

电离层不规则体对 P 波段星载 SAR 成像的影响*

李力, 杨淋, 张永胜, 董臻, 梁甸农

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 电离层不规则体导致星载合成孔径雷达(SAR)信号产生幅度及相位闪烁,严重影响低波段星载 SAR 的图像分辨性能。推导了具有普遍性的幂律谱对应的双频双点互相关函数。基于此研究了电离层对星载 P 波段 SAR 分辨性能的影响及其规律。研究表明,电离层不规则体导致星载 P 波段 SAR 两维分辨率恶化,图像峰值增益损失严重。电离层不规则体强度,谱指数,外尺度等参数的增大都会导致星载 SAR 图像分辨率及峰值增益进一步下降。基于相位屏技术的数值仿真结果验证了本文研究。

关键词: 电离层效应;不规则体;星载合成孔径雷达

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)05-0158-05

Effects of ionospheric irregularities on spaceborne P band SAR imaging

LI Li, YANG Lin, ZHANG Yongsheng, DONG Zhen, LIANG Diannong

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Spaceborne SAR imaging at lower frequencies such as P/UHF/VHF band is severely affected by ionospheric irregularities induced signal scintillation. Mutual coherence function of signals penetrating through the ionosphere was deduced. Electron density in the ionosphere was modeled by Rino's power density function. Patterns were studied that how spaceborne P band SAR image performances varies with parameters of ionospheric irregularities. The study shows that irregularities in ionospheric will defocus the image, causing considerable gain loss of the imaging. Increases in irregularity strength parameter CkL , outer scale L_o , and index of the power density function will further degrade the image. The study is validated by numerical simulation based on phase screen technique.

Key words: ionospheric effects; irregularity; spaceborne synthetic aperture radar (SAR)

P 波段星载合成孔径雷达(SAR)具有对植被、浅地表的穿透能力,在军事及民用方面皆具有巨大潜力^[1-2]。电离层传播效应是低波段星载 SAR 向高分辨方向发展的瓶颈之一^[2-4]。电离层传播效应可分为背景电离层及不规则体^[2-4]。研究表明,电离层不规则体引起的闪烁效应可导致 P 波段星载 SAR 方位向分辨率下降到百米量级^[3-4],且对距离向分辨率也有一定影响^[5]。

Ishimaru^[4]在弱闪烁假设下建立了电离层对星载 SAR 二维模糊函数影响的数学模型。Xu^[6]对模型的使用范围进行了扩展。但是 Ishimaru 和 Xu 都是在模型之外单独讨论了不规则体对 SAR 距离向图像的影响。Li^[5]对模型进行了补充,使模型中包含了电离层不规则体对距离向的影响及影响随下视角的变化。

在理论模型的基础上,电离层对星载 SAR 的影响规律也得到初步研究。研究表明:由于电离

层的影响,随着频率降低,星载 SAR 的分辨率迅速下降^[4-7],其方位向的分辨率将主要受到电离层而不是天线尺寸的限制。根据测量,电离层的不规则体强度的变化范围跨度达 5 个数量级^[8];另外,从 1 到 6 的谱指数都在报道中出现过^[2];外尺度范围在几千米到几十千米^[9]。显然,电离层参数如此剧烈的变化将导致 SAR 性能的剧烈变化,有必要对其变化的规律及范围进行分析。

1 不规则体对 SAR 图像的影响理论

1.1 电离层对 SAR 图像的影响

电离层对星载 SAR 的影响理论基于 SAR 模糊函数。电离层影响下 SAR 的模糊函数为^[4]

$$\chi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \sum_n \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{g}_n(\omega, r) \bar{f}_n^*(\omega, r_{0n}) d\omega \quad (1)$$

* 收稿日期:2012-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61101178);国家部委资助项目

作者简介:李力(1984—),男,陕西西安人,博士研究生,E-mail:li.yuan0719@gmail.com;

张永胜(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:zyzscn@163.com

$\chi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ 表示聚焦于 \mathbf{r}_0 处的模糊函数在 \mathbf{r} 的取值。其中

$$\bar{g}_n(\omega, r_n) = \bar{u}_i(\omega) \bar{G}_0(\omega, r_n) \quad (2)$$

$$\bar{f}_n(\omega, r_n) = \bar{u}_i(\omega) \exp\left(j \frac{\omega}{c} 2r_{0n}\right) \quad (3)$$

$$\bar{G}_0(\omega, r_n) = \frac{\exp\left(j2 \int k(\omega) ds + 2j\psi(\omega, n)\right)}{(4\pi r_n)^2} \quad (4)$$

其中, $\bar{u}_i(\omega)$ $\bar{f}(\omega)$ 和 $\bar{G}_0(\omega)$ 分别是发射信号、匹配函数以及格林函数的傅立叶变换。 $\psi(\omega, n)$ 表示电磁波穿过电离层不规则体导致的相位误差。 $k(\omega)$ 表示电磁波在背景电离层中的传播常数, 积分是在传播路径上进行的。

由式(1) ~ (4) 可见, 考虑电离层不规则体引入的相位误差时, SAR 的模糊函数是一个二维随机信号。Li 将模糊函数二阶矩写为 TFTPFCF 的函数^[5] (见式(5))。其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示数学期望。 $\Gamma_{1,1}$ 表示双程穿过电离层的信号 TFTPFCF。定义为

$$\begin{aligned} \langle |\chi(\mathbf{r}, \mathbf{r})_0|^2 \rangle &= (2\pi)^2 \sum_m \sum_n \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\Gamma_{1,1} \right. \\ &\cdot \exp\left(j2 \left(\int_{r_m} k(\omega_1) ds_m \int_{r_n} k(\omega_2) ds_n \right) \right) \\ &\cdot \exp\left(-j2 \left(\frac{\omega_1 r_{0m} - \omega_2 r_{0n}}{c} \right)\right) \Big] d\omega_1 d\omega_2 \quad (5) \end{aligned}$$

$$\Gamma_{1,1} = \langle \exp\{2j[\psi_1(\omega_1, \boldsymbol{\rho}_1) - \psi_2(\omega_2, \boldsymbol{\rho}_2)]\} \rangle \quad (6)$$

1.2 Rino 谱对应的 TFTPFCF 推导

根据上节分析, 星载 SAR 模糊函数二阶矩受到穿过电离层信号的 TFTPFCF 的调制。本节推导 TFTPFCF 的解析表达式, 以分析不规则体对 P 波段 SAR 成像的影响。

根据大数定理, 电离层导致的随机相位分布趋于高斯分布。对于高斯分布, 有

$$\langle \exp(j\phi) \rangle \approx \exp\left(-\frac{1}{2} \langle \phi^2 \rangle\right) \quad (7)$$

因此, 式(7) 可以写为

$$\Gamma_{1,1}(\omega_1, \omega_2, \boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{1,1}(\omega_1, \omega_2, dx) &= \exp\left(-2r_e^2(\lambda_1^2 \sec\theta_1 + \lambda_2^2 \sec\theta_2) LGC_s q_0^{-2\nu+1} \frac{\Gamma\left(v - \frac{1}{2}\right)}{4\pi\Gamma\left(v + \frac{1}{2}\right)}\right) \\ &\cdot \exp\left(4r_e^2 \lambda_1 \lambda_2 \sec\theta_1 \sec\theta_2 LGC_s \cos\theta \left|\frac{y}{2q_0}\right|^{v-1/2} \frac{K_{v-1/2}(q_0 y)}{2\pi\Gamma\left(v + \frac{1}{2}\right)}\right) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\approx \exp(-2 \langle [\psi_1(\omega_1, \boldsymbol{\rho}_1) - \psi_2(\omega_2, \boldsymbol{\rho}_2)]^2 \rangle) \quad (8)$$

而

$$\begin{aligned} &\langle [\psi_1(\omega_1, \boldsymbol{\rho}_1) - \psi_2(\omega_2, \boldsymbol{\rho}_2)]^2 \rangle \\ &= R_\phi(\omega_1, \omega_1, 0) + R_\phi(\omega_2, \omega_2, 0) \\ &\quad - 2R_\phi(\omega_1, \omega_2, \boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2) \quad (9) \end{aligned}$$

其中, $R_\phi(\omega_1, \omega_2, \boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_2) = \langle \psi(\omega_1, \boldsymbol{\rho}_1) \psi(\omega_2, \boldsymbol{\rho}_2) \rangle$ 表示电离层导致的随机相位的互相关函数。其表达式依赖于电子密度不规则体的功率谱。Rino 提出的幂律谱考虑了各向异性的电离层不规则体^[10], 幂律谱结合相位屏理论的结果得到了实测数据的验证^[11], 目前被广泛应用于电离层传播效应建模及其影响研究中^[12-14]。其表达式如下^[10]

$$\begin{aligned} S_\phi(\kappa) &= \frac{1}{4} \pi^{-3/2} r_e^2 \lambda^2 GC_k L \sec\theta \left(\frac{2\pi}{1000}\right)^{p+1} \\ &\cdot \frac{\Gamma(p/2)}{\Gamma\left(\frac{p+1}{2}\right) (\kappa_0^2 + \kappa^2)^{p/2}} \quad (10) \end{aligned}$$

其中 $\kappa = 2\pi/x$ 表示空间波数, $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ 表示外尺度 L_0 对应的波数, r_e 是经典电子半径, λ 是信号波长, G 是一个几何因子, $C_k L$ 为电离层不规则体的强度, 表征了电子密度波动水平。 θ 是下视角, p 是谱指数, $\Gamma(\cdot)$ 是伽玛函数。

由推导可得 Rino 功率谱对应的相关函数为

$$\begin{aligned} &R_\phi(\omega_1, \omega_2, y) \\ &= r_e^2 \lambda_1 \lambda_2 \sec\theta_m \sec\theta_n GC_s \cos\theta \left|\frac{y}{2\kappa_0}\right|^{\frac{p}{2}-\frac{1}{2}} \frac{K_{\frac{p}{2}-\frac{1}{2}}(\kappa_0 y)}{2\pi\Gamma(v+1/2)} L \quad (11) \end{aligned}$$

其中 $K_\nu(\cdot)$ 表示 ν 阶虚宗量汉克尔函数。 $\Gamma(\cdot)$ 是 gamma 函数。特别地

$$R_\phi(\omega_1, \omega_2, 0) = r_e^2 \lambda_1 \lambda_2 \sec\theta GC_s L q_0^{-2\nu+1} \frac{\Gamma\left(v - \frac{1}{2}\right)}{4\pi\Gamma\left(v + \frac{1}{2}\right)} \quad (12)$$

将式(9)、(11)、(12) 代入式(8), 得到穿过电离层信号的 TFTPFCF, 见式(13)。将式(13) 代入式(5) 即是电离层不规则体影响下的 SAR 模糊函数二阶矩。

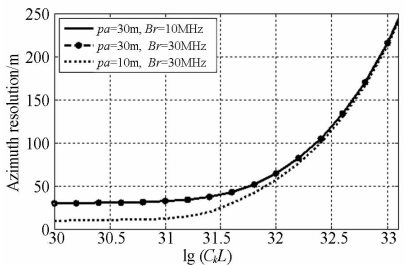
2 不规则体对 SAR 图像的影响分析

由于模糊函数二阶矩中参与相参叠加的信号受到了 TFTPFCF 的加权, 导致相参叠加的有效孔径缩短, 有效带宽减小。因此, 方位向和距离向信号的分辨率都会受到影响, 相应的主瓣增益也会降低。对于特定的系统参数, 图像的质量与实际的电离层条件有关。

针对理论方位分辨率(m) 及信号带宽(MHz) 为 $[30, 10], [30, 30], [10, 30]$ 的三组 P 波段($f_c = 435\text{MHz}$) 系统参数, 根据式(13)、计算了不规则体影响下的 SAR 模糊函数二阶矩, 分析了星载 SAR 分辨率(主瓣 3dB 宽度) 及主瓣峰值增益随不规则体参数的变化。下文的分析中, 若无进一步说明, 都采用以下默认参数: 电离层不规则体强度 $C_k L = 10^{32}$, 谱指数 $p = 4$, 外尺度 $L_o = 15\text{km}$ 。

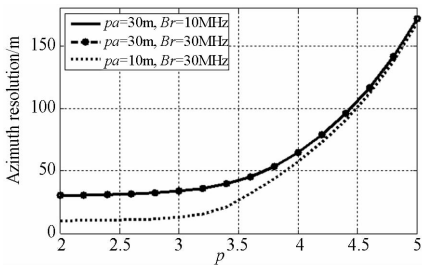
2.1 分辨率随参数的变化

不规则体参数变化对方位分辨率的影响如图 1。由于 $C_k L$ 变化范围较大, 本文图像性能随不规则体强度变化的图中都以 $\lg(C_k L)$ 为横轴。



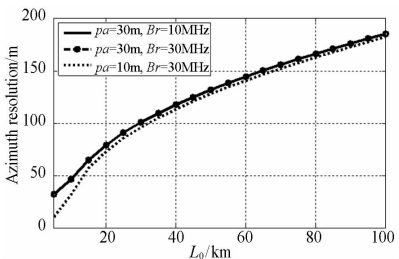
(a) 方位分辨率随不规则体强度的变化

(a) Azimuth resolution versus irregularity strength



(b) 方位分辨率随谱指数的变化

(b) Azimuth resolution versus phase power law index



(c) 方位分辨率随外尺度的变化

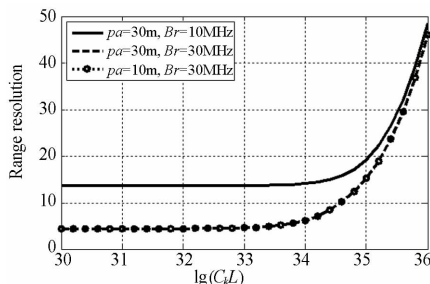
(c) Azimuth resolution versus outer scale

图 1 方位分辨率随不规则体参数的变化

Fig. 1 Azimuth resolution versus irregularity parameters

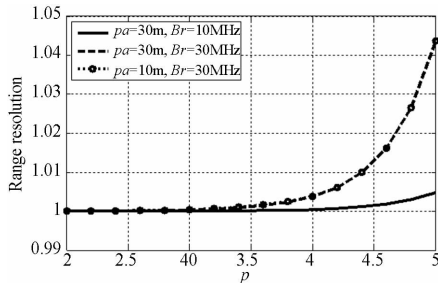
根据分析结果, 方位分辨率随不规则体参数变化规律: (1) 由图 1 可见, 随着 $C_k L_p, L_o$ 的增加, 方位向分辨率将不再取决于系统设计的理论分辨率, 而是取决于电离层参数, 这与其他作者^[7] 的结论相同。(2) 在不规则体参数变化范围内, 方位分辨率恶化达百米量级。(3) 不规则体对方位分辨率的影响随着信号带宽的变化很小, 可以忽略。

斜距分辨率随不规则体的变化如图 2。



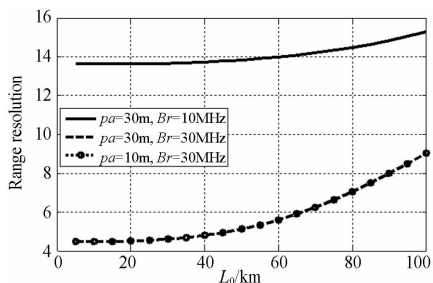
(a) 斜距分辨率随不规则体强度的变化

(a) Range resolution versus irregularity strength



(b) 斜距分辨率变化随谱指数的变化

(b) Range resolution increase versus phase power law index



(c) 斜距分辨率随外尺度的变化

(c) Range resolution versus outer scale

图 2 斜距分辨率随不规则体参数的变化

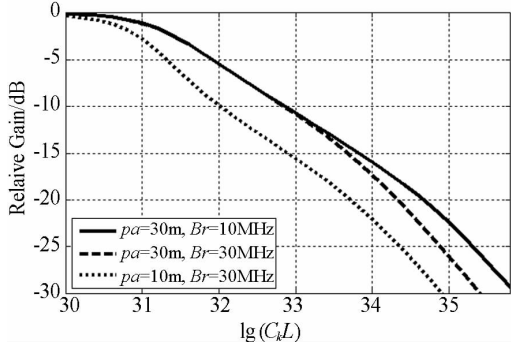
Fig. 2 Range resolution versus irregularity parameters

由于不规则体对斜距分辨率影响较小, 图 2(b) 中纵轴为不规则体影响下星载 SAR 斜距分辨率与无电离层影响的斜距分辨率的比值。由图可见, 斜距分辨率随不规则体参数变化具有如下规律: (1) 斜距分辨率恶化总是随着不规则体参数的增大而更加严重, 最严重时下降至几十米。(2) 由图 2(a)、(c) 可见, 随着不规则体强度及外尺度增加, 不同信号带宽对应的斜距分辨率之间的差异越来越小, 说明斜距分辨率受到不规则体影响越来越大。(3) 在当前电离层不规则体水平下, 谱指数的

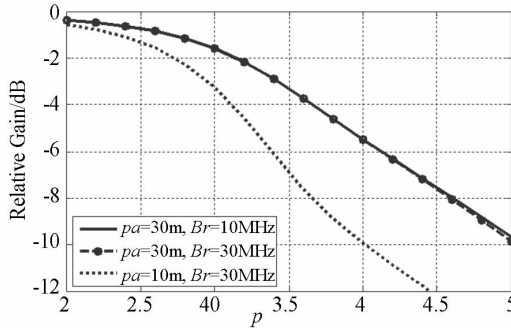
变化对斜距分辨率的影响可忽略。(4) 与方位分辨率的变化规律类似,不规则体对斜距分辨率的影响随系统方位分辨率变化可忽略。

2.2 峰值增益随参数的变化

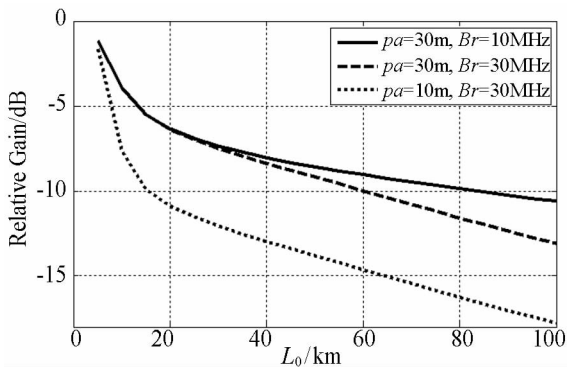
图 3 统计了模糊函数峰值增益随不规则体强度、谱指数及外尺度的变化。图中增益用无电离层影响时的峰值增益进行了归一化。



(a) 峰值相对增益随不规则体强度的变化
(a) Relative gain versus irregularity strength



(b) 峰值相对增益随谱指数的变化
(b) Relative gain versus phase power law index



(c) 峰值相对增益随外尺度的变化
(c) Relative gain versus outer scale

图 3 增益损失随不规则体参数的变化

Fig. 3 Relative gain versus irregularity parameters

由图 3 可见,峰值增益随着不规则体参数的变化有以下规律:(1) 峰值增益损失总是随着不规则体参数的增大而更加严重,在不规则体参数变化范围内,增益损失可超过 10dB。(2) 高分辨率系统的增益损失总是大于低分辨率系统。其中

信号带宽变化对于图像增益的影响只有在不规则体影响较为严重时才有所体现。

2.3 仿真实验

前文基于穿过电离层信号的 TFTPCF 对 SAR 模糊函数的影响模型,从理论上分析了星载 SAR 图像性能随电离层不规则体参数的变化。本节通过数值仿真结果与理论分析结果相对比来验证理论分析的正确性。

相位屏技术广泛应用于星载 SAR 回波模拟,可以在星载 SAR 回波中反映电离层的各种传播效应,特别是不规则体的影响^[12-13]。相位屏技术将电离层等效为某高度上只改变信号相位的薄屏。由相位屏出来的电磁波复振幅具有以下形式

$$U(x, y, 0^+) = U(x, y, 0) \exp(-j\phi(x, y, z)) \quad (14)$$

其中 $U(x, y, 0)$ 和 $U(x, y, 0^+)$ 表示信号穿过相位屏前后复振幅的空间分布。 $\phi(x, y, 0)$ 表示相位屏上的相位,可以由 Rino 功率谱公式(10)生成。信号穿过相位屏后在屏和地面之间的传播过程可以通过赫姆霍兹方程的解得到^[14]

$$W(k_x, k_y, z) = W_0(k_x, k_y, 0)$$

$$\exp\left(\frac{k_x^2 + k_y^2}{2jk_0 \cos\theta} z - \tan\theta(k_x \cos\phi + k_y \sin\phi)z\right) \quad (15)$$

其中 θ 和 ϕ 分别表示下视角和斜视角。 $W_0(k_x, k_y, 0)$ 、 $W(k_x, k_y, z)$ 分别表示信号穿过相位屏后和到达地面时复振幅空间二维分布的空间傅立叶变换。图 4 展示了利用相位屏方法生成的受电离层影响的 P 波段星载 SAR 回波的成像结果。仿真中方位理论分辨率 10m,信号带宽为 50MHz。电离层不规则体采用本文默认参数。

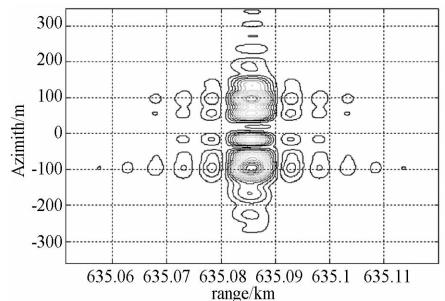
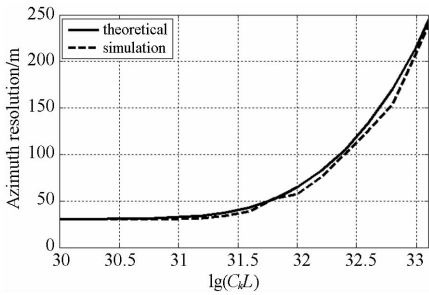


图 4 电离层不规则体影响下的 SAR 图像

Fig. 4 SAR image affected by ionospheric irregularities

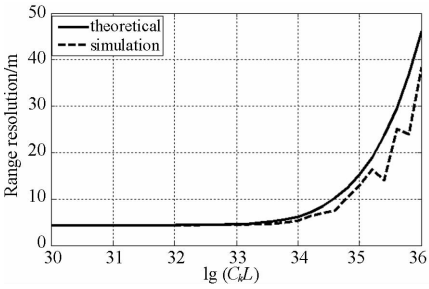
采用与 2.2 节理论分析相同的电离层不规则体参数,利用相位屏技术生成了星载 P 波段 SAR 单点目标回波并成像,将幅度图像的 300 次蒙特卡洛仿真结果进行平均,统计其分辨率和峰值增益,得到电离层不规则体影响下分辨率的数值仿真结果,与 2.2 节中的理论分析结果对比。图

5 是数值仿真与理论分析的对比结果。



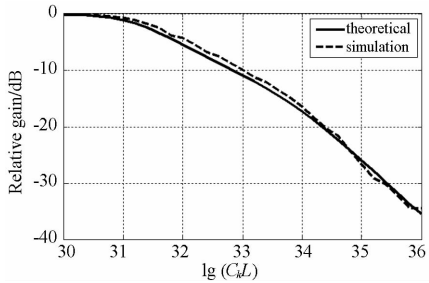
(a) 方位分辨率随不规则体强度的变化

(a) Azimuth resolution versus irregularity strength



(b) 斜距分辨率随不规则体强度的变化

(b) Range resolution versus irregularity strength



(c) 峰值增益随不规则体强度的变化

(c) Relative Gain versus irregularity strength

图 5 理论与蒙特卡洛仿真对比

Fig. 5 Comparisons between theory and simulation results

仿真结果表明,星载 P 波段 SAR 图像分辨性能随不规则体参数变化的蒙特卡洛仿真统计结果与理论计算结果吻合得较好,图中只给出了 [30m,30MHz] 的系统参数下分辨性能随不规则体强度对比结果。),验证了本文理论的正确性。

3 结束语

低波段星载 SAR 是 SAR 系统发展的重要方向之一。在电离层的影响下,低波段星载 SAR 系统的分辨性能不仅取决于 SAR 系统参数,更取决于电离层的影响,尤其是不规则体的影响。

本文推导了 Rino 功率谱模型对应的 TFTPFCF,基于此研究了电离层对星载 SAR 图像分辨性能的影响随电离层不规则体参数的变化,并通过蒙特卡洛仿真实验验证了理论分析的正确性。研究表明,SAR 分辨性能对于电离层不规则体参数具有强依赖性。不规则体强度、谱指数、外尺度的增

大都会导致星载 SAR 图像分辨性能进一步恶化。对于 P 波段(435MHz)星载 SAR,电离层不规则体参数的变化导致的方位分辨率恶化可达百米量级,5 米斜距分辨率可下降至几十米。电离层不规则体导致的图像增益损失是另一个不可忽略的重要影响。对于星载 P 波段高分辨 SAR 系统,两维的增益损失可能高达 20dB。

本文的结果是基于 Rino 的幂律谱,在几组特定的 SAR 系统参数下得到的,但分析方法与具体的功率谱及 SAR 系统参数无关,同样可用于其他形式的功率谱及系统参数。

参考文献 (References)

- [1] Quegan S, Le Toan T. Comparison of space-based technologies for measuring BIOMASS: The road to the BIOMASS mission [C]. IGARSS. Munich: 2012.
- [2] Xu Z W, Wu J, Wu Z S. A survey of ionospheric effects on space-based radar [J]. Waves in Random Media, 2004, 14 (2): S189 - S273.
- [3] Liu J, Kuga Y, Ishimaru A, et al. Ionospheric effects on SAR imaging: A numerical study [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41 (5): 939 - 947.
- [4] Ishimaru A, Kuga Y, Liu J. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz [J]. Radio Science, 1999, 34 (1): 257 - 268.
- [5] Li L L, Li F. SAR imaging degradation by ionospheric irregularities based on TFTPFCF analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45 (5): 1123 - 1130.
- [6] Xu Z W, Wu J, Wu Z S. Potential effects of the ionosphere on space-based SAR imaging [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56 (7): 1968 - 1975.
- [7] Goriachkin O V. Azimuth resolution of spaceborne P, VHF-band SAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1 (4): 251 - 254.
- [8] Secan J A, Bussey R M, Fremouw E J, et al. An improved model of equatorial scintillation [J]. Radio Science, 1995, 30 (3): 607 - 617.
- [9] Yeh K C, Liu C H. Radio wave scintillations in the ionosphere [J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70 (4): 324 - 360.
- [10] Rino C L. A power law phase screen model for ionospheric scintillation 1. Weak scatter [J]. Radio Science, 1979, 14 (6): 1135 - 1145.
- [11] Rino C L. On the application of phase screen models to the interpretation of ionospheric scintillation data [J]. Radio Science, 1982, 17 (4): 855 - 867.
- [12] Carrano C S, Groves K M, Caton R G. A phase screen simulator for predicting the impact of small-scale ionospheric structure on SAR image formation and interferometry [C]. IGARSS, Honolulu: 2010.
- [13] Rogers N C, Cannon P S, Groves K M. Measurements and simulation of ionospheric scattering on VHF and UHF radar signals: Channel scattering function [J]. Radio Science, 2009, 44: S7A.
- [14] 李力,张永胜,董臻,等. 电离层对星载 SAR 影响的多相位屏仿真方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38 (9): 1163 - 1166.

LI Li, ZHANG Yongsheng, DONG Zhen, et al. Simulation method of ionospheric effects on spaceborne SAR using multiple phase-screen technic [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38 (9): 1163 - 1166. (in Chinese)