

## P 波段雷达成像电离层效应的地面观测与校正

赵宁<sup>\*①</sup> 周芳<sup>②</sup> 王震<sup>①</sup> 邢孟道<sup>②</sup> 葛家龙<sup>①</sup> 鲁加国<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国电子科技集团公司第三十八研究所 合肥 230031)

<sup>②</sup>(西安电子科技大学 西安 410073)

**摘要:** 对于高分辨率星载 P 波段 SAR 系统, 电离层效应对 P 波段 SAR 会带来一系列较为严重的误差, 这些误差与电波频率和电离层积分电子总量(TEC)值关系密切, 并使得图像质量下降。为了获得高质量的图像, 必须对电离层误差进行校正。该文基于电离层导致的匹配滤波失配的数学模型, 指出获得准确的电离层 TEC 是校正的关键, 提出了一种高精度的基于 SAR 回波相位反演电离层 TEC 的测量方法, 并利用地基 P 波段雷达对空间目标进行穿透电离层步进频 ISAR 观测验证, 实测数据处理结果表明, 该方法有效提高了电离层 TEC 测量精度, 改善了 ISAR 成像质量, 可适于低频段星载 SAR 系统的电离层效应测量与校正应用。

**关键词:** 星载 SAR; P 波段; 电离层效应; 积分电子总量(TEC); 地基雷达; ISAR

中图分类号: TN957; TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)01-0045-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13144

## Ground Observation and Correction of P-band Radar Imaging Ionospheric Effects

Zhao Ning<sup>①</sup> Zhou Fang<sup>②</sup> Wang Zhen<sup>①</sup> Xing Meng-dao<sup>②</sup> Ge Jia-long<sup>①</sup> Lu Jia-guo<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(China Electronic Technology Group Corporation No.38 Research Institute, Hefei 230031, China)

<sup>②</sup>(Institute of Astronautics and Aeronautics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** For high resolution space-borne P-band SAR system, ionospheric effects could cause serious phase errors. These errors are causally related to the radar frequency and the TEC of ionosphere and make the image quality degraded. To guarantee the image quality, the ionosphere errors must be emended. Based on the mismatched filter model caused by ionosphere, it is pointed out that accurate ionosphere TEC is the key for phase error correction, a high precision ionosphere TEC measurement method is further put forward by using the phase errors of SAR echoes, which is validated by processing the data of a ground based P-band radar with well focused radar image of the international space station obtained. The results indicate that the method can effectively increase the accuracy of ionosphere TEC estimation, and thus improve the radar imaging quality, it is applicable to low frequency space-borne SAR systems for reducing the ionosphere effects.

**Key words:** Space-borne SAR; P-band; Ionospheric effects; Total Electron Content (TEC); Ground based radar; ISAR

### 1 引言

P 波段 SAR 因为其良好的植被、地表穿透能力而具有广泛的应用价值, 民用上在生物量调查、大面积灾害监测、冰层结构以及干旱地区含水量普查等方面可发挥重要作用, 军事上可用于反伪装、叶簇穿透探测隐蔽目标等<sup>[1,2]</sup>。

应用于星载平台的 P 波段 SAR 需要解决的关

键问题一是电离层效应的校正, 二是分布广泛的窄带射频干扰的抑制<sup>[3]</sup>。电离层是位于 50 km 至 1000 km 高度范围内的因太阳辐射而发生电离的大气层。电离层对星载 P 波段 SAR 系统的影响主要体现在星-地链路电磁波的传播效应上, 包括电离层时延、色散、相位提前、法拉第旋转、吸收以及电离层闪烁等, 这些效应会导致星载 P 波段 SAR 的成像分辨率、定位精度和图像质量下降。若不对这些效应进行校正和补偿, 高分辨的 P 波段星载 SAR 成像就无法实现。

随着星载 SAR 技术的发展和用户对成像质量不断提升的要求, 电离层对星载 SAR 的影响研究

2013-12-24 收到, 2014-03-24 改回; 2014-03-28 网络优先出版  
“高分辨率对地观测系统重大专项”青年创新基金(GFZX04060103)

资助课题

\*通信作者: 赵宁 cetc38zhaon@163.com

不断升温。文献[4]利用相位屏理论模拟了电离层对 SAR 的影响。针对 VHF, UHF, L 波段星载 SAR, 文献[5]研究了电离层不规则体效应并指出对方位向分辨率影响严重。文献[6]分析了背景电离层对星载 SAR 图像偏移和几何畸变的影响。文献[7]研究了低波段星载 SAR 的电离层效应。针对电离层校正问题, 文献[8]讨论了天基 SAR 测量中的 Faraday 旋转效应及其补偿技术, 提出利用裂谱处理和 GPS 测得的全球 TEC 分布图进行距离和方位压缩中的相位修正。文献[9]提出了采用 HF-SAR 对电离层分层成像的研究方法。文献[10]采用 PGA 方法对 OTHR 雷达的电离层相位污染进行校正。文献[11]提出了基于双频测量的星载 P 波段 SAR 电离层效应校正方法。文献[12]研究了利用星载 L 波段全极化 SAR 数据法拉第旋转效应测量电离层的方法。在地基雷达方面, 文献[13]和文献[14]分别研究了电离层对 VHF 波段和 L 波段的地基雷达对空间目标 ISAR 成像时的电离层影响。文献[15]利用多相位屏仿真的方法研究了电离层不规则体对星载 SAR 的影响。从已发表的文献来看, 针对 P 波段雷达电磁波信号受电离层的影响提出具体的分析修正方法并经试验验证的资料极少。

逆合成孔径雷达(ISAR)和 SAR 的成像原理类似, 都是通过发射宽带信号实现高的距离分辨率, 及依靠雷达与目标间的相对运动形成合成阵列提高横向分辨率, 这使得电离层对 ISAR 信号及 SAR 信号的影响极为相似。从电波传输路径的角度来看, 电离层对星载 SAR 和地基 ISAR 的影响是等同的。因此, 考虑到试验的便利性和经济性, 我们可利用 P 波段 ISAR 雷达对电离层外高速合作目标进行成像来反演电离层对宽带雷达信号的影响, 并由此为 P 波段星载 SAR 的电离层校正问题提供研究参考。

对于电离层的测量与校正, 文献[2,11]所提双频方法对电离层积分电子总量(TEC)的测量精度取决于双频时延的测量精度, 而对天基和地基雷达而言, 时延的高精度测量往往很难达到, 使得电离层 TEC 的测量精度不高, 从而无法精确补偿电离层造成的相位污染。由于电离层对不同频率电磁波相位的影响不同, 本文提出了基于回波相位拟合的方法来提高电离层 TEC 的测量精度。采用建模与实测数据相结合的方法, 研究了电离层对 P 波段电磁波包络和相位的影响, 提出了基于宽带雷达回波数据的一种背景电离层特性估计方法, 能够有效反演出电离层参数, 完成对回波数据的有效补偿。在地面利用地基 P 波段雷达对国际空间站(ISS 25544)进行 ISAR 成像处理, 发现由于电离层的存在, 使得不

同频率观测国际空间站时所得到的目标加速度呈线性变化, 而观测飞机目标时则没有该类变化, 据此可反演出电离层 TEC 值, 用于对目标 ISAR 成像补偿。利用地基 P 波段雷达对空间合作目标进行 ISAR 成像观测, 可以作为分析电离层特性的一种重要手段。本文的研究工作可为星载 P 波段 SAR 成像电离层效应抑制方法提供依据, 有助于促进星载 P 波段 SAR 技术的发展。

## 2 基于回波相位的电离层效应测量校正原理

### 2.1 受电离层影响的回波模型

通过应用电离层中电磁波传播的 Klein-Gordon 方程及匹配滤波理论, 文献[2]建立了 SAR 在电离层影响下的回波模型, 给出了当信号经过电离层传播后, 由于电离层效应的影响, 广义模糊函数的变化后形式:

$$W'(y, z) \approx \underbrace{\int A \left( t - \frac{2|x^0 - y|}{c} \right) A'_{\delta\tau} (t - 2T_{gr}(x, z, \omega_0)) dt}_{W_R(y, z)} \cdot \underbrace{\sum_{-N/2}^{N/2} \exp \left\{ -2i\omega_0 \left[ \frac{|x^n - y|}{c} - T_{ph}(x, z, \omega_0) \right] \right\}}_{W_A(y, z)} \quad (1)$$

从式(1)可以看出, 由于电离层效应的影响, 接收到的信号与匹配滤波器处于失配状态, 从而对图像分辨率产生影响。因此, 为了消除电离层效应的影响, 需要对匹配滤波器进行相应调整, 匹配滤波器中的信号真空传播时间  $|y - x^0|/c$ ,  $|y - x^n|/c$  分别由群延时  $T_{gr}(x, z, \omega_0)$  和相延时  $T_{ph}(x, z, \omega_0)$  替换, 文献[2]给出的计算公式为:

$$T_{gr,ph}(x, z, \omega_0) = \frac{R_y}{c} \left[ 1 \pm \frac{1}{2} \frac{4\pi e^2}{m_e \omega_0^2} \left( \frac{\bar{N}_e^{(H)}}{H} + \frac{1}{R_y} \int_0^{R_y} \mu(s) ds \right) \right] \quad (2)$$

其中,  $R_y = |x - y|$ ,  $\bar{N}_e^{(H)} = \int_0^H \langle N_e(h) \rangle dh \approx \text{TEC}$  是传播路径上电子浓度的积分, 称为积分电子总量 (Total Electron Content, TEC), 是表征电离层信息的一个关键的参数。

同时, 由于电离层效应的影响, 回波信号的脉冲宽度变化量和调频率变化量也要做相应变化, 文献[2]给出的计算公式为:

$$\delta\tau = \frac{R_z}{c} \frac{4\pi e^2}{m_e \omega_0^2} \frac{B}{\omega_0} N, \quad \delta\alpha = \frac{\delta\tau}{2} \frac{B}{\tau^2} \quad (3)$$

由以上分析可以得知, 要得到精确的匹配滤波函数, 需要通过测量得到 TEC, 计算出信号的群

延时时间和相延时时间,从而对匹配滤波函数进行调整。

## 2.2 基于回波相位的 TEC 提取方法

针对上述星载 SAR 电离层效应,可在地面利用 P 波段雷达穿透电离层观测空间目标来测量电离层的影响。由于电离层效应与频率有关,而地基 P 波段雷达多为窄带工作,因此可采用步进频方式进行观测。

由于成像雷达发射的是调频波,雷达成像是基于调频回波的相位,因此需要研究电离层对回波相位带来的影响。由于折射系数不为 0,电离层中载波的传播相速度为:

$$v_p(z) = \frac{c}{n(z)} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} > c \quad (4)$$

群速度表征了测距信息,为:

$$v_g(z) = c \cdot n(z) = c \cdot \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} < c \quad (5)$$

由于电离层色散效应使电离层中电磁波传播的群速度  $v_g$  小于自由空间传播的光速,导致了一个附加的距离偏移,使得脉冲压缩后的信号出现图像偏移,即图像定位精度下降,需要在成像处理中对群时延进行补偿。

电波在穿过电离层时的单程相路径延迟量为:

$$\Delta l_p = \int (n-1) dl = \frac{b}{\omega^2} \int N_e(z) dl = \frac{40.308}{f^2} N_{\text{TEC}} \quad (\text{m}) \quad (6)$$

其中  $N_{\text{TEC}} = \int N_e(z) dl$  (单位:  $e^-/\text{m}^2$ ) 为传播路径上的 TEC,  $N_{\text{TEC}}$  以  $1 \text{ TECU} = 10^{16} e^-/\text{m}^2$  为单位表述。

可见,相对于自由空间,电离层的存在缩短了相路径长度,从而导致了相位超前。电离层引起的相位超前为:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l_p = \frac{b}{c\omega} N_{\text{TEC}} = \frac{8.44 \times 10^{-7}}{f} N_{\text{TEC}} \quad (\text{rad}) \quad (7)$$

相位关于频率的变化率是由电离层引起的相位色散,即

$$\frac{d\Delta \varphi}{df} = \frac{b}{2\pi c f^2} N_{\text{TEC}} = \frac{8.44 \times 10^{-7}}{f^2} N_{\text{TEC}} \quad (\text{rad/Hz}) \quad (8)$$

相位色散会导致匹配滤波失配,使得图像分辨率下降。

设地基 ISAR 雷达发射线性调频步进脉冲信号,每个脉组内含有  $N$  个子脉冲,

$$S_r(\hat{t}, k) = w_r(\hat{t}) w_a(k) \exp[j2\pi f_c(k)\hat{t} + j\pi\gamma(\hat{t})^2] \quad (9)$$

其中  $w_r(\cdot)$  表示发射脉冲的包络,  $w_a(\cdot)$  代表方位向天线方向图,  $\hat{t}$  为快时间,且有  $\hat{t} \in [-T_p/2, T_p/2]$ ,  $T_p$  为

发射脉冲宽度(脉冲发射持续时间),  $f_c(k) = f_c + (k-1/2 - N/2)\Delta f$ , ( $1 \leq k \leq N$ ) 为第  $k$  个脉冲的载频,  $f_c$  为发射信号的中心频率,  $\Delta f$  为步进频率,  $\gamma$  为信号的调频率。

在高速运动目标的 ISAR 模型下,瞬时斜距为:

$$R_p(t_k, t_n, t_m) = R_p(t_n, t_m) + v_r t_k + \frac{1}{2} a_r t_k^2 \quad (10)$$

$$R_p(t_n, t_m) \approx R_0 + y_p + (v_r - \omega x_p)(t_n + t_m) + \frac{1}{2} a_r (t_n + t_m)^2 + \frac{1}{6} b_r (t_n + t_m)^3 \quad (11)$$

其中  $t_k$  为快时间,  $t_n$  和  $t_m$  分别为步进脉组内和脉组间的慢时间。真空中载频为  $f_{ck}$  的某一个步进频率信号的回波为:

$$S_{r\_ideal}(t_k, t_n, t_m, f_{ck}) = w_r(t_k - \tau) w_a(k) \cdot \exp[j2\pi f_{ck}(t_k - \tau) + j\pi\gamma(t_k - \tau)^2] \quad (12)$$

其中  $\tau = 2R_p(t_k, t_n, t_m)/c$  为回波时延。  $f_{ck} = f_c + (k-1/2 - N/2)\Delta f$ , ( $1 \leq k \leq N$ ) 为步进脉组中的一个载频,  $f_c$  为发射步进信号脉组的中心频率,  $\Delta f$  为步进频率,  $\gamma$  为信号的调频率。

观测目标处于电离层中,雷达调频信号传播过程需要穿透部分电离层,电磁波信号往返时要受电离层影响,电离层会对调频信号附加一个超前相位  $\Delta \varphi$ , 所以存在电离层影响时雷达接收到的线性调频回波信号为:

$$S_r(t_k, t_n, t_m, f_{ck}) = S_{r\_ideal}(t_k, t_n, t_m, f_{ck}) \exp[j\Delta \varphi_p(f_k)] \quad (13)$$

其中  $\Delta \varphi_p(f_k)$  为电离层引起的双程相位超前量。由于电磁波脉冲传播时间很短,可认为此脉冲传播时间内电离层结构不发生变化,此时,  $\Delta \varphi_p(f_k)$  仅与电磁波频率  $f_k$  相关,且  $f_k = f_{ck} + f_r$ ,  $f_r \in [-B/2, B/2]$ 。对第  $k$  个子脉冲电离层电子积分总量取  $N_{\text{TEC}}(k)$ , 则  $\Delta \varphi_p(f_k)$  可表示为:

$$\Delta \varphi_p(f_k) = -\frac{b}{\pi c f} N_{\text{TEC}}(k) \quad (14)$$

其中  $b = e^2 / (2\epsilon_0 m) = 1.591 \times 10^3 \text{ m}^3 / \text{s}^2$ 。将式(14)电离层引起的附加相位  $\Delta \varphi_p(f_k)$  在每个子脉冲的中心频率  $f_{ck}$  处进行泰勒展开,且  $f \in f_c(k) + [-B/2, B/2]$ , 记  $f_r = f - f_{ck}$  则第  $k$  个步进频率信号对应的  $\Delta \varphi_p(f_k)$  可表示为:

$$\Delta \varphi_p(f_k) = \frac{-b N_{\text{TEC}}(k)}{\pi c} \cdot \left( \frac{1}{f_{ck}} - \frac{f_r}{f_{ck}^2} + \frac{f_r^2}{f_{ck}^3} + \sum_{n=3}^{\infty} (-1)^n \frac{f_r^n}{f_{ck}^{n+1}} \right) \quad (15)$$

分析式(15)可知,电离层引入的相位误差中,  $f_r$  的 0 次项为常数相位,对单次距离向成像质量没有影

响;  $f_r$  的 1 次项会使输出信号在中心频率上出现一个延迟

$$\Delta\tau_\varphi(f_k) = \frac{d}{df_r} \left( \frac{bN_{\text{TEC}}(k)}{\pi c f_{ck}^2} f_r \right) \quad (16)$$

使距离脉冲压缩后回波包络发生偏移, 但不影响距离分辨率;  $f_r$  的 2 次项, 污染了回波的调频率, 使距离脉冲压缩匹配函数失配, 导致距离向上的散焦, 对距离分辨率的影响最大;  $f_r$  的 3 次项也会影响距离向的分辨率, 影响能力为 2 次项的  $|f - f_c|/f_c$  倍;  $f_r$  的 3 次以上的高次项的影响较小。当信号带宽较窄时, 若满足  $|f - f_c| \ll f_c$  则可忽略 3 次及以上项的影响。  $f_r$  的 2 次项在频带边缘的相位偏移幅度决定了电离层相位误差对距离分辨率影响的大小, 若允许的最大相位偏移为  $\pi/4$ , 则当相位误差小于  $\pi/4$  时可忽略相位偏移对距离分辨率的影响。

由雷达信号处理知识可知, 目标的瞬时多普勒频率正比于回波相位对时间的 1 次导数, 而回波相位与斜距相关, 即

$$f_{dk} = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{d}{dt_m} [R(t_m) + \Delta l_p] \quad (17)$$

目标的瞬时调频率正比于回波相位对时间的 2 次导数, 即

$$\gamma_{dk} = -\frac{2}{\lambda} a_{\text{iono}} = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{d^2}{dt_m^2} [R(t_m) + \Delta l_p] \quad (18)$$

其中  $a_{\text{iono}}$  是存在电离层影响时的目标回波加速度。将式(6)和式(10)、式(11)代入式(18)中得到:

$$a_{\text{iono}} = a_r - \frac{b}{4\pi^2 f_k^2} N_{\text{TEC}}(k) \quad (19)$$

同样, 将每个子脉冲的中心频率在  $f_{ck}$  处进行泰勒展开, 式(19)即为:

$$a_{\text{iono}} = a_r - \frac{b}{4\pi^2} N_{\text{TEC}}(k) \cdot \left( \frac{1}{f_{ck}^2} - \frac{2f_r}{f_{ck}^3} + \frac{3f_r^2}{f_{ck}^4} + \sum_{n=3}^{\infty} (-1)^n \frac{f_r^n}{f_{ck}^{n+2}} \right) \quad (20)$$

可见由于电离层的影响, 目标回波的加速度与频率相关, 回波调频率和多普勒中心也均与频率有关。

缓变电离层情况下, 在一段时间内可近似认为  $N_{\text{TEC}}$  不变, 这符合绝大多数时间和空间分布里电离层的变化规律。那么可以通过对回波进行加速度估计, 获得电离层影响下的回波相位, 建立电离层影响和频率之间的联系, 从而反演出电离层的参数。

假设从目标回波中估计得到的电离层加速度为  $a_{\text{iono}}$ , 将加速度对频率进行拟合, 则其可表示为:

$$a_{\text{iono}}(f_r, t_m) = p_0 + p_1 f_r + p_2 f_r^2 + \dots \quad (21)$$

对应的相位可表示为:

$$\varphi_{\text{iono}}(f_r, t_m) = \delta a_{\text{iono}}(f_r, t_m) f_r \quad (22)$$

其中  $\delta$  为系数, 即相位是加速度的高 1 阶函数。则根据式(20)和式(21)可得, 电离层参数  $N_{\text{TEC}}$  为:

$$N_{\text{TEC}} = \frac{2\pi^2 f_c^3}{10^{16} b} p_1 \quad (\text{TECU}) \quad (23)$$

注意此处得到的 TEC 是双程的, 需要除以 2 才可得到电波传输路径上的电离层 TEC 数值。在获得精确的 TEC 值之后, 即可用于构造成像匹配滤波器的修正项, 对电离层引入的相位误差进行校正。

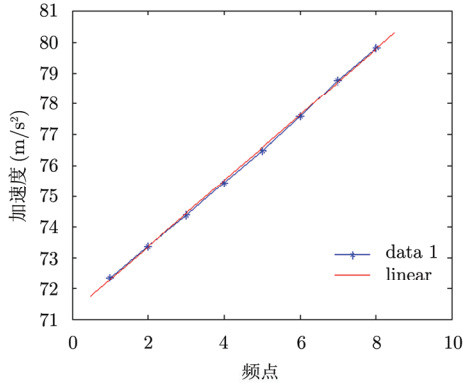
### 3 地面步进频 ISAR 数据的试验验证

根据上述模型推导, 我们采用地基 P 波段空间目标观测雷达进行了试验验证, 由于地基雷达多工作在窄带模式下, 而星载 SAR 工作在宽带模式, 为了尽可能逼真的模拟电离层对宽带 SAR 信号的影响, 我们对地基 P 波段雷达进行了步进频模式的改进, 通过一系列窄带脉冲合成宽带信号对过顶的国际空间站(ISS 25544)目标进行了电离层效应观测和 ISAR 成像处理。作为对比, 也录取了电离层以下海拔高度在 1 万米的民航飞机的步进频回波数据进行分析。雷达步进频率范围为 545~595 MHz, 发射子脉冲带宽 5 MHz, 脉宽 50  $\mu\text{s}$ , 共计 10 个子脉冲, 合成时交叠 1 MHz, 合成带宽 40 MHz, 脉冲重复周期为 1 ms。方位向波束宽度为  $4^\circ$ , 通过波束扫描切换采集了 3 个波束宽度内切向飞行的目标数据。

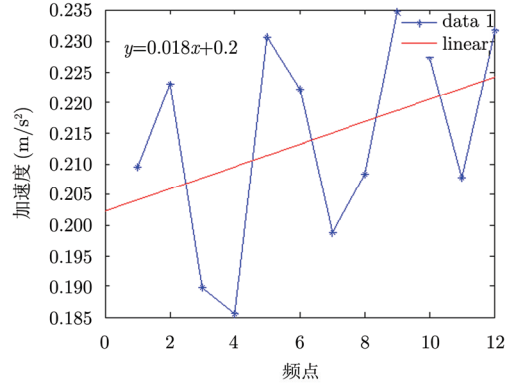
处理中通过先验知识, 及相关运动估计方法(MD、包络拟合等)可以得到目标的运动参数  $v_r$ ,  $a_r$ 。根据前文分析, 由于电离层带来的相位污染了调频率, 使得不同频点的回波数据估计得到的加速度不同。此外, 在较窄的带宽内, 电离层影响的附加相位随频率近似为线性关系, 则加速度对频率变化也应当是线性关系。通过对 2013 年 4 月 19 日下午 15:05 自中国兰州由西向东飞越北京上空的国际空间站实测数据的分析, 从 10 个步进频点分别估计出加速度, 得到的加速度确实满足以上关系, 如图 1(a)所示, 图中横坐标表示频点编号, 1 号频点为 545 MHz, 此后每个频点间隔 5 MHz。图中蓝色点为每个频点的估计加速度信息, 红色直线为线性拟合结果。可见 10 个频点测量的加速度差在 72 至 81 之间呈线性分布。而同期录取的民航飞机由于飞行高度远远低于电离层高度, 应当无上述现象发生, 图 1(b)为民航飞机的观测结果, 10 个频点测得的加速度在 0.21 附近, 其随频率变化的范围远远小于国际空间站目标, 可认为基本与频率无关。

由于电离层是缓变的，可以近似认为在一段时间内其  $N_{TEC}$  参数相同。此段时间选择过短，会导致运动参数估计不准，选择得过长又平滑了电离层的变化信息。处理中选择 4.5 s 共 300 个脉组进行分析，分析得到的电离层带来的相位如图 2 所示。图

中纵坐标表示相对工作中心频率(0 频率处表示的实际工作频率为 570 MHz)的载频频率范围，横坐标表示相对于中心脉组(0 时间处表示第 150 个脉组)的相对时间。图中从蓝色到红色代表 0 到  $2\pi$  的相位分布。



(a) 国际空间站(ISS 25544)加速度不同频率观测值  
(a) Acceleration of International Space Station (ISS 25544) observed by different frequency



(b) 民航飞机加速度不同频率观测值  
(b) Acceleration of civil aviation airplane observed by different frequency

图 1 电离层内外不同目标加速度随频率的变化

Fig. 1 The acceleration vary with frequency of different targets inside and outside ionosphere

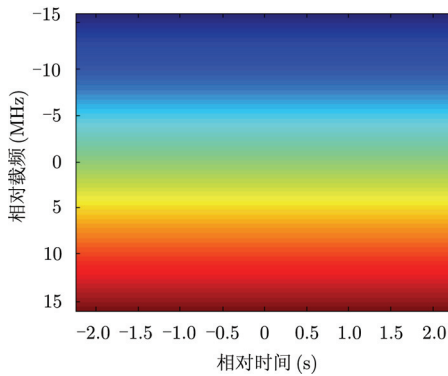
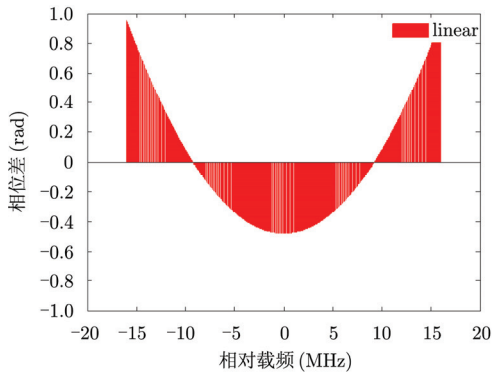


图 2 电离层导致的回波相位变化

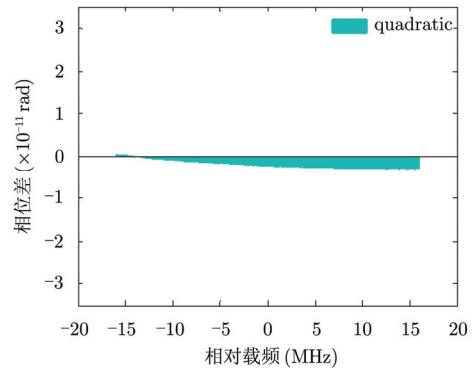
Fig. 2 The echo's phase variation caused by ionosphere

从图 2 中可以看出，电离层带来的相位随着频率的不同而缓慢变化。对其进行线性拟合后，拟合误差最大达到 1 rad，且拟合误差对称分布，说明还残留高次偶数项，如图 3(a)所示。进行 2 次拟合后，拟合误差降到  $10^{-11}$  rad，已经可以达到拟合的精度，如图 3(b)所示。图中横坐标表示相对工作中心频率(0 频率处)的载频频率范围。

则根据式(23)可得电离层双程  $N_{TEC}$  参数值。从数据中选取的 4.5 s 内的 300 组步进脉组中估计得到的电离层积分电离总量为 30.214 TECU。2013 年 4 月 19 日该时刻北京地区 IGS 公布的电离层 TEC



(a) 线性拟合误差  
(a) Error of linear fit



(b) 2次拟合误差  
(b) Error of 2nd order fit

图 3 相位误差随频率变化拟合分析

Fig. 3 Fit analysis to phase error variation with frequency

如图4(a)所示为29 TECU,采用电离层监测仪获得的电离层分布如图4(b)所示为29.4 TECU。可见本文基于回波相位实测估计得到的TEC与其差距在1 TECU以内,具有较高的可信度。需要指出的是,IGS与电离层监测仪获得的是垂测数据,且探测的高度大于国际空间站的轨道高度(约400 km)。而雷达探测的电波传播路径具有一定的倾角,所以其测量值与IGS和电离层监测仪有一定差异,但由于白天情况下,电离层的峰值一般在300 km以下的F层和E层,因此小于1 TECU的测量差应该是合理的。

利用获得的路径TEC值,进行步进频ISAR成像补偿处理。国际空间站如图5(a)所示,如果不补偿电离层相位,对10个频点进行合成处理(此时距离合成带宽为40 MHz,分辨率为3.75 m),直接成像结果如图5(b)所示。从图中可见由于信号相干性被电离层污染,严重的处理失配使得回波能量完全扩散,无法聚集成像。补偿完电离层带来的相位后成像结果如图5(c)所示,此时不同频率的信号之

间的相干性得到恢复,频带拼接后得到了较好的结果。图5(d)为结合PGA方法获得的成像结果,可见进一步提高了ISAR图像质量。

由于实验中信号带宽较窄,分辨率较低,速度、加速度的估计精度都不高,使得最终频带合成后的成像结果中,距离像仍存在栅瓣,但结合PGA的处理方法可以提高合成效果。实测数据处理结果表明,在目标运动参数未知的情况下,通过对穿透电离层的不同频带回波信号的运动参数估计,可以有效地提取出电离层的TEC,并且补偿掉电离层污染相位后可以得到目标的合成孔径雷达图像。

#### 4 结论

本文提出了基于回波相位的高精度电离层TEC提取方法,并利用地基P波段雷达在地面采用ISAR方法进行了试验验证,对国际空间站目标的观测数据分析与处理验证了方法的有效性,测量的数据与IGS和电离层测量设备获得的数据对比表明该方法可得到电离层TEC值,将获得的TEC代

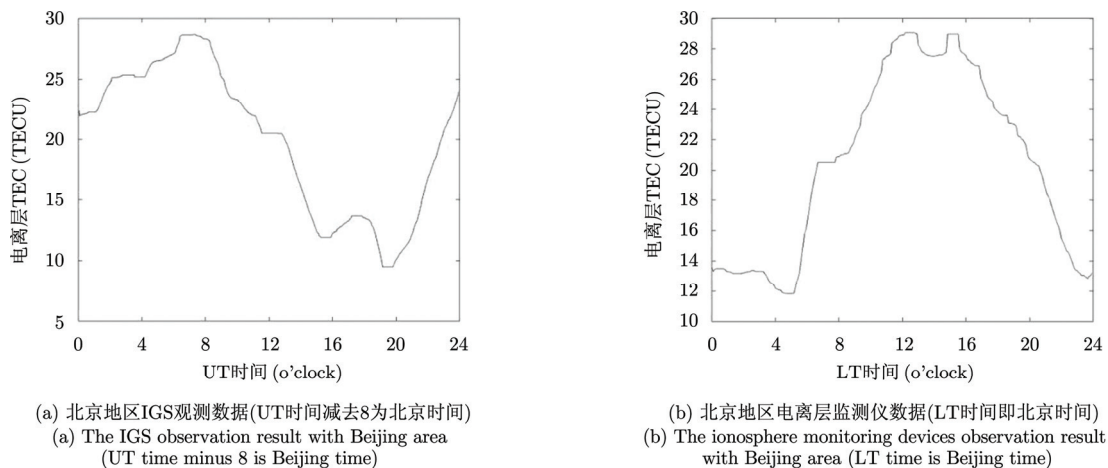
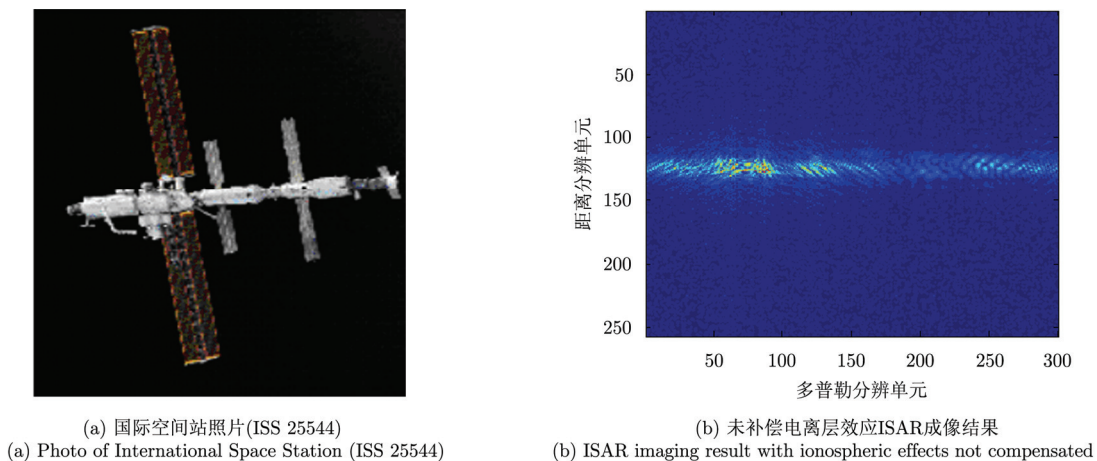


图4 北京地区电离层TEC观测数据(2013.04.19)

Fig. 4 The observation result of ionosphere TEC in Beijing area (19-04-2013)





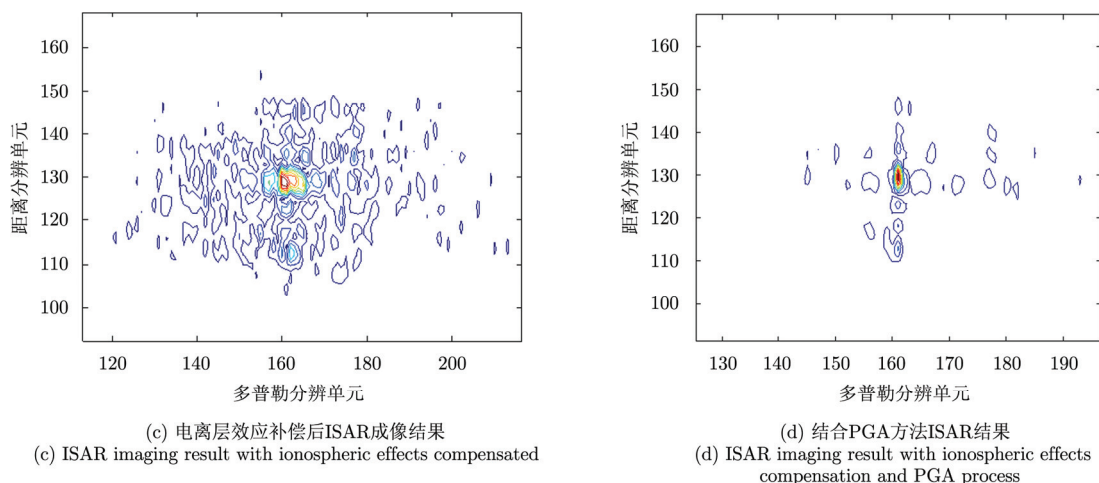


图 5 实验数据 ISAR 成像处理结果

Fig. 5 Experiment data ISAR imaging result

入校正模型中,可有效改善 ISAR 成像图像质量。所提方法为开展星载 P 波段 SAR 电离层效应抑制提供了依据,同时也能够用于对背景电离层状态进行实时监测,具有一定的理论意义和应用价值。

**致谢** 中国电波传播研究所为本文的研究工作提供了电离层对比观测数据,在此特表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Hélière F, Lin C C, *et al.* BIOMASS: a P-band SAR earth explorer core mission candidate[C]. IEEE Radar Conference, Pasadena, CA, USA, 2009: 1-6.
- [2] Tsynkov S V. On SAR imaging through the earth's ionosphere[J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2009, 2(1): 140-182.
- [3] 丁斌, 向茂生, 梁兴东. 射频干扰对机载 P 波段重复轨道 InSAR 系统的影响分析[J]. *雷达学报*, 2012, 1(1): 82-90.  
Ding Bin, Xiang Mao-sheng, and Liang Xing-dong. Analysis of the effect of radio frequency interference on repeat track airborne InSAR system[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 82-90.
- [4] Quegan S and Lamont J. Ionospheric and tropospheric effects on synthetic aperture radar performance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(4): 525-539.
- [5] Ishimaru A, Kuga Y, Liu J, *et al.* Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz[J]. *Radio Science*, 1999, 34(1): 257-268.
- [6] Xu Z W, Wu J, and 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] 赵万里, 梁甸农, 周智敏. VHF/UHF 波段星载 SAR 电离层效应研究[J]. *电波科学学报*, 2001, 16(2): 189-199.
- [8] Freeman A and Saatchi S S. On the detection of Faraday rotation in linearly polarized L-band SAR backscatter signatures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1607-1616.
- [9] Chen Jie, *et al.* Image formation algorithm for topside ionosphere sounding with spaceborne HF-SAR system[C]. IEEE IGARSS Conference, Boston, Massachusetts, USA, 2008: II549-552.
- [10] 邢孟道, 保铮. 电离层电波传播相位污染校正[J]. *电波科学学报*, 2002, 17(2): 129-133.  
Xing Meng-dao and Bao Zheng. Phase perturbation correction in ionospheric electromagnetic wave propagation[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(2): 129-133.
- [11] 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.  
Zhao Ning, Tan Lu-lu, Zhang Yong-sheng, *et al.* A double frequency measurement and correction method for ionospheric effects in space-borne P-band SAR[J]. *Radar Science and Technology*, 2013, 11(3): 255-261.
- [12] Nicoll J B and Meyer F J. Mapping the ionosphere using L-band SAR data[C]. IEEE IGARSS Conference, Boston, Massachusetts, USA, 2008: II537-540.
- [13] Schmidt A D. Radar imaging of satellites at meter wavelengths[D]. USA: UMI, 2000: 35-55.
- [14] 唐辉, 胡卫东, 郁文贤. 电离层对 L 波段 ISAR 成像的影响[J]. *电波科学学报*, 2003, 18(2): 172-177.  
Tang Hui, Hu Wei-dong, and Yu Wen-xian. Ionospheric effects on L-band ISAR imaging[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2003, 18(2): 172-177.

- [15] 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 Yong-shen, 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.

### 作者简介



赵宁(1973-), 男, 陕西人, 获北京航空航天大学博士学位, 中国电子科技集团公司第三十八研究所高级工程师, 主要研究领域为星载、机载 SAR 雷达系统、SAR/MTI 信号处理。

E-mail: cetc38zhaon@163.com



邢孟道(1975-), 男, 浙江人, 获西安电子科技大学博士学位, 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室教授。主要研究方向为合成孔径雷达(SAR)信号处理, 逆合成孔径雷达(ISAR)信号处理和稀疏信号处理。



周芳(1987-), 女, 安徽人, 西安电子科技大学 2010 级在读博士生。主要研究方向为聚束式合成孔径雷达(SAR)信号处理和逆合成孔径雷达(ISAR)信号处理。



葛家龙(1962-), 男, 安徽人, 获上海科技大学硕士学位, 中国电子科技集团公司第三十八研究所副总工程师、研究员, 主要研究方向为星载 SAR 系统。



王震(1987-), 男, 安徽人, 获西安电子科技大学硕士学位, 中国电子科技集团公司第三十八研究所工程师, 主要研究方向合成孔径雷达总体。

鲁加国(1964-), 男, 安徽人, 获中国科技大学硕士学位, 中国电子科技集团公司第三十八研究所副所长、研究员, 博士生导师, 享有国家特殊津贴专家, IEEE 高级会员, 中国电子学会高级会员、中国电子学会雷达分会和微波分会委员, 长期从事新技术研究管理工作。