

基于系统噪声抑制的 ScanSAR 辐射校正方法

张 晓^{1,2} 仇晓兰¹ 仲利华¹ 丁赤彪¹

(1. 中国科学院电子学研究所中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190;

2. 中国科学院大学 北京 100190)

摘要: SAR 回波数据中难免会存在系统噪声,传统的成像处理和辐射校正均不考虑系统噪声的影响,这会影响 SAR 图像的辐射质量。特别是对 ScanSAR 而言,在对扇贝效应进行去除时,在低信噪比区域,如果不考虑系统噪声,会使得校正后存在很大的残余误差,不仅影响图像可视化效果,同时导致辐射精度的下降。定量分析了系统噪声在辐射校正中的影响,介绍了系统噪声的抑制方法和噪声估计手段,在此基础上提出了基于系统噪声抑制的 ScanSAR 方位向辐射校正整体方案。算法在幅度图像上对系统噪声进行了抑制,并在图像域进行了方向图补偿。经实验验证,确实提高了 ScanSAR 扇贝效应的校正结果,提升了图像质量。

关键词: ScanSAR; 系统噪声; 辐射校正; 扇贝效应

中图分类号: TP202 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Radiometric correction algorithm for ScanSAR scalloping based on reduction of system noise

Zhang Xiao^{1,2} Qiu Xiaolan¹ Zhong Lihua¹ Ding Chibiao¹

(1. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: SAR raw data is disturbed by additive system noise which influences the SAR image intensity, however, Traditional radiometric correction methods usually ignore the effects of system noise. Particularly in the case of ScanSAR, system noise is added to its own scalloping effect. In low backscatter area, radiometric correction without considering system noise will remain a residual noise which will deteriorate the quality of image. In this paper, we first quantize the effect of system noise in ScanSAR radiometric correction, and then introduce a method to estimate system noise and reduce it. Eventually, we propose a method to correct scalloping in ScanSAR system based on reduction of system noise. It reduces noise and correct antenna pattern in amplitude image. Simulations and application of the algorithm in real ScanSAR data processing show that scalloping pattern is removed and image quality is improved.

Keywords: ScanSAR; system noise; radiometric correction; scalloping

1 引言

合成孔径雷达(SAR)回波数据通常都会受到加性系统噪声的影响,主要包括热噪声、背景噪声、量化噪声等。系统噪声的存在不仅会降低图像对比度进而影响图像的可读性,而且会影响到 SAR 的辐射校正。尤其对于 ScanSAR 而言,如忽视系统噪声的影响,则可能使 ScanSAR 图像由天线非均匀加权导致的图像强度周期性变化(即 Scalloping 效应)得不到很好的校正。ScanSAR 模式由于

能够实现宽测绘带故在海洋遥感方面有很大的应用价值,因此如何对 ScanSAR 低信噪比地区进行有效的辐射校正是非常值得研究的。

传统的 ScanSAR 辐射校正中,对于方位向天线方向图的校正通常是根据卫星姿态和波束指向等参数计算出,或根据回波数据估计出方位向波束中心的位置,然后利用地面测试或在轨测试得到的方向图数据对回波频谱直接进行校正。但由于多普勒中心频率计算或估计不准确等原因,常在校正后的图像上存在一定的残余误差,图像质量不够理想。近年

收稿日期:2015-04

来,国内外提出了一些图像域的辐射校正方法,文献[1]提出了一种在图像的频域中去扇贝效应条纹对应的亮斑的方法,可以在低信噪比区域获得较好的目视效果;文献[2]和文献[3]提出了基于小波变换的去扇贝效应方法,将扇贝效应的条纹特征集中起来,到某个子图像上进行统一处理,同样可以获得较好的目视效果。然而,这些图像域的后处理方法虽能改善目视效果但都难以得到良好的辐射精度。文献[4~10]在传统的 ScanSAR 辐射校正基础上进行了一些改进,如适用于 ScanSAR 的多普勒中心频率估计方法、校正函数的优化、优化定标系统设计等。文献[11]提出一种用标准条带 SAR 处理 ScanSAR 数据的方法,使处理后图像与条带模式具有相同的辐射和几何分布特性,可抑制扇贝效应的影响。但上述方法都没有考虑系统噪声在辐射校正中的影响,如在低信噪比地区(如海洋区域),即使能够获得准确的多普勒中心频率估计值,图像扇贝效应仍会因为系统噪声的影响得不到有效改善。文献[8]提出了一种系统噪声抑制的方法,在 TerraSAR-X 的数据处理中获得了较好的效果,但应用于其他系统 ScanSAR 模式的辐射校正中还存在一些限制,如文中并没有给出在降噪处理后对 ScanSAR 扇贝效应的校正方案。另外,方法中需要的噪声参数来自于噪声定标数据,但目前有些系统的 ScanSAR 模式不能保证每个波位都有相应的噪声定标数据。因此,在文献[4]的基础上,提出了一种基于噪声抑制的 ScanSAR 方位向辐射校正的方法。该方法可基于回波数据进行噪声的估计,并给出了噪声抑制后方位向辐射校正的详细方案,可广泛适用于星载 SAR 扫描模式的辐射校正。

2 系统噪声在 ScanSAR 方位向辐射校正中的影响分析

ScanSAR 模式下方位向不同位置的目标所受天线方向图加权互不相同,故而会存在扇贝效应。为了解决 ScanSAR 扇贝效应,一般都会使用校正函数对各个目标回波的辐射强度进行归一化。然而,SAR 回波中存在系统噪声,其主要由雷达系统内部的热噪声等构成,是一种加性噪声。由于系统噪声不经过天线方向图的加权,因此校正函数应只对目标回波信号进行补偿而将系统噪声排除在外。但在实际中,系统噪声和雷达回波是很难被区分,这样在对目标回波进行补偿的同时,也相当于对系统噪声进行了一次加权。

在高信噪比地区,雷达成像区域的后向散射系数比较强,噪声在雷达回波中的贡献相对小,采用校正函数进行补偿后就可以获得很好的辐射均匀性。但在低信噪比地区,雷达成像的后向散射系数比较弱、回波中噪声分量较大,采用校正函数进行补偿时对系统噪声的调制会使噪声存在沿方位向的周期性不均匀,严重时反而会加重 ScanSAR 图像的扇贝效应。下面对系统噪声在 ScanSAR 方位向辐射校正中的影响进行定量化分析。

考虑方位向上连续的 3 个 burst,128 个距离门,假设天线方向图为 sinc 型,场景均匀并服从瑞利分布,仿真了

不同信噪比下用天线方向图的倒数直接进行方位向辐射校正的结果(128 个距离门平均后),如图 1 和 2 所示。

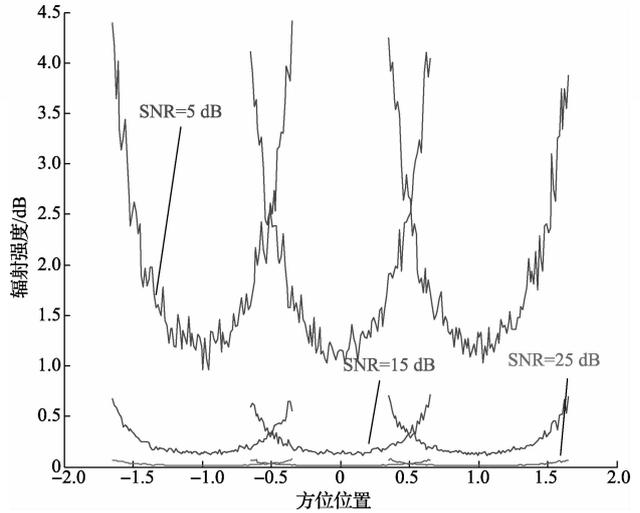


图 1 校正结果示意

为了具体量化系统噪声在校正后图像上的影响,这里统计了 burst 边缘与中心的增益起伏,结果如图 2 所示。

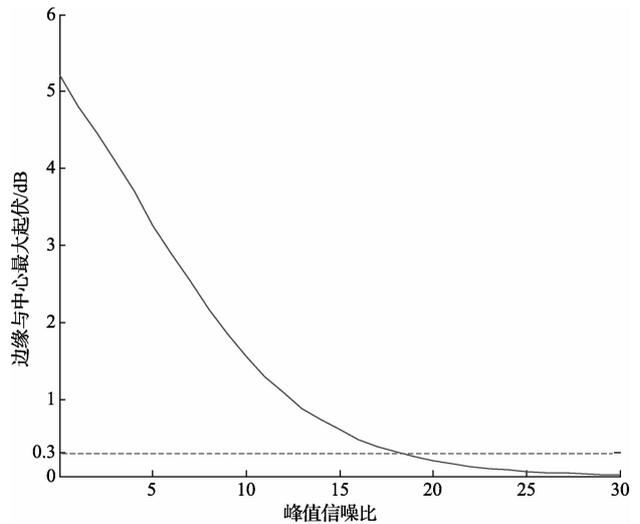


图 2 不同信噪比下校正后最大增益起伏

经验表明,在均匀场景中如使目视察觉不到扇贝效应则图像强度变化最好控制在 0.3 dB 以内。可以看出,当信噪比达到约 18 dB 时,校正结果的 burst 边缘与中心增益起伏才能控制在 0.3 dB 之内。而海面等场景下,ScanSAR 系统的信噪比达不到这样理想的情况,因此应采取适当的方法对系统噪声进行抑制。

3 SAR 系统噪声抑制方法

3.1 噪声抑制方法

以 $x_{SN}(n)$ 表示某位置上雷达原始回波, $x_s(n)$ 表示相应位置的真实信号, $x_N(n)$ 表示相应位置的噪声信号(这里 3 个都是复信号)。由于系统噪声是一个加性噪声,有:

$$x_{SN}(n) = x_s(n) + x_N(n) \quad (1)$$

因此,如果需要求解每个位置的真实信号,就需要知道其对应的噪声信号。但由于系统噪声是随机的,因此只能通过获得系统噪声的一些统计量来进一步估计真实信号的情况。具体来说,就是用系统噪声的平均功率来对真实信号进行估计。

理论上,真实信号与噪声信号是统计独立的,因此有:

$$E\{|x_{SN}(x)|^2\} = E\{|x_s(x)|^2\} + E\{|x_N(x)|^2\} \quad (2)$$

根据式(2),如记噪声功率的均值为 $E\{\xi_N^2\}$,则距离向 r ,方位向 a 位置真实信号的幅度估计值如式(3)所示:

$$\tilde{x}_s(r,a) = \sqrt{x_{SN}^2(r,a) - E\{\xi_N^2\}} \quad (3)$$

在回波信号较强区域,有 $x_{SN}^2 \geq E\{\xi_{SN}^2\}$,但是在回波信号幅度较小的区域,会出现 $x_{SN}^2 < E\{\xi_{SN}^2\}$ 的情况,这将会给之后的处理带来很多不便,因此将这些点的估计值选为0。得到如下的估计形式:

$$\tilde{x}_s(r,a) = \begin{cases} \sqrt{x_{SN}^2(r,a) - E\{\xi_N^2\}} & x_{SN}^2(r,a) \geq E\{\xi_N^2\} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

可以看出,有些点的噪声被低估了,有些点的噪声被高估了。同时,由于真实信号功率与噪声功率之和设定了需要减去功率的上限,对于噪声功率被高估部分减去平均噪声功率会出现“减少了”的情况。因此,根据式(4)的降噪方法,总会在图像上留下一个残余的噪声,需要对这部分残余噪声也进行去除,这需要对式(4)进行迭代。对残余噪声的计算可用下式:

$$P^{(m)} = E\{(x_s^{(m)})^2\} - E\{\xi_s^2\} \quad (5)$$

式中: $P^{(m)}$ 表示第 m 次迭代后的残余噪声, $E\{(x_s^{(m)})^2\}$ 表示第 m 次迭代后图像的平均功率, $E\{\xi_s^2\}$ 表示真实信号的平均功率, $E\{\xi_s^2\}$ 可以由 $E\{\xi_{SN}^2\} - E\{\xi_N^2\}$ 求得。 $\tilde{x}_s(r,a)^{(m)}$ 表示第 m 次迭代后距离向 r ,方位向 a 位置真实信号幅度的估计值。整个迭代过程如下式:

$$\tilde{x}_s^{(m+1)}(r,a) = \begin{cases} \sqrt{(\tilde{x}_s(r,a)^{(m)})^2 - P^{(m)}} & (\tilde{x}_s(r,a)^{(m)})^2 \geq P^{(m)} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (6)$$

在实际处理过程中,一般3~4次迭代即可获得较好的结果,而且处理效率较高。

3.2 噪声估计方法

3.1节提到的噪声抑制方法需要用到系统噪声的平均功率,目前其获取方法主要是通过只接收模式的内定标数据(噪声定标),文献[6]中也是使用的这种方法,但在有些ScanSAR系统中,可能不具备所有波位的噪声定标数据,因此这里给出一种通过回波信号中距离向过采样部分数据估计系统噪声平均功率的方法。

在接收雷达回波时,一般存在过采样现象,这部分数据包括了chirp信号本身扩展的能量和系统噪声,可以计算出理想chirp信号本身展宽部分的能量,进而估计系统

噪声的平均功率。

首先对信号做距离向傅里叶变换,在距离频域根据系统的过采样率和脉冲宽度计算出理想chirp信号展宽部分与信号的比值。如图3(a)所示,在一定的过采样率下,chirp信号带宽之外存在一定的间隙。

可以计算出带外信号与带内信号的能量比值如式(7)所示。

$$\frac{P_{ext}}{P_{sig}} = A \quad (7)$$

式中: P_{ext} 表示带外信号的能量, P_{sig} 表示带内信号能量。对于叠加了噪声的信号,其频谱形式如图3(b)所示。此时,带外信号与带内信号的比值如式(8)所示。

$$\frac{P_{ext} + P_{noise}}{P_{sig} + P_{noise}} = B \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可以得到信噪比。

$$SNR = 10\log\left(\frac{1-B}{B-A}\right) \quad (9)$$

根据得到的信噪比即可在时域估计出系统噪声的均值。

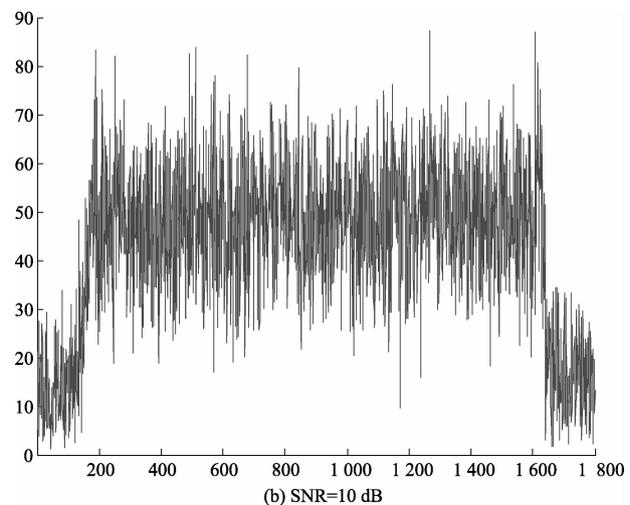
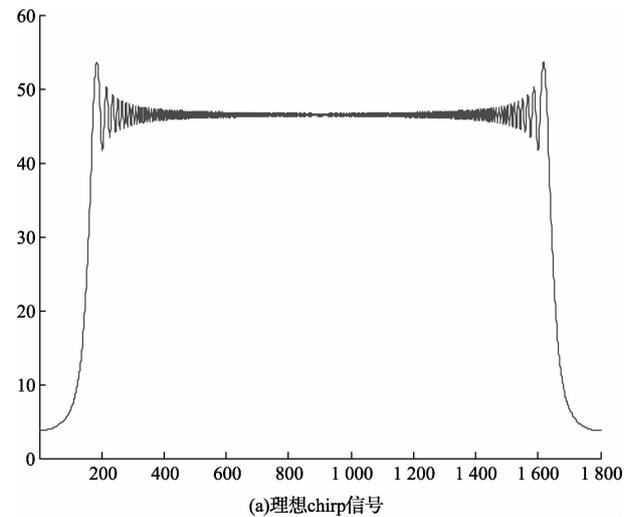


图3 信号频谱展宽示意

4 基于噪声抑制的 ScanSAR 方位向辐射校正方法

第2章已经分析过,低信噪比区域对天线方向图的补偿相当于对噪声做了一次加权,因而在辐射校正中需要对噪声进行抑制。根据第3.1小节,在噪声抑制中需要噪声是平坦的,因此必须先进行噪声抑制再做方向图的补偿。

对图像上每个像素点,需要计算出其受到的方位向天线图的加权,也就是要计算出像素点与卫星之间的视角。假设共有 N 个像素点,近似认为卫星在 burst 中心照射,可得第 N_x 个像素点的视角如下式:

$$\theta_{N_x} = \arctan\left(\frac{N_x \Delta x - \frac{N \Delta x}{2}}{h}\right) \quad (10)$$

式中: Δx 为像素间隔, h 为卫星最短斜距。再根据每个像素点的视角确定其在方位向天线方向图上的位置,也就确定了其受到天线方向图的加权,即可乘以天线方向图的倒数进行补偿。

整个校正方案如图4所示的流程。

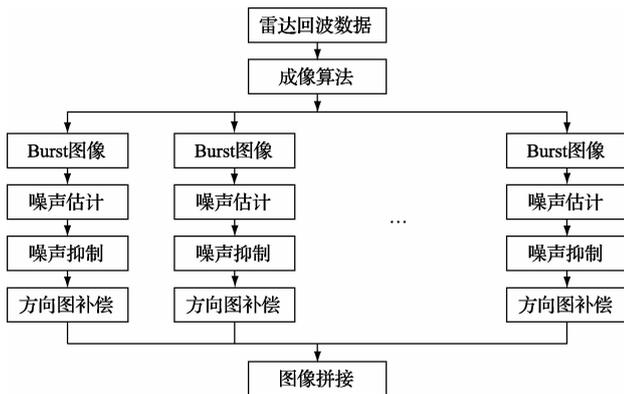


图4 系统流程

首先用 SPECAN 算法成像,对得到的每个 burst 图像,用3.1节的方法进行噪声估计,再用3.2节的方法进行噪声抑制,之后在抑制后的每个 burst 图像上进行方向图补偿,最后对各个 burst 图像进行拼接,得到最终的图像。

5 实验结果分析

首先对3.2小节的噪声估计方法进行了实验验证,在理想 chirp 信号上以不同的信噪比叠加噪声,用式(9)对信噪比进行估计,所得结果如表1所示。

可以看出,估计精度与信噪比和过采样率关系都有一定的关系,但主要受过采样率的影响。总体上看,当过采样率足够大(大于1.1)的时候,这种噪声估计方法有比较理想的精度,可以广泛应用于 SAR 系统。

表1 噪声估计仿真结果

真实信噪比 /dB	过采样率	估计信噪比 /dB	估计精度 (%)
10	1.05	10.844 8	8.45
10	1.10	10.241 4	2.41
10	1.20	9.844 5	1.55
10	1.30	9.873 2	1.27
20	1.05	21.140 1	5.70
20	1.10	20.437 4	2.19
20	1.20	20.252 4	1.26
20	1.30	19.669 2	1.65

之后分别对条带 SAR 和 ScanSAR 数据进行了多次实验,选取了有代表性的图像如图5和6所示。



(a)未经噪声抑制图像



(b)噪声抑制后图像

图5 条带 SAR 噪声抑制结果对比

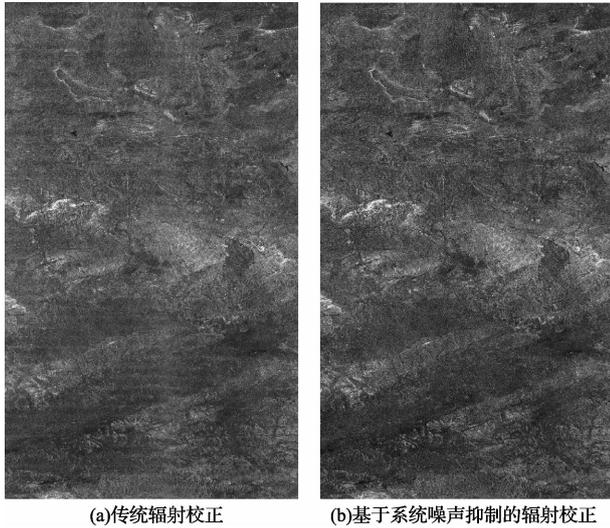


图6 ScanSAR 辐射校正结果对比(方位向为从上至下)

图5(b)中图像较(a)中图像对比度有明显的提高,可见降噪方法是有效的。图6(a)为没有经过噪声抑制,直接在多普勒域进行了天线方向图补偿的处理结果,可以看出方位向上有周期性的亮条纹出现,这主要是由于系统噪声没有受到补偿函数的加权因而在图像上生成了噪声的条带。图6(b)为使用了提出的基于系统噪声抑制的方位向辐射校正方法的处理结果。可以看出,图6(b)的扇贝效应校正结果有明显改善,噪声条带基本上已不可见,同时图像的对比度也有所提高。因此,本文提出的基于系统噪声抑制的ScanSAR 辐射校正方法对图像质量有着明显的改善。

6 结 论

本文提出了一种基于系统噪声抑制的ScanSAR 方位向辐射校正方法,并用实际ScanSAR 数据进行了验证。实验结果表明,该方法确实可以提高ScanSAR 图像的辐射精度,对扇贝效应的残余误差有较好的抑制效果,图像质量有较大改善。

参 考 文 献

- [1] ROMEISER R. A descalloping postprocessor for ScanSAR images of ocean scenes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(6):3259-3272.
- [2] SCHIAVULLI D, MIGLIACCIO M. An innovative technique for postprocessing descalloping[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(3):424-427.
- [3] SORRENTINO A, SCHIAVULLI D, MIGLIACCIO M. A post-processing technique for scalloping suppression over ScanSAR images [C]. 6th European Conference on Antennas and Propagation, 2012:2078-2081.
- [4] 查正兴,鲁昌华,陶志颖,等. 增强型 Shearlet 域 SAR 图像去噪[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 644-649.
- [5] 金廷满,梁淮宁. 合成孔径雷达高精度内定标技术[J]. 电子测量技术, 2008, 31(1):59-62.
- [6] 姜国安,宋红军. SAR 方位模糊分析与抑制[J]. 电子测量技术, 2007, 30(12):45-47.
- [7] 陈仁元,雍延梅,孙晓晖,等. 星载 ScanSAR 成像处理技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(2): 136-140.
- [8] 葛蕴萍. 星载 SAR 辐射定标处理与评估系统的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(7):53-58.
- [9] 范宗杰,徐向辉,周晓丽. 一种基于 SIFT 算法的 SAR 图像配准方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(8):70-74.
- [10] SHIMADA M. A new method for correcting ScanSAR scalloping using forests and Inter-SCAN banding employing dynamic filtering[J]. IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(12): 3933-3942.
- [11] BALSS U, BREIT H, FRITZ T. Noise-related radiometric correction in the TerraSAR-X multimode SAR processor[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 48(2):741-750.

作 者 简 介

张晓,1989 年出生,硕士研究生,主要研究方向为信息与信号处理。

E-mail:mtnerid@126.com

仇晓兰,1982 年出生,副研究员。主要研究方向为 SAR 成像技术、双基地 SAR 技术。

E-mail:xlqiu@mail.ie.ac.cn

仲利华,1984 年出生,博士。主要研究方向为 ISAR 成像。

E-mail:zlhua@163.com

丁赤飏,1969 年出生,研究员,博士生导师,副所长。主要研究方向为合成孔径雷达、遥感信息处理和应用系统等。

E-mail:cbding@mail.ie.ac.cn