



# 电离层时空变化效应对星载及月基 SAR 成像影响： 现状与展望

## 摘要

合成孔径雷达 (SAR) 作为一种主动传感器,具备全天时、全天候的观测能力,已广泛应用于对地观测中。然而,无线电信号在空间传播过程中会不可避免地受到电离层效应的影响,导致信号的相位、幅度发生变化,使得工作在电离层之上的 SAR 系统的成像性能受到干扰。本文分别从法拉第旋转、背景电离层和电离层不规则体三个方面介绍了电离层效应对不同轨道 SAR 系统成像性能的影响,并总结了电离层效应的补偿修正方案。最后,给出了电离层效应对星载和月基 SAR 成像影响的一些亟待解决的问题,以促进星载和月基 SAR 成像的发展及应用。

## 关键词

电离层效应;合成孔径雷达;法拉第旋转;背景电离层;电离层不规则体;成像性能

中图分类号 TN957

文献标志码 A

收稿日期 2019-10-21

资助项目 国家自然科学基金(41590853,41531175)

作者简介

陈昆山,男,博士,研究员,主要研究方向为微波随机散射和发射的解析建模和影像雷达系统.chenks@radi.ac.cn

1 中国科学院遥感与数字地球研究所/遥感科学国家重点实验室,北京,100101

2 中国科学院大学,北京,100049

## 0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种高效的对地观测工具,具有全天时、全天候的监测能力以及对云、雨、大气较强的穿透能力<sup>[1-2]</sup>。目前,SAR 系统已经具备在全球尺度上精确监测地球环境的能力,因此受到地学界的密切关注<sup>[3]</sup>。随着科学技术的不断进步,SAR 系统朝着高分辨率、宽测绘带、多载频、多极化、小型化、多卫星平台协作等方向发展<sup>[4-6]</sup>。但是对于工作在高空上的 SAR 系统,它们的成像性能会受到其工作环境的影响,如大气层效应、时空失相干、系统噪声、区域杂波等<sup>[7]</sup>。其中,大气层效应是制约 SAR 系统成像性能主要的因素之一<sup>[8]</sup>。

对于高频(>20 GHz)雷达系统而言,大气的吸收和衰减作用对 SAR 系统的成像性能起主要制约作用,降雨时会进一步造成这类高频雷达信号的衰减。然而,在较低载频(< 2 GHz)的情况下,SAR 系统成像则容易受到电离层的影响<sup>[9]</sup>。目前很多在轨运行的星载 SAR 系统工作在 L 波段,而 P 波段是未来星载 SAR 系统的重要发展方向之一<sup>[10]</sup>。随着人们对观测范围和重访周期的需求不断提升,高轨道 SAR 系统日益受到重视<sup>[11]</sup>。为了获取高信噪比,高轨道 SAR 系统普遍将 L 波段作为主要载频<sup>[12-13]</sup>。目前,电离层效应已经成为制约低载频 SAR 系统发展的主要瓶颈之一。

一般来讲,电离层效应可以分为三类<sup>[14]</sup>:第一类是法拉第旋转(Faraday Rotation, FR),它与传输路径的电子总浓度(Total Electron Content, TEC)和地磁场有关。FR 效应会造成采用线极化波的低载频 SAR 系统的散射能量从同极化通道旋转到交叉极化通道,从而影响极化 SAR 数据的质量<sup>[15]</sup>。此外,FR 效应的直接后果是改变后向散射系数,从而干扰 SAR 数据的应用。第二类是背景电离层效应,它与大尺度的背景电离层有关,包括色散效应、群延迟、相移和多普勒频移等<sup>[16]</sup>。其中,群延迟影响地物目标在距离向的定位精度,而色散效应与 SAR 系统的距离向聚焦有关,容易引起距离向散焦。第三类是电离层小尺度不规则体引起的多重散射效应和电离层闪烁(信号强度、相位和到达角的随机起伏)<sup>[17]</sup>。多重散射效应易造成回波时间延迟,影响 SAR 系统的距离向成像;电离层闪烁则会使频率分量相位间具有

大幅度随机特征,破坏相干积分脉冲间的相位相关性,减弱接收信号的匹配和相干积分效果,影响 SAR 系统的方位向聚焦.这三类效应耦合在一起共同影响 SAR 系统的定位精度,并导致其成像质量下降.若不对这些效应进行校正和补偿,SAR 系统将无法实现正常成像<sup>[18]</sup>.

根据轨道高度,电离层效应的分析可以分为两大类,即基于“冰冻场”假设下的电离层效应<sup>[19]</sup>和时空变化电离层效应<sup>[20]</sup>.传统的星载 SAR 系统,轨道通常在 500~800 km,由于轨道高度的限制,覆盖区域小、合成孔径时间短,因此常忽略电离层在合成孔径时间内的变化,只考虑电离层不规则波动引起的方位向去相干对 SAR 系统成像聚焦的影响<sup>[19]</sup>.为了增加可覆盖区域,地球同步轨道 SAR (Geosynchronous SAR, GEOSAR)、月基 SAR (Moon-based SAR) 等概念相继被提出<sup>[21-22]</sup>.这类高轨道 SAR 系统覆盖范围大、合成孔径时间长达数百秒乃至上千秒,而背景电离层本身又具有时空变化特性,且在长合成孔径时间内电离层中小尺度的不规则体也会随时间而发生变化,可能进一步影响信号的相干性.因此,在分析这类 SAR 系统的电离层效应时,必须在电离层空间不均匀性的基础上同时考虑电离层随时间的变化特性<sup>[20]</sup>.

基于此,本文结合不同轨道 SAR 系统的工作特点对电离层效应进行全面、系统的总结,着重从法拉第旋转、背景电离层和电离层不规则体三个方面阐述电离层效应对不同轨道 SAR 系统成像质量的影响,并介绍这些效应的补偿校正方法,为电离层效应的分析与校正提供相应的理论支撑,以促进低载频星载和月基 SAR 成像的发展及应用.

## 1 低轨道 SAR 系统电离层效应

当 SAR 系统工作在低空轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 时,电离层效应分析通常仅考虑电离层的空间不均匀性,而忽略电离层的时间变化,即“冰冻场”假设.本章基于“冰冻场”假设,总结了 LEOSAR 的电离层效应.

### 1.1 FR 效应对 LEOSAR 系统的影响

当线极化的无线电波穿过电离层时,电波的极化面在地磁场的影响下相对入射时的状态发生旋转,并随传播路径和电离层的变化而变化,这个偏转的角度即 FR 角<sup>[23]</sup>.单程的 FR 角  $\Omega$  可以通过以下公式计算<sup>[24]</sup>:

$$\Omega = 2.37 \times 10^4 \times f_c^{-2} \int N_e(h) B \cos \theta_B \sec \psi dh, \quad (1)$$

其中,  $f_c$  为载频,  $N_e$  为电子浓度,  $B$  为磁场强度,  $\theta_B$  为传播路径与磁场的夹角,  $\psi$  为传播路径与垂直方向的夹角.其中,电子总浓度 TEC (其量值记为  $C_{\text{TEC}}$ ) 的积分可表示为

$$C_{\text{TEC}} = \int N_e(h) dh. \quad (2)$$

Wright 等<sup>[25]</sup>在地磁场为中心偶极子 (centered dipole) 的假设下,给出了太阳同步轨道 (sun synchronous orbit) 下星载 SAR 的 FR 角近似表达式:

$$\Omega = \frac{0.339 \times C_{\text{TEC}}}{f_c^2} \times g(\theta, \phi), \quad (3)$$

$$g(\theta, \phi) = 2 [\sin \theta_m \sin \theta \cos(\phi_m - \phi) + \cos \theta_m \cos \theta] \pm \tan \theta_B [\sin \theta_m \sin \theta_s \sin(\phi_0 - \phi_m) \pm \cos \theta_m \cos \theta_s], \quad (4)$$

式中,  $\theta_s$  为轨道倾角,  $\phi_0$  为升交点赤经.  $(\theta, \phi)$  为卫星位置的坐标,  $(\theta_m, \phi_m)$  为磁北极点对应的地理坐标.其中载频  $f_c$  以 GHz 为单位,电子总浓度  $C_{\text{TEC}}$  以 TECU 为单位.式 (4) 第一个  $\pm$  与 SAR 系统的视线向 (looking direction) 有关 (+表示右视),第二个  $\pm$  由卫星最高点经度相对升交点赤经的位置决定,详细可参见文献<sup>[25]</sup>.

基于式 (3) 和 (4), Wright 等发现在太阳活动极小期, L 波段的太阳同步轨道星载 SAR 的 FR 角不超过  $10^\circ$ ;而在太阳活动极大期,超过  $10^\circ$  的 FR 角大大增加<sup>[25]</sup>.在全球尺度下,FR 效应导致 L 波段的线极化信号的极化面最高旋转  $40^\circ$ ,而 P 波段下的单程 FR 角可高达  $320^\circ$ <sup>[26-27]</sup>.显然,FR 效应影响低载频 (L 波段、P 波段等)、线极化的星载极化 SAR 数据.FR 对极化 SAR 数据的影响可由下式表示<sup>[20]</sup>:

$$\begin{bmatrix} O_{hh} & O_{hv} \\ O_{vh} & O_{vv} \end{bmatrix} = A(r, \theta) e^{j\phi} \begin{bmatrix} 1 & \delta_2 \\ \delta_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & f_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 & N_2 \\ N_3 & N_4 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中,  $O = \begin{bmatrix} O_{hh} & O_{hv} \\ O_{vh} & O_{vv} \end{bmatrix}$  为极化散射矩阵实测值,  $S =$

$\begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}$  为真实极化散射矩阵.  $A(r, \theta)$  为天线增益,  $\phi$  为相位延迟.  $f_1$  和  $f_2$  分别表示通道不平衡幅度,  $\delta_i, i = 1, \dots, 4$  表示通道耦合项,  $N_i, i = 1, \dots, 4$  为系统噪声.

通过辐射定标,并去除通道耦合、通道不平衡幅度和相位延迟,可以得到仅受 FR 效应影响的极化散射矩阵  $M$  :

$$\begin{bmatrix} M_{hh} & M_{hv} \\ M_{vh} & M_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ -\sin\Omega & \cos\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ -\sin\Omega & \cos\Omega \end{bmatrix}. \quad (6)$$

SAR 数据  $pq$  极化的后向散射系数  $\sigma_{pq}^0$  可由下式获得:

$$\sigma_{pq}^0 = \frac{4\pi M_{qp} M_{qp}^*}{A}. \quad (7)$$

显然,FR 效应的直接后果是改变了后向散射系数,从而影响极化 SAR 影像质量,并对极化 SAR 数据的应用造成不利影响.例如, Rignot 发现 FR 效应对利用极化干涉 SAR 数据提取森林生物量、土地覆盖分类等农林业方面的应用产生负面效应<sup>[24]</sup>.此外,FR 效应能降低 SAR 系统对地面参数变化的敏感性.当 FR 超过  $5^\circ$ ,FR 效应会严重影响利用极化数据进行地表参数提取、生物量估算等方面的应用<sup>[25]</sup>. Gilman 等利用电磁波传播理论和归一化模糊函数,研究了 FR 效应对单极化 SAR 成像的影响<sup>[28]</sup>.他们的研究指出,当 FR 效应下的回波幅度变化范围较大时,可造成距离向成像散焦. Quegan 和 Lomas 讨论了法拉第效应和系统误差各参量的耦合影响,结果表明系统误差与 FR 效应的耦合作用影响 SAR 数据的质量<sup>[29]</sup>. Isoguchi 等针对 FR 效应下 L 波段后向散射系数的变化,分析了 FR 效应对海洋风场反演的影响<sup>[30]</sup>.研究发现,当 FR 角超过  $20^\circ$  时, HV 极化后向散射系数相比 FR 效应较小时增加了 15 dB 以上,这种情况下 HV 极化后向散射系数甚至会高于 HH 极化后向散射系数.这可以较好地解释 FR 角比较大时,由 PALSAR-2 数据反演的海洋风场会低估实际风速的现象.

可见,FR 效应会对低载频极化 SAR 数据的应用构成严重影响.近年来,L 波段星载极化 SAR 数据越来越多地应用于地表散射特性分析,即将发射的 P 波段星载 SAR 系统“BIOMASS”也将采用多极化工作方式<sup>[31]</sup>.因此,针对法拉第旋转的研究不再局限

于分析其影响,关于 FR 角校正方法的研究应运而生,并日益受到人们的关注.FR 效应的校正需要对 FR 角进行反演,传统上习惯利用 GPS 探测的 TEC 数据插值得到 FR 角的估计值,然而这种方法估计的结果与实际 FR 角之间存在较大的误差,使得此方法难以满足 SAR 系统补偿 FR 效应的需求.因此研究者更专注于从极化 SAR 回波数据中估计法拉第旋转角.

对于经过辐射定标和极化通道串扰及不平衡校正后的极化 SAR 数据, Bickel 等提出 FR 角可以通过以下方式计算<sup>[23]</sup>:

$$\hat{\Omega} = 0.25 \arg(Z_{12} Z_{21}^*), \quad (8)$$

其中  $Z_{12}$  和  $Z_{21}$  可以通过定标后的极化数据获得:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{hh} & M_{hv} \\ M_{vh} & M_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

此外, Freeman<sup>[27]</sup> 和 Jehle 等<sup>[32]</sup> 针对小通道耦合的情况,提出了一种 FR 角估计方法:

$$\hat{\Omega} = \pm \frac{1}{2} \tan^{-1} \{ [4 \langle Z_{hv} Z_{hv}^* \rangle (\langle M_{hh} M_{hh}^* \rangle + \langle M_{vv} M_{vv}^* \rangle + 2 \operatorname{Re} \langle M_{hh} M_{vv}^* \rangle)^{-1}]^{0.5} \}, \quad (10)$$

其中,  $Z_{hv} = 0.5(M_{vh} - M_{hv})$ . 然而,上述两种方法得到的 FR 角估计值的范围在  $-\pi/4$  到  $\pi/4$  之间,显然,该方法获得的 FR 角存在  $\pi/2$  模糊.利用上述 FR 估计值修正 FR 效应时可能会引起一个附加的  $\pm\pi$  相位误差.虽然这个相位误差并不会影响极化数据的分析和利用,但是,该误差对干涉数据的分析可能产生较大的影响.

为了避免  $\pi/2$  模糊,陈杰等提出利用图像区域测量极化散射矩阵的  $4 \times 4$  协方差矩阵来估计 FR 角的方法<sup>[33]</sup>.利用他们的方法可以得到 6 个 FR 估计值,其中第三个估计值受系统噪声和信道振幅不平衡的影响最小,可作为 FR 角的最佳估计.

$$\hat{\Omega} = \begin{cases} 0.5 [\arg(Z_3) + \pi], & \operatorname{Im}(\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle) > 0, \\ 0.5 \arg(Z_3), & \operatorname{Im}(\langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle) < 0, \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中,  $Z_3 = \operatorname{Im}(C_{14}) + j \operatorname{Im}(C_{13} - C_{12} + 2C_{34} - C_{24})$ , 其中

$$C_{pq} = \langle M_p M_q^* \rangle, \quad (12)$$

其中,  $p = 1, \dots, 4, q = 1, \dots, 4, M_1 = M_{hh}, M_2 = M_{hv}, M_3 = M_{vh}, M_4 = M_{vv}$ . 这种方法解决了  $\pi/2$  模糊,FR 估计值的有效范围变为  $[-\pi/2, \pi/2]$ .虽然该方法在载频较低时仍然面对  $\pi$  模糊度误差,但是将此 FR 估计值代入下面的公式可以有效地校正 FR 效应:

$$\begin{aligned} S_{hh} &= 0.5\{M_{hh}[\sec(2\Omega) + 1] + M_{vv}[\sec(2\Omega) - 1]\}, \\ S_{vv} &= 0.5\{M_{hh}[\sec(2\Omega) - 1] + M_{vv}[\sec(2\Omega) + 1]\}, \\ S_{hv} &= S_{vh} = M_{hv} - 0.5 \times \tan(2\Omega)(M_{hh} + M_{vv}). \end{aligned} \quad (13)$$

此后, Rogers 等讨论了在系统噪声、极化串扰及通道不平衡等效应的影响下,利用不同方法估算 L 波段 ALOS 数据的 FR 角的性能<sup>[34]</sup>,通过对比发现, Bickel 算法<sup>[23]</sup>具有较好的稳健性. Freeman 方法<sup>[26-27]</sup>在仅考虑 FR 效应时具有更好的效果,但在系统误差影响下其实际性能低于 Bickel 算法. 方法 (11) 性能相对较差,且对背景散射体类型或生物量密度有着较强的依赖性. 最近的一些研究探索了利用极化 SAR 数据和 FR 估计值反演电离层 TEC 信息和电离层电子浓度结构的可行性<sup>[35-36]</sup>. 可以看出,研究者不仅倾向于利用极化数据估计 FR 角并修正 FR 效应,而且开始探索利用 FR 估计值来反演电离层信息,以实现电离层其他效应的补偿.

## 1.2 背景电离层效应对 LEOSAR 系统的影响

背景电离层效应是无随机变化的背景电离层对电波传播的影响,它与沿信号传输路径的 TEC 有关,具体表现为群延迟、色散、相移和多普勒频移等<sup>[13]</sup>. 许多学者对背景电离层效应进行了研究<sup>[37-45]</sup>,比较有代表性的有: Ishimaru 等利用点目标扩散函数,分析了电离层色散导致的图像偏移、电离层色散导致的脉冲信号展宽等影响<sup>[14]</sup>. 然而文献 [14] 的分析并没有考虑电离层的不均匀性,而是引入了一个均匀分布的电子浓度分布来代替. 随后,为了更加真实地反映电离层效应的影响, Liu 等在考虑了电离层水平与垂直分布不均匀性的基础上,引入了电子密度分层模型对先前的理论进行了修正<sup>[40]</sup>. Xu 等<sup>[41]</sup>基于时间矩理论,对文献 [14, 40] 的理论进行了修正,系统分析了背景电离层效应对星载 SAR 系统成像的影响,但他们仅分析了色散效应一次和二次相位误差的影响,而未对三次相位误差开展定量分析. 基于此, Wang 等利用信号模型,进一步分析了背景电离层色散效应的三次相位误差对 P 波段星载 SAR 系统成像的影响<sup>[44-45]</sup>.

上述研究表明,背景电离层效应对 SAR 系统的成像性能构成威胁. 背景电离层效应对 LEOSAR 系统的影响可以从距离向成像和方位向成像两个方面进行研究. 其中,背景电离层效应对 LEOSAR 的影响包括:

1) 距离向偏移. 距离向偏移  $\Delta L_r$  主要与群延迟现象有关,可以表示为

$$\Delta L_r = A \cdot C_{\text{TEC}} / f_c^2, \quad (14)$$

其中,  $A = 40.3$ .

2) 距离向散焦. SAR 系统发射具有一定带宽的信号,当信号穿越电离层时会出现色散现象. 因此,当电离层 TEC 超过一定数值后,会使回波信号拉伸,引起匹配滤波器的失配,从而导致距离向成像散焦. 背景电离层对距离向聚焦的影响可以用二次相位误差 (Quadratic Phase Error, QPE, 其量值记为  $E_{\text{QPE}}$ ) 和三次相位误差 (Cubical Phase Error, CPE, 其量值记为  $E_{\text{CPE}}$ ) 描述. QPE 和 CPE 可以分别表示为<sup>[44]</sup>:

$$E_{\text{QPE}} = \frac{\pi AB^2}{cf_c^3} C_{\text{TEC}}, \quad E_{\text{CPE}} = \frac{\pi AB^3}{2cf_c^4} C_{\text{TEC}}, \quad (15)$$

其中,  $c$  为波速,  $B$  为系统带宽. QPE 和 CPE 的阈值分别为  $\pi/8$  和  $\pi/4$ , 当超过阈值时, QPE 将导致主瓣展宽,旁瓣上升,从而影响距离向的成像质量. 此外, CPE 可能引起距离向成像结果旁瓣不对称,并进一步影响聚焦.

3) 方位向偏移. 通常认为背景电离层效应对方位向成像聚焦没有影响,仅会引起方位向偏移,而方位向偏移  $\Delta L_a$  与电离层 TEC 梯度引起的多普勒偏移有关:

$$\Delta L_a = V_g \times \Delta f_d / K_a, \quad (16)$$

其中,  $V_g$  为波束速度,  $K_a$  为多普勒调频率,  $\Delta f_d$  为大尺度背景电离层 TEC 的空间梯度引起的多普勒偏移:

$$\Delta f_d = \frac{2AV_{\text{iono}}}{cf_c} k_1, \quad (17)$$

其中,  $V_{\text{iono}}$  是波束在电离层中的相对运动速度,  $k_1$  是电离层 TEC 沿方位向的梯度. 在平静的电离层条件下,背景电离层引起的方位向偏移普遍小于 1 m, 对方位向定位精度影响不大.

由上述分析可知,距离向偏移量与雷达载频有关(图 1). 在 TEC 相同时, L 波段距离向偏移最高可达几十米, P 波段的距离向偏移甚至可高达数百米<sup>[41]</sup>, 这远大于星载 SAR 系统成像的精度要求, 必须加以修正. Wang 等在背景电离层效应的影响下,模拟了 P 波段星载 SAR 距离向成像结果(图 2)<sup>[41]</sup>. 可以看出一次相位误差严重影响距离向偏移,二次相位误差的严重影响可使得距离向完全散焦,三次相位误差会造成脉压后右侧旁瓣升高,主瓣向左侧展宽,使得峰值旁瓣比升高,最终导致成像结果非对称畸变.

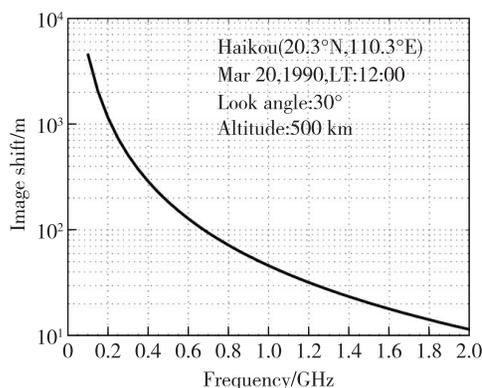


图1 在相同电离层 TEC 条件下,星载 SAR 的距离向偏移随载频的变化<sup>[41]</sup>

Fig.1 SAR image range shift as a function of carrier frequency (with the same ionospheric TEC)<sup>[41]</sup>

显然,背景电离层效应对距离向成像造成了严重影响,必须对背景电离层效应进行修正.对这类效应的补偿首先需要准确获取 TEC 信息.传统上,普遍利用 GPS 设备双频探测实现 TEC 的获取<sup>[46]</sup>,然而这类探测方式反演的 TEC 值采样率和测量精度难以满足星载 SAR 系统背景电离层效应补偿的需求.由于 SAR 系统的回波信号本身包含背景电离层造成的时延信息,研究者们致力于直接利用回波数据反演电离层 TEC 信息.Rosen 等利用分谱法(split-spectrum technique)对比分析了受电离层影响和不受电离层影响的回波数据的相位差,提出可以利用相位差提取电离层 TEC 信息<sup>[47]</sup>.同时,也有学者针对电离层造成的回波产生的时延和相位超前现象,提出了估计相对 TEC 值的方法<sup>[48-49]</sup>.Wang 等探索了

利用 SAR 数据估计的 FR 角反演路径上的 TEC 值<sup>[35]</sup>.Shteinsleiger<sup>[50]</sup> 和 Jehle 等<sup>[51]</sup> 分别就利用双频时延自适应法测量回波的展宽量进而反演 TEC 的方法进行了研究.Meyer 对上述不同 TEC 反演方法的适用性做了讨论<sup>[52]</sup>,并指出 SAR 系统的不同应用对电离层 TEC 校正的要求有很大区别.随后,针对双频时延自适应法在强起伏下无法准确估计 TEC 的问题,Wang 等在双频自适应法的基础上提出了三频时延自适应法反演 TEC 信息<sup>[53]</sup>.这种方法不仅可以精准地反演电离层 TEC 信息,而且可以同时反演电离层不规则体引起的多重散射系数.其具体反演 TEC 的过程如下:

$$C_{TEC} = \frac{c}{2A} \frac{\Delta T_{iono2}(f_c^4 - f_{stop}^4)f_{start}^4 + \Delta T_{iono1}(f_c^4 - f_{start}^4)f_{stop}^4}{(f_{start}^2 - f_c^2)(f_c^2 - f_{stop}^2)(f_{start}^2 - f_{stop}^2)}, \quad (18)$$

$$C_{iono} = \frac{cf_{start}^2 f_{stop}^2 f_c^2}{\sqrt{2}} \frac{\Delta T_{iono1}(f_{start}^2 - f_c^2)f_{stop}^4 + \Delta T_{iono2}(f_c^2 - f_{stop}^2)f_{start}^4}{(f_{start}^2 - f_c^2)(f_c^2 - f_{stop}^2)(f_{start}^2 - f_{stop}^2)}, \quad (19)$$

其中,  $f_{start} = f_c + B/2$ ,  $f_{stop} = f_c - B/2$ .  $\Delta T_{iono1}$  为  $f_{stop}$  和  $f_c$  之间的时延差,  $\Delta T_{iono2}$  为  $f_{start}$  和  $f_c$  之间的时延差.

从图 3 可以看出,在强起伏情况下,双频时延自适应方法测得的 TEC 值包含多重散射系数的影响,并且此时的双频时延方法测得的 TEC 数值与真实值之间的误差较大;相反,三频时延自适应方法由于考虑到多重散射系数的干扰,TEC 反演性能更为优秀,其估计的 TEC 数值可以较好地反映电离层 TEC 真实信息,精确地补偿背景电离层效应带来的相位误差.

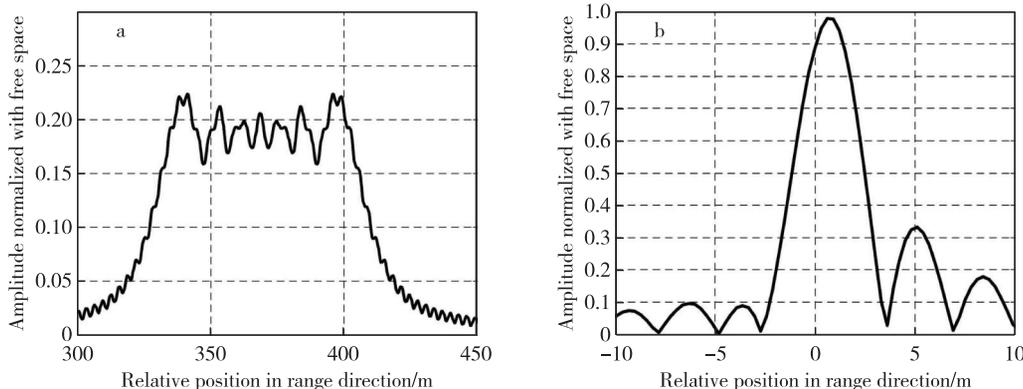


图2 背景电离层影响下的距离向一维成像结果(仿真参数:VTEC 为 150 TECU,载频 435 MHz,带宽 50 MHz<sup>[44]</sup>)

a.仅考虑距离向偏移和 QPE;b.仅考虑 CPE 影响

Fig.2 The range profile of single point target response under the background ionospheric effects (a) only linear and quadratic phase errors are considered;(b) only cubic phase error is considered.

The simulation parameters are given as:Vertical TEC is 150 TECU,carrier frequency is 435 MHz,and system bandwidth is 50 MHz<sup>[44]</sup>

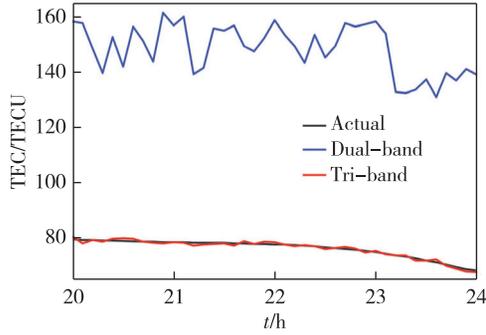


图3 电离层强起伏情况下,利用双频时延自适应和三频时延自适应方法计算的TEC反演值随时间的变化规律<sup>[53]</sup>

Fig. 3 TEC retrieval based on dual-band and tri-band path delay technique as a function of time under strong fluctuation<sup>[53]</sup>

### 1.3 电离层不规则体对LEOSAR系统的影响

不同于大尺度的背景电离层,电离层中小尺度不规则体对SAR信号的影响主要表现为多重散射效应和电离层闪烁<sup>[54-55]</sup>.不规则体的多重散射效应会影响SAR系统的距离向成像性能,但相对背景电离层而言,其影响较小,一般可以忽略不计.然而,当SAR信号遭遇强起伏时,多重散射效应则会显著干扰SAR系统的距离向成像性能<sup>[41]</sup>.当信号穿过电离层不规则体时,由多重散射现象引起的信号双程时延为<sup>[56-58]</sup>:

$$\Delta t = 40.3 \times \frac{\sqrt{2}}{c f^A} \frac{\nabla^2 A_\zeta(0)}{2z} \int_0^L N_e^2(h) h(h-z) dh, \quad (20)$$

其中, $z$ 为不规则体顶部与地面的距离, $L$ 为电离层不规则体厚度, $N_e(h)$ 为高度 $h$ 处的电子密度数值, $A_\zeta(r)$ 为电离层电子密度关于空间距离 $r$ 的横向自相

关函数, $\nabla^2 A_\zeta(0)$ 为 $A_\zeta(r)$ 的二阶泰勒展开:

$$\nabla^2 A_\zeta(0) = -\delta_\zeta^2 \sqrt{\frac{p}{2}} \left( \frac{\kappa_0}{L} \right) \frac{K_{(p-4)/2}(\kappa_0 l_0)}{K_{(p-3)/2}(\kappa_0 l_0)}, \quad (21)$$

式中, $\kappa_0 = 2p/l_i$ , $l_i$ 为不规则体的内尺度,其量级通常在几厘米到几米之间, $l_0$ 为不规则体的外尺度,其尺寸小至几米,大到几十上千米. $K_n(\cdot)$ 为第 $n$ 阶第二类修正贝塞尔函数, $\delta_\zeta$ 为电子密度起伏的标准差,数值为 $0 \sim 1$ , $p$ 为谱指数,通常取值范围为 $2 \sim 4$ .

文献[59]分析了强闪烁情况下不规则体的多重散射效应和不规则体的色散效应对距离向成像的影响(图4).可以看出,在频率较低时,电离层不规则体的多重闪烁效应会造成距离向偏移比较显著,距离向分辨率则随着起伏强度的增加而恶化.由此可见,强闪烁情况下,多重散射效应会显著影响SAR系统的距离向成像性能.

另一个与电离层中小尺度不规则体相关的效应是电离层闪烁效应,它是导致SAR系统的方位向成像散焦的主要原因.电离层闪烁是当电波通过电离层时,受电离层中小尺度不规则体的影响,造成信号振幅、相位等发生不规则变化的现象<sup>[55]</sup>.在实际研究中,通常用闪烁指数表示电离层闪烁的强弱,它是接收信号功率的归一化方差<sup>[60-61]</sup>:

$$S_4^2 = \frac{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}{\langle P \rangle^2}. \quad (22)$$

通常信号的起伏强弱程度可以根据闪烁指数的数值范围分为三类:1)弱起伏: $0.2 < S_4 \leq 0.4$ ;2)中等起伏: $0.4 < S_4 \leq 0.6$ ;3)强起伏: $0.6 < S_4 \leq 1$ .与背景电离层效应相比,电离层闪烁具有随机变化的特性,它体现在沿信号传输路径电子密度的不规

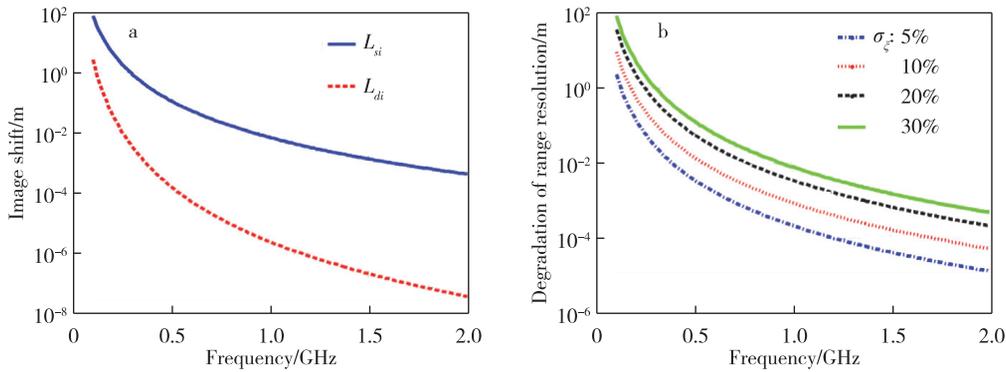


图4 (a)强闪烁情况下电离层不规则体的多重散射效应和不规则体的色散效应造成的距离向偏移;  
(b)不同起伏下电离层不规则体导致的距离向分辨率的恶化<sup>[59]</sup>

Fig. 4 (a) The range shift due to multiple scattering and dispersion of the ionospheric irregularities under strong fluctuation;  
(b) the degradation of range resolution due to the anisotropic ionospheric irregularities under different fluctuations<sup>[59]</sup>

则分布上.当电离层闪烁现象发生时,会影响信号的相干性,使得接收信号相干长度减小.当相干长度小于合成孔径长度时,将会导致 SAR 系统方位向成像发生散焦<sup>[14]</sup>.

基于此,大量学者致力于研究电离层闪烁效应对 LEOSAR 系统的影响.Crane<sup>[62]</sup>和 Yeh 等<sup>[63]</sup>分别对信号传输过程中的电离层闪烁机理做了总结,为研究电离层闪烁效应对成像的影响提供了理论依据.Quegan 等利用相位屏模型,在系统地分析对流层和电离层闪烁对 SAR 系统成像的影响后指出,对 C 波段以下的 SAR 系统而言,对流层的影响可忽略不计,而电离层闪烁则会严重影响 SAR 成像的质量<sup>[64]</sup>.Gray 等利用 GPS 实测数据,分析了电离层闪烁导致的电子密度起伏对雷达干涉测量的影响<sup>[65]</sup>,并从理论上证明干涉 SAR 配准时的方位偏移主要由电离闪烁引起.Ishimaru 等利用广义模糊函数的二阶矩分析了电离层闪烁效应对相干距离的影响<sup>[14]</sup>,结果表明电离层闪烁会减小 SAR 系统的相干距离,从而导致 SAR 系统的方位分辨率从几米下降到几百米.此后,针对电离层闪烁效应的研究大多是通过改进 Ishimaru 模型<sup>[14]</sup>来实现的.例如,Liu 等在考虑电离层水平与垂直分布不均匀性基础上,引入 Chapman 电子密度分层模型对 Ishimaru 的理论进行修正<sup>[40]</sup>.在此基础上,Li 等根据相位屏理论,构建了适用 SAR 信号传输的双频、双点互相关函数(Two-Frequency and Two-Position Coherence Function, TFTP-CF),并利用 TFTP-CF 分析了电离层不规则变化造成的 SAR 系统成像性能下降的问题<sup>[66]</sup>.之后,不同研究者分别定量分析了电离层闪烁效应对 L 波段星载 SAR<sup>[67-69]</sup>、P 波段星载 SAR<sup>[44,70-71]</sup>成像性能的影响.

总而言之,上述研究从 SAR 成像和电磁波传播原理上,对电离层闪烁效应的影响做出了有效分析.结果表明,电离层闪烁将严重影响低载频星载 SAR 系统的方位向成像性能.特别是对即将升空的 P 波段星载 SAR 系统的“BIOMASS”,电离层闪烁是造成其成像质量下降的主要因素.换言之,电离层闪烁会严重干扰 P 波段星载 SAR 的方位向成像结果<sup>[71]</sup>(图 5).尤其是经过多视处理后,点目标已经不能完全成像.

为了实现低载频的星载 SAR 系统有效成像,必须抑制电离层闪烁的影响.电离层闪烁抑制方法主要是相位梯度自聚焦法(Phase Gradient Autofocus,

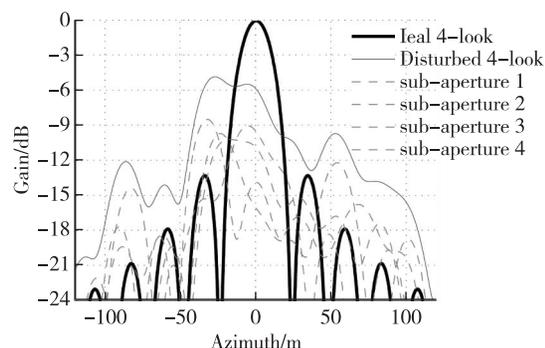


图 5 在电离层闪烁效应影响下,“BIOMASS”经四视处理后的点目标方位向成像结果<sup>[71]</sup>.其中,太阳黑子数: $R_z 12 = 62.8$

Fig. 5 The azimuth profile of the four-look single point target response under the effects of ionospheric scintillation with  $R_z 12 = 62.8$ <sup>[71]</sup>

PGA)<sup>[72-75]</sup>.Li 等详细分析了 PGA 对 P 波段电离层闪烁效应的补偿能力,结果表明 PGA 算法能有效地补偿电离层闪烁效应,保障方位向的成像质量.但是随着信杂比(signal to clutter ratio)的降低,PGA 的补偿性能可能会随之降低<sup>[76]</sup>.

## 2 高轨道 SAR 系统的电离层效应

随着对地观测需求的不断提高,传统星载 SAR 由于覆盖范围小、重访时间长等缺点,已经无法满足地学的应用需求.因此,高轨道 SAR 系统日益受到人们的关注<sup>[11,77]</sup>.高轨道 SAR 系统主要包括 GEO-SAR<sup>[12,21]</sup>和月基 SAR<sup>[22,78-79]</sup>,它们具有重访周期短、成像范围大、实时性强等优势.然而,在实现覆盖范围增大的同时,轨道高度的增加也使得合成孔径时间大大增加.通常,这类 SAR 系统的合成孔径时间长达数百秒乃至上千秒.因此,在分析高轨道 SAR 系统的电离层效应时,必须在考虑电离层的空间不均匀性的基础上,同时考虑其时间变化特性.

月基 SAR 系统和 GEOSAR 同属高轨道 SAR 系统,但是电离层效应对它们的影响截然不同:首先,GEOSAR 仅受地球电离层效应的影响,而月基 SAR 则受地球电离层和月球电离层的共同影响;其次,GEOSAR 可以通过采用低系统带宽抑制色散效应的影响,而月基 SAR 则由于轨道和成像几何的限制,在观测时必须采用大带宽才能满足观测需求,因此,月基 SAR 更容易受到色散效应的影响;再次,在相同合成孔径时间下,月基 SAR 的多普勒带宽更低,因此,其方位向成像受电离层的影响远小于

GEOSAR;最后,GEOSAR 可以通过设计或选择轨道参数,最大程度地规避电离层闪烁效应的影响<sup>[80]</sup>.但是,月基 SAR 的轨道可以近似为月球轨道,无法人为改变.因此,月基 SAR 无法避免电离层闪烁效应的影响.

如前所述,GEOSAR 和月基 SAR 受电离层效应的影响有诸多不同,但它们的电离层效应可以放到同一个体系下讨论.电离层效应主要包括 FR 效应、背景电离层效应和电离层闪烁三大类,其中,FR 效应与轨道高度无关,对低轨 SAR 和中高轨 SAR 影响机理相同,而背景电离层效应和电离层闪烁的时间变化特性必须加以考虑.

## 2.1 时空变化背景电离层效应对高轨道 SAR 系统的影响

学术界很早就注意到高轨道 SAR 系统背景电离层效应存在时间变化特性<sup>[81-82]</sup>.有的学者系统地分析了时空变化电离层效应对 GEOSAR 的影响<sup>[83-85]</sup>,并利用 GPS/GNSS 信号对时空变化电离层效应做了验证<sup>[86-87]</sup>,结果表明时空变化的背景电离层效应不但干扰 GEOSAR 距离向成像,还会对其方位向成像产生不利影响.Xu 等分析了月基 SAR 的背景电离层效应时空变化特性,指出背景电离层常数项会干扰月基 SAR 距离向成像,时空变化部分虽然不会影响其方位向聚焦,但会导致月基 SAR 的几何定位精度出现偏差<sup>[88-89]</sup>.可见,时空变化背景电离层效应足以影响高轨道 SAR 系统的成像效果.

时空变化背景电离层效应对高轨道 SAR 系统的影响同样可以从距离向成像和方位向成像两个方面进行分析.它对距离向成像的影响主要包括:

1) 距离向偏移.对于 GEOSAR 和月基 SAR 而言,距离向偏移  $\Delta L_r$  可表示为

$$\Delta L_r = \Delta L_{r0} + \Delta L_{r1}, \quad (23)$$

$$\Delta L_{r0} = A \cdot C_{\text{TECO}}/f_c^2, \quad (24)$$

$$\Delta L_{r1} = \frac{P_1^2}{8P_2} + \frac{P_1^3 P_3}{16P_2^3} + \frac{9P_3^2 - 4P_2 P_4}{128P_2^5} P_1^4 - \frac{R_1^2}{4R_2} - \frac{R_1^3 R_3}{8R_2^3} - \frac{9R_3^2 - 4R_2 R_4}{64R_2^5} R_1^4, \quad (25)$$

其中,  $C_{\text{TECO}}$  为时空变化电离层 TEC 的常数项,  $R_i$ ,  $i=1, \dots, 4$  为斜距历时随方位时间的  $i$  阶变化率,  $P_i = 2A/f_c^2 k_i + 2R_i$ ,  $i=1, \dots, 4$ ,  $k_i$  为电离层 TEC 随方位时间的  $i$  阶变化率.

显而易见,距离向偏移由两部分组成:第一部分是电离层 TEC 的常数项引起的,这也是基于“冰

冻场”假设下的距离向偏移;第二部分的距离向偏移与电离层 TEC 时空变化导致的多普勒效应有关.

2) 距离向散焦.电离层的色散效应会导致对 SAR 系统的回波信号进行匹配滤波时出现失配现象,降低 SAR 距离向图像分辨率.背景电离层效应导致的高轨道 SAR 系统的距离向散焦同样可以用 QPE 和 CPE 来描述,QPE 和 CPE 可以分别表示为

$$E_{\text{QPE}} = \frac{\pi AB^2}{cf_c^3} C_{\text{TECO}}, \quad E_{\text{CPE}} = \frac{\pi AB^3}{2cf_c^4} C_{\text{TECO}}, \quad (26)$$

其中,QPE 和 CPE 的阈值分别为  $\pi/8$  和  $\pi/4$ .

时空变化背景电离层效应对方位向成像的影响与电离层 TEC 常数项无关,而与电离层 TEC 的时空变化率有关.时空变化背景电离层效应对方位向成像的影响表现在方位向位移和方位向散焦两方面:

1) 方位向偏移.背景电离层效应导致的高轨道 SAR 系统的方位向偏移可以表示为

$$\Delta L_a = V_g \cdot \left( \frac{P_1}{2P_2} + \frac{3P_1^2 P_3}{8P_2^3} + \frac{9P_3^2 - 4P_2 P_4}{16P_2^5} P_1^3 - \frac{R_1}{2R_2} - \frac{3R_1^2 R_3}{8R_2^3} - \frac{9R_3^2 - 4R_2 R_4}{16R_2^5} R_1^3 \right), \quad (27)$$

其中,  $V_g$  为波束速度.

2) 方位向散焦.背景电离层时空变化引起的多普勒偏移会带来方位向二次相位误差 (azimuth Quadratic Phase Error,  $\text{QPE}_a$ , 其量值记为  $E_{\text{QPE}_a}$ ) 和方位向三次相位误差 (azimuth Cubical Phase Error,  $\text{CPE}_a$ , 其量值记为  $E_{\text{CPE}_a}$ ).显然,它们会影响方位向成像质量. $\text{QPE}_a$  和  $\text{CPE}_a$  可以分别表示为

$$E_{\text{QPE}_a} = \frac{\pi c}{2f_c} \Psi_Q f_{\text{dr}}^2 T_{\text{sar}}^2, \quad (28)$$

$$\Psi_Q = \frac{1}{4P_2} + \frac{3P_1 P_3}{8P_2^3} + 3P_1^2 \frac{9P_3^2 - 4P_2 P_4}{32P_2^5} - \frac{1}{8R_2} - \frac{3R_1 R_3}{16R_2^3} - 3R_1^2 \frac{9R_3^2 - 4R_2 R_4}{64R_2^5}, \quad (28a)$$

$$E_{\text{CPE}_a} = \frac{\pi c^2}{4f_c^2} \Psi_C f_{\text{dr}}^3 T_{\text{sar}}^3, \quad (29)$$

$$\Psi_C = \frac{P_3}{8P_2^3} + P_1 \frac{9P_3^2 - 4P_2 P_4}{16P_2^5} - \frac{R_3}{32R_2^3} - \frac{R_1}{16R_2^3} \frac{9R_3^2 - 4R_2 R_4}{64R_2^5}, \quad (29a)$$

其中, $\text{QPE}_a$  和  $\text{CPE}_a$  的阈值分别为  $\pi/8$  和  $\pi/4$ .当相位误差超过阈值时, $\text{QPE}_a$  将导致主瓣展宽,旁瓣上升,从而影响方位向成像质量. $\text{CPE}_a$  可能会引起方位向成像结果的旁瓣不对称.

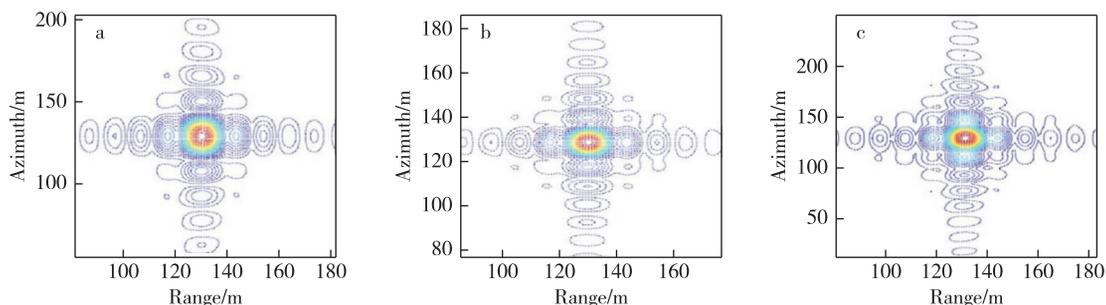


图6 在背景电离层效应影响下,合成孔径时间为(a)100 s,(b)300 s,(c)500 s时,GEOSAR的点目标成像结果<sup>[75]</sup>.其中,仿真参数为:系统带宽80 MHz,波长0.24 m;电离层参数为: $C_{TECO}=68.3$  TECU,

$$k_1=0.0068 \text{ TECU/s}, k_2=7.32 \times 10^{-6} \text{ TECU/s}^2, k_3=4.42 \times 10^{-12} \text{ TECU/s}^3, k_4=0$$

Fig.6 The single point target response of the GEOSAR under the effects of background ionosphere within a synthetic aperture time of (a) 100 s,(b) 300 s,(c) 500 s<sup>[75]</sup>.The simulation parameters are given as:system bandwidth 80 MHz,wavelength 0.24 m.Ionospheric parameters are: $C_{TECO}=68.3$  TECU, $k_1=0.0068$  TECU/s,

$$k_2=7.32 \times 10^{-6} \text{ TECU/s}^2, k_3=4.42 \times 10^{-12} \text{ TECU/s}^3, k_4=0$$

图6给出了不同合成孔径时间下,背景电离层效应对GEOSAR的点目标二维成像的影响<sup>[83]</sup>.在给定的电离层参数下,距离向偏移为35.2 m,方位向偏移仅为4.3 m.系统带宽为80 MHz时,GEOSAR的距离向成像出现散焦.同时,其方位向成像散焦现象会随着合成孔径时间的增加而变得越来越严重.

为了对比时空变化背景电离层效应对月基SAR和GEOSAR的影响,给出了相同系统和电离层参数下的月基SAR成像结果,如图7所示.可以看到,电离层TEC的时空变化率引起的距离向偏移相对整体距离向偏移较小.因此,与GEOSAR相似,月基SAR的距离向偏移量仍为35.2 m.此外,月基SAR的距离向成像结果同样出现散焦现象.然而,背景电离

层效应对月基SAR方位向成像的影响则与其GEOSAR的影响截然不同:月基SAR的方位向偏移为25.12 m,远大于GEOSAR的方位向偏移.此外,即使合成孔径时间为500 s,月基SAR的聚焦也不会受背景电离层效应的影响.

上述分析表明,时空变化的背景电离层效应会干扰高轨道SAR系统的成像质量.因此,有必要对此效应进行补偿.Hu等提出可以利用PGA算法校正时空变化的背景电离层效应<sup>[87]</sup>,并指出此方法具有良好的聚焦效果.随后,他们提出利用子孔径划分的方法提取成像残余误差,从而对时空变化电离层效应导致的散焦进行补偿<sup>[90]</sup>.该方法在较精确地给出相位误差后,对背景电离层效应导致的散焦进行补偿,

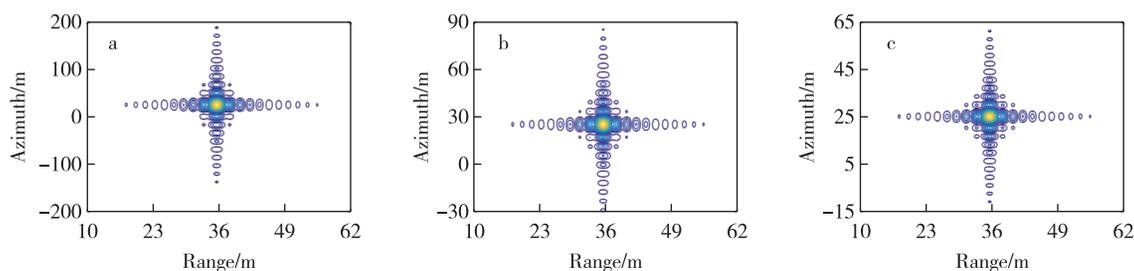


图7 在背景电离层效应影响下,合成孔径时间为(a)100 s,(b)300 s,(c)500 s时,月基SAR的点目标成像结果<sup>[75]</sup>.其中,仿真参数有:系统带宽80 MHz,波长0.24 m,入射角 $30^\circ$ ;电离层参数为: $C_{TECO}=68.3$  TECU,

$$k_1=0.0068 \text{ TECU/s}, k_2=7.32 \times 10^{-6} \text{ TECU/s}^2, k_3=4.42 \times 10^{-12} \text{ TECU/s}^3, k_4=0$$

Fig.7 The single point target response of the Moon-based SAR under the effects of background ionosphere within a synthetic aperture time of (a) 100 s,(b) 300 s,(c) 500 s<sup>[75]</sup>.The simulation parameters are given as:system bandwidth 80 MHz,wavelength 0.24 m,the incident angle is  $30^\circ$ .Ionospheric parameters are:

$$C_{TECO}=68.3 \text{ TECU}, k_1=0.0068 \text{ TECU/s}, k_2=7.32 \times 10^{-6} \text{ TECU/s}^2, k_3=4.42 \times 10^{-12} \text{ TECU/s}^3, k_4=0$$

结果显著地提高了图像质量.

## 2.2 电离层闪烁效应对高轨道 SAR 系统的影响

高轨道 SAR 系统同样受到电离层闪烁效应的影响.与传统星载 SAR 不同,由于合成孔径时间较长,电离层中小尺度的不规则体会随时间发生变化,从而导致电离层闪烁效应具有明显的时间特征.此外,由于高轨道 SAR 系统覆盖范围大, SAR 系统波束照射范围内可能包括若干个不相干的电离层不规则体.因此,分析高轨道 SAR 系统的闪烁效应时,必须考虑电离层的时空变化特性.由于电离层闪烁对高轨道 SAR 系统的影响机理相对复杂,目前针对这类效应的研究较少,且基本针对电离层闪烁对 GEOSAR 的影响展开<sup>[80,86,91-94]</sup>.例如,有研究表明<sup>[91]</sup>,电离层闪烁对 GEOSAR 方位向成像质量构成严重威胁(图 8):随着电离层电子浓度起伏强度的增加,GEOSAR 的方位向成像散焦愈发严重,并在方位向出现条带状散焦现象.因此,必须对电离层闪烁效应进行补偿.

针对高轨道 SAR 系统的电离层闪烁效应的抑制,目前主要有两种方法<sup>[80,94]</sup>:一种是通过设计轨道参数,尽可能地避免 SAR 系统经过电离层闪烁多

发地区,从而规避电离层闪烁效应;另一种是利用自聚焦算法,针对电离层闪烁效应影响下的高轨道 SAR 系统成像进行修正. Wang 等的研究表明,自聚焦算法可以较好地抑制 GEOSAR 的电离层闪烁效应,实现 GEOSAR 系统成像有效聚焦(图 9)<sup>[94]</sup>.

## 3 总结与展望

近年来,利用 SAR 系统进行全球观测受到人们的普遍关注.然而,低载频 SAR 信号在穿过电离层时不可避免地受到电离层效应的影响.本文从法拉第旋转、背景电离层和电离层不规则体三方面介绍了电离层效应对不同高度轨道 SAR 系统成像性能的影响,并总结了这些效应的补偿修正方案.结果表明,FR 效应会影响极化 SAR 和极化干涉 SAR 数据的质量,进而直接影响这些数据的应用.背景电离层效应和电离层不规则体的多重散射效应会严重影响 SAR 系统的距离向成像质量,而电离层闪烁效应则会对 SAR 系统方位向成像构成威胁.此外,轨道高度较高时,背景电离层效应的时空变化部分也会干扰 SAR 系统的成像质量.

虽然目前关于电离层效应的研究成果层出不穷

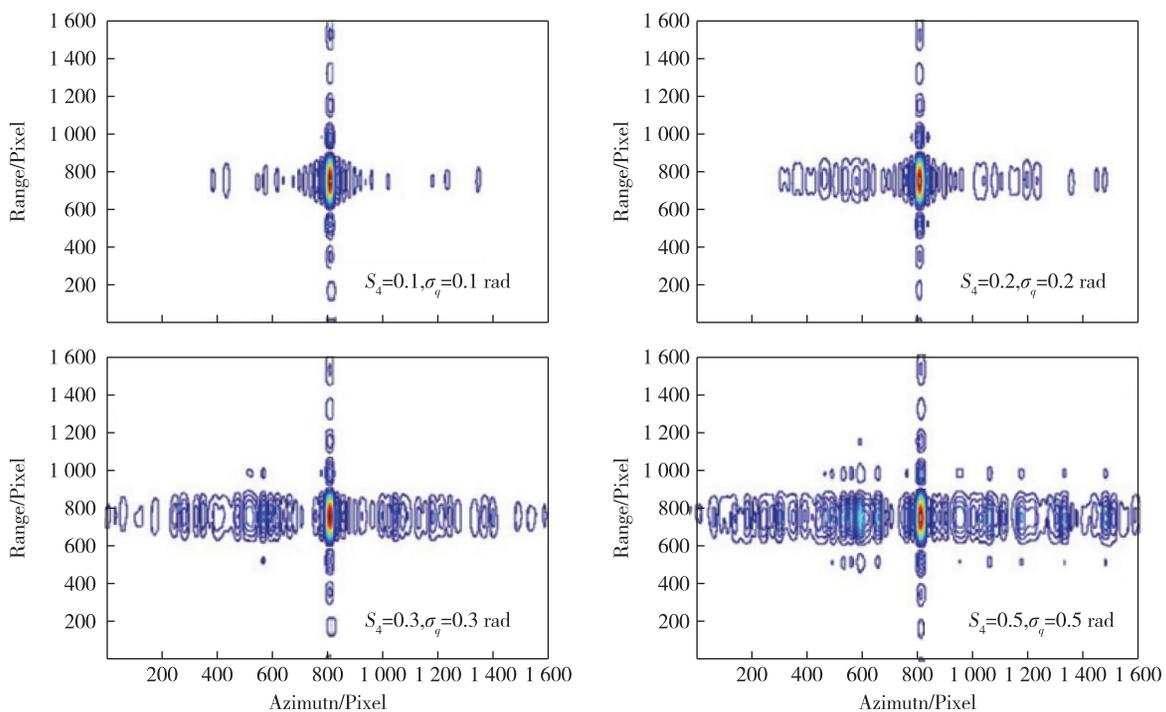


图 8 在不同电离层闪烁指数影响下 GEOSAR 的点目标成像结果<sup>[91]</sup>.

其中,仿真参数为:合成孔径时间 120 s,系统带宽 80 MHz,波长 0.24 m

Fig. 8 The single point target responses of the GEOSAR in the presence of the ionospheric scintillations with different intensities<sup>[91]</sup>. The simulation parameters are given as: synthetic aperture time, 120 s; system bandwidth, 80 MHz, wavelength 0.24 m

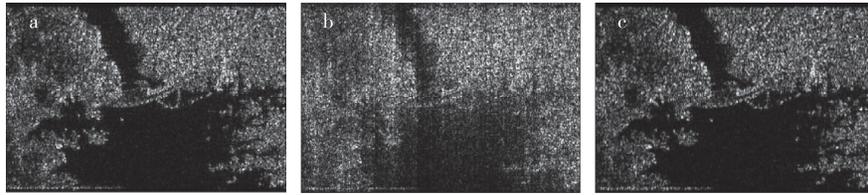


图9 GEOSAR 区域成像仿真结果

a.理想成像结果;b.受电离层闪烁影响后的成像结果;c.利用自聚焦算法补偿后的成像算法<sup>[94]</sup>

Fig.9 The single point target responses of the GEOSAR

(a) ideal SAR image,(b) degraded image by scintillation,(c) autofocus image<sup>[94]</sup>

并取得了令人瞩目的成果,但是仍然存在诸多问题需要进一步深入研究.主要有:

1) 时空变化的 FR 效应.当合成孔径时间较长时,FR 效应也存在时空变化特征.因此,SAR 系统获取的同一景数据在不同位置所受的 FR 效应不同.若不能对时空变化的法拉第旋转效应进行有效分析和校正,可能会严重影响极化 SAR 数据和极化干涉 SAR 数据的应用.

2) 时空变化的背景电离层效应对 P 波段 LEOSAR 的影响.传统上认为 LEOSAR 符合“冰冻场”假设,但针对高轨道 SAR 系统背景电离层效应的分析发现,时空变化背景电离层效应与合成孔径时间无关,而与电离层的时空变化率有关.载频在 P 波段时,背景电离层效应大大增强.因此,非常有必要研究时空变化背景下电离层效应的影响.

3) 电离层不规则体的影响.目前研究者从不同方面针对电离层不规则体的影响做了分析,但由于电离层不规则体本身的机理非常复杂,仍有很多问题亟待解决.例如,电离层不规则体的漂移运动对 SAR 系统的影响.此外,对于高轨道 SAR 系统而言,电离层不规则体的影响更为复杂,特别是高轨道 SAR 的合成孔径时间远大于电离层不规则体的生命周期,并且在覆盖范围内可能存在多个电离层不规则体.因此,要根据电离层不规则体的生成和影响机制,对电离层不规则体的效应进行更深入的分析.同时,需要对电离层闪烁效应自聚焦补偿的性能展开更多的分析.

4) 电离层效应对 SAR 系统成像的耦合影响.在理论分析中,常常将 FR 效应、背景电离层效应和电离层不规则体单独进行研究.然而,在现实中这些效应并非简单的线性叠加,而是耦合在一起,共同对 SAR 系统的成像性能造成影响.因此,需要针对这些效应的耦合影响进行综合分析,探究它们对 SAR 系统成像性能的影响以及探索补偿这些效应的方法.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Ulaby F T, Long D G. Microwave radar and radiometric remote sensing [ M ]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2014
- [ 2 ] Chen K S. Principles of synthetic aperture radar imaging: a system simulation approach [ M ]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016
- [ 3 ] Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar [ J ]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6-43
- [ 4 ] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载 SAR 技术的现状与发展趋势 [ J ]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229-240  
LI Chunsheng, WANG Weijie, WANG Pengbo, et al. Current situation and development trends of spaceborne SAR technology [ J ]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(1): 229-240
- [ 5 ] Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics [ J ]. Remote Sensing, 2013, 5(2): 716-807
- [ 6 ] Sun H B, Shimada M, Xu F. Recent advances in synthetic aperture radar remote sensing: systems, data processing, and applications [ J ]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(11): 2013-2016
- [ 7 ] Skolnik M I. Radar handbook [ M ]. 2nd ed. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1990
- [ 8 ] Liebe H J. Modeling attenuation and phase of radio waves in air at frequencies below 1000 GHz [ J ]. Radio Science, 1981, 16(6): 1183-1199
- [ 9 ] Recommendation ITU-R P.676-11: attenuation by atmospheric gases [ R ]. Geneva, 2016
- [ 10 ] Heliere F, Lin C C, Fois F, et al. BIOMASS: a P-band SAR earth explorer core mission candidate [ C ] // 2009 IEEE Radar Conference. IEEE, 2009: 1-6
- [ 11 ] Moussessian A, Chen C, Edelstein W, et al. System concepts and technologies for high orbit SAR [ C ] // IEEE International Microwave Symposium Digest, 2005: 1623-1626
- [ 12 ] Bruno D, Hobbs S E, Ottavianelli G. Geosynchronous synthetic aperture radar: concept design, properties and possible applications [ J ]. Acta Astronautica, 2006, 59(1/2/3/4/5): 149-156

- [13] Xu Z, Chen K S. Effects of the earth's curvature and lunar revolution on the imaging performance of the moon-based synthetic aperture radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5868-5882
- [14] Ishimaru A, Kuga Y S, Liu J, et al. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz [J]. *Radio Science*, 1999, 34(1): 257-268
- [15] Gail W B. Effect of Faraday rotation on polarimetric SAR [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(1): 301-307
- [16] Davies K, Smith E K. Ionospheric effects on satellite land mobile systems [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, 44(6): 24-31
- [17] Tsunoda R T. High-latitude F region irregularities: a review and synthesis [J]. *Reviews of Geophysics*, 1988, 26(4): 719-760
- [18] Xu Z W, Wu J, Wu Z S. A survey of ionospheric effects on space-based radar [J]. *Waves in Random Media*, 2004, 14(2): S189-S273
- [19] Lawrence R S, Little C G, Chivers H J A. A survey of ionospheric effects upon earth-space radio propagation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1964, 52(1): 4-27
- [20] 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
- [21] Tomiyasu K, Pacelli J L. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, GE-21(3): 324-329
- [22] Moccia A, Renga A. Synthetic aperture radar for earth observation from a lunar base: performance and potential applications [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1034-1051
- [23] Bickel S H, Bates R H T. Effects of magneto-ionic propagation on the polarization scattering matrix [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(8): 1089-1091
- [24] Rignot E J M. Effect of Faraday rotation on L-band interferometric and polarimetric synthetic-aperture radar data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 383-390
- [25] Wright P A, Quegan S, Wheadon N S, et al. Faraday rotation effects on L-band spaceborne SAR data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(12): 2735-2744
- [26] Freeman A, 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
- [27] Freeman A. Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to Faraday rotation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1617-1624
- [28] Gilman M, Smith E, Tsynkov S. Single-polarization SAR imaging in the presence of Faraday rotation [J]. *Inverse Problems*, 2014, 30(7): 075002
- [29] Quegan S, Lomas M R. The interaction between Faraday rotation and system effects in synthetic aperture radar measurements of backscatter and biomass [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(8): 4299-4312
- [30] Isoguchi O, Ishizuka K, Tadono T, et al. Effect of Faraday rotation on L-band ocean normalized radar cross section and wind speed detection [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(7): 2477-2485
- [31] Le Toan T, Quegan S, Davidson M W J, et al. The BIOMASS mission: mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(11): 2850-2860
- [32] Jehle M, Ruegg M, Zuberbuhler L, et al. Measurement of ionospheric Faraday rotation in simulated and real spaceborne SAR data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1512-1523
- [33] Chen J, Quegan S. Improved estimators of Faraday rotation in spaceborne polarimetric SAR data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(4): 846-850
- [34] Rogers N C, Quegan S. The accuracy of Faraday rotation estimation in satellite synthetic aperture radar images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4799-4807
- [35] Wang C, Liu L, Chen L, et al. Improved TEC retrieval based on spaceborne PolSAR data [J]. *Radio Science*, 2017, 52(3): 288-304
- [36] Wang C, Chen L, Zhao HS, et al. Ionospheric reconstructions using Faraday rotation in spaceborne polarimetric SAR data [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(11): 1169
- [37] Doser A B, Dunham M E. Transionospheric signal detection with chirped wavelets [C] // *Conference Record of the 31st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 1997: 1499-1503
- [38] Doser A B. A new time/frequency technique for detecting chirped signals [C] // *Conference Record of the 32nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 1998: 1650-1654
- [39] Fitzgerald T J. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at VHF [C] // *IEEE Radar Conference*, 1997: 237-239
- [40] Liu J, Kuga Y, Ishimaru A, et al. Ionospheric effects on SAR imaging: a numerical study [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(5): 939-947
- [41] Xu Z W, Wu J, 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
- [42] Tsynkov S V. On SAR imaging through the Earth's ionosphere [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2009, 2(1): 140-182
- [43] Smith E M, Tsynkov S V. Dual carrier probing for spaceborne SAR imaging [J]. *SIAM Journal on Imaging Sci-*

- ences,2011,4(2):501-542
- [44] Wang C,Zhang M,Xu Z W, et al.Cubic phase distortion and irregular degradation on SAR imaging due to the ionosphere [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2015,53(6):3442-3451
- [45] Wang C,Chen L,Liu L.Space-borne SAR imaging degradation due to the ionospheric high order dispersive delay [C] // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS),2016:1098-1101
- [46] 张东和,萧佐.利用 GPS 计算 TEC 的方法及其对电离层扰动的观测 [J]. 地球物理学报,2000,43(4):451-458  
ZHANG Donghe,XIAO Zuo.Method of calculating TEC with GPS data and its application to the ionospheric disturbances [J]. Chinese Journal of Geophysics,2000,43(4):451-458
- [47] Rosen P A,Hensley S,Chen C.Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band interferometric SAR data [C] // IEEE Radar Conference,2010:1459-1463
- [48] 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
- [49] Bamler R,Eineder M.Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2005,2(2):151-155
- [50] Shteinshleiger V B.Obtaining high resolution in transionospheric space-borne VHF-band SAR for earth remote sensing [C] // Radar Systems,1997:268-272
- [51] 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
- [52] Meyer F J.Performance requirements for ionospheric correction of low-frequency SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2011,49(10):3694-3702
- [53] Wang C,Zhang M,Xu Z W, et al.TEC retrieval from spaceborne SAR data and its applications [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics,2014,119(10):8648-8659
- [54] Ishimaru A.Theory and application of wave propagation and scattering in random media [J]. Proceedings of the IEEE,1977,65(7):1030-1061
- [55] Ishimaru A.Wave propagation and scattering in random media [M]. New York:Academic Press,1978:220-233
- [56] Xu Z W,Wu J,Wu Z S.Statistical temporal behaviour of pulse wave propagation through continuous random media [J]. Waves in Random Media,2003,13(1):59-73
- [57] Xu Z W,Wu J,Wu Z S.Second-order statistics of radio wave propagation through the structured ionosphere [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,2004,66(11):971-980
- [58] Knepp D L,Brown W A.Average received signal power after two-way propagation through ionized turbulence [J]. Radio Science,1997,32(4):1575-1596
- [59] Wang C,Zhang M,Xu Z W, et al.Effects of anisotropic ionospheric irregularities on space-borne SAR imaging [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2014,62(9):4664-4673
- [60] Briggs B H,Parkin I A.On the variation of radio star and satellite scintillations with zenith angle [J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics,1963,25(6):339-366
- [61] Wernik A W,Liu C H.Application of the scintillation theory to ionospheric irregularities studies [J]. Artificial Satellites,1975,10(1):36-58
- [62] Crane R K.Ionospheric scintillation [J]. Proceedings of the IEEE,1977,65(2):180-199
- [63] Yeh K C,Liu C H.Radiowave scintillations in the ionosphere [J]. Proceedings of the IEEE,1982,70(4):324-360
- [64] Quegan S,Lamont J.Ionospheric and tropospheric effects on synthetic aperture radar performance [J]. International Journal of Remote Sensing,1986,7(4):525-539
- [65] Gray A L,Mattar K E,Sofko G.Influence of ionospheric electron density fluctuations on satellite radar interferometry [J]. Geophysical Research Letters,2000,27(10):1451-1454
- [66] Li L L,Li F.SAR imaging degradation by ionospheric irregularities based on TFTPFCF analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2007,45(5):1123-1130
- [67] Chapin E,Chan S F,Chapman B D, et al.Impact of the ionosphere on an L-band space based radar [C] // IEEE Conference on Radar,2006, DOI: 10.1109/RADAR.2006.1631775
- [68] Carrano C S,Groves K M,Caton R G.Simulating the impacts of ionospheric scintillation on L band SAR image formation [J]. Radio Science,2012,47(4):1-14
- [69] Meyer F J,Chotoo K,Chotoo S D, et al.The influence of equatorial scintillation on L-band SAR image quality and phase [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2016,54(2):869-880
- [70] Kim J S,Papathanassiou K P,Quegan S, et al.Estimation and correction of scintillation effects on spaceborne P-band SAR images [C] // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2012:5101-5104
- [71] Rogers N C,Quegan S,Kim J S, et al.Impacts of ionospheric scintillation on the BIOMASS P-band satellite SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2014,52(3):1856-1868
- [72] Shteinshleiger V B,Dzenkevich A V,Manikov V, et al.On a VHF transionospheric synthetic aperture radar for remote terrain sensing [J]. Journal of Communications Technology & Electronics,1997,42(6):668-675
- [73] Quegan S,Green J,Zandona-Schneider R, et al.Quantifying and correcting ionospheric effects on P-band SAR images [C] // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,2008:541-544
- [74] Knepp D L,Groves K M.The effect of ionospheric scintillation on phase gradient autofocus processing of synthetic aperture radar [C] // IEEE European Conference on Antennas and Propagation,2013:3664-3667
- [75] Hsueh B,Fotopoulos G,Adve R.A study on smearing due

- to ionospheric phase scintillation in SAR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34 ( 5 ): 1823-1837
- [76] Li Z, Quegan S, Chen J, et al. Performance analysis of phase gradient autofocus for compensating ionospheric phase scintillation in BIOMASS P-band SAR data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12 ( 6 ): 1367-1371
- [77] Edelstein W, Madsen S N, Moussessian A, et al. Concepts and technologies for synthetic aperture radar from MEO and geosynchronous orbits [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2005, DOI: 10.1117/12.578989
- [78] Fornaro G, Franceschetti G, Lombardini F, et al. Potentials and limitations of moon-borne SAR imaging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7) :3009-3019
- [79] Xu Z, Chen K S. On signal modeling of moon-based synthetic aperture radar ( SAR ) imaging of earth [ J ]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3) :486
- [80] Hu C, Li Y H, Dong X C, et al. Avoiding the ionospheric scintillation interference on geosynchronous SAR by orbit optimization [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(11) :1676-1680
- [81] Bruno D, Hobbs S E. Radar imaging from geosynchronous orbit: temporal decorrelation aspects [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7) :2924-2929
- [82] Hobbs S, Mitchell C, Forte B, et al. System design for geosynchronous synthetic aperture radar missions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(12) :7750-7763
- [83] Tian Y, Hu C, Dong X, 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
- [84] Dong X C, Long T, Hu C, 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
- [85] Hu C, Li Y H, Dong X C, et al. Impacts of temporal-spatial variant background ionosphere on repeat-track GEO D-InSAR system [ J ]. *Remote Sensing*, 2016, 8 (11) :916
- [86] Dong X C, Hu C, Tian Y, 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
- [87] Hu C, Tian Y, Yang XP, 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
- [88] Xu Z, Chen K S, Xu P, et al. Ionospheric effects on the lunar-based radar imaging [ C ] // 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2017:5390-5393
- [89] Xu Z, Chen K S. Temporal-spatial varying background ionospheric effects on the moon-based synthetic aperture radar imaging: a theoretical analysis [ J ]. *IEEE Access*, 2018, 6:66767-66786
- [90] 田野,胡程,董锡超,等.时变大气层效应对地球同步轨道 SAR 成像影响的分析与补偿 [J]. *信号处理*, 2017, 33(10) :1279-1286  
TIAN Ye, HU Cheng, DONG Xichao, et al. Atmosphere effects on geosynchronous SAR: theoretical analysis and compensation method [ J ]. *Journal of Signal Processing*, 2017, 33(10) :1279-1286
- [91] Hu C, Li Y H, Dong X C, et al. Performance analysis of L-band geosynchronous SAR imaging in the presence of ionospheric scintillation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(1) :159-172
- [92] Ji Y F, Zhang Q L, Zhang Y S, et al. L-band geosynchronous SAR imaging degradations imposed by ionospheric irregularities [ J ]. *Science China Information Sciences*, 2017, 60(6) :060308
- [93] Li Y H, Hu C, Ao D Y, et al. Ionospheric scintillation impacts on L-band geosynchronous D-InSAR system: models and analysis [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(12) :4862-4873
- [94] Wang R, Hu C, Li Y, et al. Joint amplitude-phase compensation for ionospheric scintillation in GEO SAR imaging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(6) :3454-3465

## Ionospheric effects on satellite and moon-based SAR: current situation and prospects

CHEN Kunshan<sup>1</sup> XU Zhen<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** As an active sensor, Synthetic Aperture Radar ( SAR ) finds many applications in earth observation. How-

ever, the signal transmission and reception are persistently disturbed through the ionosphere layer at L-band and below. Ionospheric effect brings phase and amplitude errors to the radio signal traversed therein, and further exerts severe impact on the SAR image quality. In this paper, we review the spatial-temporal ionospheric effects on the imaging performance of SAR systems that operate at different orbital altitudes. Three kinds of effects are investigated: the Faraday rotation, the background ionospheric effects and ionospheric scintillation. Compensation approaches for these effects are then summarized. Finally, problematic issues associated with the ionospheric effects are outlined in the context of SAR theory and applications.

**Key words** ionospheric effects; synthetic aperture radar; Faraday rotation; background ionospheric effects; ionospheric scintillation; imaging performance