

基于峰值旁瓣比估计电离层 TEC 的方法

朱雪莹^{1,2,3} 胡文龙^{1,2} 张浩龙^{1,2,3} 江冕^{1,2,3}

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190;
3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 针对地球同步轨道合成孔径雷达 (geosynchronous synthetic aperture radar, GEOSAR) 电离层扰动相位定标试验研究, 提出了一种基于脉冲压缩指标峰值旁瓣比来估计电离层积分电子总含量 (total electron content, TEC) 的方法。首先, 分析了电离层对 GEOSAR 相位定标信号相位误差的影响特点; 然后, 计算了脉冲压缩指标峰值旁瓣比 (peak sidelobe ratio, PSLR) 后代法估计电离层引起的二次相位误差, 进而反演电离层的 TEC; 最后, 通过仿真分析该方法的可行性和适用性。该方法适用于 GEOSAR 相位定标试验中估计电离层 TEC, 在低波段 (如 P 波段) 信号中效果最优。

关键词: GEOSAR 电离层; 积分电子总含量; 二次相位误差; 峰值旁瓣比

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Method of measuring ionospheric TEC based on PSLR

Zhu Xueying^{1,2,3} Hu Wenlong^{1,2} Zhang Haolong^{1,2,3} Jiang Mian^{1,2,3}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at geosynchronous synthetic aperture radar (GEOSAR), there is an experimental study on phase calibration caused by ionospheric disturbances, this paper proposes a method of measuring ionospheric total electron content (TEC) based on peak sidelobe ratio. Firstly, analyze the ionospheric affect on GEOSAR experimental signal, after signal range compression, calculate the peak sidelobe ratio. Then, estimate quadratic phase error caused by the ionosphere and inverse the ionosphere TEC. Finally, the simulation analysis prove the feasibility and applicability of this method. The conclusion is that this method is suitable for the GEOSAR experimental study on phase calibration caused by ionospheric disturbances, and the estimated TEC in the low band (such as P-band) is closer to true value.

Keywords: geosynchronous synthetic aperture radar ionosphere; total electron content; quadratic phase error; peak sidelobe ratio

1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 是一种高性能遥感工具, 具有全天候、全天候、穿透能力强、覆盖面积广等特点, 在环境监测和军事等方面具有非常广泛的应用前景^[1-3]。现有的 SAR 卫星, 通常位于 1 000 km 左右的轨道上, 由于轨道高度的限制, 可覆盖区域小、测绘带窄、复观测周期长, 在很大程度上限制了其应用。将 SAR 卫星轨道提高到同步轨道可以解决低轨 SAR 卫星遇到的上述困难, 同时由于其

轨道高度较高, 不易被捕获和摧毁, 应用前景广阔^[4-6]。

GEOSAR 的轨道高度约为 36 000 km 左右, 位于电离层高度范围之上, 因此 GEOSAR 信号受到电离层的影响, 该影响主要表现为背景电离层对 GEOSAR 信号的色散, 包括相位超前、法拉第旋转、群时延、色散、多普勒频移等, 最终导致 GEOSAR 图像的偏移和畸变, 影响成像效果^[7-10]。电离层对 GEOSAR 信号的影响与电离层参数 TEC 相关, 所以消除电离层对 GEOSAR 信号的影响, 关键在于测量电离层 TEC。

收稿日期: 2015-03

GEOSAR 相位定标系统信噪比较高,具有十分重要的应用价值,它通过一个地面定标站发射一组频率连续变化的线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号,经 GEOSAR 卫星转发后发回地面站,然后由地面站接收并对其进行处理,相位定标即通过信号处理的方法从地面站接收的信号中提取精确的相位。根据测量的受电离层影响的信号参数划分,现有的电离层 TEC 测量方法有 Faraday 旋转测量法、Doppler 测量法、时延法等。GPS 双频测量法原理是发射 2 个单频信号,然后分别测量 2 个信号的时延和相位,最后利用该时延加相位反演电离层的 TEC, GPS 信号机制与 GEOSAR 相位定标信号机制不一致,因此该方法并不适用于 GEOSAR 相位定标试验。而基于 LFM 信号子频带时延差法对信号的带宽要求较高,GEOSAR 电离层扰动相位定标试验中信号的带宽达不到大带宽的要求。所以,针对 GEOSAR 电离层扰动相位定标试验,提出一种基于脉冲压缩峰值旁瓣比估计电离层 TEC 的方法,该方法利用的是 LFM 信号受电离层影响产生二次相位误差,进而影响脉冲压缩指标,测量的信号参量是 GEOSAR 信号脉冲压缩后的 PSLR,文献[12]中有提到该方法原理及可行性,但未对其具体讨论和分析,该文对该方法进行研究和仿真分析,最终得出结论。

2 电离层对 GEOSAR 信号的影响模型

电离层的色散效应,是指电离层传播路径上的自由电子的存在导致信号传播的群速度小于真空中的光速,信号传播时间的长短与信号的频率有关。频率为 f 的信号在传播过程中由电离层引起的时间延迟为:

$$t_{iono} = \frac{K}{cf^2} \int_l N_e ds = \frac{K}{cf^2} TEC \quad (1)$$

式中: c 为光速, $c=3 \times 10^8$ m/s; K 为常数, $K=40.3$ m²/s³; N_e 为电离层的电子密度, l 为信号的传播路径,积分电子总含量 TEC 为信号传播路径上的电子密度的积分,即有 $TEC = \int_l N_e ds$ 。

GEOSAR 相位定标试验中发射的信号是线性调频信号,它的信号频率是连续变化的,由电离层的色散效应可知,该信号受电离层影响后相位发生变化,该相位变化与信号本身的频率有关。假设发射 GEOSAR 信号 $S_0(f)$, 则回波信号 $S(f)$ 的表达式为:

$$S(f) = S_0(f) H_{iono}(f) = S_0(f) \exp\{-j\phi(f)\} \times \exp\{-j\phi_{iono}(f)\} = S_0(f) \exp\left\{-j \frac{4\pi f_r}{c}\right\} \times \exp\left\{-j \frac{4\pi K}{cf} TEC\right\} \quad (2)$$

式中: $\exp\left\{-j \frac{4\pi f_r}{c}\right\}$ 为传播路径引起的相位变化, $S_0(f) \exp\left\{-j \frac{4\pi f_r}{c}\right\}$ 表示没有电离层影响时的接收信号。电离层引起的相位误差 $\phi_{iono}(f) = \frac{4\pi K}{cf} TEC$ (双程

相位误差),其泰勒展开式如式(3):

$$\phi_{iono}(f) = -\frac{4\pi K}{cf_c} TEC + \frac{4\pi K}{cf_c^2} TEC(f-f_c) - \frac{4\pi K}{cf_c^3} TEC(f-f_c)^2 \quad (3)$$

式中: f_c 为 GEOSAR 信号的中心频率。由式(3)可知,电离层引起的二次相位误差为:

$$\Phi_{2m} = \frac{4\pi K f_0^2}{cf_c^3} TEC \quad (4)$$

式中: $f_0 = B/2$, B 为 GEOSAR 信号的带宽。由式(4)可知,电离层引起的二次相位误差跟信号的带宽和频率有关,带宽越大、频率越低,二次相位误差越大,这时可以通过估计 GEOSAR 信号中由电离层引起的二次相位误差来反演电离层的参数 TEC 。因此,问题转化为如何估计 GEOSAR 信号的二次相位误差。

由式(3)可以看出,电离层对 GEOSAR 信号产生的相位误差有一次相位误差(群时延),二次相位误差和更高阶的相位误差组成,其中一次和二次相位误差占主要部分。经分析可知,一次相位误差使信号压缩位置的偏移,二次相位误差导致主瓣展宽,主瓣峰值下降,旁瓣电平增加^[11],其影响的压缩指标主要有:峰值旁瓣比、积分旁瓣比、主瓣峰值、旁瓣峰值、分辨率等。因此,电离层引起的二次相位误差是使 GEOSAR 信号的脉冲压缩指标发生变化的主要因素,该文就是利用 GEOSAR 信号脉冲压缩后的峰值旁瓣比估计 GEOSAR 信号的二次相位误差,进而反演电离层参数 TEC 。

3 基于峰值旁瓣比估计电离层参数 TEC 的方法

由电离层对 GEOSAR 信号影响模型分析可知,电离层对 GEOSAR 信号产生二次相位误差的影响,该二次相位误差影响脉冲压缩峰值旁瓣比的大小。而基于脉冲压缩峰值旁瓣比估计电离层 TEC 的方法,就是将此过程逆转,即通过测量脉冲压缩峰值旁瓣比的大小来估计二次相位误差,进而估计电离层 TEC 的大小,该方法的流程如图 1 所示。

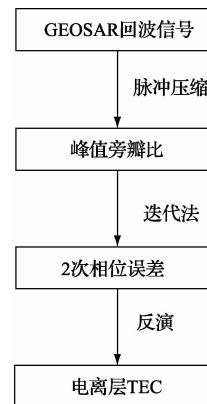


图 1 基于峰值旁瓣比估计电离层 TEC 的方法流程

具体表述为以下3个步骤:

- 1)对 GEOSAR 回波信号进行距离向脉冲压缩,根据式(5)提取脉冲压缩后的峰值旁瓣比;
- 2)通过迭代法估计二次相位误差;
- 3)根据式(4)反演得到电离层的 TEC。

下面主要分析通过迭代法根据峰值旁瓣比估计二次相位误差的过程。

GEOSAR 回波的压缩脉冲的峰值旁瓣比(PSLR)的定义为旁瓣峰值与主瓣峰值之比,计算公式如下:

$$PSLR = 20\lg \frac{P_{side}}{P_{main}} \quad (5)$$

理想 GEOSAR 回波的压缩脉冲的峰值旁瓣比为 -13.2 dB,而经过电离层影响后的 GEOSAR 回波信号产生了二次相位误差,导致脉冲压缩后的峰值旁瓣比发生变化。

由分析可知,二次相位误差导致脉冲压缩波形的变化,包络函数如式(6)所示^[7]:

$$E_m[s_0(t)] = |C(P) - C(Q) + jS(P) - jS(Q)| \quad (6)$$

式中: $C(\cdot)$ 和 $S(\cdot)$ 表示菲涅尔积分, $P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\pi Bt}{N} + N \right)$,

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\pi Bt}{N} - N \right), N = \sqrt{2\Phi_{2m}}$$

由于上述公式较为复杂,计算困难,因此通过迭代法根据峰值旁瓣比估计二次相位误差。迭代法估计调频率误差的流程如图2所示。

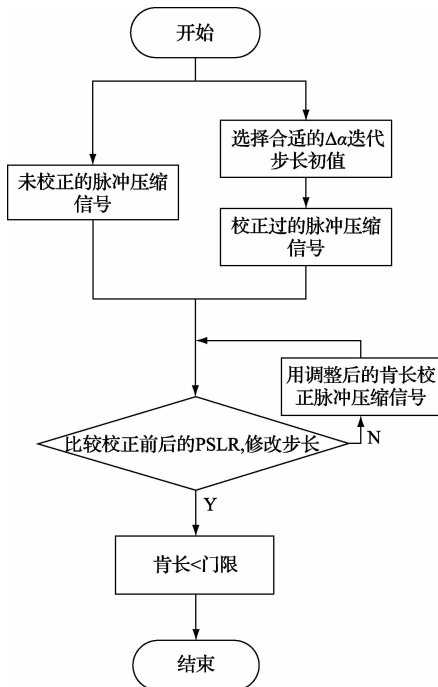


图2 迭代法估计调频率误差的流程

二次相位误差相当于调频率引入了误差,其关系如式(7)所示,因此首先设置一个调频率误差的迭代步长初值,将该初值加入到补偿压缩信号的步骤中,然后比较校正前后的 PSLR,若满足限定条件迭代步长小于门限时则立即结束迭代,输出迭代所用步长,否则根据一定的规则调整迭代步长,最后根据式(7)求得二次相位误差。

迭代过程中2个重要问题:

- 1)是步长初值选择

根据式(4),选择合适的调频率误差步长初值,用于在 GEOSAR 信号的脉冲压缩过程中校正二次相位误差的影响。调整步长选择初值可根据式(7)选择:

$$\Delta\alpha = \frac{4\Phi_{2m}}{\pi T_p^2} \quad (7)$$

- 2)调整步长规则

如果校正后的压缩结果 PSLR 大于校正前的值,则迭代步长不变,继续用该步长调整调频率的值;如果校正后的压缩结果 PSLR 小于校正前的值,则迭代步长减半,并改变它的符号;如果校正后的压缩结果 PSLR 等于校正前的值,则迭代步长减半。

4 仿真与分析

经分析可知,在不同波段情况下,电离层产生的影响大小不一样。为分析本文中提出方法的适用性,选取了3个不同波段参数进行仿真分析。仿真参数选择的依据是实际 SAR 系统的参数标准,例如 L 波段参数的依据是 PALSAR 系统,不同波段的参数选择如表1所示。由表中的参数结合式(4)可知,P波段的二次相位误差量级最大,L、C依次递减。

表1 不同波段的参数

波段	频率/GHz	带宽/MHz
P 波段	0.435	6
L 波段	1.27	14
C 波段	6	36

图3给出了基于脉冲压缩峰值旁瓣比估计电离层 TEC 方法的仿真流程图。首先仿真实理想信号压缩波形的过程是为了做对比,然后将电离层的 TEC_0 加到不同波段的理想 GEOSAR 回波信号中,通过本文提出的方法估计电离层 TEC,再将不同波段得到的估计值 TEC 与 TEC_0 相比较,最后分析电离层 TEC 的估计结果,得出结论。

将电离层的影响加到理想 GEOSAR 回波信号 S_0 中,得到受电离层影响的信号 S ,仿真过程中使用的电离层

TEC数据是从IGS官网获取的一段时间内真实TEC数据。图4(a)和(b)分别给出了理想和受电离层影响的

GEOSAR信号脉冲压缩后的结果,它们的PSLR分别为-13.2 dB和-10.6 dB。

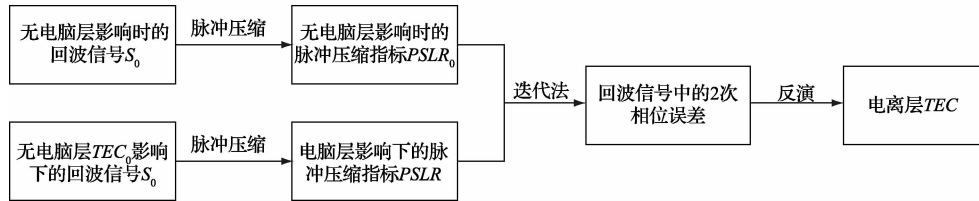
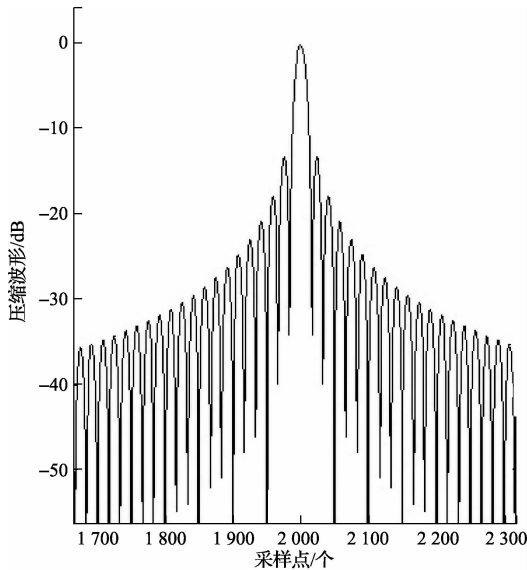
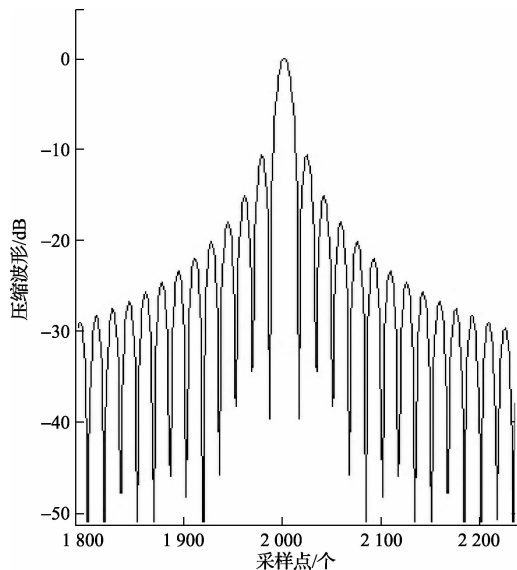


图3 基于脉冲压缩峰值旁瓣比估计电离层TEC的仿真流程



(a)理想GEOSAR信号



(b)受电离层影响的GEOSAR信号

图4 2种信号脉冲压缩波形

由图4可知,受电离层影响的脉冲压缩指标PSLR发生变化,因此可以通过本文提出的方法从回波信号中估计电离层TEC。根据仿真流程,利用本文的方法提取不同波段条件下的电离层TEC,仿真结果如图5所示。

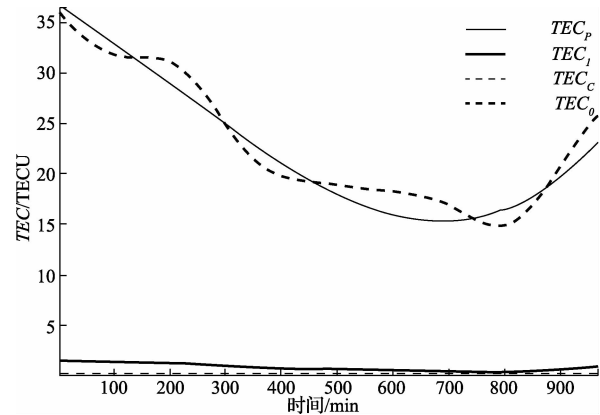


图5 不同波段得到的估计值 TEC_i 与真值 TEC_0 相比较

由估计结果可知,P波段条件下利用该方法估计得到的电离层 TEC_p 与真值 TEC_0 相当,平均误差在1.31TECU;而L波段和C波段信号由于其影响的二次相位误差量级小,由此得到的电离层TEC估计值非常小,与真值 TEC_0 相差较大。因此本文中提出的方法适用于低波段(如P波段),这时电离层对信号的影响较大,测量得到的电离层TEC误差较小。

5 结论

针对GEOSAR相位定标试验,通过测量GEOSAR回波信号脉冲压缩后的峰值旁瓣比来估计电离层引起的二次相位误差,进而反演电离层TEC。仿真分析过程中,将电离层的影响加到理想GEOSAR回波中,然后利用文中提出的方法估计电离层的TEC,通过比较加入的电离层 TEC_0 和不同波段下估计的TEC,最终验证方法的可行性和适用性。该方法在低波段(如P波段)信号中估计TEC的误差较小。此外,本文提出的方法是基于点目标模型,利用GEOSAR信号的压缩指标来反演电离层参数TEC,因此要求信号具有较高的信噪比。实际上,GEOSAR回波的二次相位误差是综合影响(如系统误差、大气扰动误差、轨道误差等)的结果,因此,要利用本方法从SAR回波中反演电离层TEC,需要进行相位误差分离或对其他相位误差予以补偿,这也是今后的研究内容之一。

(下转第36页)

- 研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11): 1060-1066.
- [3] YANG CH L, TIAN SH L, LONG B. Application of heuristic graph search to test-point selection for analog fault dictionary techniques[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(7): 2145-2158.
- [4] 金鑫,任献彬,周亮. 智能故障诊断技术研究综述[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(7): 30-32.
- [5] 孙健,王成华. 基于 mRMR 原则和优化 SVM 的模拟电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 221-226.
- [6] 黄亮,侯建军,刘颖. 模拟电路层次聚类故障分析与马氏距离故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(7): 610-615.
- [7] 秦庆强,张晓安,李艾华. 马氏距离在模拟电路硬故障检测中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(7): 41-45.
- [8] 张屹,魏学业,蒋海峰. 模拟电路故障诊断中故障重分类方法的研究[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(2): 53-56.
- [9] 赵建光,李红波,曾繁景,等. 模拟电路的马氏距离故障诊断方法研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3): 128-131.
- [10] 韩涵,王厚军,龙兵,等. 基于改进马氏距离的模拟电路故障诊断方法[J]. 控制与决策, 2013(11): 1713-1717, 1722.

作者简介

谈恩民,教授,主要研究方向为电路可测试性设计、计算机辅助测试、智能测控技术。

E-mail: tem0135@guet.edu.cn

何正岭(通讯作者),硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助测试。

E-mail: hezl1208@163.com

(上接第 28 页)

参考文献

- [1] 姚昆,杨学志,唐益明,等. SAR 海冰的三维区域 MRF 图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2551-2557.
- [2] 陈少华,韩冰,雷斌. SAR 海冰 MRF 分割精度与图像质量的关系研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(10): 31-35.
- [3] 张金良,鲁昌华,杨道莲. 曲波变换域的 SAR 图像相干斑去噪[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12): 1108-1112.
- [4] 朱敏慧. 地球同步轨道星载合成孔径雷达概念研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(5): 1-4.
- [5] 李雨龙,张红毅,黄丽佳,等. 同步轨道 SAR 电离层影响分析与仿真研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 14-22.
- [6] 江冕,胡文龙. 地球同步轨道星载 SAR 观测特性分析[J]. 现代雷达, 2013, 35(4): 1-6.
- [7] 李军,荆孟道. 同步轨道 SAR 参数分析及成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(5): 931-936.
- [8] 赵宁,谈璐璐,张永胜,等. 星载 P 波段 SAR 电离层效应的双频校正方法[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(3): 255-261.
- [9] 李财品,张洪太,谭小敏. 地球同步轨道合成孔径雷达特性分析[J]. 现代电子技术, 2009(21): 1-4.
- [10] 李亮,洪峻,明峰,等. 电离层时空变化对中高轨 SAR 成像质量的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 36(4): 915-922.
- [11] 胡仕兵,汪学刚,姒强. 线性调频波形产生器相位误差影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(2): 101-106.
- [12] 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): 2460-2467.
- [13] MEYER F, BAMLER R, JAKOWSKI N, et al. The potential of low-frequency SAR systems for mapping ionospheric TEC distributions[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(4): 560-564.

作者简介

朱雪莹,1990 年出生,在读硕士研究生。主要研究方向为地球同步轨道 SAR 电离层影响、电离层 TEC 的估计方法。

E-mail: zzyycqu@163.com