时-空变化的背景电离层对星载合成孔径雷达方位向成像的影响分析

张永胜 计一飞* 董 臻

(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

摘 要:对于星载合成孔径雷达(SAR)成像,方位向信号的相关性可能会因时-空变化的背景电离层而遭到破坏, 特别是对于低波段系统。该文将孔径内方位时变的斜距电子总量(STEC)归结于3个因素:垂向电子总量 (VTEC)的时间变化、空间变化以及电磁波传播路径的变化,分别分析了每个因素造成的时变STEC各阶系数。该 文建立了统一的分析模型,即时变STEC影响下的SAR方位向信号3阶泰勒展开模型,推导了方位向偏移和相位误 差解析表达式,并基于此得到了不同星载SAR系统的时变STEC各阶系数容限。利用实测的VTEC数据以及国际 参考电离层(IRI)模型,开展了信号级仿真。数值分析和信号级仿真的结果表明,对于低轨P波段SAR系统,空变 VTEC与传播路径变化是导致方位时变STEC的主要因素;而对于中高轨SAR系统,时变VTEC是导致方位时变 STEC的主要因素。随着载频的下降与合成孔径时间的增加,方位向成像性能更加容易受到方位时变STEC的影响。 关键词:星载合成孔径雷达;方位向成像;电离层;时-空变化的背景电离层

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2021)10-2781-09 DOI: 10.11999/JEIT200777

Research on Background Ionospheric Impacts Imposed by Spatio-temporal Variations on Spaceborne Synthetic Aperture Radar Azimuth Imaging

ZHANG Yongsheng JI Yifei DONG Zhen

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

Abstract: In spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging, the coherence of azimuth signals might be degraded by spatio-temporal variations of the background ionosphere, especially for low-frequency systems. In this paper, the azimuth temporal-varying Slant Total Electron Content (STEC) is attributed to three factors: the spatial- and temporal-varying Vertical Total Electron Content (VTEC), and the propagation path variation. Derivative of each order of the azimuth-varying STEC is analyzed as to each factor. A uniform analytical model is established, that is the third-order Taylor expansion model of SAR azimuth signals influenced by the temporal-varying STEC. The analytical expressions of the azimuth shift and phase errors are derived. Based on this model, thresholds of the varying STEC derivatives are derived for different spaceborne SAR systems. Signal-level simulations are performed by means of the VTEC real data and the International Reference Ionosphere (IRI) model. Numerical analyses and signal-level simulations indicate that the spatial-varying VTEC becomes a predominant factor that results in the azimuth temporal-varying STEC in the medium- or high-orbit SAR system. As the carrier frequency decreases and the synthetic aperture time increases, the azimuth imaging performance is more susceptible to the azimuth temporal-varying STEC.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Azimuth imaging; Ionosphere; Spatio-temporal varying background ionosphere

收稿日期: 2020-09-02; 改回日期: 2021-03-04; 网络出版: 2021-03-22

*通信作者: 计一飞 jyfnudt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501477)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(61501477)

1 概述

星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波遥感系统,集全天时、全 天候、多波段、多极化等特点于一身,具有其他遥 感系统难以发挥的作用,已在环境监测、灾害监 测、海洋监测、资源勘探、农业估产、城市规划、 测绘和军事侦察等领域发挥重要作用。为了提供更 广阔、更丰富、更细致的对地观测信息,星载 SAR正逐渐覆盖各个典型波段,并朝着高时空分辨 率、宽测绘带等方向发展[1]。由于低波段系统(包 括L波段和P波段)表现出对生物量的高敏感性^[2-4], 以及对叶簇、浅层地表和伪装覆盖物的强穿透 力^[5-7],利用低波段星载SAR实现生物量反演、碳 循环监测以及隐蔽目标探测已成为一个新的研究热 点。另外,随着广域目标区域长时间连续观测的需 求不断增长,众多国内外学者和科研机构针对中高 轨SAR开展了理论研究和系统论证^[8-10]。

SAR卫星一般运行于距离地面200 km以上的 轨道,而电离层分布于距离地面60~2000 km,这 些星载SAR的电磁波信号在发射和反射的传播过程 中势必会穿过电离层,从而受到电离层的影响,主 要包括时延、相位超前、色散、折射、衰减、法拉 第旋转以及闪烁等效应,最终对星载SAR2维图像 及其应用造成影响。电离层通常可以分为随机性、 中小尺度分布的不规则体以及确定性、时空缓变、 大尺度分布的背景电离层两个部分[11]。前者引入的 信号幅度和相位闪烁将会导致合成孔径内的去相干 效应,从而造成方位向图像散焦[12-14];后者引入的 相位超前误差会影响星载SAR干涉性能,群延迟会 导致图像整体偏移,色散效应主要会导致距离向图 像散焦,FR效应会导致极化测量误差^[11],本文研 究的是背景电离层的影响。研究表明,随着星载 SAR系统载频的降低、带宽的增大以及合成孔径时 间的增加,电离层效应更加显著[15-17]。

随着近年来针对中高轨SAR系统的研究不断深入,尤其是对于地球同步轨道SAR(GEO SAR), 其超长合成孔径时间内时空变化的背景电离层受到 了广泛关注。2014年,李亮等人^[18]通过引入电子总 量(TEC)关于方位时间的各阶导数,初步考虑了时 变背景电离层对中高轨SAR方位向成像的影响。同 年,李雨龙等人^[19]利用Ishimaru的广义模糊函数模 型,结合国际参考电离层(International Reference Ionosphere, IRI)研究了背景电离层时空变效应对 GEO SAR成像的影响。北京理工大学的研究团队 深入考虑了时变背景电离层对GEO SAR方位向成 像的影响^[20-23],详细推导了时变TEC导致的方位相 位压缩误差、距离单元迁徙误差以及二次距离压缩 误差^[21],并给出了背景电离层时变参数对GEO SAR方位聚焦影响的容限曲线,同时利用全球定位 系统、北斗导航卫星接收机实测得到的电离层 TEC数据进行了信号级、图像级的仿真^[21-23],从而 验证了理论推导的有效性。另外,孔径内传播路径 变化引起的时变斜距电子总量(Slant Total Electron Content, STEC)对星载SAR方位向成像的影 响也受到了一些学者的关注^[24,25]。

在建立背景电离层对星载SAR方位向成像影响 的信号模型时,上述文献大多仅考虑了背景电离层 垂向电子总量 (Vertical Total Electron Content, VTEC)的时变因素。但由于星载SAR的下视观测 几何,最终需要考虑STEC,而合成孔径时间内 STEC的变化与方位时间、背景电离层穿刺点的位 置以及传播路径都有关系,这表明孔径内方位时变 的STEC源于时-空变化耦合的背景电离层以及传播 路径的变化。因此,本文将针对导致方位时变 STEC的3个具体因素,即VTEC的时间变化和空间 变化,以及电磁波传播路径的变化,分析不同星载 SAR系统方位向成像性能受到的影响。

2 方位向信号模型

考虑时空变背景电离层的影响,则星载SAR系统冲激响应函数可表示为^[20,21,25]

$$h_{\text{iono}}\left(f_{\tau}, \eta; P\right) = \exp\left[\frac{j4\pi K_{\phi}}{c\left(f_{\tau} + f_{c}\right)} \cdot \text{STEC}\left(\eta; P; r_{x}, r_{y}\right)\right]$$
$$\cdot h_{0}\left(f_{\tau}, \eta; P\right) \tag{1}$$

其中

$$h_{0}(f_{\tau},\eta;P) = W_{\mathrm{r}}(f_{\tau}) w_{\mathrm{a}}(\eta - \eta_{P}) \exp\left(-\mathrm{j}\frac{\pi f_{\tau}^{2}}{K_{\mathrm{r}}}\right)$$
$$\cdot \exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi (f_{\mathrm{c}} + f_{\tau}) R_{P}(\eta)}{\mathrm{c}}\right] \qquad (2)$$

其中, f_{τ} 为快时间 τ 对应的距离频率, η 为方位慢时间, f_{c} 为载频,c为光速, $K_{\phi} \approx 40.28$ 为电离层常数, r_x, r_y 表示背景电离层穿刺点位置坐标,该穿刺点为方位时刻 η 卫星、点目标P的连线与背景电离层相位屏的交点, $h_0(f_{\tau}, \eta; P)$ 为点目标P对应的理想冲激响应函数, W_r 为距离频域窗函数, w_a 为方位时域窗函数, η_P 为P的方位中心时刻, K_r 为距离向调频率, $R_P(\eta)$ 为斜距历程。而孔径内方位时变的STEC可近似表示为以下3阶多项式的形式^[25]

STEC
$$(\eta; P; r_x, r_y) =$$
VTEC $(\eta; P; r_x, r_y)$
 $\cdot \sec [\theta_i (\eta; P; r_x, r_y)]$
 \approx STEC₀ + $k_1\eta + k_2\eta^2 + k_3\eta^3$
(3)

其中,θ_i(η)表示孔径内变化的背景电离层入射角, STEC₀为STEC的常量部分,k₁,k₂,k₃分别为STEC 关于方位时间的1阶、2阶以及3阶系数。式(3)表 明,导致孔径内时变STEC的因素主要有3个:背 景电离层VTEC本身的时间和空间分布特征以及孔 径内入射角的变化,后者源于传播路径的改变。

由于本文研究方位向成像性能,因此可以忽略 电离层相位误差对距离频率的依赖性,给出方位时 域信号的表达式

$$h_{a}(\eta; P) = w_{a}(\eta - \eta_{P})$$

$$\cdot \exp\left\{\frac{-j4\pi f_{c}}{c}\left[R_{P}(\eta) - \frac{K_{\phi} \cdot \text{STEC}(\eta; P; r_{x}, r_{y})}{f_{c}^{2}}\right]\right\}$$
(4)

其中

$$R_P(\eta) = R_0 + p_1\eta + p_2\eta^2 + p_3\eta^3 \tag{5}$$

其中, *R*₀为中心斜距, *p*₁, *p*₂, *p*₃分别为距离历程关 于方位时间的1阶、2阶、3阶系数。根据驻定相位 原理,可以求得方位时间关于多普勒频率*f*_n的3阶 驻相解

$$\eta = -\frac{c\left(f_{\eta} + \frac{2f_{c}q_{1}}{c}\right)}{4f_{c}q_{2}} - \frac{3c^{2}q_{3}\left(f_{\eta} + \frac{2f_{c}q_{1}}{c}\right)^{2}}{32f_{c}^{2}q_{2}^{3}} - \frac{9c^{3}q_{3}^{2}\left(f_{\eta} + \frac{2f_{c}q_{1}}{c}\right)^{3}}{128f_{c}^{3}q_{2}^{5}}$$
(6)

其中, $q_n = p_n - K_{\phi} \cdot k_n / f_c^2$, n = 1, 2, 3。将式(6) 代入式(4)的指数项,并去除零阶项,则方位压缩 相位有如式(7)的3阶泰勒展开式

$$\phi_{\rm ac} = \underbrace{\left(\frac{\pi q_1}{q_2} + \frac{3\pi q_1^2 q_3}{4q_2^3}\right) f_\eta}_{\phi_{\rm a1}(f_\eta)} + \underbrace{\left(\frac{\pi c}{4f_{\rm c}q_2} + \frac{3\pi cq_1 q_3}{8f_{\rm c}q_2^3}\right) f_\eta^2}_{\phi_{\rm a2}(f_\eta)} + \underbrace{\frac{\pi c^2 q_3}{16f_{\rm c}^2 q_2^3} f_\eta^3}_{\phi_{\rm a2}(f_\eta)} \tag{7}$$

可见 k_1, k_2, k_3 的存在改变了方位压缩相位,从 而造成方位向1次、2次、3次相位误差。为便于后 期数值计算与分析,在推导方位向偏移、2次相位 误差(QPE)和3次相位误差(CPE)时,可以忽略 $1/q_2$ 高阶项对相位误差的贡献,并且取 $1/q_2 \approx 1/p_2$, $1/q_2^3 \approx 1/p_2^3$,因此由1次相位误差导致的方位向偏 移可以表示为

$$\Delta L_{\rm a} = -\left[\left(\frac{\pi q_1}{q_2} + \frac{3\pi q_1^2 q_3}{4q_2^3} \right) - \left(\frac{\pi p_1}{p_2} + \frac{3\pi p_1^2 p_3}{4p_2^3} \right) \right] \\ \cdot \frac{v_{\rm g}}{2\pi} \approx \frac{K_{\phi} v_{\rm g}}{2f_{\rm c}^2 p_2} \cdot k_1 \tag{8}$$

其中, v_{g} 为SAR卫星波束中心扫过地面的速度,即 地速。在条带模式下,设计方位分辨率(不加窗)可 以表示为 $\rho_{a} = 0.886v_{g}/B_{a}$,其中 $B_{a} = K_{a}T_{a}$ 为多普 勒带宽, T_{a} 为合成孔径时间, $K_{a} = 4f_{c}p_{2}/c$ 表示多 普勒调频率。故方位向偏移可进一步推导为

$$\Delta L_{\rm a} = \frac{2K_{\phi}\rho_{\rm a}T_{\rm a}}{0.886cf_{\rm c}}k_1\tag{9}$$

通过计算多普勒带宽边缘与中心的相位误差之差,可分别得到方位向QPE和CPE表达式

$$QPE_{a} \approx \left| \frac{\pi c}{4f_{c}q_{2}} - \frac{\pi c}{4f_{c}p_{2}} \right| \frac{B_{a}^{2}}{4} \approx \frac{\pi c K_{\phi}K_{a}^{2}T_{a}^{2}}{16f_{c}^{3}p_{2}^{2}} |k_{2}|$$
$$= \frac{\pi K_{\phi}T_{a}^{2}}{cf_{c}} |k_{2}|$$
(10)

$$CPE_{a} \approx \left| \frac{\pi c^{2} q_{3}}{16 f_{c}^{2} p_{2}^{3}} - \frac{\pi c^{2} p_{3}}{16 f_{c}^{2} p_{2}^{3}} \right| \frac{B_{a}^{3}}{8} = \frac{\pi c^{2} K_{\phi} K_{a}^{3} T_{a}^{3}}{128 f_{c}^{4} p_{2}^{3}} |k_{3}|$$
$$= \frac{\pi K_{\phi} T_{a}^{3}}{2 c f_{c}} |k_{3}|$$
(11)

根据式(10)和式(11),方位向QPE和CPE都 依赖中心频率以及合成孔径时间,且分别与|k₂|, |k₃|成正比。

3 导致STEC方位时变的3个因素

时变STEC是由VTEC的时间和空间变化,以 及传播路径变化导致的,故式(3)中时变STEC的各 阶系数来源于这3个因素的耦合作用,因此接下来 将针对这3个因素展开分析。

3.1 时变VTEC

单独考虑VTEC时变的因素,则式(3)可简 化为

STEC
$$(\eta; P; r_x, r_y) = \text{VTEC}(\eta) \cdot \sec(\theta_i)$$

 $\approx \text{STEC}_0 + k'_1 \eta + k'_2 \eta^2 + k'_3 \eta^3$
(12)

其中, k₁', k₂', k₃代表由时变VTEC因素导致的时变 STEC各阶系数。

这里利用中国电子科技集团电波传播研究所提供的两组实测VTEC数据,单独分析时变VTEC因素导致的时变STEC。两组数据分别于2001-12-15,2007-12-15的海口地区测得,数据采样间隔为300 s,可以通过插值得到采样间隔为1 s的数据。不妨设置一个100 s的滑动窗,每次滑动取窗内的VTEC数据,并通过多项式拟合得到时变VTEC的常量以及时变分量的1阶、2阶、3阶系数,拟合结果如图1所示。由于2001年为太阳活动极大值年份,因此从整体来看,该年VTEC常量以及各阶系数相比于极小值年份的2007年具有更大的值。根据图1(b)、图1(c),并结合现有文献中关于时变背景



图 1 实测 VTEC 数据各阶分量的拟合结果

电离层的描述^[20-23],可以认为时变VTEC 1阶、 2阶、3阶系数的绝对值一般不会超过0.005 TECU/s, 5×10^{-6} TECU/s², 5×10^{-9} TECU/s³。考 虑入射角小于60°的情况,那么由时变VTEC主导 的STEC 1阶、2阶、3阶系数(分别为 k'_1, k'_2, k'_3)的绝 对值一般不会超过0.01 TECU/s, 1×10^{-5} TECU/s², 1×10^{-8} TECU/s³。

3.2 空变VTEC

星载SAR合成孔径在背景电离层高度的投影通常在几千米至几十千米量级,因此中尺度的背景电离层空间分布在星载SAR合成孔径内主要表现为VTEC的线性变化,从而导致孔径内STEC随方位时间线性变化。单独考虑VTEC空变的因素,则式(3)可简化为

STEC
$$(\eta; P; r_x, r_y) = \text{VTEC}(P; r_x, r_y) \cdot \text{sec}(\theta_i)$$

 $\approx \text{STEC}_0 + k_1'' \eta$ (13)

其中, k^{''}代表由VTEC空变因素导致的时变STEC 1阶系数,可进一步表示为

$$k_1'' = \frac{\nabla \text{VTEC}}{\cos \theta_{\text{i}}} \cdot v_{\text{bi}} = \frac{\nabla \text{VTEC}}{\cos \theta_{\text{i}}} \cdot \frac{L_{\text{bi}}}{T_{\text{a}}} \qquad (14)$$

其中, $\nabla VTEC$ 表示VTEC的空间变化率, v_{bi} 为孔 径内背景电离层穿刺点的速度, L_{bi} 为合成孔径在 背景电离层高度的投影。

基于IRI模型,图2给出了某区域的VTEC2维



图 2 IRI给出的局部区域 VTEC2 维分布(单位: TECU)

空间分布,该区域位于北纬13.8°~22.8°、东经 104.6°~114.0°,输入时间为2001年12月15日 17时,图中VTEC极小值、极大值分别为44.5 TECU,61.2 TECU,且两者位置大约相距1200 km, 由此可知 ∇ VTEC可达0.014 TECU/km。对于LEO SAR(轨道高度700 km)来说,取 θ ;为60°的远端波位 情况, v_{bi} 通常可达3.5 km/s,故 k_1'' 极大值约 0.1 TECU/s;对于中轨SAR(MEO SAR)来说,其 轨道高度设为7000 km, v_{bi} 约0.2 km/s,故 k_1'' 极大 值约0.005 TECU/s;对于GEO SAR来说,若取轨 道倾角为60°,离心率为0,纬度幅角为0,那么 v_{bi} 仅30 m/s, k_1'' 极大值小于10⁻³ TECU/s。由此可 见,该因素在低轨情况下最为突出,而在中高轨情 况下对应的k''值很小。

3.3 传播路径变化

这里不考虑VTEC的时空变效应,仅考虑传播 路径变化,则该因素导致的时变STEC可以近似表 示为

$$\operatorname{STEC}(\eta) \approx \operatorname{VTEC}_{0} \cdot \frac{\sqrt{R_{i}^{2} + v_{bi}^{2} \eta^{2}}}{H_{i}}$$
$$\approx \frac{\operatorname{VTEC}_{0} R_{i}}{H_{i}} + \underbrace{\frac{\operatorname{VTEC}_{0} \cdot v_{bi}^{2}}{2R_{i}H_{i}}}_{k''_{2}} \eta^{2} \qquad (15)$$

其中,VTEC₀表示VTEC常量,*R*_i为中心时刻背景 电离层穿刺点到目标的距离。

根据式(15),传播路径变化主要会引入STEC 2阶时变分量 k_2'' ,而 k_2'' 主要与VTEC₀、轨道高度以 及入射角等参数有关。如图3所示,给出了 k_2'' 随 VTEC₀以及轨道高度的变化曲线,中心入射角设 置为30°。可见,轨道高度越低、VTEC₀越大,对 应的 k_2'' 越大。在低轨情况下, k_2'' 可达10⁻³ TECU/s² 量级;而在高轨情况下, k_2'' 通常小于3×10⁻⁷ TECU/s²。

4 数值分析

4.1 成像合成孔径时间

由于时变STEC导致的方位向QPE, CPE均与 合成孔径时间有关,因此这里进一步研究不同星载 SAR系统的合成孔径时间,而合成孔径时间可严格 定义为



图 3 传播路径变化引入的时变STEC 2阶分量系数



$$T_{\rm a} = \eta_{\rm end} - \eta_{\rm start} \tag{16}$$

其中,η_{start},η_{end}分别为3 dB波束开始和结束照射目 标的时刻。在低轨情况以及中高轨的某些轨道位置 下,合成孔径时间也可以近似表示为

$$T_{\rm a} = \frac{L_{\rm syn}}{v_{\rm s}} \approx \frac{R_0 \theta_{\rm syn}}{v_{\rm s}} = \frac{0.886 c R_0}{2 f_{\rm c} \rho_{\rm a} v_{\rm s}} \tag{17}$$

其中, $\theta_{syn} = 0.886c/(2f_c\rho_2)$ 为合成孔径角, v_s 表示 地心固连坐标系下的卫星速度。由于轨道越高,中 心斜距 R_0 越大、星速 v_s 越小,那么合成孔径时间与 轨道高度呈正相关关系。另外,对于GEO SAR的 大多数轨道位置,由于地球自转效应的突显,合成 孔径时间在不同纬度幅角位置上有一定差异,而 式(17)不再适用。

基于式(17), 图4(a)计算了不同波段、不同轨 道高度、不同设计方位分辨率情况下的合成孔径时 间,入射角统一设置为30°,方位分辨率变化范围 为0.5~10 m, GEO SAR设置轨道倾角为60°, 离 心率为0,纬度幅角为0,MEO SAR轨道高度为 7000 km,其余轨道参数与GEO SAR一致。对于 载频为500 MHz的P波段LEO SAR系统, 0.5 m, 1 m, 2 m的设计方位分辨率对应的合成孔径时间分 别大约为55 s, 28 s, 14 s; 对于现有L波段LEO SAR高分辨模式,即PALSAR-2的聚束模式,方位 分辨率为1m,对应的合成孔径时间约10s。在给 定中心频率和方位分辨率情况下,轨道越高,合成 孔径时间越长,GEO SAR的合成孔径时间可达几 百甚至上千秒。基于式(16), 图4(b)进一步给出了 不同波段GEO SAR合成孔径时间随纬度幅角的变 化曲线。可见,在纬度幅角为90°附近,合成孔径 时间会突然增大,这主要是因为此时卫星与地面的 相对速度很小。

4.2 STEC各阶系数容限

接下来,考察不同星载SAR系统对时变STEC 各阶系数的容忍度。通常认为,当偏移量小于一个 分辨单元时,就可以忽略偏移的影响;另外,当



2785

图 4 合成孔径时间的计算

2次相位误差小于45°以及3次相位误差小于22.5°, 就可以忽略成像性能的恶化。故这里令 $|\Delta L_a| = \rho_a$, QPE_a = 45°, CPE_a = 22.5°,分别计算不同中心频率、 合成孔径时间情况下的时变STEC各阶系数容限, 结果如图5所示。可见,中心频率越低、合成孔径 时间越长,对应的 $|k_1|, |k_2|, |k_3|$ 容限越小,则意味 着系统方位向成像越容易受到时变STEC的影响。

表1给出了不同星载SAR系统的时变STEC各阶系数容限值,下面的分析需要对照上节中的结论。对于表中所列举的两种P波段LEO SAR系统,时空变VTEC对应的k'₁,k''都可能会超过|k₁|容限,从而导致超过一个方位分辨单元的方位偏移;而传播路径变化引起的k''可能会导致方位向散焦。对于PALSAR-2聚束模式,在较大的k''₁,k'''情况下,同样需要考虑空变VTEC和传播路径变化的影响。对于L波段MEO SAR,仅需考虑时变VTEC引入的方位向偏移。而对于L波段GEO SAR,时变VTEC可造成显著的方位向偏移和散焦,而空变VTEC以及传播路径变化的影响基本可以忽略。

5 信号仿真

本节进一步探讨时空变背景电离层对不同星载 SAR方位向成像性能的影响,这里主要涉及表1中 的6种系统。首先,利用图1中2001年12月15日海口 地区的实测VTEC时变数据,取当地时间9时为中 心时刻,时间跨度为不同系统对应的合成孔径时 间;另外,背景电离层穿刺点路径上的 ∇ VTEC设 置为0.01 TECU/km。结合不同系统,表2给出了 各因素导致的时变STEC各阶系数值。对于LEO SAR系统, k_1, k_2 分别主要来源于 $k_1'', k_2';$ 对于 MEO SAR系统,3种因素对 k_1, k_2, k_3 的贡献几乎在 同一量级;而对于GEO SAR系统, k_1, k_2, k_3 分别 主要来源于 k_1', k_2', k_3' 。

图6给出了时变STEC影响下不同星载SAR点 目标图像的方位向剖面,表3列出了不同系统对应 的方位向成像性能指标。对于P波段LEO SAR, 理论方位偏移值为6.65 m, 5 m, 2 m的方位分辨率 对应的方位向QPE分别为32.40°, 202.09°; 对于 PALSAR-2,理论方位偏移值为1.03 m,QPE为 50.19°; 对于L波段MEO SAR聚束模式,理论方位 偏移值为3.22 m,QPE为9.20°; 对于L波段GEO SAR,理论方位偏移值为19.8 m, 200 s,600 s的合 成孔径时间对应的方位向QPE分别为18.6°, 167.0°,方位向CPE分别为0.9°,25.1°。进一步与 仿真结果相对照,其中5 m分辨率P波段LEO SAR、L波段MEO SAR以及200 s合成孔径时间的 L波段GEO SAR方位向聚焦性能保持得比较好。 而2 m分辨率P波段LEO SAR,PALSAR-2以及600



图 5 时变STEC各阶分量系数的容限曲线

表 I 个回星载SAR系统对应的时变STEC答阶系数谷

	P-SAR ¹	$P-SAR^2$	PALSAR-2	MEO SAR	${ m GEO}~{ m SAR}^1$	$ m GEO~SAR^2$
中心频率 (GHz)	0.50	0.50	1.27	1.25	1.25	1.25
方位分辨率 (m)	4.96	1.98	≈ 1.00	2.10	6.30	2.10
轨道高度 (km)	700	700	636	7000	35793	35793
合成孔径时间 (s)	5.65	14.11	≈ 10.00	75.00	200.00	600.00
$ k_1 $ 容限(TECU/s)	$2.9{ imes}10^{-2}$	$1.2{ imes}10^{-2}$	$4.2{ imes}10^{-2}$	$5.6{ imes}10^{-3}$	$2.1{ imes}10^{-3}$	$7.0{ imes}10^{-4}$
$ k_2 $ 容限(TECU/s ²)	$3.0{ imes}10^{-3}$	$4.7{ imes}10^{-4}$	$2.3{ imes}10^{-3}$	$4.2{ imes}10^{{ imes}5}$	$5.9{ imes}10^{-6}$	$6.6 imes 10^{-7}$
$ k_3 $ 容限(TECU/s ³)	$1.3{ imes}10^{-4}$	$8.3{ imes}10^{-6}$	$5.9{ imes}10^{-5}$	1.4×10^{-7}	$7.4{ imes}10^{-9}$	$2.7{ imes}10^{-10}$

表 2 仿真中各因素导致的时变STEC各阶系数值								
LEO SAR	$k_1'(\mathrm{TECU/s})$ $6.2{ imes}10^{-3}$ VTEC_0	$k_2'({ m TECU/s^2}) \ -2.8{ imes}10^{-6} \ { m STEC_0}$	$k'_{3}(ext{TECU/s}^{3})$ -1.3×10 ⁻⁹ $k_{1}(ext{TECU/e})$	$k_1^{\prime\prime}(\mathrm{TECU/s})$ $3.3{ imes}10^{-2}$ $k_2(\mathrm{TECU/s}^2)$	$k_2''(\text{TECU/s}^2)$ 2.1×10 ⁻³ $k_2(\text{TECU/s}^3)$			
	42.9	49.1	3.9×10^{-2}	2.1×10^{-3}	2.6×10^{-7}			
MEO SAR	$k_{1}'({ m TECU/s})$ $6.2{ imes}10^{-3}$ ${ m VTEC}_{0}$ 42.9	$k_{2}^{\prime}({ m TECU/s^{2}})$ -2.7×10 ⁻⁶ STEC ₀ 49.1	$egin{aligned} &k_3'(ext{TECU/s}^3)\ &-1.3{ imes}10^{-9}\ &k_1(ext{TECU/s})\ &8.4{ imes}10^{-3} \end{aligned}$	$k_1''({ m TECU/s})$ 2.2×10 ⁻³ $k_2({ m TECU/s}^2)$ 8.5×10 ⁻⁶	$k_2''({ m TECU/s^2}) \ 1.1{ imes}10^{-5} \ k_3({ m TECU/s^3}) \ 1.6{ imes}10^{-11}$			
GEO SAR	$k_1'({ m TECU/s})$ $6.2{ imes}10^{-3}$ ${ m VTEC}_0$ 42.9	$k_{2}^{\prime}({ m TECU/s^2})$ -2.6×10 ⁻⁶ STEC ₀ 49.1	$k'_3({ m TECU/s^3}) \ -1.3 { imes} 10^{-9} \ k_1({ m TECU/s}) \ 6.5 { imes} 10^{-3}$	$k_1''({ m TECU/s}) \ 2.6{ imes}10^{-4} \ k_2({ m TECU/s}^2) \ -2.4{ imes}10^{-6}$	$k_2^{\prime\prime}({ m TECU/s^2}) \ 1.7{ imes}10^{-7} \ k_3({ m TECU/s^3}) \ -1.2{ imes}10^{-9}$			



图 6 时变STEC各阶分量系数的容限曲线

	分辨率 (m)	展宽系数	PSLR (dB)	ISLR (dB)	峰值功率损失 (dB)	偏移 (m)
P-SAR ¹	4.99	1.01	-12.58	-9.04	0.13	6.67
$P-SAR^2$	6.81	3.44	-6.13	-7.15	5.34	6.64
PALSAR-2	1.01	1.02	-11.73	-8.31	0.30	1.04
MEO SAR	2.10	1.00	-13.20	-9.62	0.01	3.21
$GEO SAR^1$	6.30	1.02	-13.01	-9.52	0.03	19.82
$GEO SAR^2$	2.20	1.05	-7.59	-5.59	1.03	19.65

s合成孔径时间的L 波段GEO SAR出现了较为严重 的方位向散焦,主要表现为主瓣展宽、旁瓣抬升和 峰值能量损失,且图6(f)中出现了明显的高低旁 瓣,主要是由于方位向CPE超过了容限值。另外, 方位偏移与理论计算值基本一致,进一步验证了理 论分析模型的有效性。 因此,对于低波段LEO SAR,空变VTEC和 传播路径变化是导致时变STEC的主要因素,前者 将引入方位向偏移,后者可导致明显的方位主瓣展 宽,特别是对于方位分辨率为2 m的星载P波段 SAR系统和PALSAR-2聚束模式。对于L波段MEO SAR,方位成像性能的恶化可忽略不计,但VTEC 的时空变效应导致的方位向偏移不可忽略。对于 L波段GEO SAR,时变VTEC成为导致时变STEC 的主要因素,可造成明显的方位向偏移、主瓣展 宽、旁瓣抬升以及高低旁瓣现象。

6 结束语

时-空变化的背景电离层将会导致方位时变的 STEC,从而对星载SAR方位向成像造成影响。方 位时变STEC对星载SAR方位向成像的影响可以归 结于3个具体因素:背景电离层VTEC的时间和空 间变化,以及传播路径变化。对于低波段LEO SAR,由于合成孔径时间短,空变VTEC和传播路 径变化是导致时变STEC的主要因素,将分别引入 方位向偏移误差和二次相位误差;随着轨道升高, 合成孔径时间增加,时变VTEC逐渐成为导致时 变STEC的主要因素,将会导致方位向图像偏移和 散焦。

在给定的背景电离层条件下,不同的星载 SAR系统由于主导因素不同,因此其方位向成像性 能呈现出不同程度的恶化。例如,对于设计方位分 辨率为2 m的星载P波段LEO SAR系统,时空变背 景电离层引入了6.65 m的方位向偏移误差以及超过 200°的2次相位误差,方位向剖面严重散焦;而对 于600 s合成孔径时间的L波段GEO SAR系统,时 空变背景电离层引入了19.8 m的方位向偏移误差、 167.0°的2次相位误差以及25.1°的3次相位误差,方 位向散焦严重且出现了明显的高低旁瓣。总之,随 着星载SAR载频的下降、设计方位分辨率的提高、 合成孔径时间的增大,时空变背景电离层将会导致 更加严重的方位向偏移与图像散焦,因此必须在系 统设计以及后端信号处理环节加以考虑。

参考文献

- CUMMING I, WONG F H, 洪文, 胡东辉, 译. 合成孔径雷达 成像: 算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 2-11.
 CUMMING I, WONG F, HONG Wen, HU Donghui, translation. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 2-11.
- [2] TOAN T L, BEAUDOIN A, RIOM J, et al. Relating forest biomass to SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience* and Remote Sensing, 1992, 30(2): 403–411. doi: 10.1109/

36.134089.

- [3] CARREIRAS J M B, QUEGAN S, TOAN T L, et al. Coverage of high biomass forests by the ESA BIOMASS mission under defense restrictions[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 196: 154–162. doi: 10.1016/j.rse. 2017.05.003.
- SHIMADA M, ITOH T, MOTOOKA T, et al. New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007-2010)[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 155: 13-31. doi: 10.1016/j.rse.2014.04.014.
- [5] 梁甸农,周智敏,常文革.叶簇穿透超宽带成像雷达技术发展 动态[J].国防科技参考,1999,20(3):1-6.
 LIANG Diannong, ZHOU Zhimin, and CHANG Wenge. Technological development trend of the foliage-penetrating ultra-wideband imaging radar[J]. Reference of National Defense Technology, 1999, 20(3):1-6.
- [6] 杨淋,赵宁,姚佰栋,等.高分辨率星载P波段SAR系统参数设计[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(1): 19-28.
 YANG Lin, ZHAO Ning, YAO Baidong, et al. Parameter design of a high resolution space-borne P-band SAR system[J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(1): 19-28.
- [7] WANG Cheng, CHEN Liang, and LIU Lu. A new analytical model to study the ionospheric effects on VHF/UHF wideband SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(8): 4545-4557. doi: 10.1109/TGRS.2017.2693396.
- [8] TOMIYASU K and PACELLI J L. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, 21(3): 324–329.
- [9] 李德鑫. 地球同步轨道合成孔径雷达信号处理与仿真技术研究[D]. [博士论文], 国防科技大学, 2017.
 LI Dexin. Research on the technology of signal processing and simulation of geosynchronous SAR[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2017.
- [10] LONG Teng, HU Cheng, DING Zegang, et al. Geosynchronous SAR: System and Signal Processing[M]. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018: 129–186.
- [11] 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. doi: 10.1109/LGRS.2006.882148.
- [12] JI Yifei, ZHANG Qilei, ZHANG Yongsheng, et al. L-band geosynchronous SAR imaging degradations imposed by ionospheric irregularities[J]. Science China Information Science, 2017, 60(6): 060308. doi: 10.1007/s11432-016-9064-1.

- [13] JI Yifei, ZHANG Yongsheng, DONG Zhen, et al. Impacts of ionospheric irregularities on L-band geosynchronous synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(6): 3941-3954. doi: 10.1109/TGRS.2019.2959702.
- [14] JI Yifei, ZHANG Qilei, ZHANG Yongsheng, et al. Spaceborne P-band SAR imaging degradation by anisotropic ionospheric irregularities: A comprehensive numerical study[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(8): 5516–5526. doi: 10.1109/ TGRS.2020.2966710.
- [15] 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. doi: 10.1080/01431168608954707.
- [16] 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. doi: 10.1029/1998RS900021.
- [17] XU Zhengwen, WU Jian, and WU Zhensen. A survey of ionospheric effects on space-based radar[J]. Waves in Random Media, 2004, 14(2): S189–S273. doi: 10.1088/0959-7174/14/2/008.
- [18] 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, 2014, 36(4): 915–922.
 LI Liang, HONG Jun, MING Feng, et al. Study on ionospheric effects induced by spatio-temporal variability on medium-earth-orbit SAR imaging quality[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(4): 915–922.
- [19] 李雨龙,张弘毅,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, 27.
 LI Yulong, ZHANG Hongyi, HUANG Lijia, *et al.* Analysis and simulation on GEO SAR ionosphere effects[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(9): 14-22, 27.
- [20] TIAN Ye, HU Cheng, DONG Xichao, et al. Theoretical analysis and verification of time variation of background ionosphere on geosynchronous SAR imaging[J]. IEEE

Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(4): 721-725. doi: 10.1109/LGRS.2014.2360235.

- [21] HU Cheng, TIAN Ye, YANG Xiaopeng, et al. Background ionosphere effects on geosynchronous SAR focusing: Theoretical analysis and verification based on the BeiDou navigation satellite system (BDS)[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(3): 1143–1162. doi: 10.1109/JSTARS. 2015.2475283.
- [22] DONG Xichao, HU Cheng, TIAN Weiming, et al. Design of validation experiment for analysing impacts of background ionosphere on geosynchronous SAR using GPS signals[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(20): 1604–1606. doi: 10.1049/el.2015.1545.
- [23] DONG Xichao, HU Cheng, TIAN Ye, et al. Experimental study of ionospheric impacts on geosynchronous SAR using GPS signals[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(6): 2171–2183. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2537401.
- [24] 李力. 星载P波段合成孔径雷达中的电离层效应研究[D]. [博士 论文], 国防科技大学, 2014.
 LI Li. Research on ionospheric effects in spaceborne P band synthetic aperture radar[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2014.
- [25] JI Yifei, ZHANG Qilei, ZHANG Yongsheng, et al. Analysis of background ionospheric effects on geosynchronous SAR imaging[J]. Radioengineering, 2017, 26(1): 130–138. doi: 10.13164/re.2017.0130.
- 张永胜: 男,1977年生,正高级工程师,研究方向为SAR系统设计 以及SAR信号处理等.
- 计一飞: 男,1992年生,讲师,研究方向为SAR信号处理以及电离 层传播效应等.
- 董 臻: 男,1973年生,研究员,研究方向SAR系统设计和处理、 地面动目标监测和数字波束形成等.

责任编辑: 马秀强