_\Sigma \cos \zeta \cos \xi - 2r_\Delta \sin \zeta \sin \xi + v [2s_\Sigma \sin \zeta \cos \xi + 2s_\Delta \cos \zeta \sin \xi] \} \quad (14)$$

把式(13)代入式(14)中, 消去 ζ 并整理得

$$\varphi(f, f_a, r_\Sigma, s_{0R}) = -2\pi f_a \left(s_\Sigma - \frac{r_\Delta \tan \xi}{v} \right) - \frac{4\pi}{\lambda} (r_\Sigma + v s_\Delta \tan \xi) \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{f}{f_0} \right)^2 \cos^2 \xi - \left(\frac{f_a}{2v/\lambda} \right)^2} \quad (15)$$

根据式(11), 式(15)和式(3), 并忽略由驻定相位原理产生的常数项, 点目标的二维频谱可以表示为

$$G(f, f_a, r_\Sigma, s_{0R}) = \sigma(r_{0R}, s_{0R}) W_r(f) W_a(f_a) \exp \left\{ -j\pi \frac{f^2}{k} \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_a \left(s_{0R} + \frac{\Delta s}{2} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ j2\pi f_a \frac{r_\Delta \tan \xi}{v} - j \frac{4\pi}{\lambda} \left(r_\Sigma + \frac{L_A \tan \xi}{2} \right) \right\} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{f}{f_0} \right)^2 \cos^2 \xi - \left(\frac{f_a}{2v/\lambda} \right)^2} \quad (16)$$

通过引入参数 ξ , 得到了平移不变双基地 SAR 点目标回波信号二维频谱的解析表达。由于没有采用任何近似, 该式是精确的。 ξ 即为文献[6]中定义的 HQBA, 表示驻定相位时发射机与接收机的斜视角之差的一半。当 $r_{0T} = r_{0R}$, $s_{0T} = s_{0R}$ 时, $\xi = 0$, 式(16)退化为单基地 SAR 的形式。

在平台运动过程中,沿航迹基线保持不变,驻定相位时

$$L_A = r_{0T} \tan \theta_T - r_{0R} \tan \theta_R \quad (17)$$

联立式(7)和式(17),可以用数值解法确定 θ_T 和 θ_R ,进而计算出 ξ 。值得注意的是, ξ 不仅与斜距 r_{0T} 和 r_{0R} 有关,还与二维频域的 f 和 f_a 有关,要同时反映这些依赖关系非常困难。如果系统发射窄带信号(即 $f \ll f_0$),式(7)可以简化为

$$\lambda f_a / v = \sin \theta_T + \sin \theta_R \quad (18)$$

这时联立式(17)和式(18),就可以得到距离-多普勒域中 ξ 的变化。

4 基于HQBA计算的RD算法

为进一步分析平移不变双基地SAR信号特征,把式(16)中的最后一项用泰勒级数在 $f=0$ 处展开,并整理得

$$G(f, f_a, r_\Sigma, s_{0R}) = \sigma(r_{0R}, s_{0R}) W_r(f) W_a(f_a) \cdot \exp\{j[\phi_{rc} + \phi_a + \phi_r + \phi_{az} + \phi_{RCM} + \phi_{SRC} + \phi_{c3} + \dots]\} \quad (19)$$

式(19)中各相位项的含义如下:

第1个相位项 ϕ_{rc} 为发射信号的频谱,表示距离调制信息,仅与 f 有关

$$\phi_{rc} = -\pi(f^2/k) \quad (20)$$

第2个相位项 ϕ_a 表示目标的方位位置信息。由于发射机和接收机可能非并排飞行,压缩后目标的响应位置相对接收机滞后 $\Delta s/2$,因此成像后图像沿方位向发生整体平移

$$\phi_a = -2\pi f_a \left(s_{0R} + \frac{\Delta s}{2} \right) \quad (21)$$

第3个相位项 ϕ_r 表示目标的距离位置信息。接收机以一定的A/D采样率对回波信号进行数字采样并存储,每个距离门对应的延时是电磁波从发射机到目标并从目标返回接收机的传播时间

$$\phi_r = -\frac{4\pi r_\Sigma}{c} f \quad (22)$$

第4个相位项 ϕ_{az} 仅与斜距和 f_a 有关,表示方位调制信息,可以在距离-多普勒域中通过匹配滤波予以消除

$$\phi_{az} = 2\pi f_a \frac{r_\Delta \tan \xi}{v} - \frac{4\pi}{\lambda} \left(r_\Sigma + \frac{L_A \tan \xi}{2} \right) D_B \quad (23)$$

其中 $D_B = \sqrt{\cos^2 \xi - \frac{f_a^2}{(2v/\lambda)^2}}$ 。

第5个相位项 ϕ_{RCM} 表示回波信号相对于 r_Σ 的距离单元徙动(Range Cell Migration, RCM),徙动量与 ξ , f_a 和 r_Σ 有关

$$\phi_{RCM} = -\frac{4\pi}{c} \left\{ r_\Sigma \left(\frac{\cos^2 \xi}{D_B} - 1 \right) + \frac{L_A \sin \xi \cos \xi}{2D_B} \right\} f \quad (24)$$

第6个相位项 ϕ_{SRC} 为二次距离压缩项(Second Range Compression, SRC),当斜视角较大时,该项的影响比较显著,应予以补偿

$$\phi_{SRC} = \pi(f^2/K_{src}) \quad (25)$$

其中 $\frac{1}{K_{SRC}} = \frac{2}{c} \left(r_\Sigma + \frac{L_A \tan \xi}{2} \right) \frac{\cos^2 \xi (\cos^2 \xi - D_B^2)}{f_0 D_B^3}$, K_{SRC} 为二次距离调频率。

第7个相位项 ϕ_{c3} 和省略的相位项表示距离和方位耦合的高次相位信息

$$\phi_{c3} = -\frac{4\pi}{c} \left(r_\Sigma + \frac{L_A \tan \xi}{2} \right) \frac{\cos^4 \xi (\cos^2 \xi - D_B^2)}{2f_0^2 D_B^5} f^3 \quad (26)$$

合成孔径雷达成像算法主要有RD算法^[8]、CS算法^[9]和Omega-k算法^[8,10]。对于平移不变双基地SAR成像,根据式(16)可知,考虑 ξ 在距离-多普勒域中的变化,Omega-k算法将不再适用;如果把式(24)对 $(r_\Sigma - r_{\Sigma ref})$ 进行一阶近似,忽略SRC随距离的变化,可以推导出CS算法,但由于计算 ξ 的复杂性,上述近似只能结合特定场景用数值解法获得。而RD算法则可以充分考虑 ξ 的影响,精确校正距离徙动,并结合多普勒中心随斜距的变化,因此本文采用RD算法对平移不变双基地SAR成像,处理流程和各相位函数如图2所示,其中SRC项在二维频域进行补偿,以测绘带中心为参考距离。 ξ , r_Σ 和 r_Δ 等双基参数的计算必然带来运算量的增加,但这些参数可以在雷达系统参数和工作场景确定后提前计算,以节省成像处理时间。

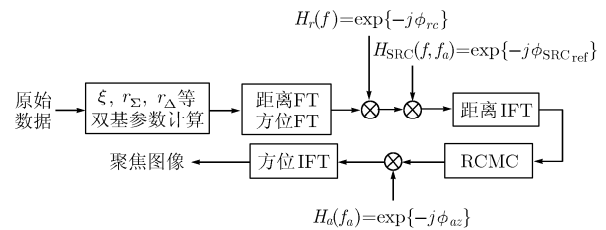


图2 基于HQBA计算的RD处理流程

5 仿真结果

为验证上述分析的有效性,本节对一个机载平移不变双基地SAR场景进行仿真,主要参数如下: $v=120\text{m/s}$, $H=4000\text{m}$, $h=3500\text{m}$, $w=300\text{m}$, $L_A=1200\text{m}$,发射机和接收机到测绘带中心的垂直距离分别为 8070m 和 7657m ,载波频率 9.6GHz ,脉冲宽度 $4\mu\text{s}$,发射信号带宽 100MHz ,距离向采样频率 125MHz 。场景中包含5个沿距离向分布的点目标,中间点位于测绘带中心,相邻两点的 r_Σ 之差为 100m 。这里假设地面是水平的,不考虑高度起伏变化。

5.1 HQBA

式(17)和式(18)表明,在距离-多普勒域中, ξ 随 f_a 和斜距都会发生变化。图3(a),3(b)和3(c)分别对发射机的斜视角 θ_{T0} 为 0.6° 和 15° 时的 ξ 进行了仿真。图3(a)中,尽管发射机正侧视工作,但由于接收机后斜视工作,使得多普勒频

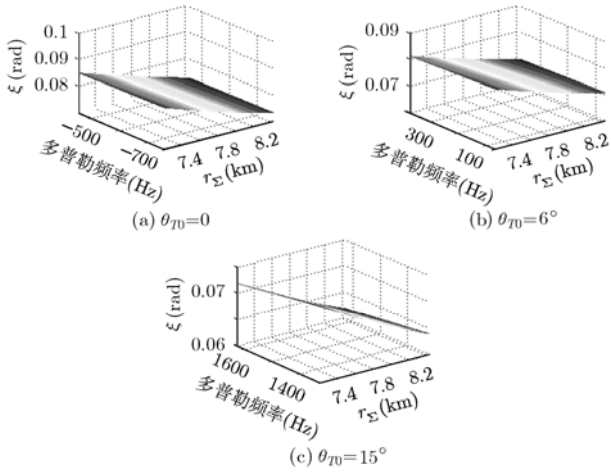


图3 不同斜视角的 ξ

率为负值。对比这3幅图可以发现,在距离-多普勒域中, ξ 随 r_Σ 的变化远比随 f_d 的变化剧烈;斜视角的变化,引起 ξ 的多普勒支撑范围发生改变。

5.2 RCM

图4对斜视角为15°时的RCM及其校正效果进行了仿真,其中图4(a)为距离压缩后的图像,图4(b)为距离徙动校正后的结果。可见,用式(24)可以精确校正平移不变双基地SAR的距离单元徙动。

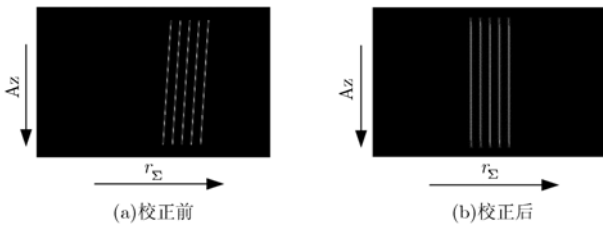


图4 RCM及其校正

5.3 点目标成像

图5给出了发射机的斜视角在6°时各点目标的成像结果,图6显示了最近点的聚焦性能,这里采用矩形窗加权。

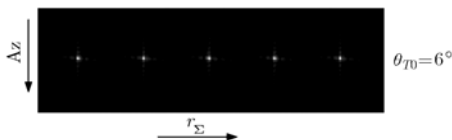


图5 成像结果

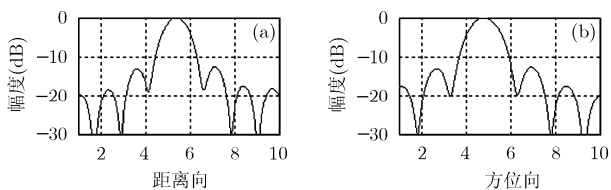


图6 聚焦效果

6 结束语

本文研究了基于HQBA的平移不变双基地SAR成像方法,并对HQBA,RCM和成像效果进行仿真。HQBA的引入,为精确分析平移不变双基地SAR的频域或混合域成像问题提供了一种有效手段,进一步的工作应考虑地面起伏和发射宽带信号等情况。

参考文献

- [1] Krieger G and Moreira A. Spaceborne bi- and multistatic SAR: potentials and challenges. *IEEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2006, 153(3): 184-198.
- [2] Geng Xupu, Yan Honghui, and Wang Yanfei. A two-dimensional spectrum model for general bistatic SAR. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2008, 46(8): 2216-2223.
- [3] 闫鸿慧,王岩飞,于海锋等.一种基于距离补偿的分布式小卫星双基SAR成像方法. *电子与信息学报*, 2005, 27(5): 771-774.
- Yan Hong-hui, Wang Yan-fei, and Yu Hai-feng, *et al.* An imaging method of distributed small satellites bistatic SAR based on range distance compensation. *Journal of Electron. & Inf. Technol.*, 2005, 27(5): 771-774.
- [4] Loffeld O, Nies H, and Peters V, *et al.* Models and useful relations for bistatic SAR processing. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [5] Neo Y L, Wong F, and Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion. *IEEE Letters Geosci. Remote Sens.*, 2007, 4(1): 93-96.
- [6] Zhang Zhenhua, Xing Mendao, and Ding Jinshan, *et al.* Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in Wavenumber domain. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2007, 45(11): 3633-3645.
- [7] Abell M L and Braselton J P. *The Mathematic Handbook*. Academic Press, 1993.
- [8] Bamler R. A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithm. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 1992, 30(4): 706-716.
- [9] Raney R K, Runge H, and Bamler R, *et al.* Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 1994, 32(4): 786-799.
- [10] Cafforio C, Pratic C, and Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. System*, 1991, 27(2): 194-207.

耿旭朴: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为微波成像理论及数字信号处理。
 闫鸿慧: 男, 1975年生, 博士, 研究方向为微波成像系统及理论。
 余慧: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为微波成像理论及数字信号处理。
 王岩飞: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像系统及理论、数字信号处理等。