

文章编号: 1007-4619 (2004)05-0385-04

电离层对星载 SAR 矩形包络线性调频信号的影响

冯 越, 洪 峻, 王一丁

(中国科学院 电子学研究所, 北京 100080)

摘 要: 讨论了电离层对星载 SAR 矩形包络线性调频信号的影响, 推导出由电离层引起的图像偏移和峰值二次相位误差的计算公式, 基于这些公式对 P, L, C 3 个波段的影响作了比较分析。结果表明: 电离层对 P 波段的影响很大, 对 L 波段有一定影响, 对 C 波段的影响基本可以忽略。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 电离层; 相位误差

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

1 引 言

星载合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率成像雷达,接收信号和参考信号的相干性是获得高分辨率图像的关键,然而信号在空间传播,不可避免要受到电离层的影响。电离层的扰动性会导致信号的幅度、相位发生变化,从而影响信号的相干性。进入20世纪90年代以来,由于高分辨率宽带SAR、极化SAR、干涉SAR和P波段SAR的诞生,电离层影响问题显得很突出^[1-3]。

Ishimaru 等人建立了电离层对星载 SAR 影响的数学模型^[3]。为了数学处理上的简便, Ishimaru 使用高斯包络线性调频信号近似矩形包络线性调频信号^[4]。这种处理能够方便的得到信号压缩后的主瓣脉冲展宽的近似表达式,但不能分析电离层对旁瓣电平的影响。线性调频信号经过电离层传播,除了引起主瓣脉冲展宽,还有旁瓣电平增高、主瓣峰值降低等影响,对于 SAR 成像而言,旁瓣电平增高比主瓣展宽的影响更大^[5]。本文在无高斯包络近似条件下,导出了电离层对矩形包络线性调频信号的影响模型。根据此模型分析了电离层对 P, L, C 波段的星载 SAR 成像质量的影响,经分析得出,电离层对矩形包络线性调频信号的影响主要有两方面:由群延迟引起的压缩脉冲波形偏移和由电离层的色散效应引起的二次相位误差。

2 影响模型推导

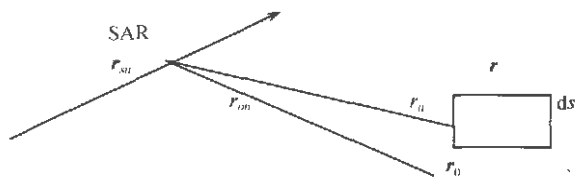


图 1 SAR 成像几何关系

Fig. 1 Geometry of SAR imagery

如图 1, 相干接收信号 $v(r_0)$ 聚焦于 r_0 , 可表示为:

$$v(r_0) = \int S(r) \chi(r, r_0) ds \quad (1)$$

其中 $S(r)$ 是 r 处的表面反射率, $\chi(r, r_0)$ 是广义模糊函数:

$$\chi(r, r_0) = \sum_n \frac{1}{2\pi} \int g_n(\omega, r_n) f^*(\omega, r_{0n}) d\omega \quad (2)$$

发射信号为矩形包络线性调频信号:

$$u_i(t) = \exp[-i(\omega_0 t - \alpha^2)] |t| < T_0$$

$$\alpha = \frac{B}{4T_0} \quad (3)$$

应用驻定相位原理得到 $u_i(t)$ 的频域信号:

$$u_i(\omega) = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\alpha} + \frac{\pi}{4}\right] \quad (4)$$

根据文献^[3]中的结果,我们可以得到经过脉冲压缩后的线性调频信号:

收稿日期: 2003-05-09; 修订日期: 2003-06-06

©1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

作者简介: 冯越(1976—),男,2000年本科毕业于清华大学自动化系,目前在中国科学院电子学研究所就读硕士研究生,从事电离层对星载 SAR 性能影响方面的研究。

$$\chi_r(r, r_0) = \int_{-B/2}^{B/2} \exp[i(\omega - \omega_0) \frac{2(r - r_0 + \Delta L)}{c} + i(\omega - \omega_0)^2 \Phi_2(\omega_0)] d\omega \quad (5)$$

$$\Delta L = \left[\frac{c}{v_g} - 1 \right] d_i \quad (6)$$

$$\Phi_2(\omega_0) = \beta''(\omega_0) d_i \quad (7)$$

式中 $\beta(\omega)$ 为传播常数, v_g 为信号在电离层中传播的群速度, d_i 为电离层厚度, c 为真空中光速。

2.1 电离层对图像偏移的影响

公式(5)中 ΔL 意味着信号经过脉冲压缩后的波形偏离了原点,这在 SAR 成像中会造成图像偏移。公式(6)表明,波形偏移是由电离层的色散效应使得电磁波在其中传播的群速度小于真空中的光速引起的。利用 TEC , (6)式可以写成:

$$\Delta L = \frac{40.3 \cdot TEC}{f_0^2 \cdot \cos \theta} \quad (8)$$

其中, TEC 为从地面到接收机的垂直方向上的总电量, f_0 为信号载频, θ 为波束视角。值得注意的是, ΔL 只跟 TEC 、信号载频以及波束视角有关,而跟信号带宽无关。

2.2 电离层对二次相位的影响

电离层对线性调频信号的另一个影响是由电离层的色散效应引起的二次相位误差,由 Φ_2 决定。峰值二次相位误差为:

$$\Phi_{2m} = \frac{B^2}{4} \beta'' d_i \approx \frac{126.65 \cdot \Delta f_s^2 \cdot TEC}{c \cdot f_0^3 \cdot \cos \theta} \quad (9)$$

式(9)中, Δf_s 为信号带宽。峰值二次相位误差和 TEC 、信号带宽的平方成正比,而反比于信号载频的三次方。这意味着低频段(P 波段)信号受电离层的影响较大,随着信号频率的增加,电离层的影响迅速降低,超过一定频率后,可以认为电离层对信号的影响基本可以忽略。有了公式(9),我们可以计算出电离层引起的压缩信号的主瓣展宽、峰值下降以及旁瓣电平增高等影响。

2.3 带宽分辨率的求解

利用菲涅尔积分,经过脉冲压缩后的信号包络可表示为:

$$E_{nv}[s_o(t)] = |F(P) - F(Q)| \quad (10)$$

式中:

$$F(X) = \int_0^X e^{j\frac{\pi}{2}x^2} dx$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{Bl}{2n} + n \right] \\ Q &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{Bl}{2n} - n \right] \\ n &= \sqrt{2\Phi_{2m}} \end{aligned} \quad (11)$$

根据式(10), 3dB 带宽分辨率 ρ_τ 可由下式确定:

$$\left| F \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{B\rho_\tau}{4n} + n \right] \right] - F \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{B\rho_\tau}{4n} - n \right] \right] \right| = \sqrt{2} \left| F \left[\frac{n}{\sqrt{\pi}} \right] \right| \quad (12)$$

式(12)是一个超越方程,通常情况下很难求出 ρ_τ 的解析解。在信号载频较高时,可以把 $e^{j\frac{\pi}{2}x^2}$ 展开为泰勒级数,求出 ρ_τ 的近似解:

$$\rho_\tau = \frac{4}{B} \sqrt{6 - 3 \sqrt{2 - \frac{2}{9} \Phi_{2m}}} \quad (13)$$

对于一般情况,知道了 B 和 Φ_{2m} 后, ρ_τ 可以用数值方法求出。

3 结果分析

3.1 电离层对图像偏移的影响结果分析

图 2 给出了 60° 波束视角时 P, L, C 3 个波段下电离层对图像偏移的影响。在典型的电离层条件下, P 波段的偏移通常有几十米, TEC 很大时甚至可达到几百米; L 波段的影响小一些,通常有几米到十几米的偏移; C 波段的影响很小,基本上可以忽略。

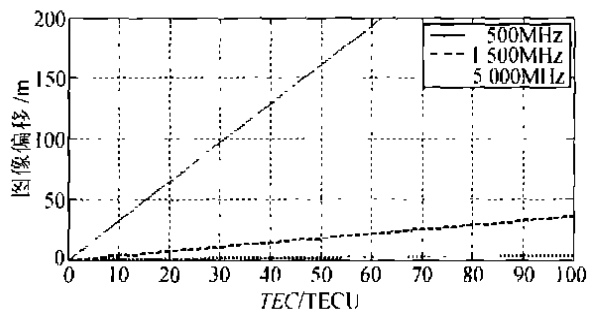


图 2 电离层对图像偏移的影响

Fig.2 Ionospheric effects on image shift of SAR

3.2 电离层对二次相位的影响结果分析

表 1 给出了 P, L, C 3 个波段,不同 TEC 和带宽条件下的峰值二次相位误差。表 1(a) 为 $\Delta f_s = 50\text{MHz}$, $\theta = 60^\circ$ 时不同 TEC 下的峰值二次相位误差, (b) 为 $TEC = 20\text{TECU}$, $\theta = 60^\circ$ 时不同带宽下的峰值

二次相位误差。在典型的电离层和带宽条件下,P波段的峰值二次相位误差可达到上百度,高带宽、TEC很大时,峰值二次相位误差甚至达到上千度。对于L波段,在带宽较小时电离层引起的二次相位误差不大,但随着信号带宽的增加,二次相位误差很快增大,对压缩信号的主瓣展宽有不容忽视的影响。在C波段,电离层引起的二次相位误差不大,基本上可以忽略。

表 1 峰值二次相位误差
Table 1 Peak second phase error

频率 /MHz	TEC/TECU					
	10	20	40	60	80	100
500(P)	96.6°	193.5°	387.0°	580.5°	774.0°	967.5°
1250(L)	6.2°	12.4°	24.8°	37.2°	49.5°	61.9°
5000(C)	0.1°	0.2°	0.4°	0.6°	0.8°	1.0°

(a)

频率 /MHz	带宽/MHz					
	20	50	100	150	200	400
500(P)	31.0°	193.5°	774.0°	1741.6°	3096.1°	12348.4°
1250(L)	2.0°	12.4°	49.5°	111.5°	198.2°	792.6°
5000(C)	0°	0.2°	0.8°	1.7°	3.1°	12.4°

(b)

图 3 给出了 P (500MHz), L (1250MHz), C (5000MHz) 3 个波段下 $\Delta f_s = 50\text{MHz}$, $\theta = 60^\circ$ 时电离层对主瓣宽度的影响,横坐标为 TEC,纵坐标为 $\frac{\Delta x'}{\Delta x}$ 有电离层影响时的主瓣宽度。P 波段的主瓣展宽非常明显,特别是 $TEC > 30\text{TECU}$ 时,随着 TEC 的增大,分辨率迅速变坏;L 波段和 C 波段的影响则不是很明显。但是需要指出的是,L 波段在信号带宽较大时,分辨率也会明显变差;而在 C 波段,分辨率基本保持不变。

图 4 是在 L 波段(1250MHz) $\Delta f_s = 50\text{MHz}$, $\theta = 60^\circ$ 对点目标进行仿真的结果。从图中可以看出,电离层对脉冲展宽的影响很小,但是对旁瓣电平有明显影响:没有电离层影响时,积分旁瓣比 (ISLR) 和峰值旁瓣比 (SL) 分别为 -10.1dB 和 -13.2dB ; $TEC = 40\text{TECU}$ 时,积分旁瓣比降为 -9.7dB ,峰值旁瓣比为 -12.4dB ; TEC 增大到 100TECU 时,积分旁瓣比为

-8.4dB ,峰值旁瓣比为 -10.9dB 。

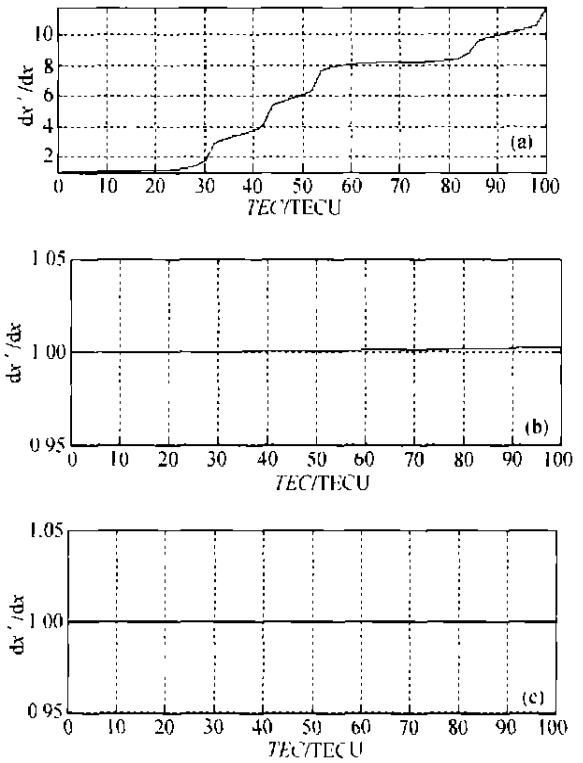


图 3 电离层对线性调频信号主瓣宽度的影响
(a)P 波段;(b)L 波段;(c)C 波段

Fig.3 Ionospheric effects on the main lobe of LFM signals

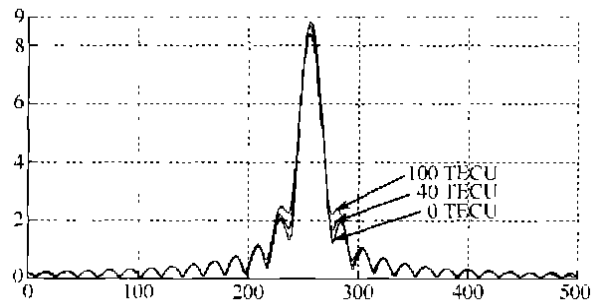


图 4 电离层对线性调频信号旁瓣电平的影响

Fig.4 Ionospheric effects on the side lobe of LFM signals

4 结 论

电离层对矩形包络线性调频信号的影响主要有两方面,一是由于电磁波在电离层中传播的群速度小于真空中的光速引起的波形偏移,二是由于电离层的色散效应导致矩形包络线性调频信号在脉冲压缩时产生二次相位误差。本文给出了电离层引起的波形偏移和峰值二次相位误差的计算公式。知道了峰值二次相位误差,我们可以讨论电离层对压缩波

形的主瓣展宽、主瓣峰值下降以及旁瓣电平增高的影响。最后对 P、L、C 3 个波段的影响作了比较研究,结果表明:在典型的电离层条件下,P 波段信号受到的影响很大;L 波段在带宽较大或 TEC 较大时有一定影响;在 C 波段,电离层的影响基本上可以忽略。

参 考 文 献 (References)

[1] Quegan S, Lamont J. Ionospheric and Tropospheric Effects on Synthetic Aperture Radar Performance [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1986, 7(4): 525—539.

[2] Kim Yunjin, Jakob van Zyl. Ionospheric Effects on Polarimetric and Interferometric Space-borne SAR. *IGARSS '98*, 1998, 1: 472—474.

[3] Ishimaru, A., Kuqa, Y., Liu, J. *et al.* Ionospheric Effects on Synthetic Aperture Radar Imaging at 100 MHz to 2GHz [J]. *Radio Science*, 1999, 34(1): 257—268.

[4] El-Khamy, S. E., McIntosh, R. E. Optimum Transionospheric Pulse Transmission [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1973, 21: 269—273.

[5] Zhang C B. Principles, Systems Analysis and Applications of Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: Science Press, 1989. [张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989.]

Ionospheric Effects on Linear FM Rectangular Envelope Signals

FENG Yue, HONG Jun, WANG Yi-ding

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: Ionospheric effects on linear FM rectangular envelope signals of space-borne SAR are considered in this paper. Two kinds of effects due to the ionosphere are presented and the relative formulas are derived, including compressed pulse shift and second phase error. It can be seen that the compressed pulse shift is proportional to total electron content (TEC) and inverse proportional to the square of signals frequencies, and that the second phase error is proportional to TEC and the square of signals bandwidth while in inverse proportional to the square of signals frequencies at the same time. The ionospheric effects at P, L, C bands are also investigated by comparison based on the formulas derived above. The result shows that signals at P-band will be severely affected by the ionosphere. The effects will be obvious at L-band if the signals have a large bandwidth or TEC values are high. At C-band, ionospheric effects are neglectable.

Key Words: SAR; ionosphere; phase error