

基于相位近似的双基地 SAR 波数域成像算法

刘 喆 杨建宇 皮亦鸣 张晓玲
(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 双基地 SAR 系统的目标回波信号斜距历程与单基地 SAR 存在本质差异, 因而单基地成像算法无法直接应用于双基地系统。为此该文提出对双基地 SAR 点目标脉冲响应函数二维频谱的相位项做一阶近似, 由此推导出双基地 SAR 波数域成像算法。通过对点目标与面目标的成像仿真得到的成像结果及其质量评估指标表明: 该算法可以在大基线长度、大斜视角的情况下实现高分辨成像。

关键词: 双基地合成孔径雷达; 波数域算法; 相位近似

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2094-04

A Wavenumber Domain Imaging Algorithm for Bistatic SAR System Based on Phase Approximation

Liu Zhe Yang Jian-yu Pi Yi-ming Zhang Xiao-ling
(School of Electronic Engineering UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The bistatic SAR overall slant range history of target response is essentially different from the monostatic slant range history; hence, bistatic SAR imaging processing can not be achieved by purely monostatic approaches. To address the problem, a wavenumber domain algorithm is derived, which is based on the one-order approximation of the point scatter response's two-dimensional spectrum phase. Bistatic SAR data of simulated point and surface scatter response are focused by the algorithm and the quality of the image demonstrates the effectiveness and high resolution of the algorithm in large squint angle and large base line length case.

Key words: Bistatic synthetic aperture radar; Wavenumber domain algorithm; Phase approximation

1 引言

双基地 SAR 是发射机和接收机分别安装在不同运动平台上的成像雷达系统^[1]。这种平台分离特性使得其具有丰富的空时频信息, 以及灵活、隐蔽等单基地雷达不具备的优点, 因而具有广阔的应用前景; 但同时该特性也会导致回波信号的斜距历程及空变特性复杂性增强^[2,3], 进而对成像算法提出更高的要求。

双基地回波信号的斜距历程不同于只包含一个根式的单基地斜距历程, 是两个根式之和。若直接使用单基地成像算法, 在使用大基线长度、大斜视角几何布局的双基地 SAR 系统中, 会由于双站畸变项的影响而发生散焦等无法正确成像的问题。文献[4]利用地震学的波方程将双基地回波数据变换为等效的单基地 SAR 回波, 应用单基地波数域成像算法对其成像, 但该算法仅在 Along Track 几何布局 (收发平台沿同一轨迹、同向、同速飞行) 时才成立。本文成像算法基于双基地平行轨迹等效模型^[5], 因而不受 Along Track 几何布局的严格限制。通过对双基地 SAR 点目标的方位维脉冲响应函数 (Point Scattering Response, PSR) 的二维频谱中的相位项进行一阶近似, 提出适用于大基线长度、大斜视角的双基地 SAR 高分辨率波数域成像算法。

2 双基地 SAR 波数域成像算法

2.1 基于相位近似的脉冲响应函数

双基地 SAR 点目标的方位维脉冲响应函数可以表示为

$$h(\tau, t; r_1, r_2) = \delta(\tau - R(t; r_1, r_2)/c) \exp(-j2\pi R(t; r_1, r_2)/\lambda) \quad (1)$$

式中 τ 和 t 分别是快时间和慢时间, c 为光速, λ 是发射信号中心角频率 ω_0 对应的波长, r_1, r_2 分别是 $t = 0$ 时刻收发平台到目标的斜距。 $R(t; r_1, r_2)$ 为 t 时刻收、发平台到目标的斜距和, 即目标回波信号的斜距历程。应用平行轨迹等效模型, 在图 1 所示的几何关系下, 有

$$R(t; r_1, r_2) = \sqrt{(r_1 \cos \theta_1)^2 + (r_1 \sin \theta_1 - vt)^2} + \sqrt{(r_2 \cos \theta_2)^2 + (r_2 \sin \theta_2 - vt)^2} \quad (2)$$

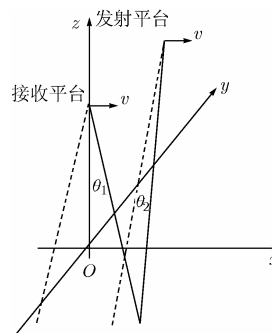


图 1 双基地雷达收发平台与目标的位置关系

式中 θ_1 和 θ_2 分别是收发平台的等效斜视角; v 为平台的飞行速度, 方向为 x 轴正方向。

将式(2)代入式(1)中, 令 $x = vt$, 并对式(1)分别进行 τ 域和 x 域傅里叶变换。利用驻定相位原理得到双基地 SAR 点目标方位维脉冲响应函数的二维频谱:

$$H^{\tau,x}(\omega, k_x; r_1, r_2) = \exp\{j[\phi(\omega, \hat{x}; r_1, r_2) - k_x \hat{x}]\} \quad (3)$$

式(3)中忽略了常数项。 $k_x = 2\pi f_x/v$ 为多普勒波数, $\phi(\omega, \hat{x}; r_1, r_2) = -\frac{\omega + \omega_0}{c} R(t; r_1, r_2)$ 。 \hat{x} 是满足方程 $\frac{\partial \phi(\omega, x; r_1, r_2)}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}} = k_x$ 成立的驻定相位点, 令 $k = \frac{\omega + \omega_0}{c}$,

该方程可以进一步写为

$$\frac{r_1 \sin \theta_1 - \hat{x}}{\sqrt{(r_1 \cos \theta_1)^2 + (r_1 \sin \theta_1 - \hat{x})^2}} + \frac{r_2 \sin \theta_2 - \hat{x}}{\sqrt{(r_2 \cos \theta_2)^2 + (r_2 \sin \theta_2 - \hat{x})^2}} = \frac{k_x}{k} \quad (4)$$

为便于式(4)求解, 可以令

$$\left. \begin{aligned} r_1 \sin \theta_1 - \hat{x} / \sqrt{(r_1 \cos \theta_1)^2 + (r_1 \sin \theta_1 - \hat{x})^2} &= \sin \alpha \\ r_2 \sin \theta_2 - \hat{x} / \sqrt{(r_2 \cos \theta_2)^2 + (r_2 \sin \theta_2 - \hat{x})^2} &= \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

则 α 和 β 的物理意义分别是收、发雷达在驻定相位点 \hat{x} 对目标的斜视角。为进一步简化求解, 可以认为当双基地 SAR 合成孔径远小于平台到目标的斜距时, 二者都是很小的角度, 所以有 $\sin \alpha \approx \alpha$, $\sin \beta \approx \beta$, 利用该近似并联立式(4)、式(5), 即可以得到:

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha &\approx r_1 \sin \theta_1 + r_2 \left(\frac{k_x}{k} \cos \theta_2 - \sin \theta_2 \right) / r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 \\ \sin \beta &\approx r_2 \sin \theta_2 + r_1 \left(\frac{k_x}{k} \cos \theta_1 - \sin \theta_1 \right) / r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)而得到的驻定相位点 \hat{x} 代入式(3)中, 可以得到双基地 SAR 点目标方位维脉冲响应函数的二维频谱。然而为便于接下来对成像算法的进一步推导, 由于 \hat{x} 表达式较为复杂, 本文不采用该方法, 而是利用式(4), 式(5)中 α , β 与驻定相位点 \hat{x} 之间的关系进行变量代换, 把式(3)相位项表示为 α 和 β 的函数:

$$\begin{aligned} \psi(\omega, k_x; r_1, r_2) &= \phi(\omega, \hat{x}; r_1, r_2) - k_x \hat{x} \\ &= -k[r_1 \cos(\theta_1 - \alpha) + r_2 \cos(\theta_2 - \beta)] \quad (7) \end{aligned}$$

式(7)中既有接收平台距目标斜距 r_1 又有发射平台距目标斜距 r_2 , 且 α , β 都是 r_1 和 r_2 的函数, 然而现有成像算法无法直接处理两个待求的独立的斜距变量。而且对于波数域成像算法, 算法的关键所在是其二维频谱的相位应当是一个关于单一斜距变量 r 的形如 $\psi = Ar + B$ 的表达式, 其中 A, B 都与 r 无关, 式(7)无法满足该条件。为解决上述问题, 现以收、发平台单程斜距的均值作为单一变量 $r = (r_1 + r_2)/2$, 并对式(7)做关于 r 的泰勒级数一阶展开。为求解该展开式的一阶项, 定义变量 $l = (r_1 - r_2)/2$, 所以有

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r + l \\ r_2 &= r - l \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

设参考斜距 $r_0 = (r_1 + r_2)/2$, 相应收、发平台与参考位置处目标的参考斜距分别为 r_{10} 和 r_{20} , 并利用式(8), 则可得

$$\begin{aligned} \psi(\omega, k_x; r_1, r_2) &\approx \psi(\omega, k_x; r_{10}, r_{20}) + \left[\frac{\partial \psi(\omega, k_x; r_1, r_2, r)}{\partial r_1} \cdot \frac{\partial r_1}{\partial r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \psi(\omega, k_x; r_1, r_2, r)}{\partial r_2} \cdot \frac{\partial r_2}{\partial r} \right] \Big|_{r_1=r_{10}, r_2=r_{20}} \cdot (r - r_0) \\ &= \psi(\omega, k_x; r_{10}, r_{20}) + \left[\frac{\partial \psi(\omega, k_x; r_1, r_2, r)}{\partial r_1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \psi(\omega, k_x; r_1, r_2, r)}{\partial r_2} \right] \Big|_{r_1=r_{10}, r_2=r_{20}} \cdot (r - r_0) \\ &= -\psi_0 - k_r \cdot r \quad (9) \end{aligned}$$

其中

$$\left. \begin{aligned} k_r &= k \left[g + \cos(\theta_1 - \alpha) + \cos(\theta_2 - \beta) \right] \Big|_{r_1=r_{10}, r_2=r_{20}} \\ &\approx k \left[\cos(\theta_1 - \alpha_0) - \cos(\theta_2 - \beta_0) \right] \\ g &= r_1 \sin(\theta_1 - \alpha) \frac{\partial \alpha}{\partial r} + r_2 \sin(\theta_2 - \beta) \frac{\partial \beta}{\partial r} \\ \psi_0 &= -\psi(\omega, k_x; r_{10}, r_{20}) - k_r \cdot r_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由于 $\partial \alpha / \partial r = -\partial \beta / \partial r \approx 0$, 因此可忽略 g 。将式(9)和式(10)结果代入式(7)和式(3), 可得经过相位近似的双基地 SAR 方位维脉冲响应函数的二维频谱 $H_a^{\tau,x}(\omega, k_x; r_1, r_2)$, 其二维逆傅里叶变换 $h_a(\tau, x; r_1, r_2)$ 就是基于相位近似的双基地 SAR 方位维脉冲响应函数。

2.2 基于相位近似的波数域算法

设 $d(\tau, x)$ 是经过相干解调以及距离压缩后的双基地 SAR 点目标回波信号, 利用与其对应且基于相位近似的方位维脉冲响应函数 $h_a(\tau, x)$ 作为波数域成像算法的二维相关核, 则成像过程可以表示为^[6]

$$u(r, x) = \int d(\tau, x) \otimes h_a(\tau, x) d\tau \quad (11)$$

对式(11)进行 x 域傅里叶变换并将式(9)代入

$$U^x(r, k_x) = \frac{1}{2\pi} \int D(\omega, k_x) \exp\{j[k_r \cdot r + \psi_0]\} d\omega \quad (12)$$

对上式进行 r 域傅里叶变换得到

$$U^{\tau,x}(k_r, k_x) = D(\omega, k_x) \cdot \exp\{j\psi_0\} \quad (13)$$

其中 $D(k_x, \omega)$ 是 $d(x, t)$ 的二维傅里叶变换。

另外, 考虑移零因子的作用, 所以有

$$\begin{aligned} U^{\tau,x}(k_r, k_x) &= S \{ D(\omega, k_x) \cdot \exp(j\psi_0) \cdot \exp(-j \cdot r_0 \cdot 2\omega/c) \} \\ &\quad \cdot \exp(jr_0 k_r) \end{aligned} \quad (14)$$

对于双基地 SAR, 难以根据式(10)中的 k_r 得到其反函数 $\omega(k_r)$ 的解析表达式, 因此为了在 k_r 域得到等间隔采样处的频谱, 考虑 k_r 与 ω 之间一一对应的关系, 可以先将 ω 域等间隔位置上的 $D(\omega, k_x)$ 值映射到 k_r 域非等间隔的位置, 而后通过在 k_r 域的插值得到等间隔处的频谱值。式(14)中, $S\{\}$ 为采用以上思路的插值映射算子。具体的插值方法可以依据对成像性能和运算量的要求而选择, 本文仿真中采用的是三阶

样条插值方法。

对式(14)做二维逆傅里叶变换, 就可以得到二维空间复图像 $u(r, x)$ 。至此, 基于一阶相位近似的双基地 SAR 波数域算法推导完毕。

由上可知, 基于相位近似的双基地 SAR 波数域成像算法(以下简称相位近似算法)成像所用二维相关核的相位经过了一阶近似。比较式(7), 式(9)可知由于相位近似而引入的相位误差为

$$\text{error} = k \left[\left(r_1 - r_2 / 2 \right) - \left(r_{10} - r_{20} / 2 \right) \right] \cdot \left[\cos(\theta_1 - \alpha_0) - \cos(\theta_2 - \beta_0) \right] \quad (15)$$

对于单基地, 由于 $r_1 = r_2$, $r_{10} = r_{20}$, 因此, $\text{error} = 0$, 该算法能够实现精确成像。双基地情况下, 对位于参考位置上的目标也可以精确聚焦, 然而对其他位置的目标, 存在不为零的相位误差, 且该误差随着目标与参考位置偏离量的增大而增大。因此对于非参考斜距位置的目标, 该算法不是单基地意义上的最优成像, 但是当满足成像区域的条带宽度远小于斜距的条件时,

$$r_1 \approx r_{10}, \quad r_2 \approx r_{20} \quad (16)$$

$\text{error} \approx 0$, 对成像质量的影响可以忽略。通常满足 $|\text{error}| < \pi/4$ 的相位误差对成像质量的影响是可以接受的, 一般双基地 SAR 成像应用中均可满足这样的条件。如果由一阶近似带来的误差无法满足成像质量的要求, 可以通过分段处理并选择相应的参考斜距等方法来进行补偿。

3 仿真结果

为了验证算法的有效性, 首先利用点目标回波仿真数据进行成像处理。双基地 SAR 系统仿真参数如下: 波长 0.03m, 接收天线方位向尺寸 1.2m, 发射脉冲带宽 80MHz, 脉冲重复频率 315Hz。二平台飞行速度为 135m/s, 飞行高度均为 6km, 接收平台距离成像条带中心的最短斜距为 18km, 采用平移不变几何布局, 通过调整二平台的斜视角和基线长度 d 来进行仿真。选取收、发平台距离成像条带中心的最短斜距作为参考斜距, 点目标位于条带中心。

不同斜视角以及不同基线长度下的相位近似算法方位向成像质量评估指标^[7]的结果都列于表 1 中。图 2 是在收发平台均为正侧视即 $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$ 的情况下, 基线长度 $d = 18.5 \text{ km}$ 时的仿真成像结果方位向剖面图。仿真过程中未进行任何加窗处理。

表 1 点目标成像结果方位向质量比较

仿真参数	分辨率(m)		峰值旁瓣比(dB)	积分旁瓣比(dB)
	理论值	相位近似算法		
$\theta_1=0, \theta_2=0, d=18.5\text{km}$	0.799	0.790	21.4	14.1
$\theta_1=5^\circ, \theta_2=10^\circ, d=18.5\text{km}$	0.790	0.798	17.3	13.5
$\theta_1=5^\circ, \theta_2=10^\circ, d=25\text{km}$	0.832	0.825	16.9	13.1
$\theta_1=9^\circ, \theta_2=20^\circ, d=25\text{km}$	0.803	0.812	13.7	10.4

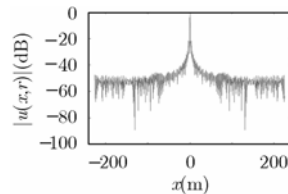


图 2 参考位置点目标成像结果方位向剖面图

由此可见, 在大基线长度、大斜视角情况下, 相位近似算法的方位向分辨率与理论值相符, 具有高分辨成像能力。只是斜视角增大时, 旁瓣随之增大, 可通过加窗进行抑制。

为了进一步验证算法, 本文又利用面目标回波仿真数据进行成像处理。系统仿真参数不变。面目标条带宽度为 500m, 方位向宽度 428.6m, 斜视角 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 。选取收、发平台距离成像条带中心的最短距离作为参考斜距, 基线长度为 18.5km。面目标中偏离参考位置最远的点目标满足 $\left| \left(r_1 - r_2 / 2 \right) - \left(r_{10} - r_{20} / 2 \right) \right|_{\max} = 483.19 \text{ m}$ 。如图 3 所示, 其相位误差绝对值在合成孔径的边界处最大, 最大值为 0.052, 结合图中点目标的成像结果方位向剖面图及成像质量指标, 则可以认为该相位误差对成像性能的影响较小。成像过程中没有任何加窗处理, 该面目标成像结果如图 4。

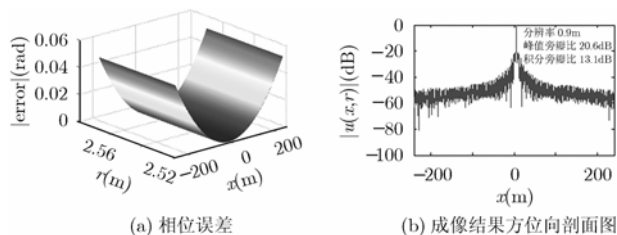


图 3 面目标中偏离参考位置最远的点目标

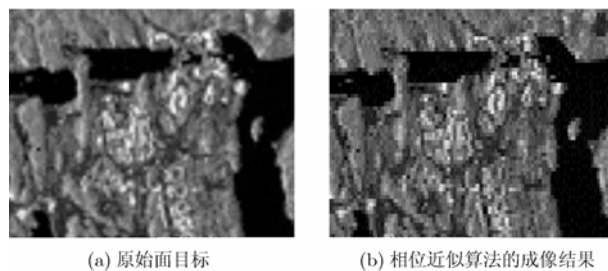


图 4 面目标仿真结果

4 结束语

本文对双基地 SAR 回波脉冲响应函数二维频谱的相位项进行一阶近似, 在此基础上推导了波数域成像算法。文中进一步分析了相位近似误差对成像聚焦性能的影响, 并对仿真点目标和面目标回波数据进行成像处理, 结果表明该算法可以在使用大基线长度、大斜视角几何布局的双基地 SAR 系统中有效实现高分辨成像。本文算法可直接用于机载双基地 SAR 系统, 对于星载双基地 SAR, 利用平行直线轨迹近似实际卫星轨迹, 该算法同样适用。

参考文献

- [1] Krieger G, Fiedler H, and Moreira A. Bi- and multistatic

- SAR: potentials and challenges[C]. EUSAR'04, Germany, May 2004: 365–370.
- [2] Ender J H G. A step to bistatic SAR processing[C]. EUSAR'04, Germany, May 2004: 359–364.
- [3] Loffeld O, Nies H, and Peters V, *et al.* Models and useful relations for bistatic SAR processing[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 2004, 42(10): 2031–2038.
- [4] D'Aria D, Guarnieri A M, and Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 2004, 42(7): 1362–1376.
- [5] 何峰, 梁甸农, 董臻. 基于大斜视角的星载双基地 SAR 波数域成像算法[J]. *电子学报*, 2005, 33(6): 1011–1014.
He Feng, Liang Dian-nong, and Dong Zhen. A wavenumber domain algorithm for spaceborne bistatic SAR imaging with large squint angle[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 1011–1014.
- [6] Bamler R. A comparison of range-doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1992, 30(4): 703–713.
- [7] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 8–11.
- 刘 喆: 女, 1978 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为雷达成像、信号处理.
- 杨建宇: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 LFM CW 雷达理论、雷达成像等.
- 皮亦鸣: 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、导航定位新技术等.
- 张晓玲: 女, 1966 年生, 教授, 研究方向为干涉 SAR 成像处理、雷达图像处理与目标识别.