

电离层对星载合成孔径雷达方位向分辨率影响的分析

郑虎^{①②} 李廉林^① 李芳^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 100049)

摘要: 该文分析了天线实孔径尺寸、不同电离层谱以及电离层不规则体尺度等因素在电离层对星载合成孔径雷达(SAR)方位向分辨率影响中的作用。研究表明,保持星载 SAR 合成孔径长度不变,增加天线实孔径的尺寸会引起 SAR 方位向分辨率的退化,同时导致 SAR 方位向图像平滑。电离层的 Kolmogorov 谱对 SAR 方位向的影响较双参谱严重。电离层不规则体尺度远大于合成孔径的尺寸时,电离层对 SAR 方位向分辨率的影响可以忽略;在电离层不规则体的尺度减小到合成孔径的尺寸以下,但量级接近时,电离层的影响会导致 SAR 方位向分辨率的恶化。

关键词: 星载 SAR; 天线实孔径尺寸; 电离层不规则体; 电离层湍动谱; 广义模糊函数

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2085-04

Study about Ionospheric Effects on Spaceborne SAR Azimuth Imaging

Zheng hu^{①②} Li Lian-lin^① Li Fang^①

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

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the effect of some factors such as the size of real antenna, different ionospheric spectra and the size of ionospheric irregularities on the azimuth resolution of Synthetic Aperture Radar(SAR) is investigated. The results showed that increasing real antenna aperture size but maintaining the equivalent aperture size of the SAR system will decrease the SAR image's azimuth resolution, however, it can smooth azimuth image; Ionosphere with Kolmogorov spectrum affects the SAR azimuth imaging more seriously than that with two-parameter spectrum; When the irregularity scale is much larger than equivalent aperture size, the impact of the ionosphere on the SAR azimuth resolution can be ignored; However, when irregularity scale is smaller than equivalent aperture size but with close magnitude, the impact of the ionosphere will result in a substantial degradation of the azimuth resolution.

Key words: Spaceborne SAR; Size of antenna real aperture; Ionospheric irregularities; Ionospheric turbulence spectrum; Generalized ambiguity function

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率多用途的主动式成像雷达,近年利用星载 SAR 进行森林植被探测成为合成孔径雷达应用的一个新的热点^[1-4]。由于探测森林植被需用较低的工作频率,如 P 波段(典型值 500MHz),对于较低的工作频段,电离层对 SAR 信号的影响会变得很显著。目前已有不少的工作研究了电离层对 SAR 图像的影响,代表性的有 Ishimaru 和 Liu 的研究工作^[5,6]。Ishimaru 在电离层水平方向均匀分布的假设下研究了电离层法拉第旋转影响、电离层色散导致的图像偏移、电离层色散以及多次散射导致的脉冲信号展宽等影响。Liu 进一步研究了由于电离层不均匀性导致的图像退化以及图像位移^[6]。在这些研究工作中还有一些影响因素没有得到深入的考虑。如在以往的模型中星载

SAR 被处理为一个点,这意味着天线实孔径尺寸的影响被忽略,本文修正了 Ishimaru 提出模糊函数,针对尺寸不同的天线实孔径研究了电离层对方位向的影响。另外,电离层不规则体的特性需用不同的电离层湍动谱描述,本文比较分析了 Kolmogorov 谱和双参谱,研究了它们对 SAR 方位向的影响。最后,本文还研究了不同尺度的电离层不规则体对 SAR 方位向分辨率的影响。

本文基于广义模糊函数,分析 P 波段电离层对 SAR 图像方位向分辨率的影响。Ishimaru 引入的广义模糊函数为^[5]

$$\chi(r, r_0) = \sum_n \frac{1}{2\pi} \int |\bar{u}_i(\omega)|^2 \frac{\exp\left\{i2 \int \beta ds - i \frac{\omega}{c} 2r_{0n} + 2\varphi\right\}}{(4\pi r_n)^2} d\omega \quad (1)$$

其中 $\bar{u}_i(\omega)$ 为 SAR 发射线性调频信号的傅里叶变换, $\beta(\omega)$ 为沿着电磁波传播路径的传播常数, $\int \beta(\omega) ds$ 为沿着电波在电离层中的传播路径对传播常数的积分。 r_0 为点目标的坐

标, r 为地面上任意点的坐标, r_{0n} 指第 n 次取样时点目标与 SAR 接收机之间的距离, r_n 指第 n 次取样时地面上任意点与 SAR 接收机之间的距离, \sum_n 指对沿 SAR 飞行路径的抽样数据求和。 φ 表示由于电离层湍动造成的信号复相位扰动, 它与电离层湍动的幅度、电离层的扰动谱及信号传播路径有关, 仿真中根据采用的模型进行计算。将 $\beta(\omega)$ 在载频 ω_0 处作泰勒级数展开, 经过推导得到仅与方位向有关的模糊函数^[5, 6]:

$$\chi = \sum_n \frac{1}{(4\pi r_n)^2} \exp\left(i2 \frac{\omega_0}{c} (r_n - r_{0n} - d_i) + i2 \int \beta(\omega_0) ds + i2\varphi\right) \quad (2)$$

其中 $d_i = \int ds$ 表示沿着信号传播路径的电离层厚度。本文通过计算模糊函数, 用它的一阶矩(或二阶矩)的半功率宽度(或 3dB 宽度)分析 SAR 的方位向分辨率。

本文中采用二维的电离层模型, 分别由竖直剖面 and 水平剖面描述。用 Chapman 公式描述竖直方向上的电子密度分布。典型的白天电子密度 N_e 剖面为

$$N_e = N_{\max} \exp\left(\frac{1}{2}(1.0 - z - \sec \chi e^{-z})\right) \quad (3)$$

其中 $z = (h - H_{\max})/H_s$, χ 是太阳天顶角, H_{\max} 为太阳过顶时($\chi = 0$)最大电子密度 N_{\max} 对应的高度, H_s 为标高。本文的仿真计算中取电离层的典型值: $H_{\max} = 350$ km, $H_s = 50$ km, 峰值电子密度 $N_{\max} = 10^{12}/\text{m}^3$, 以及 $\chi = 0$ 。除特别声明外假定星载 SAR 工作频率为 500MHz, 轨道的飞行高度为 400 km, 合成孔径长度为 10km, 沿着飞行路径的数据抽样距离为 100m(即抽样点数为 100)。另外假定被观测地面长度为 1000m, 地面上的数据抽样距离为 10m(即抽样点数为 100)。在卫星的飞行高度处的竖直平均总电子含量 $\text{TEC} = 5\text{TECU}$ ($\text{TECU} = 10^{16}/\text{m}^2$)。在模拟计算中电离层水平方向电子密度扰动均通过电离层的湍动谱生成, 扰动的幅度均设为 10%。以上所取的参数与文献[6]相同。图 1 为所取模型的示意图。

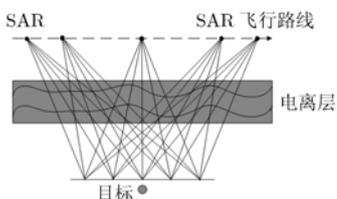


图 1 电离层对星载 SAR 的影响模型

2 天线口径效应对星载 SAR 方位向分辨率的影响

对工作频率较高(如 L 以上工作频段)的星载 SAR, 电离层对图像分辨率的影响较小, SAR 图像方位向分辨率仅取决于合成孔径长度, 因此以往研究中 SAR 的天线被视为一个点^[5, 6], 这意味着湍动电离层引起的天线口径效应的影响被

忽略。而对频率较低的星载 SAR, 电离层的影响增大, 它引起 SAR 图像分辨率的严重退化。天线口径效应对星载 SAR 分辨率的影响也不可忽略。考虑天线实孔径的影响, 将 Ishimaru 提出的模糊函数式(2)修正为

$$\chi(r, r_0) = \sum_n \frac{1}{(4\pi r_n)^2} \cdot \int_D \exp\left(i2 \frac{\omega_0}{c} (r_n - r_{0n} - d_i) + i2 \int \beta(\omega_0) ds + i2\varphi\right) dl \quad (4)$$

其中 $\int_D dl$ 为沿着 SAR 飞行方向的天线实孔径 D 积分。对于实际的 SAR 天线, 将其离散为 M 段, 计算中将此积分变为求和:

$$\chi(r, r_0) = \sum_m \sum_n \frac{1}{(4\pi r_n)^2} \cdot \exp\left(i2 \frac{\omega_0}{c} (r_{nm} - r_{0nm} - d_i) + i2 \int \beta(\omega_0) ds + i2\varphi\right) \quad (5)$$

其中 r_{0nm} 为第 n 次取样时目标与 SAR 接收机天线第 m 个天线段之间的距离, r_{nm} 为第 n 次取样时地面上任意点与 SAR 接收机天线第 m 个天线段之间的距离, \sum_m 表示对离散的天线接收信号求和(图 2), 图 2 中天线上的点为离散天线段的中点。

下面对天线实孔径长度分别为 3m, 5m 和 10m 的情况对式(5)进行仿真。计算中天线沿孔径方向均匀离散, 每段离散天线的长度为 1m。电离层湍动谱选择双参谱(同文献[6], 见以下式(11)), 并取参数 v_1, v_2, L_0 和 L_b 分别为 1.75, 5.5/2, 10km, 500m。为了获得统计的结果, 在仿真过程中使用双参谱计算电离层电子密度的水平分布, 并计算出相应的式(5)的模糊函数, 然后取多次(20 次)计算的平均值。本文后面的结果均采用 20 次计算的平均值。仿真中假定 SAR 的合成孔径长度不变, 以研究天线口径尺寸的影响。

图 3 是广义模糊函数的仿真计算结果。从图 3 的结果可以看出, 保持合成孔径长度不变, 随着天线尺寸增大, 星载 SAR 的方位向分辨率随之减小。Ishimaru 曾指出电离层的湍动减小了 SAR 系统在方位向的相干长度, 因此减小了方位向的分辨率^[5]。而对于大尺寸的天线, 电离层的影响会引起更大的相干长度减小, 因此保持合成孔径长度不变时, 实天线孔径越大 SAR 的方位向分辨率越低。另外从图 3 的结果还可以看出, 天线尺寸增大对广义模糊函数有平滑作用, 即图中随天线尺寸增大曲线的抖动减小, 亦即平滑了 SAR 方位向图像。平滑现象可以解释为随天线实孔径增大, 回波信号经过的电离层的范围也随之增大, 在累加过程中电离层随机扰动造成的影响相互抵消得更多, 故 SAR 方位向图像也出现平滑。该现象与随机媒质引起的口径平滑效应理论一致。

3 电离层谱的影响

实际的电离层是不均匀的, 它包含很多或大或小尺度的

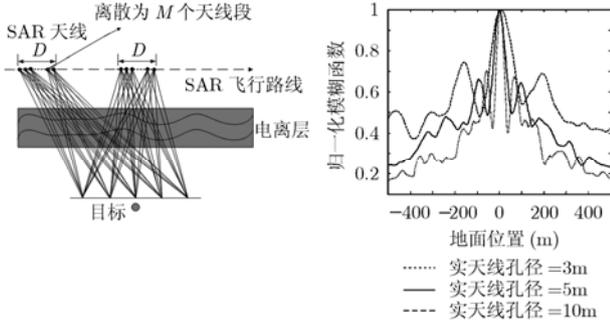


图 2 考虑天线尺寸时, 电离层对星载 SAR 影响的仿真模型

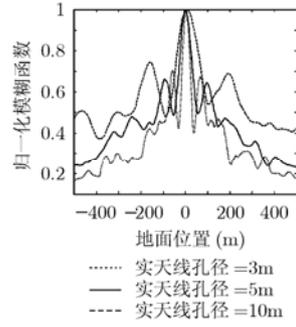


图 3 不同天线孔径尺寸情况下电离层对 SAR 方位向分辨率的影响

不规则体结构。造成电离层不均匀的原因主要是由于电离层等离子体的不稳定性、电离层、热层和磁层之间的耦合等动态过程, 在不同的条件下电离层湍动特性是不同的。描述电离层的湍动谱有 Kolmogorov 谱、双参谱、高斯谱等。Liu 的研究工作表明电离层的不规则体会引起 SAR 图像分辨率的退化^[6], 但没有分析不同湍动谱对 SAR 图像的不同影响。在实际的 SAR 成像中, 为分析、校正不规则体对 SAR 图像的影响必须选择合适的电离层湍动谱。本节将选择 Kolmogorov 谱和双参谱来进行分析、比较。

Kolmogorov 谱在三维 \mathbf{K} 空间的形式为^[7]

$$\Phi_f(\mathbf{K}) = \frac{C_f^2}{(\kappa_0^2 + K^2)^{v+\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

C_f 是结构强度参数。

$$C_f = \frac{1}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(v + \frac{3}{2}\right)}{\Gamma(v)} \sigma_f^2 L_0^{-2v} \quad (7)$$

其中 $\kappa_0 = 1/L_0$, L_0 是不规则体外尺度, 取 $L_0 = 10\text{km}$; $v = 1/3$; σ_f^2 为电子密度分布的方差, 由扰动幅度决定。上面各向同性的三维谱与一维 K 空间的谱 $V(K)$ 的关系如下:

$$\Phi_f(\mathbf{K}) = -\frac{1}{2\pi K} \frac{\partial V(K)}{\partial K}$$

这里 $V(K)$ 是一维形式的 Kolmogorov 谱:

$$V(K) = \frac{\pi C_f}{v+1/2} \frac{1}{(\kappa_0^2 + K^2)^{(v+1/2)}} \quad (8)$$

Quegan 和 Lamont 等人考虑湍动谱应该有个断点波数 κ_b , 而提出了电离层双参谱^[8], 其形式为

$$\Phi_f(\mathbf{K}) = \begin{cases} \frac{C_s}{(\kappa_0^2 + K^2)^{v_1}}, & K \leq \kappa_b \\ \frac{C_s}{(\kappa_0^2 + K^2)^{v_2}} (\kappa_0^2 + \kappa_b^2)^{v_2-v_1}, & K > \kappa_b \end{cases} \quad (9)$$

C_s 是扰动强度参数。

$$C_s = \frac{1}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(v_1)}{\Gamma(v_1-3/2)} \sigma_f^2 L_0^{-2(v_1-3/2)} \quad (10)$$

其中 $\kappa_0 = 1/L_0$, $\kappa_b = 1/L_b$, L_0 是外尺度, L_b 是尺度断点。取 $L_0 = 10\text{km}$, $L_b = 500\text{m}$; $2v_1, 2v_2$ 表示谱斜率, 取值范围

分别为 $2v_1 = 3 \sim 3.5, 2v_2 = 5 \sim 5.5$ 。为了在结构强度参数 C_f 和扰动强度参数 C_s 相等的情况下比较 Kolmogorov 谱和双参谱, 取 $v_1 = 11/6, v_2 = 5.5/2$ 。同样, 以上三维谱可转换为

$$V(K) = \begin{cases} \frac{\pi C_s}{v_1-1} \frac{1}{(\kappa_0^2 + \kappa_b^2)^{(v_1-1)}} - \frac{\pi C_s}{(\kappa_0^2 + K^2)^{(v_1-1)} \left(\frac{1}{v_1-1} - \frac{1}{v_2-1} \right)}, & K \leq \kappa_b \\ \frac{\pi C_s}{v_2-1} \frac{1}{(\kappa_0^2 + \kappa_b^2)^{(v_2-v_1)}} \frac{1}{(\kappa_0^2 + K^2)^{(v_2-1)}}, & K > \kappa_b \end{cases} \quad (11)$$

图 4 中的曲线分别是电离层在两种不同谱结构情况下对式(2)模糊函数的计算仿真结果, 仿真的方法与上节相同。由图中的曲线可以看出双参谱的电离层 SAR 方位向分辨率比 Kolmogorov 谱的电离层 SAR 方位向分辨率要高。对于校正电离层对 SAR 方位向图像的影响如何选择电离层湍动谱是必须考虑的一个首要问题, 以上结果为校正电离层不规则体对 SAR 方位向图像的影响提供了参考。

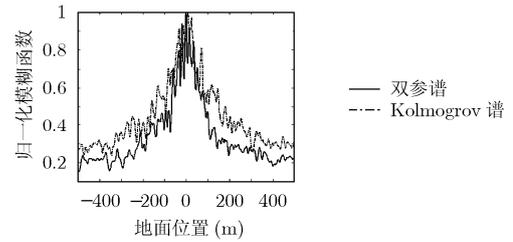


图 4 电离层分别为 Kolmogorov SAR 的方位向分辨率的影响

4 电离层不规则体尺度的影响

电离层不规则体大多数出现在极地和赤道地区, 不规则体的尺度范围从几米至几十公里。不同尺度的不规则体的生成机制不同, 对电波传播造成的影响也不一样。大尺度不规则体起源于太阳爆发, 其折射效应影响电波的传播路径和时延; 中尺度的不规则体起源于重力波, 小尺度的不规则体起源于等离子体不稳定性, 中小尺度的不规则体会引起 VHF 波的后向散射和卫星信号闪烁。如上所述, 电离层不规则体会造成 SAR 分辨率的退化, 但不同尺度的不规则体对 SAR 图像分辨率的影响是不同的。

本节中电离层湍动谱选择双参谱, 参数 v_1, v_2 和 L_b 分别取为 1.75, 5.5/2, 500m。本文分别在 P 波段的 3 种工作频率下(500MHz, 700MHz 和 1GHz), 以 3 种尺度的不规则体为例, 分析研究不规则体尺度对 SAR 方位向分辨率的影响。3 种不规则体尺度分别取为: (1) $L_0 = 10^3 \text{m}$, (2) $L_0 = 10^4 \text{m}$, (3) $L_0 = 10^5 \text{m}$ 。图 5-图 7 分别显示在 3 种频率下电离层不规则体尺度对 SAR 方位向分辨率的影响仿真结果。分析计算结果可以得到, 当在电离层不规则体的尺度减小到合

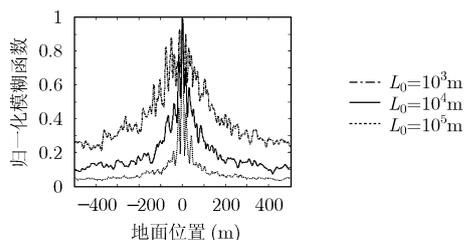


图5 不同电离层外尺度对谱和双参谱的情况下对影响, 工作频率 500MHz

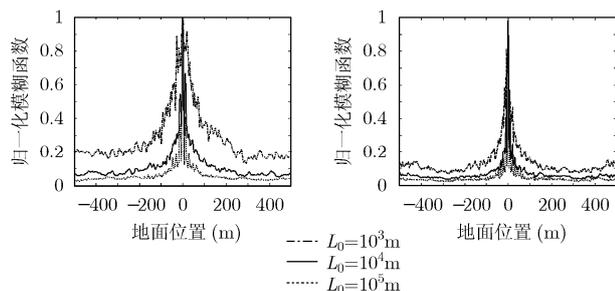


图6 不同电离层外尺度对 SAR 的方位向分辨率的影响, 工作频率 700MHz

图7 不同电离层外尺度对 SAR 的方位向分辨率的影响, 工作频率 1000MHz

成孔径的尺寸以下, 但量级接近时(如 $L_0=10^3$ m), 电离层的影响会导致 SAR 方位向分辨率的恶化, 并且频率越低恶化越严重, 例如在本文中当不规则体外尺度 $L_0=10^3$ m 时, 在 1GHz 频率下方位向的分辨率约为 30m, 在 500MHz 频率下, 方位向的分辨率大于 270m; 当电离层不规则体尺度远大于合成孔径的尺寸时, 电离层对 SAR 方位向分辨率的影响几乎可以忽略, 如 $L_0=10^5$ m 对应的各频率曲线所示, SAR 方位向分辨率基本保持不变。

5 结束语

本文主要研究结果总结如下: (1)保持合成孔径长度不变, 增加星载 SAR 天线实孔径尺寸会导致 SAR 方位向分辨率下降; 另外, 星载 SAR 天线实孔径尺寸增加可起到对 SAR 方位向图像的平滑作用。(2)不同的电离层湍动谱对 SAR 图像方位向的影响不同。本文比较了 Kolmogorov 谱和双参谱,

具有 Kolmogorov 谱湍动的电离层对 SAR 图像方位向的影响较双参谱严重。(3)当电离层不规则体尺度远大于合成孔径的尺寸时, 电离层对 SAR 方位向分辨率的影响可以忽略; 在电离层不规则体的尺度减小到合成孔径的尺寸以下, 但量级接近时, 电离层的影响会导致 SAR 方位向分辨率的恶化, 并且频率越低恶化越严重。

参考文献

- [1] Saatchi S and Moghaddam M. Estimation of boreal forest biomass using spaceborne SAR systems. Proc. IGARSS, Piscataway, NJ, USA, July 1999, 3: 1646-1648.
- [2] Snoeij P, van der Valk N, and Boom E, *et al.* Effect of the ionosphere on P-band spaceborne SAR images. Proc. IGARSS, Sydney, Australia, July 2001, 1: 132-134.
- [3] Hallberg B, Smith G, and Olofsson A, *et al.* Performance simulation of spaceborne P-band SAR for global biomass retrieval. Proc. IGARSS, Anchorage, Alaska, Sept 2004, 1: 503-506.
- [4] Rignot E, Zimmermann J R, and Vanzyl J J. Spaceborne applications of P-band imaging radars for measuring forest biomass. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1995, 33(9): 1162-1169.
- [5] Ishimaru A, Kuga Y, and Liu J. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz. *Radio Science*, 1999, 34(1-2): 257-268.
- [6] Liu J, Kuga Y, and Xiaoqing P, *et al.* Ionospheric effects on SAR imaging: a numerical study. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2003, 41(5): 939-947.
- [7] Liu J. Ionospheric effects on synthetic aperture radar imaging. [Ph.D. dissertation], University of Washington, 2003.
- [8] Quegan S and Lamont J. Ionospheric and tropospheric effects on synthetic aperture radar performance. *Int. J. Remote Sens.*, 1986, 1(7): 525-539.

郑 虎: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为电波传播、电磁逆散射。

李廉林: 男, 1980 年生, 博士, 研究方向为电波传播、电磁逆散射。

李 芳: 女, 1944 年生, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场理论及应用。