

地球同步轨道 SAR 曲线轨迹模型下的改进 CS 成像算法

包敏^{*①} 周鹏^① 保铮^① 李亚超^{①②} 邢孟道^① 王万林^②

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(空间微波技术国防科技重点实验室 西安 710000)

摘要: 地球同步轨道合成孔径雷达(GEO SAR)轨道高度高,合成孔径时间长,直线轨迹模型不再适用,导致常规的基于直线轨迹模型的成像算法性能下降。该文根据 GEO SAR 平台的运动特性,使用高阶逼近建立了曲线轨迹模型下的斜距方程,并结合级数反演法,推导了 GEO SAR 回波信号 2 维频谱高阶近似表达式。然后在此基础上提出了一种适用于 GEO SAR 曲线轨迹模型的改进 Chirp Scaling(CS)成像算法。仿真结果表明该算法的斜距方程精度较高,能够精确校正距离徙动,实现全孔径高分辨成像。

关键词: 合成孔径雷达; 同步轨道; Chirp Scaling(CS); 级数反演; 2 维频谱

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2686-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00289

An Improved CS Imaging Algorithm for GEO SAR Based on Curve Trajectory Model

Bao Min^① Zhou Peng^① Bao Zheng^① Li Ya-chao^{①②} Xing Meng-dao^① Wang Wan-lin^②

^①(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Because of the long integration time of Geosynchronous Earth Orbit Synthetic Aperture Radar (GEO SAR), the imaging algorithms based on linear trajectory module is not suit for GEO SAR, the imaging algorithms based on linear trajectory module may induce considerable distortion. Thus, this paper establishes the range equation of curve trajectory model by using the high order approximate based on the characters of the GEO SAR movements. Then, the two-dimensional spectrum is derived by the method of series reversion, based on which an improved Chirp Scaling (CS) imaging algorithm for GEO SAR based on curve trajectory model is presented. Simulation results show that the proposed range equation is more precise and the algorithm proposed is effective to correct the range-migration and to give high resolution imagery with the entire aperture.

Key words: SAR; Geosynchronous orbits; Chirp Scaling (CS); Series reversion; Two-dimensional spectrum

1 引言

随着星载 SAR 技术的不断发展以及其应用的不断深化,星载 SAR 系统的探测距离、成像分辨率和观测范围等性能也在逐步提高。目前在轨的星载 SAR 系统均搭载于低轨卫星上,其轨道高度较低、重返周期长,特别是近年来空间弹道导弹、激光武器的飞速发展,对低轨 SAR 卫星的战场生存能力提出了严峻考验。而地球同步轨道 SAR(GEO SAR)的轨道高度为 35768 km,抗打击和摧毁能力强,有较强的战场生存能力。同时,超长的合成孔径使其具备了对动目标进行连续跟踪与高分辨率成像的潜

力^[1]。此外, GEO SAR 可以用很小的波束角覆盖大面积区域,获得大范围、持续的对地观测能力,在地震和火山预报、海洋应用研究等方面具有潜在的优势。1978 年, Tomiyasu 等人^[2,3]率先提出了 GEO SAR 的概念,但是限于当时天线、供电、火箭等技术水平,对其研究一直停留在概念研究阶段。近年来,随着星载 SAR 技术的快速发展,对 GEO SAR 的研究也逐渐升温^[4-6]。

GEO SAR 轨道高度高,卫星速度小,使其具有较长的合成孔径时间,所以曲线运动轨迹对成像的影响不能忽略,此时,常规低轨 SAR 成像处理中基于直线轨迹模型推导的 RD^[7], CS^[8]等算法已经难以完成目标的精确聚焦,为了获得良好的聚焦效果需要对其成像模型和算法进行改进。虽然 BP^[9]算法在理论上没有进行任何近似,能够对任意轨迹情况

2011-03-27 收到, 2011-07-08 改回

重点实验室基金(9140C5305020902)资助课题

*通信作者: 包敏 mbao627@china.com.cn

下的信号进行成像，且不受场景的限制，是时域最优成像算法，但是其运算量比较大，不适合工程实现。CS 算法校正空变的距离徙动时无需插值操作，拥有较高的运算效率，在 SAR 成像中得到广泛应用。因此本文针对 GEO SAR 长合成孔径时间内曲线运动轨迹的情况，提出了一种曲线轨迹模型下的改进 CS 成像算法。

文中首先根据 GEO SAR 平台的运动特性，对其几何构型采取高阶逼近，建立了曲线轨迹模型下的斜距方程，并且结合级数反演法，推导了 GEO SAR 回波信号 2 维频谱高阶近似表达式。在此基础上，详细推导出该算法的实现方法。仿真结果表明，本文所用模型的斜距方程较常规直线轨迹模型下的斜距方程精确，该算法能够精确地校正距离徙动，实现全孔径高分辨成像。

2 GEO SAR 成像几何模型与斜距历程分析

2.1 GEO SAR 成像几何模型

图 1 为 GEO SAR 成像几何模型。其中，卫星相对地球的运动在地心直角坐标系^[10]中进行描述。该坐标系以地心为坐标原点， X 轴位于赤道平面，正方向指向格林尼治子午线， Z 轴为地球自转轴，正方向指向北极方向， Y 轴符合右手定则。弧线 \widehat{AB} 为卫星在以某一时刻 t_0 为中心的一段运动轨迹，轨迹坐标为 (x_s, y_s, z_s) ， P 为测绘带中一点，坐标为 (x_p, y_p, z_p) 。令 t_m 为慢时间，设 $t_m = 0$ 时雷达位于 O' 点，且雷达到目标点 P 的斜距为 R_0 。

由以上条件可以得到，雷达与目标点 P 的瞬时斜距为

$$R(t_m) = \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2 + (z_s - z_p)^2} \quad (1)$$

设轨道倾角为 i ，轨道为圆形，地球为均匀球体，

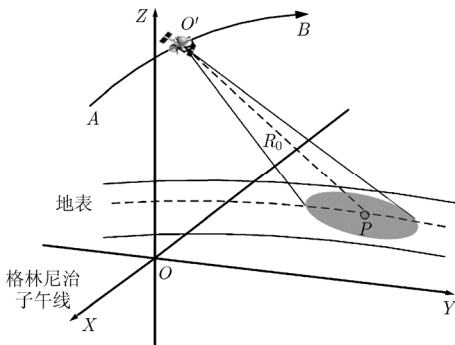


图 1 GEO SAR 成像几何模型

轨道升交点赤经为 L_0 ，则卫星在以 t_0 时刻(本文以升交点为起始“0”时刻)为中心的一段时间内相对地球的运动轨迹为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos L_0 [1 + (\cos i - 1) \sin^2 \omega (t_0 + t_m)] \\ -\frac{1}{2} \sin L_0 (\cos i - 1) \sin 2\omega (t_0 + t_m) \\ \sin L_0 [1 + (\cos i - 1) \sin^2 \omega (t_0 + t_m)] \\ +\frac{1}{2} \cos L_0 (\cos i - 1) \sin 2\omega (t_0 + t_m) \\ \sin i \sin \omega (t_0 + t_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 ω 为地球自转角速率， $R = R_e + h$ 为轨道半径， R_e 为地球半径， h 为轨道高度。

将卫星在以 t_0 时刻为中心的一段运动轨迹进行四阶泰勒展开得

$$\begin{cases} x_s = k_{x0} + k_{x1}t_m + k_{x2}t_m^2 + k_{x3}t_m^3 + k_{x4}t_m^4 \\ y_s = k_{y0} + k_{y1}t_m + k_{y2}t_m^2 + k_{y3}t_m^3 + k_{y4}t_m^4 \\ z_s = k_{z0} + k_{z1}t_m + k_{z2}t_m^2 + k_{z3}t_m^3 + k_{z4}t_m^4 \end{cases} \quad (3)$$

由于 GEO SAR 的合成孔径时间较长，在合成孔径时间内其运动轨迹为曲线，必须要考虑 3 个方向的速度和加速度及高阶的运动参数，式(3)中的泰勒展开系数表征了 3 个方向的速度和加速度及高阶的运动参数。在 GEO SAR 超长的合成孔径时间内，例如 200 s，对其运动方程进行三阶逼近带来的近似误差约为 10^{-2} 量级，已不能满足精确成像的要求，而对其运动方程进行四阶逼近带来的近似误差约为 10^{-4} 量级。因此通常对其运动方程进行四阶逼近已足够精确。泰勒展开系数表达式较为复杂，限于篇幅，这里不再罗列。

将式(3)代入式(1)，然后对斜距 $R(t_m)$ 在孔径中心 $t_m = 0$ 处做泰勒级数展开，展开后的序列保留至四次项，得到 GEO SAR 曲线轨迹模型下的斜距四阶近似式为

$$R(t_m) = R_0 + k_1 t_m + k_2 t_m^2 + k_3 t_m^3 + k_4 t_m^4 \quad (4)$$

其中各项系数表达式如下：

$$\begin{aligned} R_0 &= (k_{x0}^2 + k_{y0}^2 + k_{z0}^2 - 2k_{x0}x_p - 2k_{y0}y_p \\ &\quad - 2k_{z0}z_p + x_p^2 + y_p^2 + z_p^2)^{1/2} \\ k_1 &= \frac{a_1}{2R_0}, \quad k_2 = \frac{a_2}{2R_0} - \frac{a_1^2}{8R_0^3}, \quad k_3 = \frac{a_3}{2R_0} - \frac{a_1 a_2}{4R_0^3} \\ &\quad + \frac{a_1^3}{16R_0^5}, \quad k_4 = \frac{a_4}{2R_0} - \frac{2a_1 a_3 + a_2^2}{8R_0^3} + \frac{3a_1^2 a_2}{16R_0^5} - \frac{5a_1^4}{128R_0^7} \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 2k_{x0}k_{x1} + 2k_{y0}k_{y1} + 2k_{z0}k_{z1} - 2k_{x1}x_p \\
 &\quad - 2k_{y1}y_p - 2k_{z1}z_p \\
 a_2 &= 2k_{x0}k_{x2} + 2k_{y0}k_{y2} + 2k_{z0}k_{z2} + k_{x1}^2 + k_{y1}^2 + k_{z1}^2 \\
 &\quad - 2k_{x2}x_p - 2k_{y2}y_p - 2k_{z2}z_p \\
 a_3 &= 2k_{x0}k_{x3} + 2k_{y0}k_{y3} + 2k_{z0}k_{z3} + 2k_{x1}k_{x2} + 2k_{y1}k_{y2} \\
 &\quad + 2k_{z1}k_{z2} - 2x_pk_{x3} - 2y_pk_{y3} - 2z_pk_{z3} \\
 a_4 &= 2k_{x4}k_{x0} + 2k_{y4}k_{y0} + 2k_{z4}k_{z0} + 2k_{x3}k_{x1} \\
 &\quad + 2k_{y3}k_{y1} + 2k_{z3}k_{z1} + k_{x2}^2 + k_{y2}^2 + k_{z2}^2 \\
 &\quad - 2x_pk_{x4} - 2y_pk_{y4} - 2z_pk_{z4}
 \end{aligned} \tag{7}$$

2.2 GEO SAR 斜距历程分析

为分析距离模型的有效性, 有如下准则: 如果在整个合成孔径时间内, 该距离模型对真实斜距历程的近似带来的相位误差小于 0.25π , 则认为该近似处理是有效的。

文献[11]给出了基于直线轨迹模型的低轨 SAR 成像处理的斜视等效距离模型, 如式(8)所示

$$R(t_m) = \sqrt{V_r^2 t_m^2 + R_0^2 - 2V_r t_m R_0 \sin \theta_{sq}} \tag{8}$$

其中 V_r 为等效雷达速度, θ_{sq} 为等效斜视角, R_0 为雷达至目标的最近斜距, 各参数定义详见文献[11], 这里不再赘述。从本质上说, 斜视等效距离模型只有两个自由度, 仅仅能够对真实斜距历程实现二阶精确逼近。然而对于 GEO SAR 的应用, 对斜距历程的二阶逼近不能精确逼近 GEO SAR 的曲线运动轨迹。因此, 低轨 SAR 成像处理的斜视等效距离模型已经不再适用, 基于其推导的 CS 算法已难以完成 GEO SAR 目标的精确聚焦。

下面对卫星在赤道上空, 以目标点 (0°N , 92.24°E) 为例对 GEO SAR 在合成孔径时间内斜视等效距离模型和本文所述模型的斜距近似误差进行分析。仿真参数如表 1 所示。该目标点对应的入射角为 15.4° , 合成孔径时间为 37 s。

表 1 GEO SAR 仿真参数

轨道倾角	90°
轨道高度	35768 km
升交点	105°
轨道偏心率	0
观测区纬度	0°
载频	10 GHz
信号脉宽	30 μs
发射信号带宽	50 MHz
距离向采样率	60 MHz
脉冲重复频率	690 Hz
场景中心斜距	35981 km
入射角	15.4°

在一个合成孔径时间内, 斜视等效距离模型对目标真实斜距进行逼近的最大相位误差为 0.45π , 已大于 0.25π , 利用其进行成像必然带来成像质量的下降。而由本文模型带来的最大相位误差为 0.0012π , 远小于 0.25π 。可见, 本文将 GEO SAR 的运动模型建立在 3 维空间中, 考虑了 3 个方向的速度和加速度及高阶的运动参数, 并且对其斜距历程进行了四阶逼近, 从而能够得到精确的目标斜距表达式。

3 基于级数反演的 GEO SAR 目标 2 维频谱

由式(4)所示, 该斜距公式含有 t_m 的四次项, 这将导致在使用驻相原理求解信号 2 维频谱时出现解高次方程的情况, 难以得到驻相点的精确解。因此, 本文采用级数反演法^[12-14]来进行 GEO SAR 2 维频谱的推导, 首先设 $R(t_m) = \mu_0 + \mu_1 t_m + \mu_2 t_m^2 + \mu_3 t_m^3 + \mu_4 t_m^4$, $\mu_0 = 2R_0$, $\mu_1 = 2k_1$, $\mu_2 = 2k_2$, $\mu_3 = 2k_3$, $\mu_4 = 2k_4$ 。雷达发射线性调频信号, 并在后续的分析中假设包括散射系数在内的总增益为 1, 则点目标的回波基带信号可表示为

$$\begin{aligned}
 s(\hat{t}, t_m) &= a_r \left(\hat{t} - \frac{R(t_m)}{c} \right) a_a(t_m) \\
 &\quad \cdot \exp \left\{ j\pi\gamma \left[\hat{t} - \frac{R(t_m)}{c} \right]^2 \right\} \exp \left\{ -j\pi \frac{2R(t_m)}{\lambda} \right\} \tag{9}
 \end{aligned}$$

其中 $a_r(\hat{t})$ 为发射脉冲包络, $a_a(t_m)$ 由收发系统天线方向图决定, γ 为调频率, \hat{t} 为快时间, λ 为波长, c 为光速。

由文献[12,13]可得信号 $s(\hat{t}, t_m)$ 的 2 维频谱表达式为

$$s(f_r, f_a) = a_r(f_r) a_a(f_a) \exp \{ j\varphi(f_r, f_a) \} \tag{10}$$

其中 $a_r(f_r)$ 为距离谱包络, $a_a(f_a)$ 为方位谱包络, $\varphi(f_r, f_a)$ 为 2 维频谱相位项表示如下:

$$\begin{aligned}
 \varphi(f_r, f_a) &= -\pi \frac{f_r^2}{\gamma} - 2\pi \frac{(f_r + f_c)}{c} \mu_0 \\
 &\quad + 2\pi \frac{1}{4\mu_2} \left[\frac{c}{(f_r + f_c)} \right] \left[f_a + \frac{(f_r + f_c)}{c} \mu_1 \right]^2 \\
 &\quad + 2\pi \frac{\mu_3}{8\mu_2^3} \left[\frac{c}{(f_r + f_c)} \right]^2 \left[f_a + \frac{(f_r + f_c)}{c} \mu_1 \right]^3 \\
 &\quad + 2\pi \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2\mu_4}{64\mu_2^5} \left[\frac{c}{(f_r + f_c)} \right]^3 \left[f_a + \frac{(f_r + f_c)}{c} \mu_1 \right]^4 \tag{11}
 \end{aligned}$$

由以上推导过程可以看出, 由于斜距公式和 2 维频谱表达式均为高阶近似式, GEO SAR 各项运动参数都在 2 维频谱中得到体现, 与传统方法相比 2 维频谱中 GEO SAR 运动信息更加完整, 具有较高的精度, 有利于 GEO SAR 全孔径高精度成像。

4 GEO SAR 改进 CS 成像算法

由于距离频率 f_r 和方位频率 f_a 相互耦合, 不便于成像处理, 在 SAR 系统中, 通常满足 $f_c \gg f_r$ 。因此, 这里将式(11)的 2 维频谱相位项进一步展开成关于 f_r 的多项式, 并忽略 f_r 的高阶项, 保留 f_r 三次及以下相位项, 整理后得到以下形式:

$$\varphi(f_r, f_a) \approx \varphi_0(f_a; R_0) + \varphi_1(f_a; R_0)f_r + \varphi_2(f_a; R_0)f_r^2 + \varphi_3(f_a; R_0)f_r^3 \quad (12)$$

下面对上式中各项逐一进行分析和说明:

(1)式(12)等号右边第 1 项与距离频率 f_r 无关, 为方位调制项, 该项体现了方位向的信号调制, 即

$$\begin{aligned} \varphi_0(f_a; R_0) = 2\pi & \left[-\frac{2f_c}{c} \mu_0 + \frac{\mu_1^2}{4\mu_2 c} f_c + \frac{\mu_1^3 \mu_3}{8\mu_2^3 c} f_c \right. \\ & + \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{64\mu_2^5} \frac{\mu_1^4}{c} f_c \\ & + \left(\frac{\mu_1}{2\mu_2} + \frac{3\mu_3 \mu_1^2}{8\mu_2^3} + \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{16\mu_2^5} \mu_1^3 \right) f_a \\ & + \left(\frac{c}{4\mu_2 f_c} + \frac{3\mu_3 \mu_1 c}{8\mu_2^3 f_c^2} + \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{32\mu_2^5 f_c} 3\mu_1^2 c \right) \\ & \cdot f_a^2 + \left(\frac{\mu_3 c^2}{8\mu_2^3 f_c^2} + \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{16\mu_2^5 f_c^2} \mu_1 c^2 \right) \\ & \cdot f_a^3 + \left. \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{64\mu_2^5} c^3 f_a^4 \right] \quad (13) \end{aligned}$$

(2)式(12)等号右边第 2 项为关于距离频率 f_r 的一次项, 其中, $\varphi_1(f_a; R_0)$ 体现了目标存在的距离徙动, 即

$$\begin{aligned} \varphi_1(f_a; R_0) = 2\pi & \left[-\frac{\mu_0}{c} + \frac{\mu_1^2}{4\mu_2 c} + \frac{\mu_1^3 \mu_3}{8\mu_2^3 c} + \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{64\mu_2^5} \mu_1^4 \right. \\ & + \left(-\frac{c}{4\mu_2 f_c^2} - \frac{3\mu_1 \mu_3 c}{8\mu_2^3 f_c^2} - \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{32\mu_2^5 f_c^2} 3\mu_1^2 c \right) \\ & \cdot f_a^2 - \left(\frac{2c^2 \mu_3}{8\mu_2^3 f_c^3} + \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{8\mu_2^5 f_c^3} \mu_1 c^2 \right) f_a^3 \\ & - \left. \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{64\mu_2^5} 3c^3 f_a^4 \right] \quad (14) \end{aligned}$$

(3)式(12)等号右边第 3 项为关于距离频率 f_r 的二次项即二次距离脉冲压缩(SRC)项, 其中, $\varphi_2(f_a; R_0)$ 表示距离向信号调频率, 即

$$\begin{aligned} \varphi_2(f_a; R_0) = 2\pi & \left[-\frac{1}{2\gamma} + \left(\frac{c}{4\mu_2 f_c^3} + \frac{3\mu_1 \mu_3 c}{8\mu_2^3 f_c^3} \right. \right. \\ & + \left. \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{32\mu_2^5 f_c^3} 3\mu_1^2 c \right) f_a^2 \\ & + \left(\frac{3\mu_3 c^2}{8\mu_2^3 f_c^4} + \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{16\mu_2^5 f_c^4} 3\mu_1 c^2 \right) \\ & \cdot f_a^3 + \left. \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{32\mu_2^5 f_c^5} 3c^3 f_a^4 \right] \quad (15) \end{aligned}$$

(4)式(12)等号右边第 4 项为关于距离频率 f_r 的三次项, 其中, $\varphi_3(f_a; R_0)$ 表示距离向信号调频率的斜率, 即

$$\begin{aligned} \varphi_3(f_a; R_0) = 2\pi & \left[\left(-\frac{c}{4\mu_2 f_c^4} - \frac{3\mu_1 \mu_3 c}{8\mu_2^3 f_c^4} \right. \right. \\ & - \left. \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{32\mu_2^5 f_c^4} 3\mu_1^2 c \right) f_a^2 \\ & + \left(-\frac{\mu_3 c^2}{2\mu_2^3 f_c^5} - \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{4\mu_2^5 f_c^5} \mu_1 c^2 \right) f_a^3 \\ & - \left. \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2 \mu_4}{32\mu_2^5 f_c^6} 5c^3 f_a^4 \right] \quad (16) \end{aligned}$$

可以看出, 由于 GEO SAR 运动的复杂性, 其回波信号 2 维频谱中的每一项都具有随距离 R_0 的空变性。不同于低轨 SAR, 由于 GEO SAR 轨道高度高, 雷达速度小, 距离频率 f_r 的三次项在 GEO SAR 中不能忽略。下面对距离频率 f_r 的二次项和三次项随距离的空变性进行分析, 由于在 2 维频域内无法同时对 f_r , f_a 和 R_0 这 3 个变量进行调整, 因此可以将这两项近似写为以 R_0 为变量的表达式如下:

$$\begin{aligned} \varphi_2 & \approx \left| \varphi_2(f_{dc} + B_a/2; R_0) \right| (B/2)^2 \\ \varphi_3 & \approx \left| \varphi_3(f_{dc} + B_a/2; R_0) \right| (B/2)^3 \end{aligned} \quad (17)$$

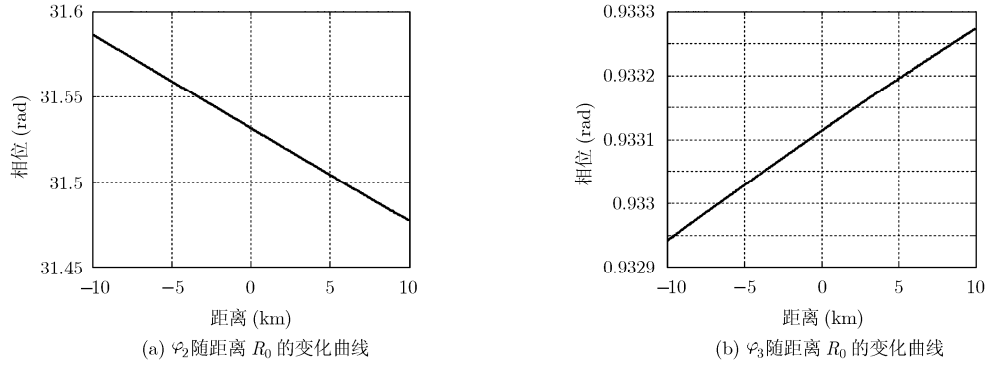
其中 f_{dc} 为多普勒中心频率, B_a 为方位多普勒带宽, B 为发射信号带宽。参数如表 1 所示。可以计算出 φ_2 和 φ_3 随距离 R_0 的变化曲线如图 2 所示。

由 SAR 成像的性质可知, 若相位项随距离的变化量在 0.25π 范围之内, 其对成像的影响可以忽略, 仍能保证良好的聚焦性能, 因此下面以 0.25π 为标准进行分析。由图 2 可知, φ_3 的值已大于 0.25π , 故在成像处理时距离频率 f_r 的三次项不能忽略。在 20 km 的斜距测绘带宽内, φ_2 和 φ_3 的变化范围分别为 0.1093 rad 和 3.328×10^{-4} rad, 小于 0.25π , 故它们随 R_0 的空变性可以忽略, 可对其按场景中心处的相位值进行补偿。对于场景特别宽的情况, 忽略距离频率 f_r 二次项的距离空变性可能带来较大误差, 这时可以采用非线性变标的方法^[15]来解决。

根据以上分析, 结合 GEO SAR 回波信号的 2 维频域高阶近似表达式, 本文提出了一种曲线轨迹模型下的改进 CS 成像算法, 算法流程如下:

(1)三次相位项补偿 CS 算法首先要在距离-多普勒域完成变标处理, 由式(12)可知, 直接对其进行距离向逆傅里叶变换是非常困难的, 故本文先对 GEO SAR 回波信号做 2 维 FFT, 在 2 维频域以场景中心点 R_s 构造三次相位项补偿函数为

$$H_1(f_r, f_a) = \exp\{-j\varphi_3(f_a; R_s) f_r^3\} \quad (18)$$

图 2 φ_2 和 φ_3 随距离 R_0 的变化曲线

经过该相位补偿之后得到的信号为

$$s(f_r, f_a) = a_r(f_r) a_a(f_a) \exp \{ j\varphi_0(f_a; R_0) + j\varphi_1(f_a; R_0) f_r + j\varphi_2(f_a; R_0) f_r^2 \} \quad (19)$$

(2) 距离-多普勒域 Chirp Scaling 操作 对式(19)进行距离向 IFFT 变换, 将其变换到距离-多普勒域可得

$$s(\hat{t}, f_a) = a_r \left(\hat{t} + \frac{\varphi_1(f_a; R_0)}{2\pi} \right) a_a(f_a) \cdot \exp \left\{ j \left[\varphi_0(f_a; R_0) - \frac{\pi^2}{\varphi_2(f_a)} \cdot \left(\hat{t} - \frac{2}{c} R(f_a; R_0) \right)^2 \right] \right\} \quad (20)$$

其中 $R(f_a; R_0) = -\frac{\varphi_1(f_a; R_0)c}{4\pi}$ 为距离徙动曲线, 由于 $\varphi_1(f_a; R_0)$ 与距离有关, 体现了 GEO SAR 距离徙动的空变性。为了 CS 成像算法的设计, 需要得到 $R(f_a; R_0)$ 相对 R_0 的解析表达式, 通常可用 R_0 的一次多项式作较准确的近似。

由于 GEO SAR 几何关系的复杂性, 本文采用数值计算的方法来得到 $R(f_a; R_0)$ 相对 R_0 的表达式。该过程如下: 首先, 在条带宽度内沿距离向放置一定数量的点目标(一般几十个即可), 然后计算同一方位频率 f_{an} 下不同距离点目标的距离徙动曲线表达式的值序列为 $\{R(f_{an}; R_{01}), R(f_{an}; R_{02}), \dots, R(f_{an}; R_{0i}), R(f_a; R_{0N})\}$, 其中 $1 \leq i \leq N$, R_{0i} 为第 i 个点目标的距离, N 为放置的点目标数。之后, 对计算得到的距离徙动曲线表达式的值序列相对距离 R_{0i} 的数值关系进行线性拟合得该方位频率 f_{an} 下的距离徙动表达式为

$$R(f_{an}; R_0) = A(f_{an}) + B(f_{an}) R_0 \quad (21)$$

对所有离散方位频点进行上述操作, 即可得到所有方位频率点上 $A(f_a)$ 和 $B(f_a)$ 的值。之后可以构造如下 CS 相位函数为

$$H_2(\hat{t}, f_a) = \exp \left\{ -j \frac{\pi^2}{\varphi_2(f_a; R_s)} C_s(f_a) \cdot \left[\hat{t} - 2 \frac{A(f_a) + B(f_a) R_s}{c} \right]^2 \right\} \quad (22)$$

其中变标因子 $C_s(f_a)$ 为

$$C_s(f_a) = B(f_a) / B(f_{\text{ref}}) - 1 \quad (23)$$

f_{ref} 为参考频率, 参考频率通常设置为多普勒中心频率。

在距离-多普勒域乘以式(22)所示的 CS 相位函数, 即将所有距离单元目标的距离徙动曲线都调整到与场景中心目标的距离徙动曲线一致。

(3) 2 维频域补偿 经过 CS 相位函数相乘后, 对信号进行距离 FFT, 将其变换到 2 维频域可得

$$s(f_r, f_a) = a_r \left(-\frac{\varphi_2(f_a; R_s) B(f_{\text{ref}}) f_r}{\pi B(f_a)} \right) a_a(f_a) \cdot \exp \{ j\varphi_0(f_a; R_0) \} \cdot \exp \left\{ j \frac{\varphi_2(f_a; R_s) B(f_{\text{ref}})}{B(f_a)} f_r^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi [A(f_a) + B(f_a) R_s]}{c} f_r \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi B(f_{\text{ref}}) (R_0 - R_s)}{c} f_r \right\} \cdot \exp \{ j\theta(f_a; R_0) \} \quad (24)$$

式(24)中第 1 个相位项为方位调制项; 第 2 个相位项为距离调频信号经过距离 FFT 的结果; 第 3 个相位项为距离徙动项, 第 4 个相位项表示了目标距离压缩后的位置, 第 5 个相位项为 CS 变标引起的剩余相位项, 其中 $\theta(f_a; R_0) = \frac{4\pi^2 B(f_a) [B(f_{\text{ref}}) - B(f_a)]}{c^2 \varphi_2(f_a; R_s)} \cdot (R_0 - R_s)^2$ 。

在 2 维频域乘以如下距离补偿函数 $H_3(f_r, f_a)$ 完成距离聚焦和距离徙动校正。

$$H_3(f_r, f_a) = \exp \left\{ -j \frac{\varphi_2(f_a; R_s) B(f_{ref})}{B(f_a)} f_r^2 \right\} \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi [A(f_a) + B(f_a) R_s]}{c} f_r \right\} \quad (25)$$

(4)方位聚焦 对完成 2 维频域补偿的信号进行距离 IFFT 后, 沿方位向乘以如下方位补偿函数 $H_4(\hat{t}, f_a)$ 完成方位压缩和剩余相位校正, 最后再进行方位 IFFT, 即完成了目标的聚焦。

$$H_4(\hat{t}, f_a) = \exp \{-j\varphi_0(f_a; R_0)\} \exp \{-j\Theta(f_a; R_0)\} \quad (26)$$

该算法的整个流程与经典的 CS 算法基本一致, 如图 3 所示, 区别在于该算法是基于曲线轨迹模型推导的, 所采用的相位补偿因子不同, 由于 GEO SAR 几何关系的复杂性, CS 因子通过数值计算来得到, 并且结合 GEO SAR 的特性对 f_r 的三次相位项进行了补偿。本文算法中所有操作都由 FFT 和相位点乘完成, 并且在实际处理中相邻的相位相乘可以合并, 故共需要 6 次 FFT 和 4 次复数乘法。常规 CS 算法需要 4 次 FFT 和 3 次复数乘法, 本文算法运算量相对于常规 CS 算法变化不大, 可满足实时成像要求。

5 仿真实验分析

为验证本文算法的有效性, 选取卫星在赤道上

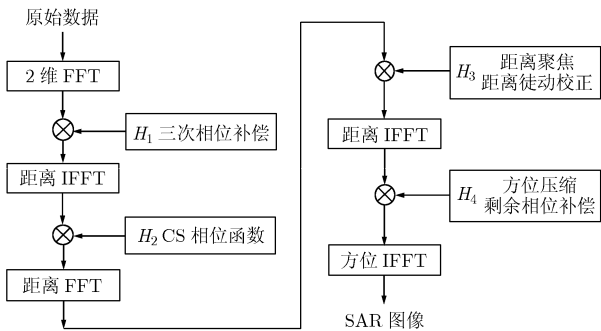


图 3 本文算法流程图

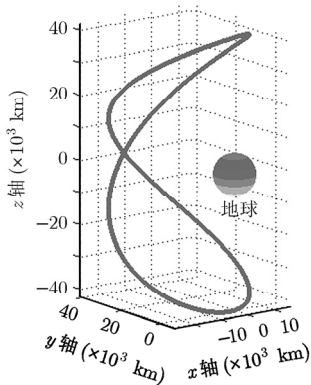


图 4 GEO SAR 相对地球运动轨迹

空时, 对位于场景近、中、远的 3 个点目标进行成像仿真, 其对应 20 km 的斜距测绘带宽和 74.7 km 的地距测绘带宽。设置点目标分别为 $P_{近}$ (0°N , 92.24°E), $P_{中}$ (0°N , 91.90°E), $P_{远}$ (0°N , 91.57°E)。仿真参数如表 1 所示。斜距分辨率为 2.66 m, GEO SAR 的方位分辨率受地球自转影响严重, 在赤道上空, 合成孔径时间为 37 s, 方位分辨率为 $3 \text{ m}^{[6]}$ 。在赤道上空, 卫星相对地球的运行速度为 4335 m/s, 多普勒中心频率为 8202 Hz, 多普勒带宽为 193.5 Hz。

图 4 给出了 GEO SAR 相对地球的运动轨迹, 图 5 给出了 GEO SAR 的星下点轨迹。由图 4, 图 5 可知, 轨道倾角的存在使得卫星相对地球运动轨迹呈“8”字形, 且该“8”字处在以轨道半径 R 为半径的球面上, 其星下点轨迹呈以赤道对称的“8”字形, 星下点轨迹南北方向的最大纬度都等于轨道的倾角。

下面对采用本文算法和基于斜视等效距离模型的 CS 算法^[1]的点仿真结果进行对比。图 6 分别给出了基于斜视等效距离模型的 CS 算法和本文算法的成像结果等高线图。表 2 给出了本文算法点目标的聚焦性能统计, 其中, PSLR 为峰值旁瓣比, ISLR 为积分旁瓣比, 成像处理中均未进行加窗处理。

由图 6 和表 2 数据可得, 由于 GEO SAR 合成孔径时间长, 利用低轨 SAR 直线轨迹模型得到的斜视等效距离模型带来的相位误差大于 0.25π , 不能获得足够的频谱信息, 造成主瓣展宽, 图像扭曲, 难以满足 GEO SAR 成像要求。而本文算法的点目标成像结果等高线图中, 旁瓣规则, 主旁瓣明显分开, 呈现一个良好的“十字”状, 聚焦效果良好, 且 3 个位置的点目标的成像性能指标均接近理论值。可见, 本文的斜距方程较为精确, 基于其推导的 CS 算法相位补偿精确, 能较好的校正距离徙动, 并且对距离频率的三次项进行了补偿, 避免了距离维旁

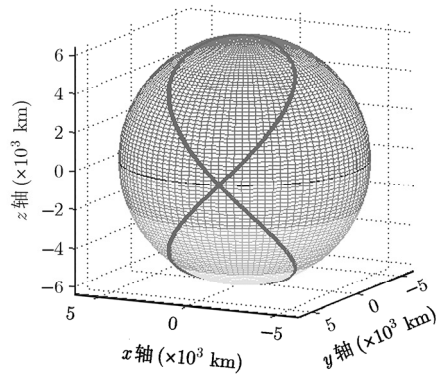


图 5 星下点轨迹

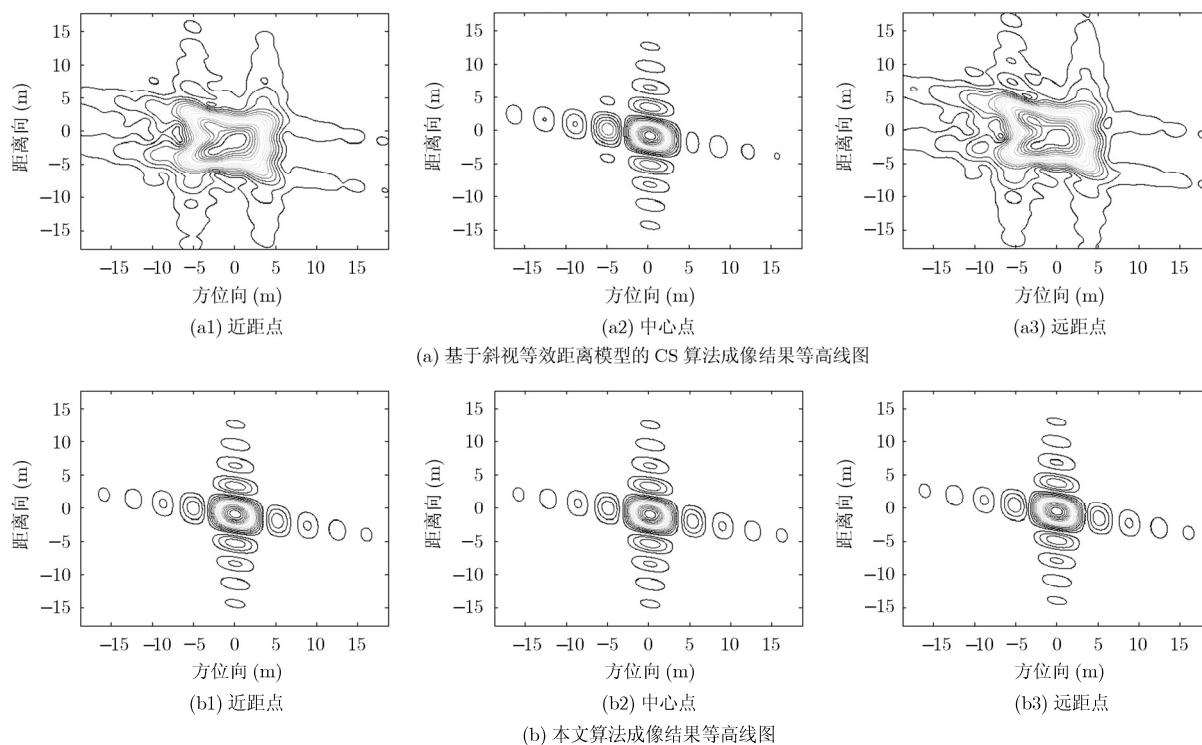


图6 基于斜视等效距离模型的CS算法和本文算法成像结果比较图

表2 本文算法成像结果质量评价

	距离向			方位向		
	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
近距点	2.67	-13.27	-9.81	3.00	-13.22	-10.02
中心点	2.65	-13.26	-9.80	3.00	-13.26	-10.04
远距点	2.65	-13.25	-9.81	3.00	-13.19	-9.94
理论值	2.66	-13.26	-9.80	3.00	-13.26	-9.80

瓣的非对称现象, 能够实现 GEO SAR 全孔径精确成像。

6 结束语

本文首先分析了 GEO SAR 成像几何关系, 根据 GEO SAR 的运动特点, 建立了曲线轨迹模型下的斜距方程, 结合级数反演, 推导出了 GEO SAR 回波信号的 2 维频谱高阶近似表达式。在此基础上, 提出了一种适用于 GEO SAR 曲线轨迹模型的改进 CS 成像算法。文章最后通过对不同距离的点目标进行仿真, 验证了本文模型的精确性和成像算法的有效性。

参考文献

[1] 尹建风, 李道京, 吴一戎. 顺轨三频三孔径星载 SAR 的运动目标检测及定位方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 902-907.

Yin Jian-feng, Li Dao-jing, and Wu Yi-rong. Research on the method of moving target detection and location with three-frequency three-aperture along-track spaceborne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(4): 902-907.

[2] Tomiyasu K. Synthetic aperture radar in geosynchronous orbit[C]. Digest International IEEE Antennas and Propagation Symposium, Maryland, USA, May 1978: 42-45.

[3] Tomiyasu K and Pacelli J L. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, 21(3): 324-329.

[4] Global earthquake satellite system: a 20-year plan to enable earthquake prediction. JPL Document, 2003.

[5] Bruno D, Hobbs S E, and Ottavianelli G. Geosynchronous synthetic aperture radar: concept design, properties and possible applications[J]. *Acta Astronautica*, 2006, 59(1-5):

- 149-156.
- [6] Tian Wei-ming, Hu Chen, Zeng Tao, *et al.*. Several special issues in GEO SAR system[C]. Proc. EUSAR 2010, Aachen, Germany, June 2010: 588-591.
- [7] 李真芳, 黄源宝, 保铮. 大面积连续实时 SAR 成像技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(4): 446-449.
Li Zhen-fang, Huang Yuan-bao, and Bao Zheng. Technology of continuous real-time SAR imaging [J]. *Journal of Xidian University*, 2003, 30(4): 446-449.
- [8] Raney R K. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.
- [9] 杨永红. 机载双站 SAR 后向投影成像算法[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(7): 113-115.
Yang Yong-hong. Back projection imaging formation for bistatic airborne SAR[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(7): 113-115.
- [10] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 274-275.
- [11] 黄岩, 李春升, 陈杰, 等. 高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35-38.
Huang Yan, Li Chun-sheng, Chen Jie, *et al.* Refined chirpscaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(3): 35-38.
- [12] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2007, 4(1): 93-96.
- [13] Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, Li Yan, *et al.* Range Doppler algorithm for bistatic missile-borne forward-looking SAR[C]. Proc. APSAR 2009, Xi'an, China, Oct. 2009: 960-963.
- [14] Liu Bao-chang, Wang Tong, Wu Qi-song, *et al.* Bistatic SAR data focusing using an Omega-K algorithm based on method of series reversion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2899-2912.
- [15] Davidson G W, Cumming L G, and Ito M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133.
- [16] Hu Cheng, Zeng Tao, and Zhu Yu. The accurate resolution analysis in Geosynchronous SAR[C]. Proc. EUSAR 2010, Aachen, Germany, June 2010: 925-928.
- 包 敏: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为 SAR/ISAR 成像及动目标检测技术.
- 周 鹏: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为弹载 SAR 成像技术.
- 保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为雷达成像、动目标检测、雷达目标识别等.
- 李亚超: 男, 1981 年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、SAR/ISAR 成像和地面运动目标检测技术.
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和目标识别.