

考虑电离层对 GEOSAR 影响的改进 CS 成像算法

王卓群, 李亚军, 李雁斌, 顾网平, 李芬

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘要: 地球同步轨道合成孔径雷达(GEOSAR)轨道位置高且合成孔径时间较长, 电离层的空时变化特性严重影响该雷达的聚焦性能。为解决电离层对 GEOSAR 成像聚焦性能的影响, 提出一种改进的 chirp scaling (CS) 成像算法。结合 GEOSAR 的轨道运动特点, 给出因电离层空时变化引起的回波信号模型, 提出了改进 CS 成像算法用以解决电离层对成像聚焦性能的影响。仿真结果表明: 该成像方法能较好地处理电离层影响, 可获得理想的聚焦成像结果。该方法为 GEOSAR 实现高精度成像提供了技术支撑。

关键词: 地球同步轨道合成孔径雷达; CS 成像算法; 电离层影响; 合成孔径时间; 聚焦性能

中图分类号:P 412.25

文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.06.016

CS Imaging Method for Geosynchronous SAR Considering Ionospheric Effects

WANG Zhuoqun, LI Yajun, LI Yanbin, GU Wangping, LI Fen

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Geosynchronous synthetic aperture radar (GEOSAR) has high orbital altitude and long synthetic aperture time. However, the key problem in GEOSAR imaging process is that ionospheric effects will result in the defocusing with the classical imaging algorithm. This paper proposes a new chirp scaling (CS) imaging algorithm. Firstly, based on the orbital motion characteristics of GEOSAR, the echo signal model based on ionospheric space-time variation is given. Then, an improved CS imaging algorithm is proposed to solve the influence of ionosphere on imaging focusing performance. Finally, the imaging simulations for the point targets are implemented. The imaging results show the correctness and effectiveness of the new imaging technique in solving ionospheric effects. This method provides technical support for high-precision imaging of GEOSAR.

Keywords: geosynchronous synthetic aperture radar (GEOSAR); chirp scaling (CS) imaging algorithm; ionospheric effects; synthetic aperture time; focusing performance

0 引言

地球同步轨道合成孔径雷达(GEOSAR)具有重访周期短和抗打击能力强等优点, 在军事和民用领域中具有广泛的应用前景和发展潜力^[1-6]。GEOSAR信号传输过程中, 不可避免受到电离层影响。对于低轨合成孔径雷达(low earth orbital synthetic aperture radar, LEOSAR)来说, 因合成孔径时间较短可忽略电离层对成像质量的影响。然而, GEOSAR一般工作于 L 波段, 由于合成孔径时间较长, 一般在小时量级, 电离层的时间变化特性将

严重影响该雷达的成像聚焦性能。

目前, 国内外学者在电离层对星载 SAR 聚焦性能影响的研究方面已取得了一定的成果^[7-11], 但相关研究主要集中在电离层对低轨 SAR 成像质量的影响, 而针对 GEOSAR 聚焦性能影响的研究较少。李亮等^[7]建立了电离层对中高轨道 SAR 系统的信号影响模型, 分析了电离层时间变化对中高轨 SAR 成像质量的影响。JEHLE 等^[8]研究了受电离层污染的 GEOSAR 的回波信号模型, 分析了电离层对距离及方位分辨能力的影响。然而, 由于 GEOSAR

的轨道位置较高, 合成孔径时间较长, 该雷达不再满足“停—走—停”的假设, 故收发路径中大气层引起的斜距误差也不相同^[9]。

因此, 本文基于非“停—走—停”假设, 针对电离层影响 GEOSAR 成像质量的问题, 提出了改进 chirp scaling (CS) 成像算法。首先, 根据射线跟踪法推导电离层引起的双程斜距误差模型, 理论推导受电离层影响的回波信号; 其次, 基于回波信号模型提出改进的 CS 成像算法; 最后, 仿真验证算法的有效性, 该算法可较好地解决电离层引起的目标位置偏移和分辨率下降的问题, 获得聚焦的成像结果。

1 电离层影响的回波信号模型

GEOSAR 所发射的电磁波信号经过外部空间、电离层、平流层、对流层, 最终达到地表目标, 其反射信号被该雷达接收。其中, 电离层中的大气折射致电磁波的非线性传输。因此, 本节详细分析了电离层折射所引起的斜距误差。

电离层不同于其他介质的主要参数之一就是电离层中的折射指数。在电离层中忽略电子碰撞和地磁场的影响, 对于 L 波段的 GEOSAR, 其电离层折射率可表示为

$$n_{\text{ion}}(t_0 + t_a, h) = \sqrt{1 - \frac{80.6 N_e(t_0 + t_a, h)}{f^2}} = 1 - \frac{40.3}{f^2} N_e(t_0 + t_a, h) \quad (1)$$

式中: $N_e(t_0 + t_a, h)$ 为在时刻 $t_0 + t_a$ 时电离层中的电子密度; f 为信号频率; h 为传播路径上任意点的高度。

由于掠射角趋近于 90°, 则电离层折射率变化引起的斜距误差为

$$R_{\text{ion}}(t_0 + t_a) = \int (n_{\text{ion}}(t_0 + t_a, h) - 1) dh = - \frac{40.3}{f^2} e_{\text{TEC}}(t_0 + t_a) \quad (2)$$

式中: e_{TEC} 为积分电子含量, 且 $e_{\text{TEC}}(t_0 + t_a) = \int N_e(t_0 + t_a, h) dh$ 。

由于 e_{TEC} 具有时间变化特性, 现假设 t_0 时刻的积分电子含量为 $e_{\text{TEC}0}$, 则 e_{TEC} 随慢时间 t_a 变化为

$$e_{\text{TEC}}(t_0 + t_a) = e_{\text{TEC}0} + E_1 t_a + E_2 t_a^2 + E_3 t_a^3 + \dots + E_n t_a^n \quad (3)$$

式中: $E_n (n = 1, 2, 3)$ 为 e_{TEC} 的 n 阶导数, 且 $E_n = \left. \frac{\partial^n e_{\text{TEC}}(t_0 + t_a)}{\partial t_a^n} \right|_{t_0}, n = 1, 2, 3$ 。

因此, 电离层引起的接收天线与地表目标之间的斜距误差为

$$R_{\text{ion}}(t_0 + t_a + \tau) = - \frac{40.3}{f^2} e_{\text{TEC}}(t_0 + t_a + \tau) \quad (4)$$

式中: τ 为雷达发射电磁波到目标的电磁波传输时间。

根据式(2)和式(4), 推导得到电离层引起的双程斜距误差为

$$R_{\text{all-ion}}(t_0 + t_a) = R_{\text{ion}}(t_0 + t_a) + R_{\text{ion}}(t_0 + t_a + \tau) = - \frac{40.3}{f^2} 2e_{\text{TEC}0} - q_1 t_a - q_2 t_a^2 - q_3 t_a^3 - q_4 \quad (5)$$

式中: $q_1 = \frac{40.3}{f_c C} (2E_1 + 2E_2 \tau + 3E_3 \tau^2); q_2 = \frac{40.3}{f_c C} \cdot (2E_2 + 3E_3 \tau); q_3 = \frac{40.3}{f_c C} 2E_3; q_4 = \frac{40.3}{f_c C} (E_1 \tau + E_2 \tau^2 + E_3 \tau^3)$ 。

在距离频率-方位时间域, GEOSAR 回波信号可表示为

$$\begin{aligned} S_{\text{ion}}(f_r, t_a) = & \rho_r(f_r) \rho_a(t_a) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma}\right) \cdot \\ & \exp\left(-j2\pi \frac{f_c + f_r}{C} R(t_0 + t_a)\right) \cdot \\ & \exp\left(-j2\pi \frac{f_c + f_r}{C} R_{\text{all-ion}}(t_0 + t_a)\right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\rho_r(\cdot), \rho_a(\cdot)$ 分别为雷达线性调频信号的距离窗函数和方位窗函数; γ 为雷达线性调频信号的调频率; C 为波速; f_c, f_r 分别为距离和方位频率; $R(t_0 + t_a)$ 为理想情况下的斜距模型。

考虑到距离频率 f_r 远小于载波频率 f_c , 可忽略 f_r 对方位脉冲响应的影响, 则电离层污染的回波信号可进一步表示为

$$S_{\text{ion}}(f_r, t_a) = A_i S(f_r, t_a) H_{\text{ir}}(f_r) H_{\text{ia}}(t_a) \quad (7)$$

式中:

$$S(f_r, t_a) = \rho_r(f_r) \rho_a(t_a) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma}\right) \cdot$$

$$\exp\left(-j2\pi \frac{f_c + f_r}{C} R(t_0 + t_a)\right);$$

$$H_{\text{ir}}(f_r) = \exp\left(-j2\pi \frac{80.6 e_{\text{TEC}0}}{(f_c + f_r) C}\right);$$

$$H_{\text{ia}}(t_a) = \exp(-j2\pi(q_1 t_a + q_2 t_a^2 + q_3 t_a^3));$$

$$A_i = \exp(-j2\pi q_0)。$$

式(7)中: $S(f_r, t_a)$ 为 GEOSAR 的理想回波信号距离频率-方位时间域表达式; $H_{\text{ir}}(f_r)$ 和 $H_{\text{ia}}(t_a)$ 分别为电离层对距离向和方位向脉冲响应函数的影响; A_i 为电离层对回波信号幅度的影响。下面详细分析

$H_{ir}(f_r)$ 和 $H_{ia}(t_a)$ 对点目标聚焦性能的影响。

式(7)中 $(f_c + f_r)^{-1}$ 的泰勒级数展开式

$$H_{ir}(f_r) =$$

$$\begin{aligned} & \exp\left(-j2\pi \frac{80.6e_{TEC0}}{f_c C} \left(1 - \frac{f_r}{f_c} + \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 - \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^3 + \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^4 + \dots\right)\right) = \\ & \exp\left(-j2\pi \frac{80.6e_{TEC0}}{f_c C}\right) \exp\left(j2\pi \frac{80.6e_{TEC0}}{f_c^2 C} f_r\right) \cdot \\ & \exp\left(-j2\pi \frac{80.6e_{TEC0}}{f_c^3 C} f_r^2\right) \cdot \\ & \exp\left(j2\pi \frac{80.6e_{TEC0}}{f_c^4 C} f_r^3\right) \exp\left(-j2\pi \frac{80.6e_{TEC0}}{f_c^5 C} f_r^4\right) \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)中: 第 1 个指数项表示电离层对回波信号幅度的影响; 第 2 个指数项体现了电离层引起的距离走动项, 其图像距离偏移量为 $\Delta_{ir} = 40.3e_{TEC0}/f_c^2$, 对低频段雷达影响较为严重; 其余指数项均引起距离分辨能力下降, 其峰值二次相位量为 $40.3\pi e_{TEC0} B_r^2/(f_c^3 C)$, 峰值高阶相位量为 $40.3\pi e_{TEC0} B_r^3 (1 - B_r/(2f_c))/(2f_c^4 C)$ 。当相位误差总量大于 $\pi/4$ 时, 将导致距离向分辨能力下降, 否则可忽略电离层对距离分辨能力的影响。 $H_{ia}(t_a)$ 可展开为

$$\begin{aligned} H_{ia}(t_a) = & \exp\left(-j2\pi \frac{80.6}{f_c C} E_1 t_a\right) \cdot \\ & \exp\left(-j2\pi \frac{80.6}{f_c C} E_2 t_a^2\right) \exp\left(-j2\pi \frac{80.6}{f_c C} E_3 t_a^3\right) \quad (9) \end{aligned}$$

式中: 第 1 个指数项为方位走动项, 表示图像方位偏移量为 $-\lambda R_c 40.3 E_1 / (f_c C V_s(t_0))$; 第 2 个和第 3 个指数项均引起方位分辨能力下降, 其峰值二次相位误差为 $40.3\pi E_2 T_{sar}^2 / (f_c C)$, 峰值高阶相位误差为 $40.3\pi E_3 T_{sar}^3 / (2f_c C)$ 。

2 改进 CS 成像算法

GEOSAR 的 CS 成像算法流程如图 1 所示, 通过一系列成像处理步骤, 最终获得清晰的点目标成像。

2.1 电离层影响处理步骤

步骤 1: 根据式(7)中电离层污染的 GEOSAR 回波信号 $S_{ion}(f_r, t_a)$, 首先通过相位补偿消除电离层对距离向成像聚焦性能的影响, 用双频时延差分估计法得到 e_{TEC} 平均值, 并用距离频率-方位时间域乘以 $H_{ir}(f_r)$ 的共轭相位补偿函数 $\text{conj}(H_{ir}(f_r))$, 即

$$S_{ion1}(f_r, t_a) = S_{ion}(f_r, t_a) \cdot \text{conj}(H_{ir}(f_r)) \quad (10)$$

步骤 2: 根据式(9)可知, $H_{ia}(t_a)$ 为 e_{TEC} 随方位慢时间的变化特性对方位向脉冲响应函数的影响函

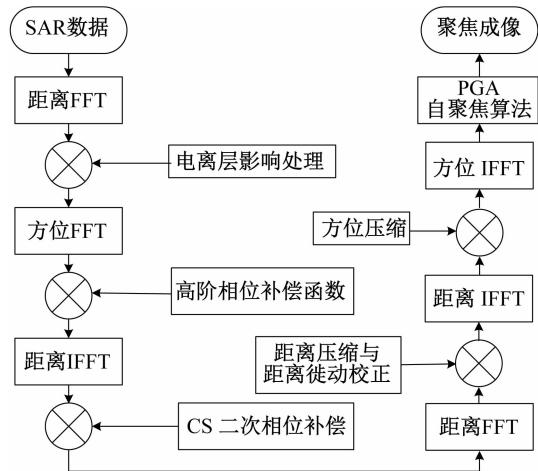


图 1 GEOSAR 的 CS 成像算法流程图

Fig. 1 Flowchart of CS imaging algorithm for GEOSAR

数。通过双频时延差分估计法仅能获得 e_{TEC} 大致变化趋势, 得到粗估计函数 $\tilde{H}_{ia}(t_a)$ 。在距离频率-方位时间域进行相位补偿处理, 即

$$S_{ion2}(f_r, t_a) = S_{ion1}(f_r, t_a) \cdot \text{conj}(\tilde{H}_{ia}(t_a)) \quad (11)$$

步骤 3: 在非“停—走—停”假设条件下, GEOSAR 信号发射与接收路径的 e_{TEC} 变化对雷达聚焦性能的影响函数为 $H_i(f_r, t_a, \tau)$, 仍然仅能获得粗估计函数 $\tilde{H}_i(f_r, t_a, \tau)$ 。在距离频率-方位时间域进行相位补偿处理, 有

$$\begin{aligned} S'(f_r, t_a) = & S_{ion2}(f_r, t_a) \cdot \\ & \text{conj}(\tilde{H}_i(f_r, t_a, \tau)) \quad (12) \end{aligned}$$

基于上述步骤, 处理后的信号中包含了理想回波信号 $S(f_r, t_a)$ 和一小部分电离层影响残留信号 $H_{i2}(f_r, t_a)$, 有

$$S_{ion2}(f_r, t_a) = S(f_r, t_a) H_{i2}(f_r, t_a) \quad (13)$$

通过方位向傅里叶变换, 应用级数反演算法获得二维频谱, 有

$$\begin{aligned} S(f_r, f_a) = & \rho_r(f_r) \rho_a(f_a) \exp(-j2\pi B_a(f_a)) \cdot \\ & \exp(-j2\pi B_1(f_a) f_r) \cdot \exp(-j2\pi B_2(f_a) f_r^2) \cdot \\ & \exp(-j2\pi B_3(f_a) f_r^3) H_{i2}(f_r, f_a) \quad (14) \end{aligned}$$

式中: $B_a(f_a)$ 为方位调频相位; $B_1(f_a), B_2(f_a), B_3(f_a)$ 为距离与方位之间的耦合函数。

2.2 弯曲轨迹处理部分

步骤 1: 高阶相位补偿。由式(14)可知, GEOSAR 的点目标二维频谱表达式存在高阶距离及方位耦合项^[12], 这使得该雷达回波信号不同于参考 CS 的信号形式, 因此, 首先去除该高阶耦合项, 即在

二维频域乘以其高阶相位补偿函数,该补偿函数为

$$H_1(f_r, f_a) = \exp(j2\pi B_3(f_a) f_r^3) \quad (15)$$

步骤 2:CS 相位函数处理。通过距离向逆傅里叶变换,获得回波信号的距离时间-方位频率域表达式。由于回波信号的多普勒调频率为 $K(f_a) = 1/(2B_2(f_a))$, 为构造 CS 相位函数,该信号可重新描述为

$$\begin{aligned} S_1(t_r, f_a) = & \rho_r(t_r) \rho_a(f_a) \cdot \\ & \exp(j\pi K(f_a) (t_r - B_1(f_a))^2) \cdot \\ & \exp(-j2\pi B_a(f_a)) H_{i2}(t_r, f_a) \end{aligned} \quad (16)$$

对比 CS 信号形式,计算获得的 CS 因子,有

$$d(f_a) = (CB_1(f_a) - 2R_{sc})/2R_{sc} \quad (17)$$

CS 二次相位函数为

$$\begin{aligned} H_2(t_r, f_a) = & \exp[j\pi K(f_a) d(f_a) \cdot \\ & (t_r - B_1(f_a))^2] \end{aligned} \quad (18)$$

因此,CS 处理后的回波信号为

$$\begin{aligned} S_2(t_r, f_a) = & \rho_r(t_r) \rho_a(f_a) \exp(-j2\pi B_a(f_a)) H_{i2}(f_r, f_a) \cdot \\ & \exp[j\pi K(f_a)(1 + d(f_a)) (t_r - B_1(f_a))^2] \end{aligned} \quad (19)$$

步骤 3: 距离压缩处理与距离徙动校正。对式(18)的信号 $S_2(t_r, f_a)$ 进行距离压缩处理,即在二维频域乘以距离压缩函数,该函数为

$$H_3(f_r, f_a) = \exp\left\{j\pi f_r^2 / \left[\frac{K(f_a)}{(1 + d(f_a))}\right]\right\} \quad (20)$$

通过距离徙动校正将图像距离向聚焦于点目标斜距 R_{sm} , 其校正函数为

$$H_4(f_r, f_a) = \exp\left(j2\pi\left(B_1(f_a) - \frac{2R_{sm}}{C}\right)f_r\right) \quad (21)$$

步骤 4: 方位压缩处理。在距离时间-方位频率域乘以方位压缩函数,该函数为

$$H_5(f_a) = \exp\left(j2\pi\left(B_a(f_a) - f_a \frac{X_m}{V_s(t_0)}\right)\right) \quad (22)$$

2.3 PGA 算法处理

基于上述成像处理流程,回波信号仍存在残余电离层相位误差。引入传统的 PGA 技术^[9],使处理后成像结果聚焦于真实目标位置。

3 仿真分析

本节基于国际全球定位系统服务(IGS)提供的全球电离层网格数据,仿真分析电离层对 L 波段 GEOSAR 聚焦性能的影响,并验证改进 CS 成像算法的有效性。GEOSAR 参数见表 1。

表 1 GEOSAR 参数

Tab. 1 GEOSAR parameters

参数	数值	参数	数值
轨道高度/km	36 578	方位波束宽度/(°)	0.2
近地点幅角/(°)	90	波束俯仰角/(°)	0.6
升交点赤经/(°)	105	信号载频/GHz	1.25
轨道倾角/(°)	57	信号带宽/MHz	25
e_{TEC}	20	相干积累时间/s	1 000

根据 IGS 提供的 2014 年 11 月 1 日全球电离层网格图,以北京地区为例观测 e_{TEC} 的日变化趋势,如图 2 所示。距离偏移量为 4.7 m,距离相位误差为 0.03 rad,方位偏移量为 2.1 m,相位误差随相干积累时间的长度有关,在 1 000 s 的相干积累时间内的方位相位误差为 4.7 rad。

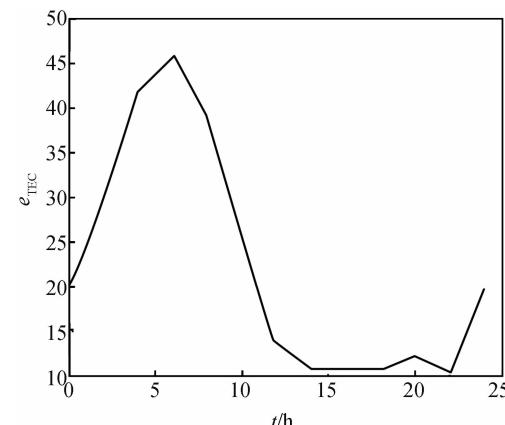


图 2 北京某地区 e_{TEC} 日变化趋势(2014 年 11 月 1 日)

Fig. 2 Daily variant tendency of e_{TEC} in Beijing (November 1st, 2014)

研究当相干积累时间为 1 000 s 时,电离层对成像聚焦性能的影响及改进 CS 算法的成像效果,如图 3 所示。距离及方位分辨率理论值分别为 6 m 和 3.15 m。由于受电离层影响,距离向偏离场景中心位移量为 4.72 m,方位向偏离场景中心位移量为 2.11 m。其成像质量如下:在距离向 $\Delta_{IRW} = 6$ m, $\Delta_{PSLR} = -13.25$ dB, $\Delta_{ISLR} = -10.14$ dB;在方位向 $\Delta_{IRW} = 5.89$ m, $\Delta_{PSLR} = -0.51$ dB, $\Delta_{ISLR} = -2.92$ dB。

用基于 GEOSAR 的改进 CS 成像算法,图像成像将聚焦于场景中心,其成像质量如下:在距离向 $\Delta_{IRW} = 6$ m, $\Delta_{PSLR} = -13.25$ dB, $\Delta_{ISLR} = -10.14$ dB;

在方位向 $\Delta_{IRW} = 3.17 \text{ m}$, $\Delta_{PSLR} = -13.14 \text{ dB}$, $\Delta_{ISLR} = -10.92 \text{ dB}$ 。对比二维分辨率理论值可知,用本文提出的改进CS成像算法可有效消除电离层对GEOSAR聚焦性能的影响,获得高精度成像结果。

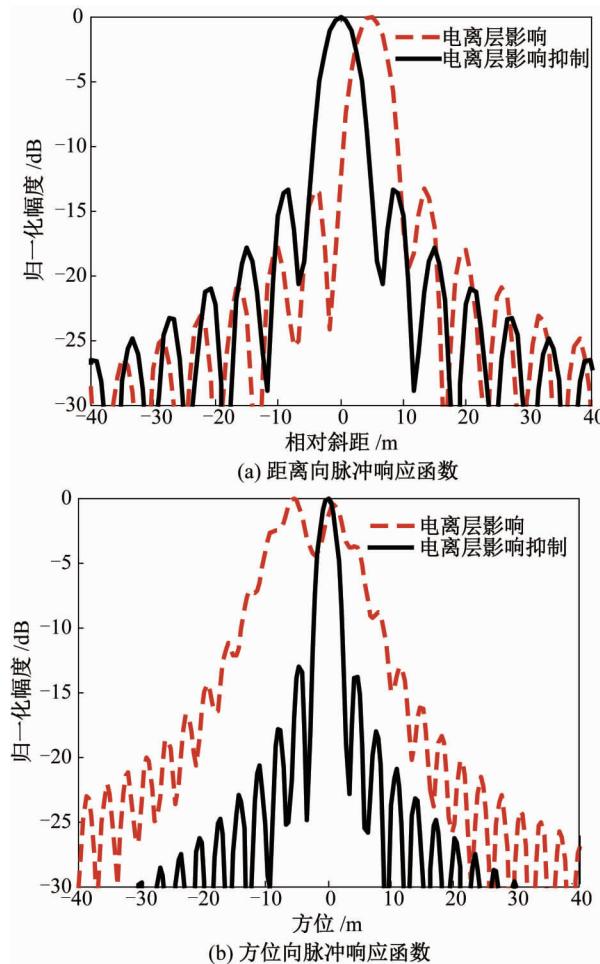


图3 电离层影响及其抑制处理后的成像结果

Fig. 3 Ionospheric effects and imaging results obtained by eliminating ionospheric influences

4 结论

本文针对电离层引起的成像散焦问题,提出了基于GEOSAR的改进CS成像算法。在非“停一走一停”假设下,考虑到电离层大气折射率引起的斜距误差,以及时延引起的双程传播路径不同,推导了电离层影响的斜距误差及回波信号模型,并基于此,提出了改进CS成像算法,主要包括电离层影响处理、弯曲轨迹处理及PGA自聚焦三部分。仿真结果表明:电离层导致了距离向偏移和方位模糊问题,改进CS算法则可有效处理该问题,获得清晰的成像结果。

参考文献

- [1] CAZZANI L, COLESANTI C, LEVA D, et al. A ground-based parasitic SAR experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2132-2141.
- [2] 陈筠力, 李威. 国外SAR卫星最新进展与趋势展望[J]. 上海航天, 2016, 33(6): 1-19.
- [3] RODON J, BROQUETAS A, GUARNIERI A, et al. Geosynchronous SAR focusing with atmospheric phase screen retrieval and compensation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(8): 4397-4404.
- [4] 席龙梅, 盛磊, 葛家龙. 星载滑动聚束SAR模糊特性分析与仿真[J]. 上海航天, 2011, 28(1): 1-6.
- [5] ANDRASCHKO M, ANTOL J, BAIZE R, et al. The potential for hosted payloads at NASA[C]// IEEE Aerospace Conference. 2012: 1-12.
- [6] BRUNO D, HOBBS S, OTTAVIANELLI G. Geosynchronous synthetic aperture radar: concept design, properties and possible applications[J]. Acta Astronautica, 2006, 59(1): 149-156.
- [7] LI L, ZHANG Y, DONG Z, et al. Ionospheric polarimetric dispersion effect on low-frequency spaceborne SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2163-2167.
- [8] JEHLE M, FREY O, SMALL D, et al. Measurement of ionospheric TEC in spaceborne SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(6): 2460-2468.
- [9] WANG H, WU Z, KANG S, et al. Monitoring the marine atmospheric refractivity profiles by ground-based GPS occultation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 10(4): 962-965.
- [10] BOSSER P, BOCK O, PELON J, et al. An improved mean-gravity model for GPS hydrostatic delay galibration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 3-7.
- [11] XING M, JIANG X, WU R, et al. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2870-2883.
- [12] JIANG Y, WANG Z. Analysis for resolution of bi-static SAR configuration with geosynchronous transmitter and UAV receiver[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, 2013(6): 1-10.

(本文编辑:姚麒伟)