

## 电离层时空变化对中高轨 SAR 成像质量的影响分析

李亮<sup>\*①②③</sup> 洪峻<sup>①②</sup> 明峰<sup>①②</sup> 胡继伟<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(微波成像技术重点实验室 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 中高轨道合成孔径雷达(SAR)是下一代星载 SAR 重要的发展方向之一, 电离层影响分析是推动中高轨道 SAR 系统发展的关键技术。该文针对中高轨道 SAR 的系统特点, 结合电离层时空变化特征, 建立了背景电离层对中高轨道 SAR 系统的影响分析模型, 重点分析了背景电离层及其时空变化对中高轨 SAR 系统图像质量的影响, 主要包括距离向和方位向图像分辨率的下降以及图像位移。分析结果表明, 电离层及其时空变化对中高轨 SAR 图像质量产生较为严重的影响, 相同电离层条件下, 对于分辨率相同的 SAR 系统, 随着轨道高度的增加, 电离层引入的误差对距离向分辨率和图像畸变以及方位向分辨率和图像位移产生的影响程度将增大。

**关键词:** 中高轨 SAR; 电离层; 成像; 分辨率

**中图分类号:** TN957.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2014)04-0915-08

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2013.00859

## Study on Ionospheric Effects Induced by Spatio-temporal Variability on Medium-earth-orbit SAR Imaging Quality

Li Liang<sup>①②③</sup> Hong Jun<sup>①②</sup> Ming Feng<sup>①②</sup> Hu Ji-wei<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Sciences and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Medium-Earth-Orbit SAR (MEOSAR) is one of the potential next-generation spaceborne SARs. Ionospheric effects analysis is one of the critical techniques for the development of MEOSAR. An analysis model for background ionospheric effect on MEOSAR is established based on the system characteristics of MEOSAR and the spatio-temporal variability of ionosphere. The degradation of image quality, including resolution and displacement distortion, induced by background ionosphere and its spatio-temporal variability is analyzed. The analysis result shows that ionosphere and its time-space variability affect critically the quality of obtained images. In condition of the same ionosphere, the degradation of resolution in both azimuth and range, the distortion on range image and the displacements in azimuth image are all more serious with the increasing of SAR orbit height when the resolution is same.

**Key words:** Medium-Earth-Orbit SAR (MEOSAR); Ionosphere; Imaging; Resolution

### 1 引言

分辨率和测绘带宽是衡量星载 SAR 性能的重要指标, 常规脉冲工作体制下, 低轨道 SAR 的方位分辨率和测绘带宽相互制约, 提升轨道高度是解决这一制约关系的有效手段。进入本世纪以来, 随着天线技术、载荷能力以及计算机性能的提高, 中高轨道 SAR 系统的可行性在国际上取得了广泛的认

可<sup>[1]</sup>。中高轨道 SAR 不仅能够大幅改善低轨道 SAR 的系统性能, 并且能够在空间位置上和低轨道 SAR 相互补偿, 且具有广域监视、宽测绘带高质量成像、高精度重轨干涉成像、突发事件快速响应等能力, 成为星载 SAR 的重要发展方向之一。纵观国内外研究现状<sup>[1-3]</sup>可以发现, 中高轨道 SAR 是当前普遍关注的星载 SAR 重要的发展方向, 在未来一段时间内将是主要的研究热点和难点。

由于星载 SAR 系统工作于电离层之上, 无线信号在穿越电离层的过程中会受到电离层效应的影响, 因此, SAR 成像质量不可避免地会受到电离层

2013-06-14 收到, 2013-10-22 改回

中国科学院科技创新重点部署项目和国家级基金资助课题

\*通信作者: 李亮 liliang282@163.com

的影响。国内外很多学者就电离层对 SAR 系统成像质量的影响进行了研究<sup>[4-6]</sup>，但这些研究都是针对低轨道 SAR 系统进行的，鉴于低轨道 SAR 合成孔径时间较短、测绘带较窄等特点，研究电离层对低轨道 SAR 成像影响时未就电离层时空变化特性对 SAR 成像的影响进行深入的研究，然而，电离层是一个变化的物理量，其随着季节、时间、经纬度等不同而变化，且电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)是很多层电离层综合的结果，每一层电离层都有自己的特征，因此，每一层的电离层发生变化都将导致电离层 TEC 的变化，就 SAR 成像影响而言，电离层 TEC 沿方位向随时间的变化和沿测绘带的变化都将引起成像质量的下降。研究结果表明，电离层 TEC 随时间的变化率一般在 0.5TECu/min(1TECu=10<sup>16</sup> 电子/m<sup>2</sup>)，有时甚至达到 6TECu/min<sup>[7]</sup>，而电离层 TEC 随空间的变化率在一般宁静电离层条件下约为 2TECu/100 km，极端条件下可达 30TECu/100 km<sup>[8]</sup>，中高轨 SAR 由于合成孔径时间较长、测绘带较宽，因此，必须考虑电离层 TEC 时空变化对成像的影响。目前关于电离层对中高轨 SAR 系统的影响几乎未见相关文献报道，只有文献[9]在研究同步轨道 SAR 成像时，提及电离层会导致同步轨道 SAR 系统时间去相关。虽然中高轨 SAR 具有很好的发展前景，但电离层的时空变化特性对成像质量的影响相比于低轨道 SAR 而言将不可忽略，本文正是基于电离层的时空变化特性，结合中高轨 SAR 的系统特点，分析电离层对中高轨 SAR 成像质量的影响，重点分析了背景电离层及其时空变化对中高轨 SAR 成像质量的影响。分析结果表明：(1)对于相同的电离层 TEC 时变性，电离层对中高轨 SAR 方位向分辨率和图像位移的影响较低轨道 SAR 而言明显增大，且随着轨道高度的增加影响越来越大，甚至无法成像；(2)对于相同的电离层 TEC 空变性和校正精度，电离层 TEC 校正后的剩余误差引起的距离向分辨率的下降和图像畸变对于中高轨 SAR 系统而言不可忽略，且其随着轨道高度的增加而增大。

## 2 电离层对 SAR 信号影响分析

星载 SAR 轨道高度都处在电离层电子浓度的最大值之上，SAR 信号必然会经过电离层，势必会受到电离层效应的影响，产生诸如相位超前、群延时以及色散等现象。

### 2.1 群延时

根据 Appleton-Hartree 公式，电离层折射指数可以近似表示为<sup>[10]</sup>

$$n \approx 1 - \omega_p^2 / (2\omega^2) \quad (1)$$

其中  $\omega_p = \sqrt{e^2 N_e / (m\epsilon_0)}$  为电子浓度为  $N_e$  时的等离子体角频率， $e$  为电子电荷， $m$  为电子质量， $\epsilon_0$  为自由空间的介电常数， $\omega$  为电磁波角频率。

电磁波在电离层中的传播速度为

$$v_{\text{ion}} = cn = c(1 - \omega_p^2 / (2\omega^2)) \quad (2)$$

其中  $c$  为光速。

从式(2)可以看出，电磁波通过电离层时，由于传播速度小于自由空间的传播速度而产生附加时延，SAR 信号双程通过电离层，因此产生的双程附加时延为

$$\tau_{gi} = 2 \int_s (1 - n) dl / c \approx 80.6(\text{TEC} / (cf^2)) \quad (3)$$

其中， $s$  为信号在电离层中的传播路径， $\text{TEC} = \int_s N_e dl$  为传播路径上的电子总数， $f$  为电磁波频率。

电离层引入的群延时会导致 SAR 成像在距离向产生一定的位移，对于高轨道、宽测绘带 SAR 系统，电离层 TEC 沿测绘带的不同导致测绘带内近距和远距端图像距离向位移不同，近而导致 SAR 距离向图像畸变。

### 2.2 相位超前

电磁波信号在电离层中的折射指数小于 1，因而，相对于自由空间会存在相位超前，产生相位误差，电离层 TEC 引起的相位误差为<sup>[5]</sup>

$$\phi_{\text{ion}} = -2\pi 80.6(\text{TEC} / (cf)) \quad (4)$$

相位误差对图像质量的影响程度取决于相位误差的大小以及相位误差的函数形式。就大小而言，若不考虑 SAR 成像过程中其它二次相位误差，当电离层引入的二次相位误差在所有频率范围内都小于  $\pi/4$  弧度时，其对成像的影响可以忽略。就函数形式而言，相位误差依赖于频率和时间，如果相位误差只随频率改变，随时间的变化保持不变，则只影响距离向图像质量；如果相位误差随时间的变化而变化，则方位向图像质量也会受到影响。

对于 SAR 特别是高轨 SAR 而言，SAR 每个脉冲传播路径的 TEC 不同，从式(4)可以看出，电离层引入的相位误差既是频率的函数，又是时空变化的。因此电离层 TEC 引入的相位误差对距离向和方位向都有影响，本文主要从距离向和方位向两个方面分别分析电离层 TEC 引起的相位误差对 SAR 成像的影响。

## 3 距离向影响

### 3.1 距离向分辨率

对式(4)电离层引入的相位误差在中心频率  $f_c$  处进行泰勒展开得<sup>[11]</sup>

$$\phi_{\text{ion}} = \frac{2\pi(80.6)\text{TEC}}{c} \left( \frac{1}{f_c} - \frac{(f-f_c)}{f_c^2} + \frac{(f-f_c)^2}{f_c^3} + \sum_{n=3}^{\infty} \left( (-1)^n \frac{(f-f_c)^n}{f_c^{n+1}} \right) \right) \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 电离层引入的相位误差既有常数相位误差, 也有一次、二次以及高次相位误差。本文主要讨论二次相位误差引起的距离向分辨率的下降。

SAR 信号为带宽信号, 在上下边带处的二次相位误差最大为

$$\phi_{2e} = \frac{\pi(80.6)\text{TEC} \cdot B^2}{2cf_c^3} \quad (6)$$

其中  $B$  为系统带宽。

对于 SAR 系统, 当系统引入的二次相位误差小于  $\pi/4$  时, 二次相位误差引起的图像质量下降可以忽略不计<sup>[8]</sup>。引起二次相位误差的因素很多, 包括卫星平台、星载 SAR 系统、地面成像应用系统以及传播路径等。本节主要分析电离层引起的距离向二次相位误差的大小及其对距离向成像质量的影响。

从式(6)可以看出, 电离层引入的最大二次相位误差与电离层 TEC, 系统带宽以及中心频率有关, 图 1 给出电离层引入的距离向最大二次相位误差随电离层 TEC 以及 SAR 系统参数的变化。从图 1 仿真结果可以看出: (1) 带宽一定时, 频率越高, 相同的电离层引起的二次相位误差越小; (2) 中心频率一定时, 系统带宽越大, 相同的电离层引起的二次相位误差越大, 即系统设计的分辨率越高, 同样的电离层 TEC 引起的误差越大。

从图 1 结果可知, 对于中心频率为 500 MHz, 带宽为 100 MHz 的 SAR 系统, 当 TEC 大于  $2\text{TEC}_u$  或电离层 TEC 校正后剩余不确定性大于  $2\text{TEC}_u$  时, 电离层引入的二次相位误差将大于  $\pi/4$ , 此时即使成像过程中其它因素引入的二次相位误差可以忽略不计, 其距离向成像质量也会下降。同样, 对于中心频率为 1300 MHz, 带宽为 100 MHz 的 SAR 系统, 当 TEC 大于  $40\text{TEC}_u$  或电离层 TEC 校正后剩余不确定性大于  $40\text{TEC}_u$  时, 其距离向成像质量会下降。

图 2 给出了电离层 TEC 引起的二次相位误差对距离向脉冲压缩的影响结果, 从图 2 可以看出, 当电离层 TEC 超过一定数值时, 距离向脉冲压缩质量明显下降, 特别当 SAR 工作于较低频段时, 很小的 TEC 误差就会导致距离向图像质量明显下降, 因此, 必须对电离层 TEC 的影响进行校正。一般情况下, 利用成像区域的电离层 TEC 进行补偿校正, 由

于目前电离层 TEC 测量精度优于  $1\text{TEC}_u$ <sup>[12]</sup>, 从图 2 可以看出, 不考虑电离层 TEC 空间变化前提下, 即使工作于 P 波段的星载 SAR 系统, 背景电离层 TEC 校正后其引起的距离向分辨的下降也可以忽略。但是, 由于电离层 TEC 随经纬度是变化的<sup>[13]</sup>, 因此, 测绘带内不同距离处的 TEC 有一定差异, 对于低轨道 SAR, 测绘带一般只有几十公里, 电离层 TEC 空变性引起的测绘带内的 TEC 变化可以忽略, 即可近似认为 TEC 在测绘带内是均匀的, TEC 校正后的剩余误差对低轨道 SAR 距离向成像的影响可以忽略。但对于中高轨 SAR 而言, 由于其测绘带达数百公里, 电离层空变性将导致电离层 TEC 沿测绘带变化, 利用测绘带内某一点的 TEC 对整个测绘带进行校正后, TEC 存在剩余误差。因此, 针对中高轨 SAR 系统, 需要根据电离层空变特点和 SAR 工作参数, 分析电离层 TEC 校正后剩余误差对距离向成像的影响。图 3 给出了不同轨道条件下, 电离层 TEC 校正后剩余误差引起的最大二次相位误差, 仿真参数如表 1 所示。从图 3 可以看出, 电离层 TEC 校正后剩余误差引起的二次相位误差随着轨道高度的增加而增大, 且频率越低, 影响越严重。

通过上述分析可知, 电离层 TEC 空变特性导致的电离层校正后的剩余误差对中高轨 SAR 系统距离向成像质量的影响与低轨道 SAR 系统相比将变得不可忽略, 特别是对于低频 SAR 系统和电离层变化较为剧烈时, 电离层校正后的剩余误差甚至会导致中高轨 SAR 系统无法成像。因此, 针对电离层对中高轨 SAR 系统距离向的影响, 必须采用距离向分段校正的方法, 将宽测绘带划分为多个子条带进行校正。

表 1 仿真参数

SAR 中心频率(MHz)	500/1300
工作带宽(MHz)	100
SAR 视角(°)	6
距离向波束宽度(°)	3
电离层空间变化率( $\text{TEC}_u/100 \text{ km}$ )	5

### 3.2 距离向图像位移

式(3)给出了 SAR 信号在电离层中的附加时延, 雷达回波经过压缩后, 图像会在距离向产生位置偏移, 偏移量约为<sup>[11]</sup>

$$\Delta r \approx 40.3\text{TEC}/f_c^2 \quad (7)$$

其中  $f_c$  为电磁波中心频率。

由式(7)可以看出, 距离向图像位移与 SAR 工

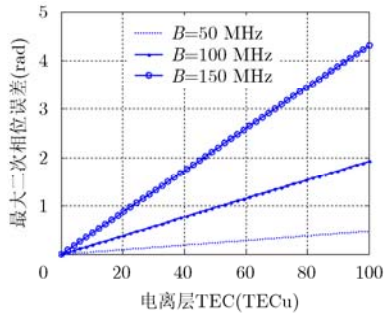
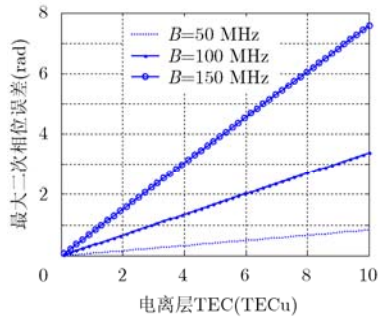
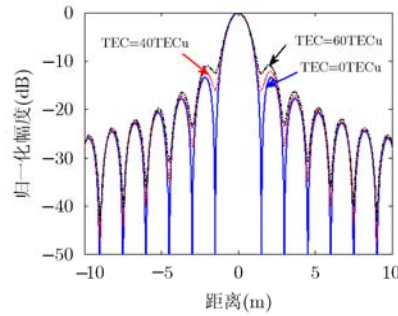
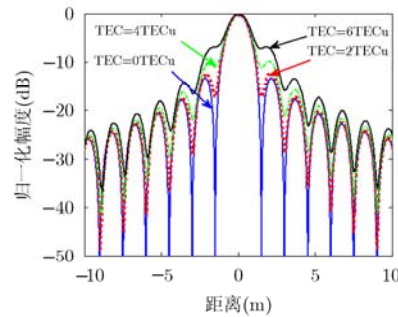
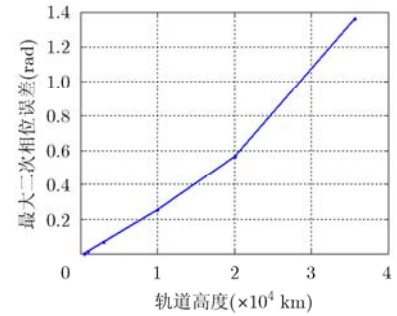
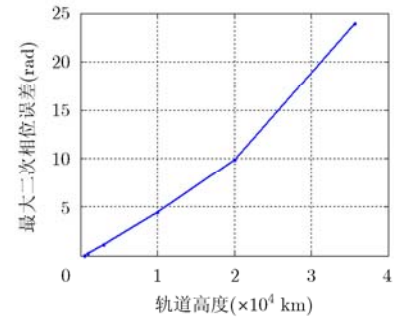
(a)  $f_c = 1300$  MHz(b)  $f_c = 500$  MHz

图1 电离层导致的距离向最大二次项误差随电离层 TEC 的变化

(a)  $f_c = 1300$  MHz,  $B = 100$  MHz(b)  $f_c = 500$  MHz,  $B = 100$  MHz图2 不同电离层 TEC 条件下  
的距离向脉冲压缩结果(a)  $f_c = 1300$  MHz(b)  $f_c = 500$  MHz图3 不同轨道高度下电离层 TEC 校正后  
剩余误差导致的最大二次相位误差

作频率和电离层 TEC 有关。对于常数 TEC 引起的距离向图像位移通过测量电离层 TEC 可以实现距离向图像位移的精确校正。但是, 电离层 TEC 在距离向的变化会导致近距端和远距端的图像位移不同, 使距离向图像产生扭曲, 正如 3.1 节的分析, 对于低轨道 SAR 而言, 电离层 TEC 在距离向可以认为是均匀的, 其引起的图像扭曲可以忽略不计。而对于中高轨 SAR 系统, 电离层空变性将引起 TEC 沿距离向存在较大的变化, 导致距离向图像扭曲。图 4 给出了轨道高度分别为 800 km 和 3000 km 时, 电离层及其空变性导致的 L 波段 SAR(中心频率为 1300 MHz)近、中、远距离向图像压缩结果, 假设中心斜距上电离层 TEC 为 40TECu, 其它仿真参数见表 1。

从图 4 中可以看出, 电离层 TEC 会导致 SAR 距离向图像产生一定的位移, 位移大小与 TEC 大小以及工作频率有关, 对于文中给定的仿真参数, 距离向位移大约为 10 m, 远大于距离向分辨单元, 另外, 由于电离层 TEC 具有空变性, 测绘带内近距端和远距端图像产生的位移不同, 对于低轨道 SAR 而言, 该位移差异较小(如图 4(a)所示), 一般情况下可以忽略, 但对于高轨道 SAR 而言, 该位移差异一般超过一个分辨单元(如图 4(b)所示)。

如果电离层是均匀的, 可以利用电离层 TEC 的测量值实现距离向位移的精确校正, 但实际上电离层具有空变性, 该空变性将导致图像畸变, 下面主

要针对图像畸变进行分析, 本节只考虑电离层 TEC 变化引起的测绘带内图像位移不同所导致的畸变。图 5 给出了各种条件下电离层 TEC 校正后剩余误差引起的距离向图像畸变, 仿真参数见表 1。从图 5 可以看出, 对于中高轨 SAR 系统, 电离层 TEC 空变性引起的距离向图像畸变较为严重, 距离向图像畸变随着轨道高度的增加, 测绘带的增大以及电离层 TEC 梯度的增加都将增大。因此, 对于中高轨 SAR 系统, 应采用多点校正的方法, 实现测绘带内距离向 TEC 的分段校正。

## 4 方位向影响

### 4.1 方位向分辨率

电离层对方位向的影响主要通过电离层 TEC 影响 SAR 回波信号, 若地面目标固定, 则 TEC 是方位向慢时间的函数, 因此, 可以将式(4)电离层引入的相位误差沿 TEC 在中心波束时刻(正侧视情况下或小斜视角下为 0)做泰勒展开, 仅考虑中心频率, 得<sup>[11]</sup>

$$\phi_{\text{ion}_a} = \frac{2\pi(80.6)}{cf_c} \left\{ \text{TEC}(0) + \text{TEC}'(0)\eta + \frac{\text{TEC}''(0)}{2}\eta^2 + \frac{\text{TEC}'''(0)}{6}\eta^3 + \dots \right\} \quad (8)$$

其中,  $\text{TEC}(0)$  为波束中心时的 TEC,  $\text{TEC}'(0)$ ,  $\text{TEC}''(0)$  和  $\text{TEC}'''(0)$  分别为波束中心时刻 TEC 的一阶, 二阶和三阶导数, 反映 TEC 的变化情况,  $\eta$

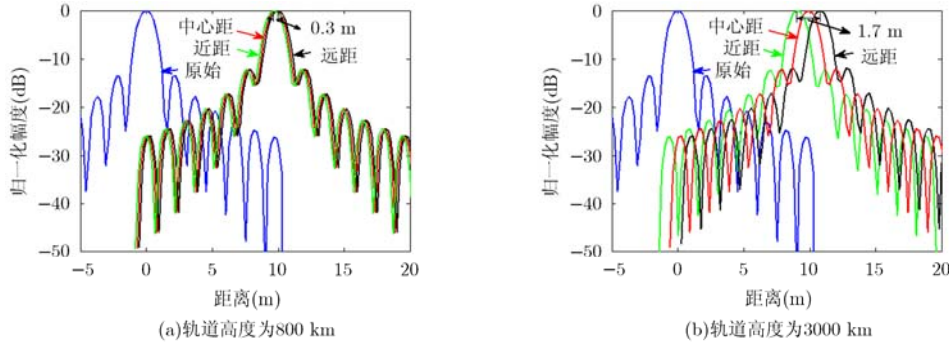


图 4 电离层及其空变性产生的图像距离向位移

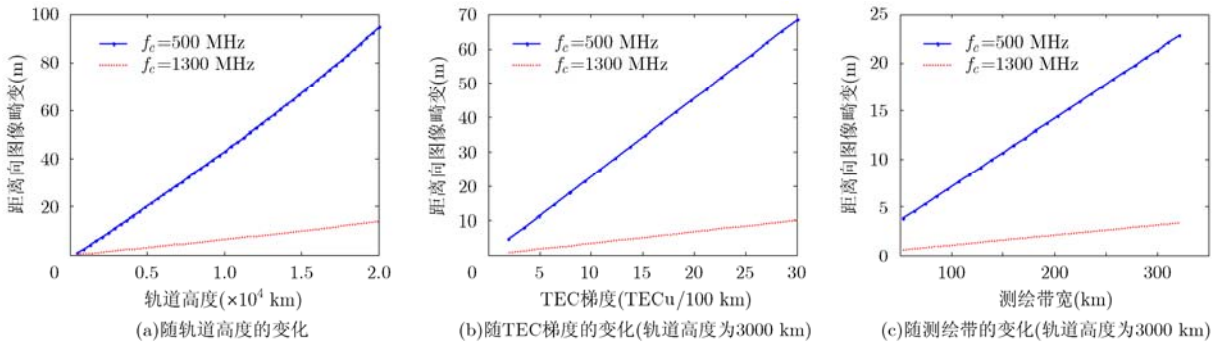


图 5 中高轨 SAR 系统距离向图像畸变

为方位向慢时间。由式(8)可以看出，电离层会对 SAR 信号引起常数项、一次项、二次项以及高次项相位误差

对于低轨道 SAR 而言，合成孔径时间很短，一般小于 1 s，因此，电离层 TEC 在一个合成孔径时间内可以认为是常数，其对方位向图像质量的影响可以忽略。但对于中高轨道 SAR 而言，由于合成孔径时间大大增加，电离层 TEC 在整个合成孔径内的变化将增加，近而导致电离层引入的方位向相位误差增大，因此，需要针对中高轨 SAR 的工作参数，结合电离层时变性，分析电离层产生的相位误差对中高轨 SAR 方位向分辨率的影响。

图 6 和图 7 分别给出了几种轨道高度下电离层

TEC 时变性引起的二次相位误差和三次相位误差对方向成像的影响，仿真参数见表 2，该仿真参数是根据不同轨道高度 SAR 获取相同分辨率时计算得到。仿真结果表明，相同的电离层条件下，电离层时变性引起的相位误差对中高轨 SAR 影响较大，且随着轨道高度的升高，电离层二次和三次相位误差引起的方位向图像质量的下降越来越严重，当轨道升高到一定高度时，电离层时变性引起的相位误差将导致方位向无法成像。

由式(8)可知，电离层引入的方位向峰值二次相位误差和峰值三次相位误差分别为

$$\phi_{2a} = -\frac{2\pi(80.6) \text{TEC}_s''}{cf_c} \left(\frac{T_a}{2}\right)^2 \quad (9)$$

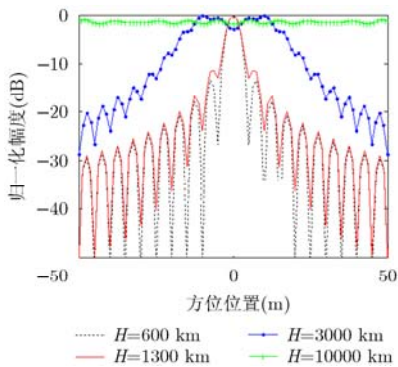


图 6 二次相位误差引起的方位向压缩结果

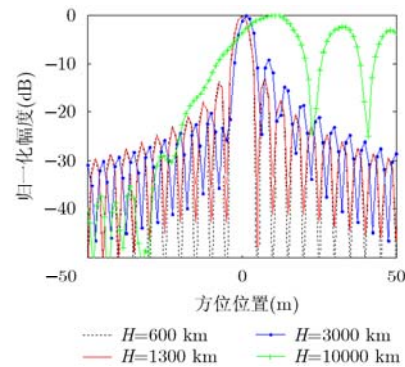


图 7 三次项相位误差引起的方位向压缩结果



表2 4种轨道 SAR 仿真参数

轨道高度(km)	600	1300	3000	10000
工作频率(GHz)	1.25	1.25	1.25	1.25
方位分辨率(m)	5	5	5	5
合成孔径时间(s)	2.6	5.7	13.7	54.5
多普勒带宽(Hz)	1384	1198	890	400
斜视角(°)	0	0	0	0
地面入射角(°)	45	45	45	45
波束视角(°)	40.2	36.0	28.7	16.0
$d^2\text{TEC}/dt^2(\text{TECU}/\text{s}^2)$	0.02	0.02	0.02	0.02
$d^3\text{TEC}/dt^3(\text{TECU}/\text{s}^3)$	0.002	0.002	0.002	0.002

$$\phi_{3a} = -\frac{2\pi(80.6)}{cf_c} \frac{\text{TEC}_s'''}{6} \left(\frac{T_a}{2}\right)^3 \quad (10)$$

其中  $T_a$  为合成孔径时间。

对于正侧视 SAR, 假设孔径照射是均匀的, 则其方位向分辨率  $\rho_a$  可以表示为<sup>[14]</sup>

$$\rho_a = 0.886\lambda R_0 / (2L_s) \quad (11)$$

其中  $R_0$  为中心斜距,  $L_s$  为合成孔径长度。

若 SAR 方位向天线尺度为  $L_a$ , 则方位向波束宽度  $\theta_{bw} = 0.886\lambda / L_a$ , SAR 合成孔径长度是指目标在雷达波束照射期间传感器所经过的路径长度, 因此, 合成孔径可表示为<sup>[14]</sup>

$$L_s = R_0 \theta_{bw} v_{\text{sat}} / v_g \quad (12)$$

其中  $v_{\text{sat}}$  表示卫星速度,  $v_g$  表示波束地面投影速度。

为简化推导, 假设卫星轨道为圆轨道, 地球为圆球体, 则有

$$v_{\text{sat}} = \sqrt{\mu/R_s}, \quad v_g \approx R_e \sqrt{\mu/R_s^3} \quad (13)$$

其中  $\mu = 3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$  为地球引力常数,  $R_e$  为地球半径,  $R_s$  为卫星轨道半径。

SAR 合成孔径时间是指目标处于 3 dB 波束范围内的时间, 因此, 合成孔径时间可表示为<sup>[14]</sup>

$$T_a = 0.886\lambda R_0 / v_g L_a \quad (14)$$

把式(11)-式(14)分别代入式(9)和式(10)整理得

$$\phi_{2a} = 0.886^2 \frac{80.6\pi\lambda^2 R_0^2 R_s \text{TEC}_s''}{16\mu cf_c \rho_a^2} \quad (15a)$$

$$\phi_{3a} = 0.886^3 \frac{80.6\pi\lambda^3 R_0^3 \text{TEC}_s'''}{192cf_c (\mu/R_s)^{3/2} \rho_a^3} \quad (15b)$$

式(15a)和式(15b)分别给出了电离层时变性引入的方位向峰值二次相位误差和峰值三次相位误差, 图8给出了不同轨道高度时, 电离层时变性引入的方位向峰值二次和三次相位误差, 仿真参数见表2。

从图8可以看出: 对于一定轨道高度的 SAR 系统, 随着分辨率的增大, 电离层时变性引入的峰值二次和三次相位误差将变小; 对于一定分辨率的 SAR 系统, 随着轨道高度的增大, 电离层时变性引入的峰值二次和三次相位误差将变大。因此, 对于高分辨率 SAR 系统, 特别是高轨道 SAR 而言, 必须考虑电离层时变性引起的二次和三次相位误差对方向成像质量的影响。

为了直观地了解电离层时变性引起的相位误差对方向成像质量的影响, 本节仿真分析了轨道高度为 3000 km 时, 不同分辨率条件下, 电离层时变性引起的二次和三次相位误差对方向成像质量的影响, 仿真参数见表2, 仿真结果如图9和图10所示。从图9和图10结果可以看出, 分辨率越高, 电离层时变性引起的相位误差对方向成像质量的影响越大, 这一点类似于电离层空变性引起的相位误差对距离向成像影响的分析结果, 即系统设计的 SAR 图像分辨率越高, 越容易受到电离层的影响。因此, 对于中高轨 SAR 系统而言, 特别是分辨率较高时, 电离层时空变化特性引起的相位误差会大大影响图像质量, 必须采用适当的补偿校正方法, 校正电离层 TEC 及其时空变化特性引起的相位误差。

#### 4.2 方位向图像位移

电离层 TEC 梯度会对 SAR 产生较为严重的影

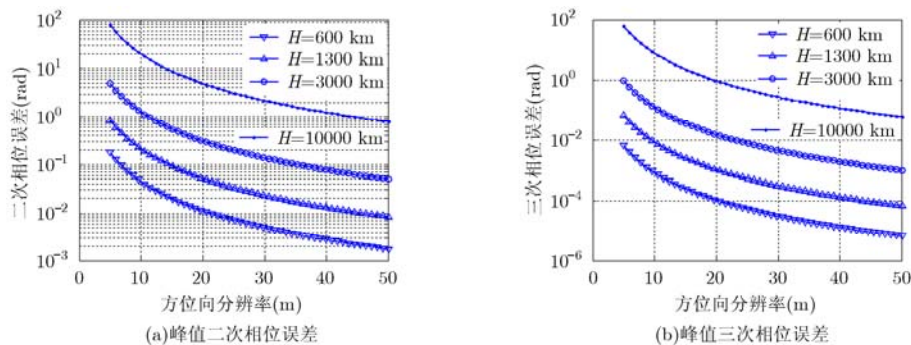


图8 电离层时空变化引入的相位误差随分辨率的变化

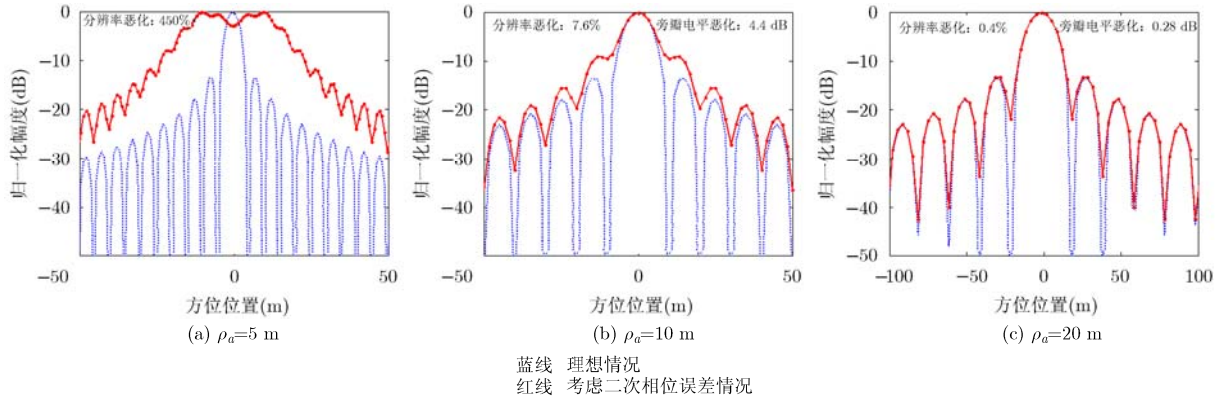


图 9 不同分辨率下二次相位误差引起的方位向压缩结果

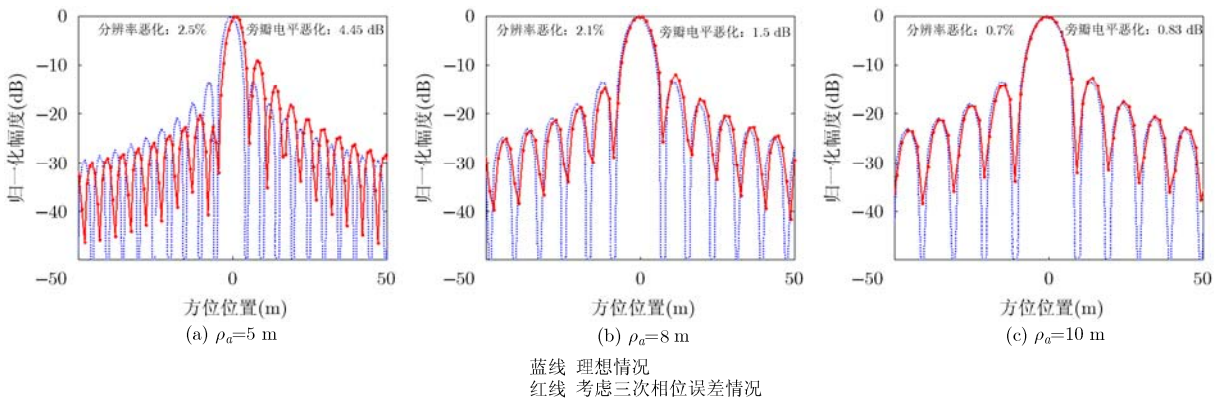


图 10 不同分辨率下三次相位误差引起的方位向压缩结果

响，电离层 TEC 梯度产生的相位梯度为<sup>[15]</sup>

$$\frac{\partial \phi_{\text{ion}}}{\partial t} = \frac{4\pi(40.3)}{c f_c} \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} \quad (16)$$

其中  $t$  为方位向时间，则由此产生的附加多普勒频率为

$$\Delta f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi_{\text{ion}}}{\partial t} = \frac{2(40.3)}{c f_c} \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} \quad (17)$$

假设由相位梯度产生的方位向位移为  $\Delta \text{az}$ ，方位向调频率为 FM，卫星速度为  $v_{\text{sat}}$ ，则有

$$\text{FM}(\Delta \text{az}/v_{\text{sat}}) = \Delta f_d \quad (18)$$

联合式(17)和式(18)可得

$$\Delta \text{az} = \frac{2(40.3)v_{\text{sat}}}{c f_c \text{FM}} \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} \quad (19)$$

由式(19)可以看出，方位向位移与轨道几何以及电离层 TEC 时间变化率都有关系。

根据 SAR 相关知识可知：

$$\text{FM} = 2v_r^2/\lambda R_0, \quad v_r^2 = v_{\text{sat}}v_g \quad (20)$$

其中  $v_r$  为雷达等效速度。

把式(13)和式(20)代入式(19)并进一步整理，得

$$\Delta \text{az} = \frac{2(40.3)}{f_c^2} \frac{R_0}{2\sqrt{\mu}} \frac{R_s^{3/2}}{R_e} \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} \quad (21)$$

由式(21)可以看出，同样的电离层变化条件下，随着轨道高度的升高，方位向位移增大，因此，一般电离层变化条件下，低轨道 SAR 不予考虑的方位向位移对于中高轨 SAR 而言则需要考虑并加以校正，否则 SAR 定位精度将大大降低。

上述分析和仿真结果表明对于中高轨 SAR 系统，电离层时变性引起的方位向图像位移较大，为了保证几何定位精度，必须对方位向位移进行校正，在分辨率一定的条件下，同样的电离层 TEC 测量精度，卫星轨道越高，校正后方位向位移方差越大，即校正精度越低。从另一个方面来说，在分辨率相等条件下，要达到同样的方位向位移测量精度，轨道越高，所要求的电离层 TEC 测量精度越高，鉴于篇幅有限，在此不展开分析。

### 5 结束语

本文从电离层对 SAR 信号的影响分析出发，结合中高轨 SAR 系统特点和电离层时空变化特征，分析了背景电离层及其时空变化特征对中高轨 SAR 系统成像质量的影响，分析结果表明，相对于低轨道 SAR 系统，电离层及其时空变化对中高轨 SAR 系统距离向分辨率和图像畸变以及方位向分辨率和

图像位移的影响都将增大,且分辨率越高、工作频率越低,影响程度越大。虽然,电离层TEC可以实现较为精确的校正,但是,由于中高轨SAR测绘带的大幅增加以及合成孔径时间和空间的增大,电离层时空变化特性将不可忽略,导致电离层TEC校正后的剩余误差增大,因此,对于中高轨特别是同步轨道SAR而言,需要探索电离层TEC动态高精度测量方法,实现电离层TEC和TEC梯度的高精度测量<sup>[16]</sup>,校正电离层TEC及其时空变化特性引入的误差。

### 参考文献

- [1] Edelstein W, Madsen S, Moussessian A, *et al.* Concepts and technologies for synthetic aperture radar from MEO and geosynchronous orbits[C]. Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, USA, 2005, Vol. 5659: 195–203.
  - [2] Huang L J, Han B, Hu D H, *et al.* Medium-Earth-Orbit SAR imaging based on keystone transform and azimuth perturbation[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 3608–3610.
  - [3] Bao M, Xing M D, Wang Y, *et al.* Two-dimensional spectrum for MEO SAR processing using a modified advanced hyperbolic range equation[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(18): 1043–1045.
  - [4] Chen J and Zebker H A. Ionospheric artifacts in simultaneous L-band ionospheric artifacts in simultaneous L-band InSAR and GPS observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(4): 1227–1239.
  - [5] Xu Z W, Wu J, *et al.* A survey of ionospheric effects on space-based radar[J]. *Waves in Random Media*, 2004, 14(2): S189–S273.
  - [6] Liu J, Kuga Y, *et al.* Ionospheric effects on SAR imaging: a numerical study[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(5): 939–947.
  - [7] 黄文耿, 陈艳红, 沈华, 等. 用GPS观测研究电离层TEC水平梯度[J]. *空间科学学报*, 2009, 29(2): 183–187.  
Huang Wen-geng, Chen Yan-hong, Shen Hua, *et al.* Study of ionospheric TEC horizontal gradient by means of GPS observations[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2009, 29(2): 183–187.
  - [8] Papathanassiou K, Kim J S, Quegan S, *et al.* Study of ionospheric mitigation schemes and their consequences for BIOMASS product quality[R]. University of Sheffield, ESA/ESTEC Contract No. 22849/09/NL/JA/ef., European Space Agency, 2012.
  - [9] Bruno B and Hobbs S E. Radar imaging from geosynchronous orbit: temporal decorrelation aspects[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2924–2929.
  - [10] 李亮, 洪峻, 明峰, 等. 一种基于有源定标器的电离层对星载SAR定标影响校正方法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(5): 1096–1101  
Li Liang, Hong Jun, Ming Feng, *et al.* An approach for ionospheric effects correction on spaceborne SAR calibration based on active radar calibrator[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1096–1101.
  - [11] Meyer F J. Performance requirements for ionospheric correction of low-frequency SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3697–3702.
  - [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): 2460–2468.
  - [13] Wu Y W, Liu R Y, Zhang B C, *et al.* Variations of the ionospheric TEC using simultaneous measurements from the China crustal movement observation network[J]. *Annales Geophysicae*, 2012, 30: 1423–1433.
  - [14] Cumming I G and Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation[M]. Boston, MA: Artech House, 2005, Chapter 4.
  - [15] Jung Hyung-sup, Lee Dong-taek, Lu Zhong, *et al.* Ionospheric correction of SAR interferograms by multiple-aperture interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(5): 3191–3199.
  - [16] Helmboldt J F, Lazio T J W, Intema H T, *et al.* High-precision measurements of ionospheric TEC gradients with the Very Large Array VHF system[J]. *Radio Science*, 2012, 47: 1–13.
- 李亮: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为SAR系统定标技术、机载SAR系统设计以及电离层对SAR成像影响等。  
洪峻: 男, 1960年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为SAR定标技术、量化SAR图像应用等。  
明峰: 男, 1977年生, 副研究员, 主要研究方向为雷达信号处理、SAR系统量化应用等。  
胡继伟: 男, 1983年生, 助理研究员, 主要研究方向为雷达信号处理及定标算法等。