

文章编号:1000-6893(2003)01-0066-03

一种基于高阶统计量的 SAR 图像自聚焦算法

武昕伟, 朱兆达

(南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

New Algorithm Based on Higher-Order Statistics for SAR Imagery Autofocus

WU Xin-wei, ZHU Zhao-da

(College of Information Science and Technology, Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 提出了一种基于高阶统计量分析的相位误差估计算法,用于 SAR 图像自聚焦。该算法从复图像域出发,通过循环移位及加窗处理孤立强点目标,利用高阶累积量对高斯噪声的抑制能力,在距离压缩相位历史域估计相位误差。由于避免了对加性噪声及干扰很敏感的差分运算,相位误差的估计结果有很好的鲁棒性。仿真及实测数据的处理结果证明了该算法的可行性。

关键词: 合成孔径雷达; 自聚焦; 高阶统计量; 相位误差; 相位梯度自聚焦

中图分类号: V243 **文献标识码:** A

Abstract: In this paper, a new method of phase errors estimation based on higher-order statistics is proposed for SAR imagery autofocus. The method, which starts right in with complex phase-degraded SAR imagery, isolates the dominant point target in the image domain via circular shifting and windowing, and then estimates phase errors in the range-compressed phase-history domain by a higher-order cumulant. The algorithm makes good use of the property that the higher-order cumulant can suppress noise with Gaussian distribution, while avoiding derivative computation which can be sensitive to additive noise and disturbance. So the phase errors estimation will be more robust. Simulation and processing results of real data show the feasibility of the proposed method.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); autofocus; higher-order statistics; phase errors; Phase Gradient Autofocus (PGA)

子孔径相关 (Map Drift, MD) 和相位梯度自聚焦 (Phase Gradient Autofocus, PGA) 是两种具有代表性的自聚焦算法^[1]。MD 法把整个孔径分割成两个或多个子孔径,根据子图像之间的互相关结果估计相位误差。子孔径相关算法以参数模型为基础,往往不能适应高分辨成像的要求。PGA 方法是一种非模型的相位误差估计算法,无须指出待估计相位误差的最高阶数,并且能够校正任意阶次的相位误差,因此在 SAR 领域得到广泛应用,是一种稳健的高分辨 SAR 相位校正方法^[2]。在距离压缩相位历史域,PGA 算法利用相邻脉冲数据估计相位误差的差分,求和得到相位误差,通过迭代逐步减小相位误差,使图像得到聚焦。由于差分运算对加性噪声及干扰很敏感,因此,有可能产生较大的估计误差。为避免相位误差估计中的差分运算,提出了一种基于高阶统计量分析的相位误差估计算法。该算法充分利用了三阶累积量对高斯白噪声的抑制能力,无须差分运算,因

此,估计结果对噪声更加稳健。

1 基于三阶累积量的相位误差算法

高阶统计量具有对高斯噪声是零响应,或称为盲正态的性质^[3,4],因此,可以有效地抑制正态噪声的影响。本文提出的相位误差估计算法与三阶累积量有关。假定有一幅包含 N (距离向单元数) $\times M$ (方位向单元数) 个像素的 SAR 复图像。在每个距离单元上,有一个强散射点且位于孔径位置中心(经循环移位而得到)。由于在高分辨力情况下,各分辨单元内散射体个数有限,大数定律不成立,各分辨单元的散射系数呈非高斯分布^[5],故 N 个强散射点的复反射系数可看作相互独立的非高斯分布随机变量序列。各分辨单元上叠加了独立同分布的复高斯噪声,且噪声与目标成分相互独立。

在距离压缩相位历史域,构造如下相位误差模型^[6]

$$\left. \begin{aligned} g_{k1} &= k + n_{k1} \\ g_{k2} &= k e^{j e^{(2)}} + n_{k2} \\ &\dots \\ g_{kM} &= k e^{j e^{(M)}} + n_{kM} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $k = 1, \dots, N; l = 1, \dots, M; g_{kl}$ 表示在距离压缩相位历史域上第 k 个距离单元、第 l 个孔径位置的样值; $e(l)$ 表示空不变相位误差, 且假定 $e(1) = 0$; k 是第 k 个距离单元上选定点目标的复反射率, 不同距离单元的 k 相互独立且服从非高斯分布; n_{kl} 表示第 k 个距离单元第 l 个孔径位置上的噪声成分。由于离散傅立叶变换是酉线性变换, 因此, n_{kl} 仍然是独立同分布的复高斯随机变量。自聚焦的目的是从式 (1) 中估计相位误差 $e(l)$, 然后进行校正。利用高斯随机变量的三阶累积量为零的性质

$$c_{3g_l}(i, j) = \text{cum}[g_{kl}^*, g_{(k+i)l}, g_{(k+j)l}] = \text{cum}[e^{-j e(l)}, e^{j e(l)}, e^{j e(l)}] + c_{3n_l}(i, j) = e^{j e(l)} \text{cum}[e^{-j e(l)}, e^{j e(l)}, e^{j e(l)}] \quad (2)$$

式中: i, j 是与三阶累积量有关的时间差; $\text{cum}[\cdot]$ 表示联合累积量; g_{kl}^* 是 g_{kl} 的复共轭。根据 $e(l) = 0$, 利用第 1 列数据可求得 $\{e(l)\}$ 的三阶累积量, 相应地得到 $e(l) = 2, \dots, M$ 。

2 自聚焦算法流程

基于高阶统计量的自聚焦算法首先要根据散焦图像确定相位误差的影响, 利用循环移位和确定窗宽的方法孤立强点目标。完整算法包括:

(1) 循环移位 在选定的距离单元上找出最强散射点, 循环移位到成像区中心。循环移位处理保留了选定目标上的相位误差影响, 同时去除了与目标相对应的线性相位成分。

(2) 确定窗宽 加窗处理的目的是保留选定目标所包含的信息, 同时去除其它背景杂波及部分相邻目标的干扰信息。由于对相位误差没有任何先验知识, 因此很难准确地确定窗宽, 往往需要迭代处理, 以逐步逼近真实的窗宽值。

(3) 相位误差估计 利用式 (2) 相位误差估计原理, 可以求得相位误差的估计值。由于避免了差分运算, 因此三阶累积量算法对噪声更加稳健。

(4) 相位误差校正及迭代 相位误差校正就是通过相位误差的复共轭与距离压缩信号历史相乘完成的。在实际的散焦图像中, 同一距离单元往往有多个相互靠近的强点目标, 精确地循环移位是很困难的。故上述过程应以迭代方式进行, 最终得到较为准确的相位误差。流程如图 1。

3 仿真结果与实测数据验证

产生一幅包含 512×512 像素的复图像。各

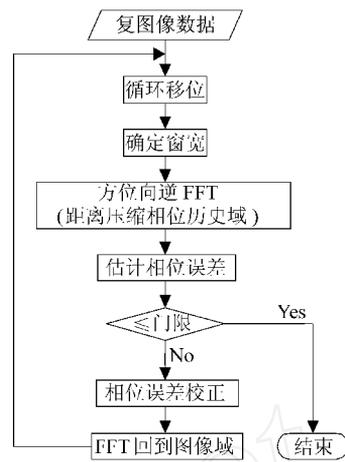


图 1 算法流程

Fig. 1 Block diagram of the autofocus procedure

距离单元上强点目标的复反射系数呈非高斯分布。在各像素位置上叠加零均值高斯分布随机变量, 图 2(a) 示出某一距离单元的一维像, 对应的

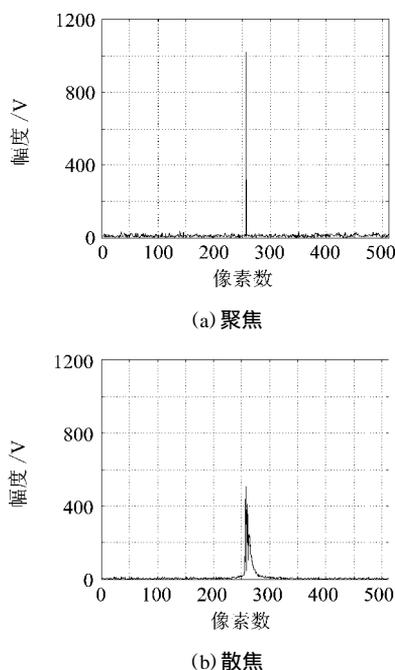


图 2 点目标一维像

Fig. 2 Azimuth profile of point target

强散射点完全聚焦。在距离压缩相位历史域引入相位误差模型^[1,7]

$$e(t) = t^2 + t^3 + t^4 + \dots \quad (3)$$

式中: $e(t)$ 为相位误差; \dots 分别为二次、三次和四次相位误差的系数。

由于距离压缩相位历史域与图像域呈傅立叶变换关系, 因此, 该目标受点扩散函数的影响而散焦, 表现为主瓣展宽, 峰值降低, 旁瓣电平增高等, 如图 2(b) 所示。图 3 绘出利用高阶统计量算法所得到的相位误差估计曲线。显然, 基于三阶累积量的相位误差算法能够有效地克服噪声的影

响。图4示出相位误差得到校正后的结果。

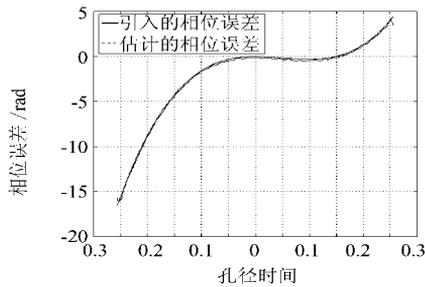


图3 相位误差

Fig. 3 Phase errors

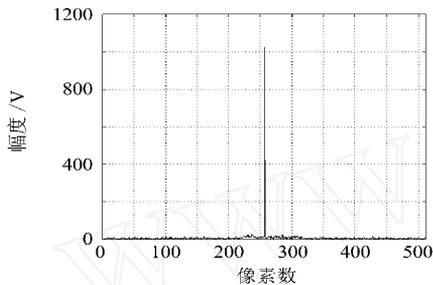


图4 自聚焦处理后的点目标一维像

Fig. 4 Azimuth profile of point target after autofocus

利用某型机载雷达录取的实测数据,本文验证了基于高阶统计量分析的自聚焦算法提高SAR图像质量的可行性。该雷达工作于X波段,以条带模式工作方式采集数据。

图5给出原始的SAR图像。图像大小为 1024×512 像素,分辨力3米 \times 3米,成像场景是某城市郊区,包括一座桥梁、河流及农田等,相位误差未知。图6给出利用三阶累积量自聚焦算法处理后的图像,很明显,强点目标得到聚焦,图像质量大大提高。

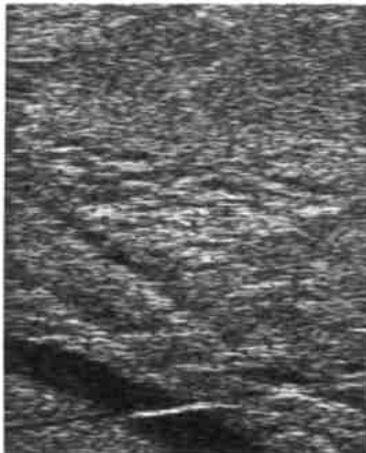


图5 原始SAR图像

Fig. 5 Original SAR image

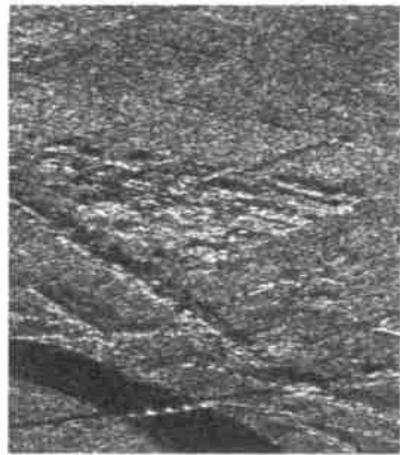


图6 自聚焦处理后的SAR图像

Fig. 6 SAR image processed by autofocus

参考文献

- [1] Carrara W G, Goodman R S, Majowski R M. Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms [M]. Boston: Artech House, 1995.
- [2] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, *et al.* Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30 (3): 827 - 835.
- [3] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1995. (Zhang X D. Modern signal processing [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing Company, 1995.)
- [4] Nikias C L, Petropulu A P. Higher-order spectra analysis: a nonlinear signal processing framework[M]. Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice Hall, 1993.
- [5] Skolnik M L. Radar handbook[M]. 2nd, New York: McGraw-Hill, 1990.
- [6] Jakowatz C V Jr, Wahl D E. Eigenvector method for maximum-likelihood estimation of phase errors in synthetic-aperture-radar imagery[J]. J Opt Soc Am, 1993, 10 (12): 2539 - 2546.
- [7] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1989. (Zhang C B. Synthetic aperture radar principle, system analysis and application[M]. Beijing: Science Publishing Company, 1989.)

作者简介:



武昕伟(1969 -) 男,辽宁本溪人,南京航空航天大学信息科学与技术学院在读博士生,1995年毕业于解放军电子工程学院,主要从事雷达成像算法及图像后处理方面的研究。

朱兆达(1939 -) 男,山东青岛人,1960年毕业于南京航空学院,现为南京航空航天大学信息科学与技术学院教授、博士生导师,中国电子学会会士,IEEE高级会员,研究方向为:雷达信号检测与处理。

(责任编辑:俞敏)