

文章编号: 2095-4980(2017)02-0198-08

基于频带分割法反演电离层 TEC 参数

王楠, 付海洋*, 李索, 徐丰

(复旦大学 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要: 星载合成孔径雷达(SAR)系统会受到电离层带来的相位影响, 降低星载SAR系统成像质量, 对低频段宽带星载SAR尤其明显。为了消除电离层对星载SAR带来的相位影响, 基于陆地观测技术卫星2号(ALOS-2)星载SAR数据, 采用距离向频带分割法来估计电离层电子总含量(TEC)参数。验证推导距离向频带分割法的最优估计精确度, 并利用ALOS-2数据, 采用距离向频带分割法反演得到二维电离层TEC参数分布, 分析了距离向分辨率单元数对反演精确度的影响。另外, 分析了雷达图像不同区域采用距离向频带分割法的估计精确度。结果表明频带分割法具有很强的鲁棒性, 可以有效地反演电离层TEC参数分布, 同时距离向分辨率单元数和成像区域场景地形起伏也影响反演电离层参数的精确度。

关键词: 星载合成孔径雷达(SAR); 电离层电子总含量(TEC); 距离向频带分割法; 陆地观测技术卫星2号(ALOS-2)

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0198

Retrieving ionospheric TEC based on the split-spectrum method

WANG Nan, FU Haiyang*, LI Suo, XU Feng

(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The ionosphere can affect the phase of spaceborne Synthetic Aperture Radar(SAR) signal, which will degrade the quality of SAR imaging, especially for the low frequency wideband spaceborne SAR. Based on Advanced Land Observing Satellite-2(ALOS-2) SAR data, the ionospheric Total Electron Content(TEC) distribution is estimated by using the split-spectrum method in order to eliminate the impact of ionosphere. Firstly, the accuracy of the split-spectrum method for retrieving ionospheric TEC is validated. Then, the two-dimensional ionospheric TEC distribution is obtained based on the split-spectrum method using ALOS-2 data. The range resolution cell effect is also analyzed. The ionospheric TEC estimation accuracies of the split-spectrum method for three different typical areas in SAR image are compared. The results show that the split-spectrum method is robust to estimate the two-dimensional ionospheric TEC effectively. The range resolution cell and different scenes in SAR image also affect the TEC estimation accuracy of the split-spectrum method.

Keywords: spaceborne Synthetic Aperture Radar; ionospheric Total Electron Content; split-spectrum method; Advanced Land Observing Satellite-2

星载 SAR 是一种能够全天时、全天候工作的雷达。星载 SAR 系统成像时, 由电离层带来的相位会与地形、地面变化带来的相位混叠^[1], 从而影响成像质量。电离层对 L 波段(1~2 GHz)SAR 有不可忽略的影响, 包括群时延、色散、法拉第旋转、闪烁等效应。色散效应导致穿过电离层传播的星载 SAR 信号脉冲展宽与失真, 图像散焦。因此为保证 L 波段星载 SAR 系统的成像质量, 需要将电离层相位带来的色散效应消除^[2]。

基于电离层作用 SAR 成像的原理, 以往研究提出了利用电离层效应从 SAR 系统数据中估计电离层电子含量(TEC)的反演模型, 并对图像进行补偿^[3~6]。Freeman 通过估计全极化 SAR 信号中的法拉第旋转角信息来反演信号传播路径上的电离层 TEC 参数, 并进行了图像补偿分析^[3~4]。Jehle 等依据电离层色散效应影响匹配滤波, 从

收稿日期: 2016-10-10; 修回日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(414040125)

*通信作者: 付海洋 email: haiyang_fu@fudan.edu.cn

而导致信号展宽的特性,提出通过改变匹配滤波器的调频率,寻找输出信号峰值旁瓣比最大时的调频率来估计电离层 TEC^[5]。王成等分析了 Jehle 提出的双频 TEC 自适应估计方法在 TEC 闪烁效应下存在的不足,提出了基于 SAR 回波信号的三频相位自适应 TEC 反演方法,并给出了反演电离层参数分布的仿真结果^[6]。

对于星载合成孔径雷达系统,电离层 TEC 参数校正主要包括距离向频带分割法和群时延方法等。Bamler 等详细分析了采用距离向频带分割算法估计 TEC 的精确度,并且证明距离向频带分割算法的估计精确度接近克拉美劳限(Cramer-Rao Bound, CRB),比较了频带分割法和双频/三频方法的估计精确度^[7]。Rosen 和 Bricic 等采用频带分割法来估计距离向子带之间的相位差,通过该相位差来反演 SAR 信号传播路径的电离层 TEC^[8-9]。Gomba 等系统地给出采用距离向频带分割算法消除干涉 SAR 成像系统中的电离层相位,并采用 ALOS-PALSAR 数据验证了距离向频带分割算法估计电离层 TEC 的有效性^[10]。Meyer 等也提出了采用距离向群时延差异法来估计电离层的 TEC 参数,其理论依据是电离层带来的相位超前和群时延具有相反的符号,而由地面变化引起的群时延和相位变化则具有相同的符号^[11]。之前针对距离向频带分割算法的文章,主要是基于 ALOS-PALSAR 的数据来估计电离层 TEC 并去除电离层对 SAR 成像的影响。

本文首先分析电离层 TEC 对星载 SAR 信号相位产生的影响及仿真,其次利用 ALOS-2 数据,验证距离向频带分割算法不同带宽选择对电离层 TEC 参数的影响精确度,然后采用日本 ALOS-2 星载 SAR 卫星数据,采用距离向频带分割算法来估计电离层 TEC 参数,并计算估计电离层 TEC 参数反演的相位精确度。最后,对比分析了该算法使用不同距离向分辨单元以及针对不同区域的估计电离层参数的反演精确度。

1 电离层对星载 SAR 信号相位的影响

考虑电离层对星载 SAR 信号的影响,通常将电离层等效为距离地面高约 400 km 的一层(见图 1),电离层电子总含量 TEC 表示为:

$$TEC = \int n_e(h)dh \quad (1)$$

式中: n_e 为电子密度; h 为电磁波信号传播路径。

根据文献[10],电离层对星载 SAR 信号产生的相位 $\varphi_{\text{iono}}(f)$ 可表示为:

$$\varphi_{\text{iono}}(f) = 2 \times \frac{2\pi K}{cf} \int n_e(h)dh = \frac{4\pi K}{cf} TEC \quad (2)$$

式中: c 为光速; f 为信号频率; K 为常数, $K=40.28 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 。

星载合成孔径雷达发射线性调频信号,信号在通过电离层之后匹配滤波的输出 $S_{\text{out_iono}}(f)$ 表示为:

$$S_{\text{out_iono}}(f) = S_t(f)e^{j\varphi_{\text{iono}}(f)} \cdot S_r^*(f) \quad (3)$$

式中: $S_t^*(f)$ 为发射信号的频域表达式; $S_t(f)e^{j\varphi_{\text{iono}}(f)}$ 为接收信号 $S_r(f)$ 的频域表达式,其中电离层产生的相位超前为 $\varphi_{\text{iono}}(f)$ 。

2 距离向频带分割算法估计 TEC

对于 L 波段星载 SAR 系统(如 ALOS 和 ALOS-2),电离层相位的二阶效应色散影响比较明显。下面分析采用距离向频带分割算法来估计干涉成像时差分电离层 TEC 参数的流程。

2.1 电离层色散相位与地形地面变化相位的混叠

对于重复轨道干涉 SAR 系统,主图像和副图像在 2 次测量时由于时间上的差异,电离层对它们带来的相位影响不同,要得到效果良好的干涉图,需要将 2 次测量之间的电离层 TEC 的差值估计出来并进行补偿。干涉图像的相位中包含了多个分量:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi f}{c} \Delta r_1 + \frac{4\pi f}{c} \Delta r_2 + \frac{4\pi K}{cf} \Delta TEC \quad (4)$$

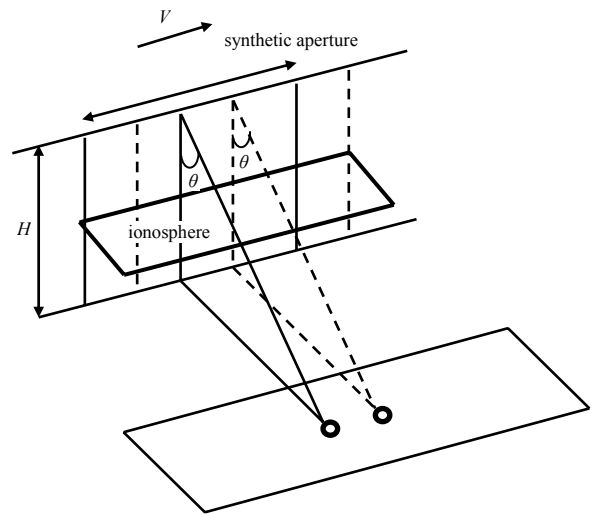


Fig.1 Effect of ionospheric TEC on the spaceborne SAR signal
图 1 电离层对星载 SAR 信号影响示意图

式中: $\Delta\varphi$ 为 2 幅干涉图像之间的相位差; Δr_1 为地形高度; Δr_2 为由于地貌变化而产生的高度差; ΔTEC 为 2 次测量之间电离层 TEC 的差值。在进行干涉成像时, 需要的是因地形高度和地貌变化而产生的相位差, 而式(4)由电离层带来的相位差是干扰项。将式(4)中的 3 个相位项写为:

$$\Delta\varphi_{\text{int}} = \frac{4\pi f}{c} (\Delta r_1 + \Delta r_2) \quad (5)$$

$$\Delta\varphi_{\text{TEC}} = \frac{4\pi K}{cf} \Delta TEC \quad (6)$$

可以看出, 地形高度带来的干涉相位大小与信号的频率成正比, 而电离层带来的色散相位与信号频率成反比, 因此可以利用该特点将由电离层产生的干扰相位与干涉相位区分开来, 从而将 ΔTEC 估计出来。

2.2 使用距离向频带分割法估计电离层 TEC

由文献[7]可知, 在使用距离向频带分割算法估计电离层 TEC 时, 假设 2 幅要进行干涉的图像分别为 U_1 和 U_2 , 分别将 2 幅图像分割为 2 个子带(见图 2), 这样就可以得到 4 个子带图像 $U_{1l}, U_{1h}, U_{2l}, U_{2h}$ 。假设下边带的中心频率为 f_1 , 上边带的中心频率为 f_2 , 将之前得到的 2 幅下边带子图像进行干涉得到 $S_1 = U_{1l} \cdot U_{2l}^*$, 将 2 幅上边带子图像进行干涉得到 $S_2 = U_{1h} \cdot U_{2h}^*$ 。这里通过式(4)可以得到此时 2 幅子带干涉图像的相位为:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{4\pi f_0}{c} (\Delta r_1 + \Delta r_2) \frac{f_1}{f_0} + \frac{4\pi K}{cf_0} \Delta TEC \frac{f_0}{f_1} \quad (7)$$

$$\Delta\varphi_2 = \frac{4\pi f_0}{c} (\Delta r_1 + \Delta r_2) \frac{f_2}{f_0} + \frac{4\pi K}{cf_0} \Delta TEC \frac{f_0}{f_2} \quad (8)$$

式中 f_0 为距离向带宽中心频率。由式(7)和式(8)可以推出 ΔTEC 的计算公式为:

$$\Delta TEC = \frac{\Delta\varphi_1 f_2 - \Delta\varphi_2 f_1}{\frac{4\pi K}{c} \left(\frac{f_2}{f_1} - \frac{f_1}{f_2} \right)} = \frac{cf_0}{4\pi K} \frac{f_1 f_2}{f_0(f_2^2 - f_1^2)} (\Delta\varphi_1 f_2 - \Delta\varphi_2 f_1) \quad (9)$$

由式(9)估计得到 ΔTEC 之后, 可以通过式(2)将由 ΔTEC 产生的相位补偿到图像中。需要注意的是, 在实际应用时需要逐点估计该点的 ΔTEC , 因此在进行估计时, 每个点都需要使用一定数量的距离向分辨单元来进行估计和平均。

2.3 距离向频带分割法的估计精确度

由文献[12]可知, 干涉相位估计的精确度由其相干系数 γ 决定, 可写为:

$$\sigma_{\Delta\varphi_1} = \sigma_{\Delta\varphi_2} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \quad (10)$$

式中 N 为平均估计的样本个数。采用距离向频带分割算法估计电离层 TEC 时, 距离向总带宽为 B , 用来进行干涉的上下子边带的带宽都是 b , 采用的距离向分辨力单元个数为 N , 那么这里实际进行平均分辨力单元个数为 $N_b = N \cdot b / B$, 因此上下边带的相位差 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ 的估计精确度为:

$$\sigma_{\Delta\varphi_1} = \sigma_{\Delta\varphi_2} = \frac{1}{\sqrt{2N_b}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \quad (11)$$

从式(11)中可以看到, 上下子边带的相位差估计精确度不仅由 2 幅图像的相干系数决定, 而且也与子带带宽的大小有关。在文献[7]中, Bamler 分析了距离向频带分割算法的估计精确度与子带带宽之间的关系, 得出结论: 在 $b = B/3$ 时, 算法的估计精确度最高, 达到了最大似然估计法的最优精确度, 此时该算法的估计精确度接近 CRB, 表示为:

$$\sigma_{\Delta\varphi_1} = \sigma_{\Delta\varphi_2} = \frac{1}{\sqrt{2N_b}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} = \sqrt{\frac{3}{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \quad (12)$$

因此, 使用 1/3 距离向带宽作为频带分割的子带宽, 在使用上下子带相位差来估计 ΔTEC 时, 由式(9)和式(12)可以得到:

$$\sigma_{\Delta TEC}^2 = \left(\frac{cf_0}{4\pi K} \right)^2 \left(\frac{f_1 f_2}{f_0(f_2^2 - f_1^2)} \right)^2 (f_2^2 \sigma_{\Delta\varphi_1}^2 + f_1^2 \sigma_{\Delta\varphi_2}^2) \quad (13)$$

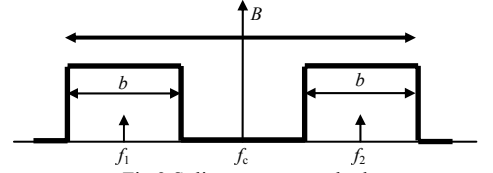


Fig.2 Split-spectrum method
图 2 频带分割法

由式(13)开方可以得到:

$$\sigma_{\Delta TEC} = \left(\frac{cf_0}{4\pi K} \right) \left(\frac{f_1 f_2}{f_0(f_2^2 - f_1^2)} \right) \sqrt{f_2^2 + f_1^2} \sigma_{\Delta \phi_1} \quad (14)$$

当星载 SAR 信号的载波频率远大于信号带宽时, 可以对式(14)进行近似:

$$\frac{f_1 f_2}{f_2^2 - f_1^2} \approx \frac{f_0^2}{(f_2 - f_1)(f_2 + f_1)} = \frac{f_0^2}{\frac{2}{3} B \cdot 2f_0} = \frac{3f_0}{4B} \quad (15)$$

$$\frac{\sqrt{f_2^2 + f_1^2}}{f_0} \approx \sqrt{2} \quad (16)$$

由式(14)、式(15)和式(16)可知:

$$\sigma_{\Delta TEC} = \left(\frac{cf_0}{4\pi K} \right) \frac{3\sqrt{2}f_0}{4B} \sigma_{\Delta \phi_1} \quad (17)$$

将式(12)代入式(17)中可得:

$$\sigma_{\Delta TEC} = \frac{3cf_0^2}{16\pi KB} \sqrt{\frac{3}{N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \quad (18)$$

式(18)为使用距离向频带分割算法, 在最优子带带宽 $b = B/3$ 时, 得到最优估计精确度, 与文献[10]一致。

3 仿真结果

首先, 验证采用子带带宽为 $b = B/3$ 时, 距离向频带分割算法估计电离层 TEC 参数的精确度达到最优。本文使用 2015 年 3 月 9 日上海地区的 ALOS-2 观测数据, 采用距离向频带分割算法估计电离层 TEC。观测模式是高敏感全极化模式 (High-sensitive mode Full(Quad.) polarimetry, HBQ), 处理等级是 Level1.1, 距离向分辨力为 5.1 m, 方位向分辨力为 4.3 m, 中心频率为 1.275 GHz, 带宽为 42 MHz。由于缺少真实的另外一幅同地区不同时间的图像来进行干涉, 所以这里只能使用一幅图像来进行仿真验证。采用一副 ALOS-2 图像作为主图像, 在该信号中加入服从二维高斯分布的电离层 TEC(变化幅度大小为 4 个标准 TECU)相位作为副信号, 加入复数循环高斯噪声。在每个信噪比处加入 100 次噪声并进行迭代估计, 利用多次估计的平均值作为最后的估计结果, 并计算估计样本的标准差。图 3 表示采用不同带宽 b 时 2 幅干涉图像的相干系数 γ 和 TEC 标准差 σ_{TEC} 的关系, 图中标记为 CRB 的实点实线为理论估计精确度—克拉美劳限(CRB)。从图 3 中可以看出, 当 $b = B/2$ 时, 估计精确度最低; 当 $b = B/3$ 带宽时, σ_{TEC} 估计精确度要优于 $b = B/4, B/5$, 接近 CRB 曲线。

采用 ALOS-2 图像作为干涉用的主图像, 在该图像中加入干涉时变化的电离层 TEC 参数, 变化幅度为 3.2 TECU, 同时加入复数循环高斯噪声来得到另外一幅干涉的副图像, 采用距离向频带分割算法对这 2 幅图像间存在的电离层 TEC 相位进行估计。从图 4(a)~图 4(c)可以看出, 在仅仅使用 1/3 带宽成像的 2 幅图像中, 距离向(纵向)的分辨力明显下降, 从图中高楼处的强散射点可以明显发现纵向亮点加宽。图 4(d)表示在 3 种信噪比下, 仿真加入的一维沿方位向变化的 TEC 与估计得到的 TEC 之间的比较结果, 仿真采用的距离向分辨力单元为 $N=600$ 。仿真 TEC 的变化幅度为 3.2 个标准 TECU, 采用距离向频带分割算法估计的结果和给定的结果吻合。在信噪比 $R_{SN}=5$ dB, 10 dB, 20 dB 时, 估计电离层 TEC 标准差为 $\sigma_{TEC}=(0.227\ 1, 0.124\ 6, 0.043\ 9)$ TECU, 对应的相位标准差为 $\sigma_{\Delta \phi}=(0.030, 0.016, 0.006)\pi$ 。

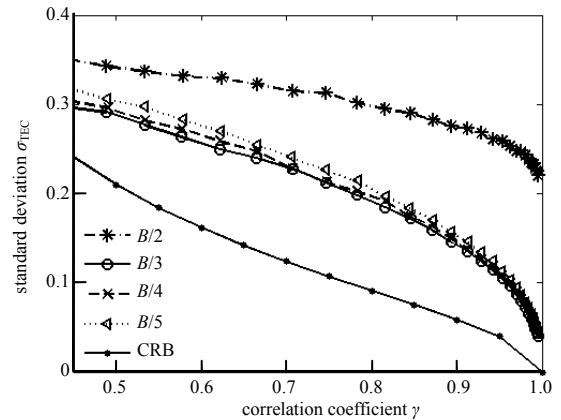


Fig.3 Estimation accuracy of the split-spectrum method using different bandwidths

图3 采用不同带宽频带分割算法的估计精确度

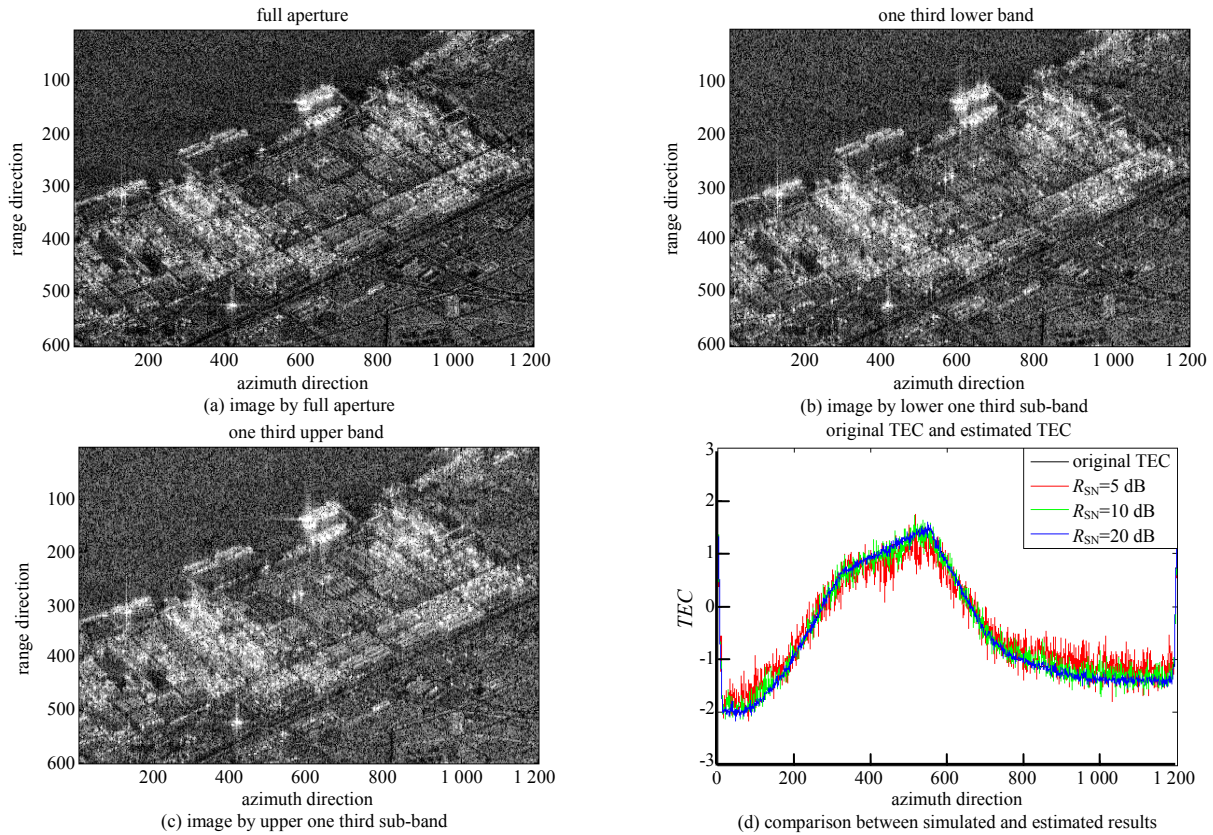


Fig.4 Imaging scene and the estimated results of TEC

图 4 成像场景与 TEC 估计结果

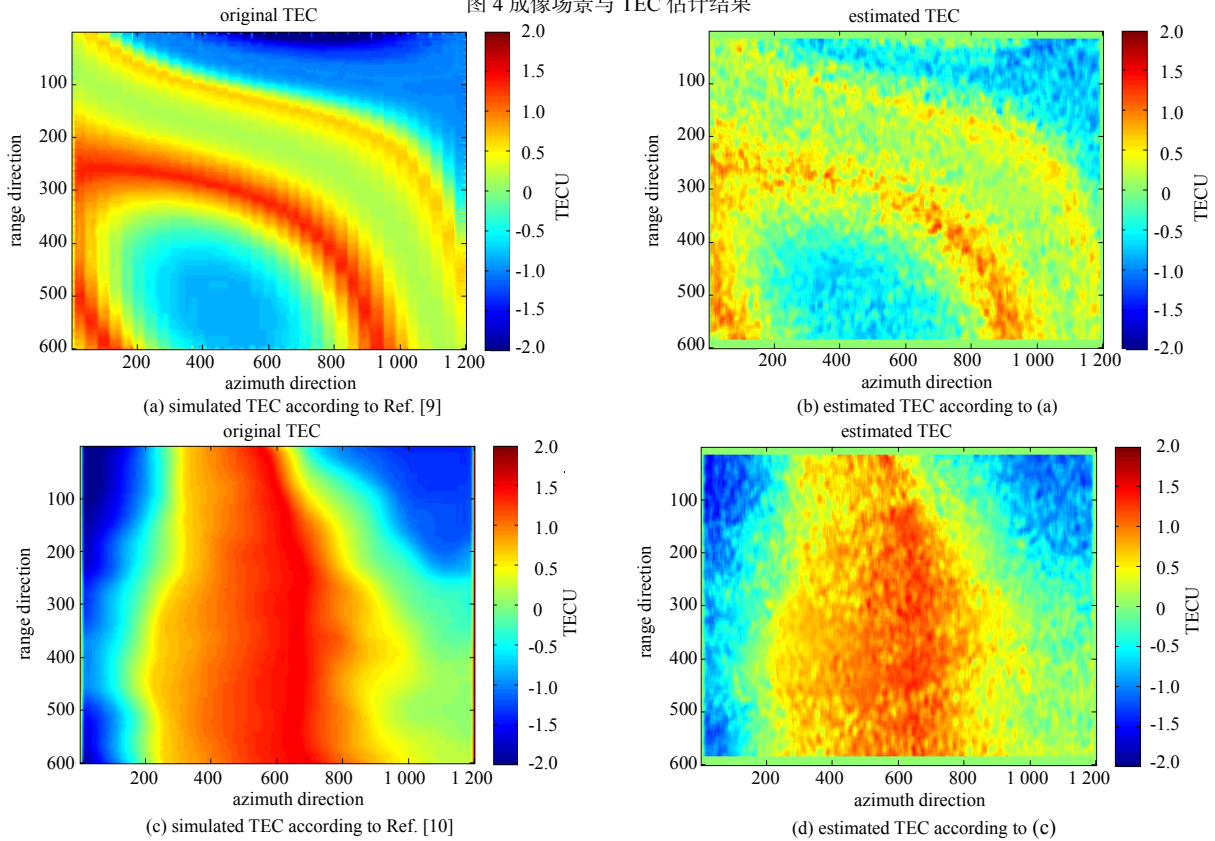


Fig.5 Estimated TEC for different distributions

图 5 不同分布的 TEC 估计结果

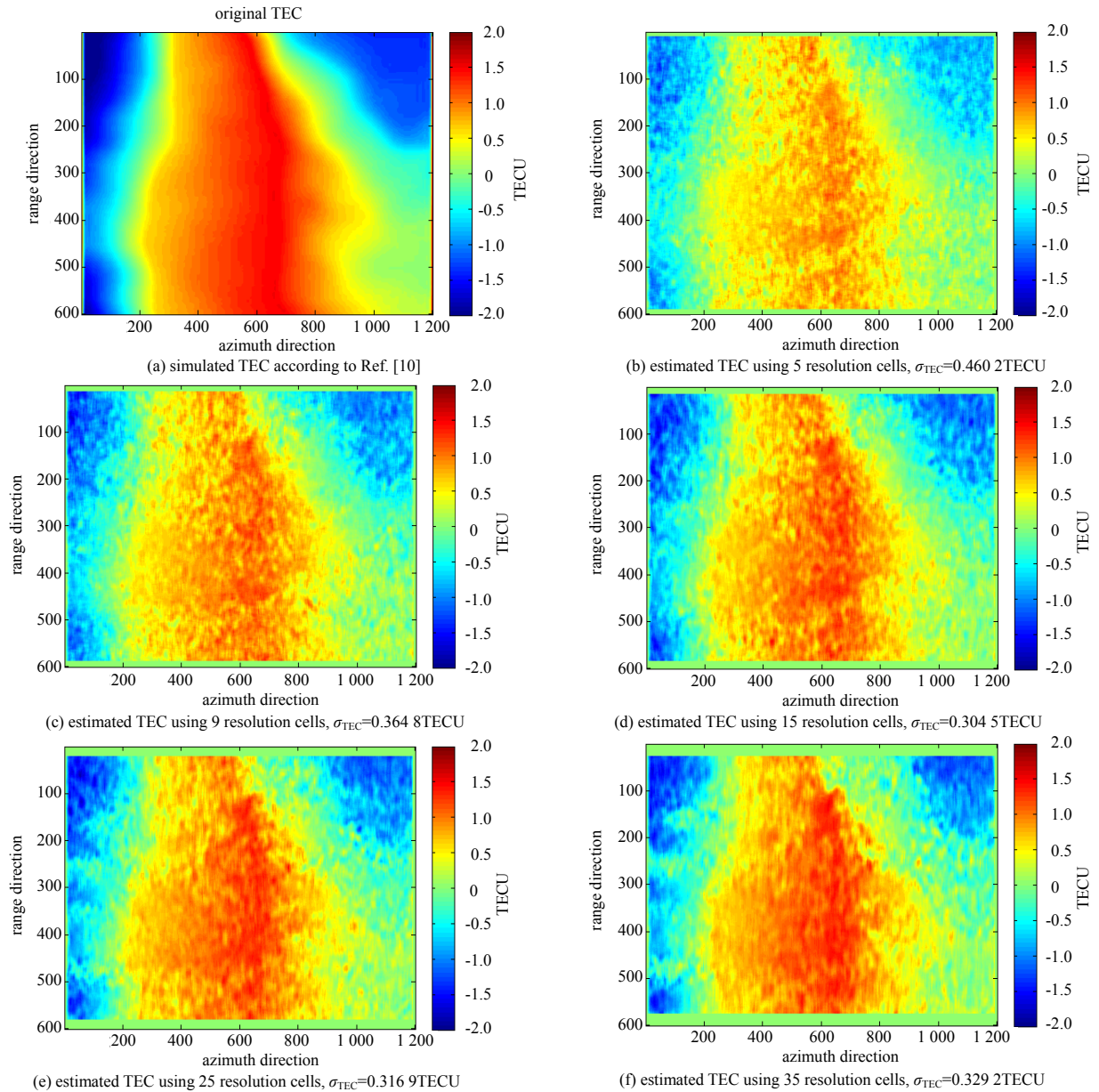


Fig.6 Estimated TEC using different range resolution cells

图 6 应用不同距离向分辨单元的 TEC 估计结果

图 5 针对同样的码头场景依据文献[9-10]所给的 2 种实际电离层 TEC 参数分布, 采用距离向频带分割算法, 距离向分辨力单元 $N=35$ 时, 得到 2 种 TEC 分布的估计结果, 此时加入噪声的信噪比为 10 dB, 2 幅相干系数分别为 0.829 4 和 0.821 7。仿真结果表明该算法能够反演二维 TEC 的变化与分布, 2 幅图像反演结果的标准差分别为 $\sigma_{\text{TEC}}=0.371 5\text{TECU}$ 和 $\sigma_{\text{TEC}}=0.304 5\text{TECU}$, 对应的相位标准差为 $\sigma_{\Delta\varphi}=0.049\pi$ 和 $\sigma_{\Delta\varphi}=0.04\pi$ 。

图 6 表示在信噪比 $R_{\text{SN}}=10\text{dB}$ 的情况下, 使用不同距离向分辨单元采用距离向频带分割算法得到的 TEC 参数估计结果。计算估计 TEC 与仿真 TEC 像素间标准差作为衡量估计效果的参数指标。可以发现, 使用 15 个距离向分辨单元时, 标准差估计效果最优。当距离向分辨力单元超过 15, 随着分辨单元数的增加, 估计精确度逐渐下降。这是因为 TEC 沿距离向逐渐变化, 当使用较多距离向分辨单元进行估计时, 估计点对应的估计窗口内 TEC 变化比较明显, 在经过平均后估计结果偏离了该点处对应的 TEC 理论值, 导致估计的结果变差。而在使用较少的距离向分辨单元时, 可以认为一定距离向分辨单元内 TEC 恒定, 所以使用更多的分辨单元进行估计有利于消除噪声的干扰, 估计的精确度更高。

在以上的仿真中, 电离层 TEC 参数在距离向 3 km 的范围内变化幅度超过了 3 个标准 TECU, 则距离向分辨力单元存在最优的情况。如果电离层 TEC 沿距离向变化缓慢, 如在 10 km 范围内变化值很可能小于 1 个标准 TECU。针对该种情况估计电离层 TEC 时, 使用较多距离向分辨单元进行估计会得到较好的效果。为了测试电离

层 TEC 沿距离向变化缓慢的情况下,采用的距离向分辨单元数对于算法估计精确度的影响,使用大小为 $1\,000 \times 1\,200$ 个像素点的场景,在场景中加入如图 5(c)分布形式的 TEC(整体变化幅度较小,为 0.4 个标准 TECU),采用距离向频带分割算法估计电离层 TEC。图 7 给出了采用不同距离向分辨单元数估计城区区域和农田区域的估计结果。从图 7 中能够看到,随着使用的距离向分辨单元的增多,估计的精确度在逐步上升。结合图 6 中得到的结果,说明针对沿距离向变换缓慢的 TEC 分布,在 TEC 沿距离向变化较慢的场景中,采用较多的距离向分辨单元来进行估计能够较好地抑制噪声对于估计结果的影响,得到更高的估计精确度,这说明在大多数实际应用场景中,应该使用较多的距离向分辨单元来进行估计和平均。而针对沿距离向变化较快的 TEC 分布,采用距离向频带分割算法估计时采用的距离向分辨单元不宜较多。

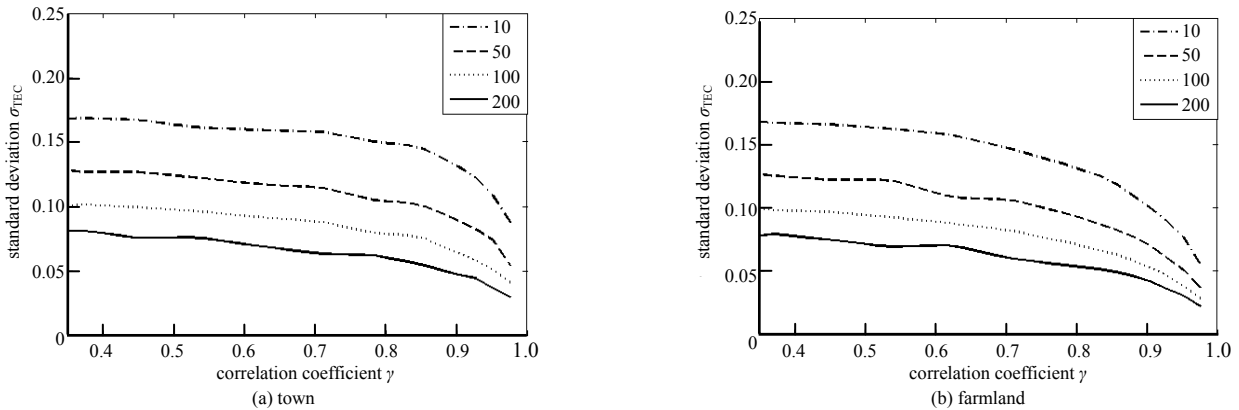


Fig.7 Accuracy of estimated TEC using different resolution cells

图 7 不同距离向分辨单元得到的估计精确度对比

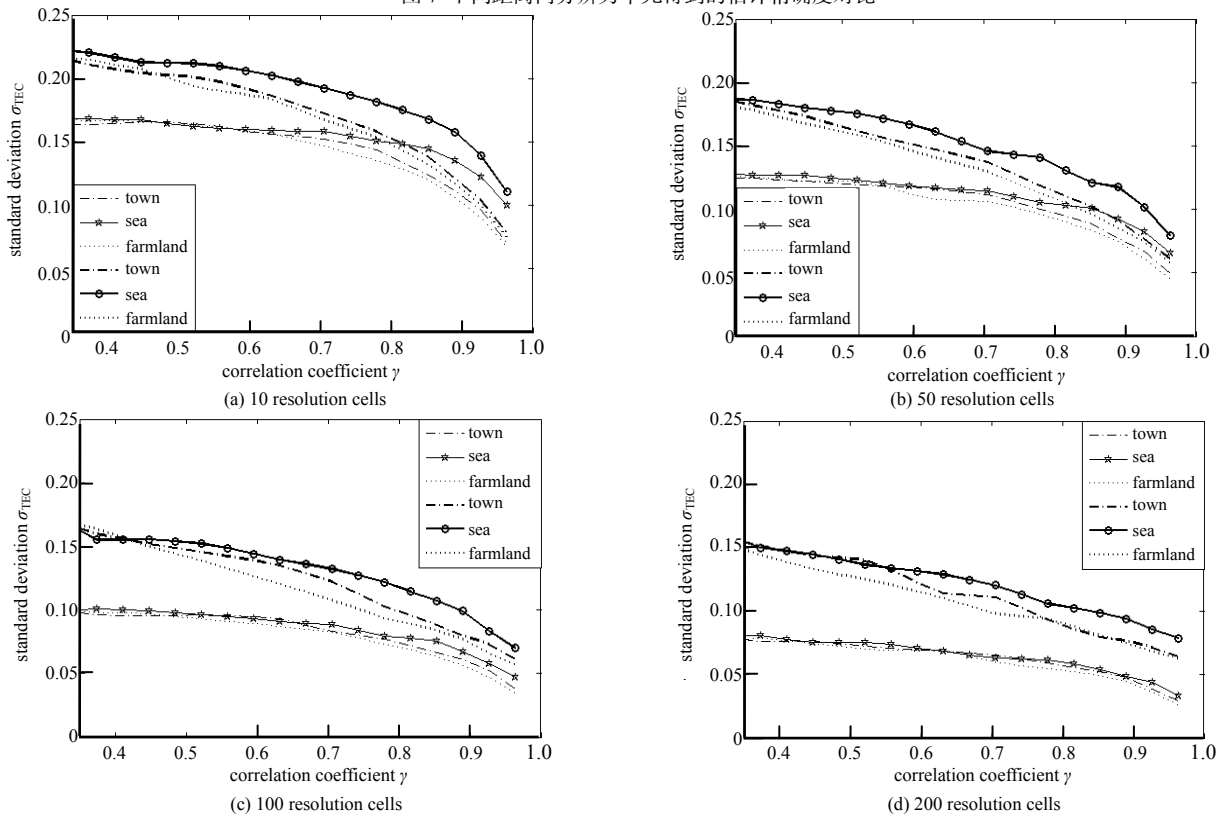


Fig.8 Comparison for the estimation accuracy in three typical regions using different resolution cells, the thick line represents the accuracy of the TEC which varies 4 TECU; the thin line represents the accuracy of the TEC which varies 0.4 TECU

图 8 不同距离向分辨单元估计得到的 3 个区域的估计精确度对比结果,粗线代表 4 个标准 TECU 估计精确度,细线代表 0.4 个 TECU 估计精确度

下面分析采用距离向频带分割算法,针对雷达成像不同区域的电离层 TEC 估计效果。采用的场景大小为 $1\,000 \times 1\,200$ 个像素点,在场景中加入如图 5(c)分布形式的 TEC, TEC 的变化幅度分别为 0.4 个标准 TECU 和 4 个标准 TECU。图 8 给出了 3 种区域在使用同样距离向分辨单元数估计电离层 TEC 时分别得到的估计精确度。从图 8 可

可以看出,随着距离向分辨单元的增多,估计精确度增加。对比而言,农田区域的估计精确度最高,而海洋区域的估计精确度最低。农田区域估计精确度高于海洋区域的可能原因在于估计电离层相位时,由地形高度变化导致的相位变化会在一定程度上影响电离层相位的估计,而这种影响正是使用距离向频带分割算法估计电离层 TEC 带来的相位影响时的主要误差,而农田和城市的高度起伏变化在一定时间内比较小,但海洋区域的高度起伏变化(时空相关性)则相对会大一些,所以在进行估计时,海洋区域的估计精确度可能要低一些。同时可以发现,在距离向分辨单元个数增加时,3个区域的估计精确度趋于一致,这可能是因为算法的估计精确度逐渐达到最优。

4 结论

本文采用日本 L 波段 ALOS-2 SAR 卫星数据验证了距离向频带分割算法的最优估计带宽,针对重轨干涉 SAR 反演得到了 2 幅图像之间变化的电离层 ΔTEC 参数分布,该算法也可用在单航过干涉 SAR 成像。随着信噪比 SNR 增加,反演电离层 TEC 的精确度将提高,对应干涉 SAR 系统设计的相位精确度改善。本文进一步分析了距离向分辨单元数和电离层 TEC 沿着距离向的非均匀性对于算法估计精确度的影响。最后分析了城区、海洋、农田区域的电离层 TEC 参数的估计效果,发现农田区域和城区区域的估计精确度要高于海洋区域,这主要是由于城区与农田区域相对海洋区域而言时空相关性较高。后续工作将进一步采用 2 幅图像进行干涉来进一步验证算法反演 TEC 的精确度,所得结论适用并指导 L 波段干涉 SAR 系统设计。

致谢 本文作者感谢中国科学院电子学研究所提供的项目支持,感谢王海鹏副教授协助提供的数据。

参考文献:

- [1] 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):189-273.
- [2] MEYER F J. Performance requirements for ionospheric correction of low-frequency SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011,49(10):3694-3702.
- [3] FREEMAN A, SAATCHI S S. On the detection of Faraday rotation in linearly polarized L-band SAR backscatter signatures[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2004,42(8):1607-1616.
- [4] FREEMAN A. Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to Faraday rotation[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2004,42(8):1617-1624.
- [5] JEHLE M, FREY O, SMALL D, et al. Measurement of ionospheric TEC in spaceborne SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010,48(6):2460-2468.
- [6] 王成, 张民, 许正文, 等. 基于星载 SAR 信号的 TEC 反演新方法[J]. 地球物理学报, 2014,57(11):3570-3576. (WANG Cheng, ZHANG Min, XU Zhengwen, et al. A new approach of TEC retrieval from the space-borne SAR[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014,57(11):3570-3576.)
- [7] BAMLER R, EUNEDER M. Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2005,2(2):151-155.
- [8] BRCIC R, PARIZZI A, EINEDER M, et al. Estimation and compensation of ionospheric delay for SAR Interferometry[C]// 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). [S.l.]:IEEE, 2010:2908-2911.
- [9] ROSEN P, HENSLEY S, CHEN C. Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band interferometric SAR data[C]// Proc. IEEE Radar Conf., 2010:1459-1463.
- [10] GOMBA G, PARIZZI A, DE Zan F, et al. Toward operational compensation of ionospheric effects in SAR interferograms: the split-spectrum method[J]. 2015 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015,54(3):1446-1461.
- [11] MEYER F, BAMLER R, JAKOWSKI N, et al. The potential of low-frequency SAR systems for mapping ionospheric TEC distributions[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2006,3(4):560-564.
- [12] ULANDER L M H, ASKNE J. Repeat-pass SAR interferometry over forested terrain[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1995,33(2):331-340.

作者简介:



王楠(1987-),男,河南省洛阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为合成孔径雷达信号处理.email:14210720127@fudan.edu.cn.

付海洋(1983-),女,黑龙江省鹤岗市人,讲师,主要研究方向为电离层和合成孔径雷达.email:haiyang_fu@fudan.edu.cn.

李索(1993-),男,安徽省淮南市人,在读硕士研究生,主要研究方向为光学卫星目标检测与识别.

徐丰(1982-),男,浙江省金华市人,研究员,主要研究方向为新体制合成孔径雷达.