

基于频谱偏移估计提高距离向分辨率 处理算法的误差分析

徐华平, 周荫清, 李春升

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于频谱偏移估计算法是一种分布式小卫星合成孔径雷达 (Distributed Small Satellite Synthetic Aperture Radar, 简称为 DSS-SAR) 提高距离向分辨率的数据处理方法, 它实现过程简洁、数据量小。从基于频谱偏移估计算法的实现过程知道, 其性能主要受到频谱重叠和频谱偏移估计误差的影响, 本文着重研究这两种误差因素对由该算法处理得到的合成图像质量的影响。分别推导了存在频谱重叠和频谱偏移估计误差时合成图像的数学表达式, 分析了它们对合成图像质量的影响, 提出了: 1. 频谱重叠主要引起合成图像中点目标旁瓣抬高; 2. 频谱偏移估计误差主要引起合成图像中点目标主瓣衰减和旁瓣抬高。利用点目标仿真验证了理论分析的正确性。最后根据误差分析结果, 对基于频谱偏移估计算法的实现提出了改进的建议。

关键词: 提高分辨率; 数据处理; 算法; 误差分析

中图分类号: TN959 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 09-1562-04

The Error Analysis of the Algorithm Based on Spectrum Shift Estimation for Improving Range Resolution

XU Hua-ping ZHOU Yin-qing LI Chun-sheng

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083 China)

Abstract The algorithm based on spectrum shift estimation is a processing method with brief flow chart and less processing time for improving range resolution in distributed small satellite synthetic aperture radar (DSS-SAR). But its performance is decreased by spectrum overlap and estimation error of spectrum shift. The influence of these two factors on the algorithm is analyzed in this paper. The mathematic expressions of the combination image, including the effect of the two kinds of errors, are deduced respectively, and the image quality worsening caused by the errors is discussed. The expressions and the discussion show that spectrum overlap decreases the peak side lobe ratio and the integral side lobe ratio of point targets, and the error of spectrum shift attenuates main lobe and increases the side lobe of point targets in the combination image. The point target simulation is employed to validate the analysis. Some suggestions are presented to improve the implementation of the algorithm based on spectrum shift, and a new concept of processing depth is proposed to enhance the practicality of the algorithm.

Key words improvement of resolution; data processing algorithms; error analysis

1 引言

DSS-SAR 是上世纪末提出的一种新的空间观测系统, 它利用编队飞行小卫星群协同工作共同完成系统的多项任务^[1-3]。提高 SAR 图像距离向分辨率是分布式小卫星 SAR 重要的系统任务之一。具有微小视角差的不同小卫星照射同一地面目标, 获取地面目标不同频谱段的 SAR 图

像。结合不同小卫星得到的 SAR 图像就可以获得更宽的目标频谱, 从而得到更高的距离向空间分辨率。

目前关于分布式小卫星 SAR 提高距离向分辨率处理算法的讨论还较少^[1,3,4]。文献 [4] 给出了提高距离分辨率的原理; 文献 [3] 仅简单介绍了一种 PHASEMAP 的处理算法, 而没有给出具体实现; 文献 [1] 提出的基于频谱偏移估计算法通过在频域进行一次频谱平移来实现相位补偿,

处理流程简洁,运算量小,可行性较强.但是文献[1]在推导基于频谱偏移估计算法得到的合成图像表达式的过程中忽略了频谱重叠以及频谱偏移估计误差,本文重新推导了存在这两种误差时合成图像的表达式,定量地分析了这两种误差因素对基于频谱偏移估计算法的影响,并利用点目标仿真验证理论分析,最后根据分析结果对该算法的实现提出了改进建议.

论文第 2 部分讨论频谱重叠对图像质量的影响,第 3 部分讨论频谱偏移估计误差对图像质量的影响,最后在第 4 部分提出了基于频谱偏移估计算法实现的改进思路.

2 频谱重叠对图像质量的影响

用来提高距离向分辨率处理的两幅图像在频谱上存在着一定的重叠,以保证它们之间的相关性.进行提高距离分辨率处理时很难完全去除它们之间的这种频谱重叠,下面分析图像间频谱重叠的存在对合成图像质量的影响.

令两幅图像频谱之间的重叠宽度为 $B_w^{overlap}$,改写文献[1]中给出的合成图像的表达式,得到考虑频谱重叠时合成图像在频域表示为

$$S(x, f_r) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) \otimes_x \left\{ \left[\text{rect}\left(\frac{f_r}{B_w + |\Delta f|}\right) + \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_w^{overlap}}\right) \right] \cdot \Gamma\left(x, f_r + f_0 - \frac{\Delta f}{2}\right) \right\} \quad (1)$$

式中 ρ_a 为方位向分辨率, x 为方位向坐标, B_w 为小卫星的信号带宽, Δf 为两颗小卫星回波信号之间的距离向频谱偏移, f_r 为距离向频率, f_0 为雷达载频. $\Gamma(\cdot)$ 为散射系数 $\gamma(\cdot)$ 的傅立叶变换. $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数,且有

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

对式(1)进行傅立叶反变换,忽略复常数系数,得

$$s^{overlap}(x, r) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) \otimes_x \left[\text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho'_r}\right) + \frac{B_w^{overlap}}{B_w + |\Delta f|} \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho'_r}\right) \right] \otimes_x \gamma(x, r) \quad (3)$$

式中, r 为斜距向坐标, ρ'_r 为合成图像的斜距向分辨率,且有

$$\rho'_r = \frac{c}{2(B_w + |\Delta f|)} = \frac{\rho_r}{1 + |\Delta f|/B_w} \quad (4)$$

$\rho_r^{overlap}$ 是频谱重叠宽度在时域对应的主瓣宽度,有

$$\rho_r^{overlap} = \frac{B_w + |\Delta f|}{B_w^{overlap}} \rho'_r \quad (5)$$

定义 $\alpha_{overlap} = \frac{B_w^{overlap}}{B_w + |\Delta f|}$ 为频谱重叠因子,则式(3)重写为

$$s^{overlap}(x, r) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) \otimes_x \left[\text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho'_r}\right) + \alpha_{overlap} \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho'_r/\alpha_{overlap}}\right) \right] \otimes_x \gamma(x, r) \quad (6)$$

根据式(6)知道,频谱重叠的存在使得合成图像中附加了

目标的低分辨率响应 $\alpha_{overlap} \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho'_r/\alpha_{overlap}}\right)$, 其主瓣宽度为理想情况下点目标响应主瓣宽度的 $\frac{1}{\alpha_{overlap}}$, 幅度为理想情况点目标响应的 $\alpha_{overlap}$. 通常在去频谱重叠处理^[1]后剩余的谱重叠宽度很小,即 $\alpha_{overlap} \ll 1$, 因此点目标分辨率还是主要取决于高分辨率响应 $\text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho'_r}\right)$ 的主瓣宽度,而附加的低分辨率响应则引起目标响应旁瓣的抬高,从而导致点目标距离向峰值旁瓣比和积分旁瓣比性能指标下降.

图 1 给出了 $\alpha_{overlap} = 0.1$ 和 $\alpha_{overlap} = 0.05$ 两种情况下,距离向点目标的冲激响应曲线,图中的虚线和实线分别为不存在和存在频谱重叠的点目标冲激响应.可以看出频谱重叠引起了点目标响应旁瓣抬高;随着 $\alpha_{overlap}$ 的减小,这种影响越来越小.因此在处理中应尽量减小频谱重叠宽度.

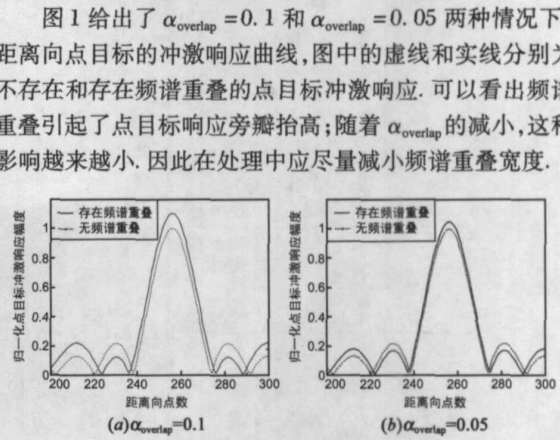


图 1 频谱重叠对目标性能的影响

3 频谱偏移估计误差对图像质量的影响

频谱偏移估计是基于频谱偏移估计算法的关键,频谱偏移估计不准会影响合成图像的质量,文献[4]在阐述提高距离向分辨率的原理时,也给出了存在频谱偏移误差时的仿真结果.下面详细推导存在频谱偏移估计误差时合成图像的点目标响应.

当存在 Δf_{error} 的频谱偏移估计误差时,频谱平移后两幅图像的频域表达式变为

$$S_m^{error}\left(x, f_r - \frac{\Delta f}{2}\right) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) \otimes_x \left\{ \text{rect}\left[\frac{f_r - (\Delta f + \Delta f_{error})/2}{B_w}\right] \cdot \Gamma\left(x, f_r + f_0 - \frac{\Delta f + \Delta f_{error}}{2}\right) \right\} \quad (7)$$

$$S_n^{error}\left(x, f_r + \frac{\Delta f}{2}\right) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) \otimes_x \left\{ \text{rect}\left[\frac{f_r + (\Delta f + \Delta f_{error})/2}{B_w}\right] \cdot \Gamma\left(x, f_r + f_0 - \frac{\Delta f - \Delta f_{error}}{2}\right) \right\} \quad (8)$$

对式(7)和(8)进行反傅立叶变换,得

$$S_m^{error}(x, t) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) \otimes_x \left[\text{sinc}(\pi B_w t) \cdot \exp(j\pi \Delta f t) \right] \otimes_t \left\{ \sigma(x, t) \cdot \exp[-j2\pi(f_0 - \Delta f/2)t] \right\} \cdot \exp[j\pi \Delta f_{error} t] \quad (9)$$

$$S_n^{error}(x, t) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) \otimes_x \left[\text{sinc}(\pi B_w t) \exp(-j\pi \Delta f t) \right] \otimes_t \left\{ \sigma(x, t) \cdot \exp[-j2\pi(f_0 - \Delta f/2)t] \right\} \cdot \exp[-j\pi \Delta f_{error} t] \quad (10)$$

令地面场景为两个独立的点目标,即

$$\sigma(x, t) = \delta(x, t) + \delta(x, t - \tau) \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)和(10),并将两式相加,忽略复常数,得合成图像为

$$S_{\text{error}}(x, t) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) \otimes_x \left\{ \text{sinc}(\pi B_w t) \cdot \exp\{j\pi [\Delta f(m, n) + \Delta f_{\text{error}}(m, n)] t\} + \text{sinc}(\pi B_w (t - \tau)) \cdot \exp\{-j\pi [\Delta f(m, n) + \Delta f_{\text{error}}(m, n)] (t - \tau)\} + \text{sinc}[\pi B_w (t - \tau)] \cdot \exp\{j\pi [\Delta f(m, n) + \Delta f_{\text{error}}(m, n)] (t - \tau)\} + \text{sinc}[\pi B_w (t - \tau)] \cdot \exp\{-j\pi [\Delta f(m, n) + \Delta f_{\text{error}}(m, n)] (t - \tau)\} \right\} \quad (12)$$

式(12)化简得

$$S_{\text{error}}(x, t) = \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) \otimes_x \left\{ \frac{B_w^l}{B_w} \text{sinc}(\pi B_w^l t) + \frac{B_w^s}{B_w} \text{sinc}(\pi B_w^s t) + \frac{B_w^l(t - \tau) + \Delta f_{\text{error}}(m, n)\tau}{B_w(t - \tau)} \text{sinc}[\pi B_w^l(t - \tau)] + \pi \Delta f_{\text{error}}(m, n)\tau \right. \\ \left. + \frac{B_w^s(t - \tau) - \Delta f_{\text{error}}(m, n)\tau}{B_w(t - \tau)} \text{sinc}[\pi B_w^s(t - \tau)] - \pi \Delta f_{\text{error}}(m, n)\tau \right\} \quad (13)$$

式中, $B_w^l = B_w + |\Delta f(m, n) + \Delta f_{\text{error}}(m, n)|$, $B_w^s = B_w - |\Delta f(m, n) + \Delta f_{\text{error}}(m, n)|$. 式(13)中含有 B_w^s 的项就是由于频谱重叠引起的低分辨率响应, 含有 B_w^l 的项则为由频谱结合得到的高分辨率点目标响应. 理想情况下点目标 $\delta(t - \tau)$ 距离向冲激响应的主瓣峰值应该在 $t = \tau$ 处; 存在频谱偏移估计误差时, 根据式(12)得其主瓣峰值幅度为

$$S_{\text{max}}^{\delta(t-\tau)} = |\cos(\pi \Delta f_{\text{error}}(m, n)\tau)| \quad (14)$$

根据以上分析, 频谱偏移估计误差 $\Delta f_{\text{error}}(m, n)$ 的存在引起了点目标 $\delta(t - \tau)$ 的主瓣衰减, 衰减的程度取决于 $\Delta f_{\text{error}}(m, n)$ 和 τ , 严重时会导致某些区域的目标完全被噪声淹没. 图 2、3、4 分别给出了 $\Delta f_{\text{error}}(m, n) = \frac{f_s}{512}$, $\tau = 0, \tau = 0.25/\Delta f_{\text{error}}(m, n), \tau = 0.5/\Delta f_{\text{error}}(m, n)$ 时, 合成图像点目标的冲激响应曲线. 观察式(13)和图 2~4 不难发现, 对于不同的 τ , $\Delta f_{\text{error}}(m, n)$ 对点目标 $\delta(t - \tau)$ 冲激响应呈周期性影响, 变化周期为 $\frac{1}{\Delta f_{\text{error}}(m, n)}$. 当 τ 在 $\left[-\frac{0.5}{\Delta f_{\text{error}}(m, n)}, \frac{0.5}{\Delta f_{\text{error}}(m, n)}\right]$ 区间变化时, 随着 τ 逐渐远离零点, 冲激响应主瓣逐渐衰减, 旁

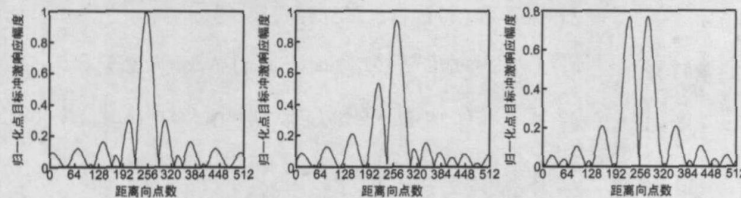


图 2 $\tau=0$ 时点目标的冲激响应曲线

图 3 $\tau=0.25/\Delta f_{\text{error}}(m, n)$ 时点目标的冲激响应曲线

图 4 $\tau=0.5/\Delta f_{\text{error}}(m, n)$ 时点目标的冲激响应曲线

瓣逐渐抬高. 当 $\tau = 0.5/\Delta f_{\text{error}}(m, n)$ 时, 主瓣中心点的值为 0, 而在其两旁出现两个虚假目标, 如图 4 所示.

沿距离向放置多个点目标, 采用文献[1]给出的方法进行提高距离向分辨率的处理. 图 5 和图 6 分别为不存在和存在频谱偏移估计误差时所得到的处理结果, 说明了由于频谱偏移估计误差而引起不同位置点目标的主瓣衰减和旁瓣抬高现象, 图 6 中 $\Delta f_{\text{error}}(m, n) = \frac{f_s}{256}$. 从图 6 中可以很清楚地看到频谱偏移估计误差对图像质量影响随距离向周期性变化, 这与文献[4]中存在频谱偏移误差时得到的仿真结果是相一致的.

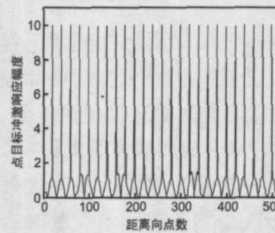


图 5 采用准确的频谱偏移值所得到的处理结果

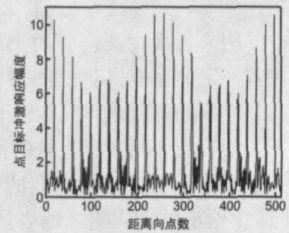


图 6 采用带有误差的频谱偏移值得到的结果

4 基于频谱偏移算法实现方法的改进

实际中, 地形场景斜度随距离向是变化的, 因此用于提高距离向分辨率的两幅图像间的频谱偏移随着距离向也是变化的. 从第 3 部分的分析知道, 频谱偏移估计误差对合成图像质量影响很大, 因此基于频谱偏移估计算法在整个观测带内不能采用同一频谱偏移估计值进行频谱平移. 这里提出一种分段处理的改进方法, 具体的实现是将整幅图像沿距离向划分为 N 段, 然后根据估计得到的每一段的频谱偏移量, 按照文献[1]给出的基于频谱偏移估计算法对各段进行处理, 最后根据各段之间的相对位置关系将处理后的 N 段数据在距离向进行拼接, 就可以得到距离向分辨率提高了的整幅图像. 需要注意的是, 当频谱偏移随距离向变化较快时, 这种分段拼接的方法由于分段过多, 运算量太大, 不利于实现. 在这种情况下, 可以采用在时域乘以相位的方法来实现频谱在频域的平移.

分段处理时, 段的长度必须使得同一段内频谱偏移的变化小于一定值, 以保证由于频谱偏移误差引起的点目标主瓣衰减和旁瓣抬高处于可接受的范围内. 根据式(12), 当 $\tau = 0.1/\Delta f_{\text{error}}(m, n)$ 时, 点目标响应的主瓣衰减约 0.44dB, 第一旁瓣抬高约 0.89dB. 若认为 τ 在 $[-0.1/\Delta f_{\text{error}}(m, n), 0.1/\Delta f_{\text{error}}(m, n)]$ 范围内时, 频谱偏移误差引起的点目标性能降低可接受, 则段长度或一段内的点数 L_n 必须满足

$$\frac{1}{f_s} L_n \leq 0.2 / \left(\frac{c}{2f_s} L_n \sigma \Delta f_{\text{error}} \right) \quad (15)$$

整理式(15), 得

$$L_n \leq f_s \sqrt{\frac{0.4}{c\sigma \Delta f_{\text{error}}}} \quad (16)$$

式中, $\sigma \Delta f_{\text{error}}$ 为频谱偏移量随斜距的变化率。

借鉴 SAR 成像处理中聚焦深度^[9]的概念, 本文定义满足式(16)中 L_n 的最大值 $L_{n\text{max}}$ 为基于频谱偏移估计算法的处理深度, 其确定公式为

$$L_{n\text{max}} = f_s \sqrt{\frac{0.4}{c\sigma \Delta f_{\text{error}}}} \quad (17)$$

在实际处理中, 利用地形的先验知识和信号采样率, 根据式(17)估算基于频谱偏移估计算法的处理深度。

5 结论

本文主要研究基于频谱偏移估计算法进行 DSS-SAR 提高距离向分辨率处理时, 频谱重叠和频谱偏移估计误差对合成图像质量的影响。通过本文的研究得到以下结论:

(1) 两幅图像间的频谱重叠主要引起合成图像中点目标冲激响应旁瓣抬高, 积分旁瓣比和峰值旁瓣指标变差。随着频谱重叠宽度的减小, 频谱重叠对图像质量的影响也越小, 因此在数据处理时应尽可能减小残余的频谱重叠宽度。

(2) 频谱偏移估计误差是影响图像质量的最主要因素, 它对目标性能的影响随距离向呈周期性变化。在一个周期内, 随着目标位置远离中心, 频谱偏移估计误差引起目标主瓣衰减和旁瓣抬高增大, 当偏离增大到半个周期时, 点目标冲激响应中心位置处的值衰减到零, 同时在它的两旁出现了两个虚假目标。随着频谱重叠估计误差的增大, 该周期越小, 对图像质量的影响也越大。

(3) 当频谱偏移随距离向变化时, 基于频谱偏移估计算法必须采用分段处理。

参考文献:

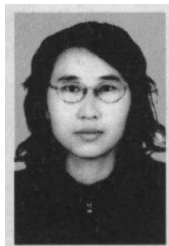
[1] 徐华平, 周荫清, 李春升. 基于频谱偏移估计的分布式星载 SAR 提高距离向分辨率的数据处理方法 [J]. 电

子学报, 2003, 31(12): 1790- 1794

XU Hua-ping ZHOU Yin-qing LI Chun-sheng An algorithm based on spectrum shift estimation for improving range resolution using distributed spaceborne interferometric SAR [J]. Acta Electronica Sinica 2003 31(12): 1790- 1794 (in Chinese)

- [2] Das A, Cobb R TechSat 21-Space missions using collaborating constellations of satellites [A]. 12th AIAA/USU Conference on Small Satellites [C]. USA: SSC98 - VI-1, 1998
- [3] Massonnet D Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2001, 39(3): 506- 520
- [4] Prati C, Rocca F Improving slant-range resolution with multiple SAR surveys [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems 1993, 29(1): 135- 143
- [5] 黄岩. 高分辨率合成孔径雷达成像处理技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学研究生院, 1999
- HUANG Yan High-Resolution spaceborne SAR imaging processing technique [D]. Beijing Graduate School of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 1999 (in Chinese)

作者简介:



徐华平 女, 1977年 2月出生于陕西渭南, 主要研究方向: 信息获取与处理, 高分辨率雷达成像, 分布式星载 SAR 的实现方法等。

Email huaping-xu@ sina.com.

周荫清 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会员, 主要研究方向: 信息获取与处理, 高分辨率成像雷达和时变谱估计等。