

南京航空航天大学
论文集

(二〇〇三年) 第9册

信息科学与技术学院

(第1分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇〇四年三月

信息科学与技术学院

041 系

目 录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
1	郭春生 朱兆达 朱岱寅	博士 正高 中级	041	In SAR数字地形高度图的生成研究	现代雷达	2003.25.01	
2	郭春生 朱兆达 朱岱寅	博士 正高 中级	041	基于PD算子的In SAR干涉图滤波研究	南航学报	2003.35.01	
3	武昕伟 朱兆达	博士 正高	041	一种基于高阶统计量的SAR图像自聚焦算法	航空学报	2003.24.01	
4	武昕伟 朱兆达	博士 正高	041	一种基于最小熵准则的SAR图像自聚焦算法	系统工程与电子技术	2003.25.07	
5	勾焯 朱兆达 张弓	硕士 正高 副高	041	基于形态学的SAR图像相干斑抑制算法的改进	南航学报	2003.35.04	
6	蔡骏 朱兆达	硕士 正高	041	基于自聚焦方法的SAR动目标检测技术研究	雷达与对抗	2003.00.04	
7	程堂柏 周建江 虞震东 舒永泽	博士 正高 博士 正高	041 041 毕业 病逝	窗函数递推T矩阵法	航空学报	2003.24.02	
8	黎宁 李有福	副高 副高	041 香港城大	Feature Encoding for Unsupervised Segmentation of Color Images	系统、人与控制论汇刊B (美国)	2003.33.03	
9	朱岱寅 朱兆达 叶少华 张昆辉	中级 正高 副高 正高	041 041 外单位 外单位	机载SAR成像信号处理研究与实践	南航学报	2003.35.06	
10	朱岱寅 朱兆达 叶少华	中级 正高 副高	041 041 外单位	Enlarging SAR Patch-Mapping Area by Antenna Beam Scan	南航学报——英文版	2003.20.02	
11	朱岱寅 朱兆达	中级 正高	041	机载干涉SAR/ISAR对地面慢速目标成像研究	电子与信息学报	2003.25.05	
12	汪玲 朱兆达	初级 正高	041	ROPE与PGA在ISAR运动补偿中的对比研究	雷达与对抗	2003.00.01	
13	颜彪 许宗泽 邹国良	博士 正高	041 041 外单位	基于多相滤波的直接数字正交变换技术	上海大学学报	2003.09.01	
14	李颖慧 徐大专	硕士 正高	041	基于SOVA的并行级联空时格码的译码算法	南航学报——英文版	2003.20.01	
15	张小飞 徐大专	博士 正高	041	Singular Signal detection with fractal	神经网络与信号处理国际会议交流		
16	张小飞 徐大专 齐泽锋 赵瑞娜	博士 正高 硕士 硕士	041 041 武大 武大	基于分形的奇异信号检测	南航学报	2003.35.04	
17	张小飞 徐大专 齐泽锋	博士 正高 硕士	041 041 武大	基于小波变换奇异信号检测的研究	系统工程与电子技术	2003.25.07	
18	张小飞 徐大专 齐泽锋	博士 正高 硕士	041 041 武大	基于模极大值小波域的去噪算法研究	数据采集与处理	2003.18.03	
19	张小飞 徐大专 芮华 郑生华	博士 正高 博士 博士	041	基于小波和分形理论的多径衰落信号分析	应用基础与工程科学学报	2003.11.04	
20	宋茂忠 谭姝	正高 硕士	041	载有方位信息的时空调制信号载波提取与相干解调	上海交大学报	2003.37.10	
21	谭姝 宋茂忠	硕士 正高	041	利用RCM2200实现GPS串口数据的网络传输	电子技术	2003.00.03	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
22	史庭祥 宋茂忠	硕士 正高	041	多径环境下的伪码跟踪误差和码片内多径分量的联合估计研究	数据采集与处理	2003.18.03	
23	史庭祥 宋茂忠 王刚	硕士 正高 硕士	041	考虑伪码跟踪误差影响的码片内多径分离研究	电讯技术	2003.43.01	
24	陈吉忠 方琰葳	副高 硕士	041	利用格雷互补序列降低多载波CDMA信号的峰平比	南航学报	2003.35.04	
25	仰枫帆	副高	041	A Dynamic Assignment of Extrinsic Information Distribution by a Frequency Means for Iterative Turbo Decoder	电子学报——英文版	2003.12.04	
26	王永澄 付锋 陈晓凤	正高 硕士 本科	041	圆轨道同步卫星在区域导航系统中应用研究	南航学报	* 2002.34.04	
27	王永澄 付锋 尤鸣翔 陈晓凤	正高 硕士 本科 本科	041	中国区域卫星导航系统星座的方案探讨	南航学报	2003.35.05	
28	刘敬锋 王永澄 尤鸣翔	硕士 正高 本科	041	区域卫星导航星座的探讨	机械制造与自动化	* 2002.00.05	
29	刘敬锋 王永澄	硕士 正高	041	一种基于伪卫星的提高区域导航精度的方案	2002年第17届南京地区研究生通信年会交流	*	
30	王成华 江爱华	正高 中级	041 教务处	对本科毕业设计工作的若干思考	电气电子教学学报	2003.25.01	
31	王成华 沈嗣昌 郑步生	正高 正高 副高	041	建设电工电子基地 培养高素质人才	2003年电子高等教育学术研讨会交流		
32	吕勇 王成华 刘碧	硕士 正高 硕士	041	基于DSP的固态视频记录仪系统设计	计算机应用研究	2003.精扩本	
33	吴宁 陈武棍 张兴敢	正高 硕士 正高	041 毕业 南大	Automatic Target Recognition of ISAR object Images Based on Neural Network	神经网络与信号处理国际会议论文集(南京)	2003.01.00	
34	周芳 吴宁	硕士 正高	041	USB 2.0设备控制器与IP核的Verilog HDL设计	南师大学报——工程技术版	2003.03.04	
35	张弓 朱兆达	副高 正高	041	基于杂波跟踪的CFAR检测研究	电子学报	2003.31.12	
36	张弓 朱兆达 周亦南	副高 正高 硕士	041	局部熵算法在机载PD雷达杂波跟踪中的应用	电子学报	2003.31.09	
37	张弓 朱兆达 朱宁仪	副高 正高 硕士	041	Speckle Suppress for SAR Images Based on Pyramidal Morphology Algorithm	航空学报——英文版	2003.16.02	
38	张弓 朱兆达 朱宁仪	副高 正高 硕士	041	Application of Genetic Algorithm with Approximation Crossover Strategy to Ambiguity Resolution in PD Radar	东南大学学报——英文版	2003.19.02	
39	张弓 朱宁仪 朱兆达	副高 硕士 正高	041	关于SAR图像处理滤波器的评估参数研究	计算机测量与控制	2003.11.09	
40	朱宁仪 张弓 朱兆达	硕士 副高 正高	041	VC++与matlab混合编程用于SAR图像处理	计算机测量与控制	2003.11.07	
41	郑步生	副高	041	用EDA软件Multisim仿真三相电路特性	机械制造与自动化	2003.00.01	
42	郑步生	副高	041	一种快速编辑电子电路图形的方法	电子工程师	2003.29.01	
43	郑步生	副高	041	基于 Microsoft Visio 2002的电路图形的绘制	电气电子教学学报	2003.25.01	
44	郑步生 梁飞鸿 蒋璇	副高 本科 正高	041	基于ASP技术的数字电路辅助教学网站的开发	现代电子技术	2003.00.06	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
45	顾长青 王璟	正高 硕士	041	IPO-FDTD混合法计算三维复杂腔体的RCS	电波科学学报	2003.18.04	
46	顾长青 丁锦波	正高 硕士	041	互耦补偿的神经网络算法用于圆阵波达方向估计	南航学报	2003.35.04	
47	王璟 顾长青	硕士 正高	041	三维复杂腔体的时域有限差分法分析	南航学报	2003.35.04	
48	周永刚 徐金平 牛臻弋	中级 正高 博士	041 东大 东大	CSP结构半导体激光器二维稳态数值模拟	南航学报	2003.35.04	
49	周永刚 徐金平	中级 正高	041 东大	减缩时域有限差分法在电磁干扰预测中的应用	东南大学学报	2003.33.04	
50	周永刚 徐金平	中级 正高	041 东大	细导线精确算法在改进的减缩时域有限差分法中的应用	2003年全国微波毫米波会议交流		

InSAR 数字地形高度图的生成研究

郭春生^{1,2} 朱兆达¹ 朱岱寅¹

(1. 南京航空航天大学 南京 210016)

(2. 杭州电子工业学院 杭州 310037)

【摘要】 干涉合成孔径雷达(InSAR)成像处理中,干涉相位图在相位展开之后,还需作相位高度转换和数字地形高度图(DEM)的校准处理。本文基于 InSAR 成像原理的一种新的近似描述,按照不同的物理意义将干涉相位差分成三个不同的分量,然后据此讨论了从三维相位图到 DEM 的转换以及 DEM 的校准处理。仿真结果验证了该方法的正确性。

【关键词】 干涉合成孔径雷达(InSAR), 数字高度模型(DEM), 重采样

Studies on the DEM Geocoding from InSAR

GUO Chun-sheng^{1,2} ZHU Zhao-da¹ ZHU Dai-yin¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016)

(2. Hangzhou Institute of Electronics Engineering Hangzhou 310037)

【Abstract】 In interferometric synthetic aperture radar, after 2-dimension phase unwrapping processing, the conversion from phase to height and the DEM geocoding are essential. An new description model is proposed to illustrate the principle of the interferometric synthetic aperture radar. Through this model, interferometric phase difference is divides into three proportions, which have the distinct physical meanings. According to these analyses, the processes of geocoding of digital elevation model are discussed. This method is proved by the processing result of emulated data.

【Key words】 interferometry synthetic aperture radar, digital elevation model, re-sampling

1 引言

近年来,由于合成孔径雷达(SAR)可以在全天候条件下得到类似于光学图像的电磁散射图,在许多国家得到了深入的研究和广泛应用。传统的 SAR 仅仅利用处理后得到的复图像数据中的幅度信息,而丢弃了相位信息,干涉合成孔径雷达(InSAR)正是利用该相位值获取观测区域的高度信息。早在 1974 年 Graham^[1]就利用机载 SAR 系统组成垂直干涉仪,实现了对地貌的三维成像。1986 年 Zebker 和 Goldstein^[2]改进了 Graham 的处理方法,提出更加实用的机载 InSAR 处理方案,并在此后使用 SeaSAT 数据进行了证实。Gabriel 和 Goldstein 于 1988 年首次利用单天线重复轨道的 SIR-B 数据取得了成像区的地形高度图(TEM)。国内目前还未录取适合做 InSAR 研究的原始数据,一些单位使用国外数据对 InSAR 开展了一些研究,受到条件限制,这些研究还远不完整,特别是对相位展开后的进一步处理涉及甚少。本文通过对 InSAR 原理的工程近似,将展开后的干涉相位值分成三部分。然后根据这三部分的不同物理意义,给出了干涉

相位到地形高度的转换关系,并讨论了数字高度模型(DEM)的校准处理。

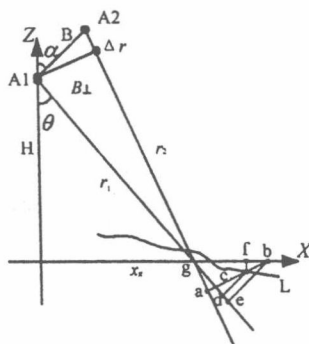


图1 InSAR 成像的几何示意图

2 InSAR 基本原理

InSAR 成像的几何关系如图 1 所示,图中 X 轴代表距离向,Z 轴代表高度向,L 表示随 X 变化的地形高度线。A1、A2 分别为两次航过的天线或单次航过双天线的相位中心点。A1 的高度为 H。g 点为成像区的中心点,距离向坐标为 x_g 。 r_1 和 r_2 分别为 A1 和 A2 到成像区中心点 g 的斜距, r_1 和 r_2 的差为 Δr 。B 是 A1 和 A2 的间距,称为基线。 $B_{\perp}$ 为以 g 点为顶点、 r_1 为一斜边的等边三角形的底边,称为等效基线。 B_x 和 B_z 分别为基线 B 在 X 轴和 Z 轴上的投影,基线 B 与 Z 轴间的夹角为 α 。A1 和 g 的连线与垂线的夹角为 θ 。

假定 L 上有一点 $c(x_c, z_c)$, 其高度用线段 cf 表

示,两天线到点 c 的相位差 φ_c 可表示为

$$\varphi_c = \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) \quad (1)$$

式中: λ 为雷达波长, r_1 、 r_2 分别为天线 A1、A2 到点 c 的距离。根据图 1 所示的几何关系,可将式(1)改写为

$$\varphi_c = \frac{4\pi}{\lambda}(\sqrt{(H + B_x - z_c)^2 + (B_x - x_c)^2} - \sqrt{(H - z_c)^2 + x_c^2}) \quad (2)$$

文献[7]中由该式推出了相位差与高度的关系式,但本文将从另一个角度对该问题作近似分析。由于天线距成像区的距离远远大于成像区的宽度,可以将垂直交于视线方向的等距离曲线段看作是垂直于视线方向的等距离直线段。如图 1 所示,过 c 点的线段 ca 垂直于线段 ga ,近似认为线段 ca 上的各点到天线 A2 的距离相等(即等距离线)。同样线段 cd 相对于天线 A1 有类似性质,则两天线到点 c 的相位差可表示为

$$\varphi_c = \frac{4\pi}{\lambda}(ga - gd) + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r \quad (3)$$

在图 1 中,延长线段 ac 与 X 轴相交于 b 点,再过 b 点作 gd 的垂线 be ,于是可以得到

$$\begin{aligned} \varphi_c &= \frac{4\pi}{\lambda}(ga - ge + ed) + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r \\ &= \underbrace{\frac{4\pi}{\lambda}(ga - ge)}_1 + \underbrace{\frac{4\pi}{\lambda}ed}_2 + \underbrace{\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r}_3 \end{aligned} \quad (4)$$

式中包括三项,其中对于第一项,代表相位值中随距离的变化而线性变化的部分,定义为 β 两次航过的天线相位中心到成像区中心的视线夹角,即 $\beta = \frac{B_\perp}{r_1}$,式中 $B_\perp$ 为等效基线长度,于是第一项可表示为

$$\frac{4\pi}{\lambda}ge(\sin(\theta - \beta) - \sin\theta)/\sin\theta \propto ge \quad (5)$$

对于第二项,该项相位值与地形高度的呈线性关系。如图 1 所示,根据线段 ed 可得到如下关系式

$$\frac{ed}{cb} = \sin\beta \quad (6)$$

由于 c 点高度 $cf = cb\sin(\theta - \beta)$,则上式可表示为

$$\frac{4\pi}{\lambda}cf\sin\beta/\sin(\theta - \beta) \quad (7)$$

根据此式既可将干涉相位值转换为地形高度值。第三项则是一固定相位值。

表 1 InSAR 主要参数

等效基线长度 $B_\perp$	100m
基线俯仰角 α	45°
天线俯仰角 θ	45°
天线 A1 的高度 H	200e3m
成像区中心点水平距离 X_c	200e3m
成像区中心点高度范围 Z_c	1~1 000m
载波波长 λ	0.031 2m

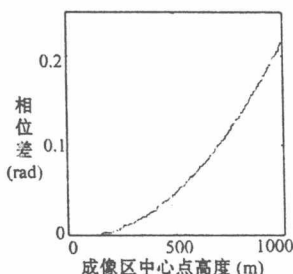


图 2 误差曲线

图 2 给出了在表 1 所示参数情况下,式(3)和式(2)计算出的相位差曲线。从图中可以看出最大相位差小于 0.3rad,根据式(7)可得到高度差为 1.05m,这表明在此近似条件下,数字地形高度图的分辨率数量级可达到几米。

3 DEM 的生成

由前面的近似分析可知,根据式(4)从 InSAR 的干涉相位值中计算目标点的地形高度值,必须首先确定式中与地形高度无关的一、三项的相位值。理论上,线性和固定相位项都可以通过在测绘区设置参考点,由参考点的相位数值对展开后的干涉相位值进行校准。但在实际处理中,由于线性相位项的存在,使干涉相位图的干涉条纹过于密集,不利于二维相位展开,因此需要在二维相位展开之前暂将其去除。线性变化相位项,相当于一个调制信号的载频,对该项去除则相当于解调过程。具体的操作是将信号在频域进行频谱搬移,使信号频谱的模最大值移至零频处,该过程被称为平坦地球相位去除。通常情况下,由于第二项中也会存在线性相位项,这样在平坦地球相位去除的过程中,将不可避免地会影响最终的相位值。因此干涉相位图在经过平坦相位去除和二维相位展开之后,得到三维相位图并非真实地形的反映。为获得 DEM,必须在观测区内设置一些参考点(理想情况下为两点),根据参考点处的干涉相位值来对三维相位图进行校准处理,从干涉相位值中抽出与地形高度相对应的相位分量,并根据式(4)作相位到高度转换处理得到 DEM。

对图 1 的局部进行放大重画后如图 3 所示,图中的虚线表示地形高度线。从图 3 中可以看出,干涉相位图中均匀采样的点 a 、 a' 、 a'' ,计算后得到的分别是对应

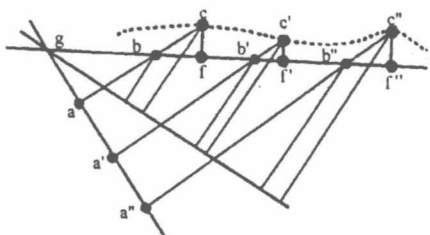


图3 数字高度图的采样间隔示意图

地形高度线上 c, c', c'' 点处的高度值, 其中 c, c', c'' 点在水平线上的投影分别是 f, f', f'' 。虽然水平线上的 b, b', b'' 各点是均匀分布的, 由于 c, c', c'' 点的高度不等, 因此 f, f', f'' 各点在水平线上的分布也是不均匀的 (实际情况中, $bf, b'f', b''f''$ 远远大于 $bb', b'b'', b'b''$, 图中为表示方便, 将 $bb', b'b'', b'b''$ 画成大于 $bf, b'f', b''f''$)。因此直接计算得到的 DEM 的采样间隔也不均匀, 必须对 DEM 的采样间隔进行均匀化处理。由前面的分析可知

$$bf = cf / \tan(\theta - \beta) \quad (8)$$

设成像区数字高度模型的距离向采样点数为 N , 各采样点的高度分别为 $h_i (i \in [0, N-1])$, 这样各点在水平坐标轴上的投影坐标为

$$x_i = i\rho_r + h_i / \tan(\theta - \beta) + C, i \in [0, N-1] \quad (9)$$

式中 C 为起始常数值, ρ_r 为距离向采样间隔。则数字高度模型的距离向投影宽度为

$$W' = (N-1)\rho_r + h_{N-1} - h_0 / \tan(\theta - \beta) \quad (10)$$

在数字高度模型的距离向投影宽度上进行均匀采样, 得到各均匀采样点的坐标为

$$x'_i = iW' / (N-1) + h_0 / \tan(\theta - \beta) \quad (11)$$

$$i \in [0, N-1]$$

最后根据 $x_i \rightarrow h_i, i \in [0, N-1]$ 的对应关系拟合函数 $h(x)$, 并计算 $h(x)$ 在坐标 $x'_i (i \in [0, N-1])$ 出的值, 完成数字高度模型重采样过程, 完成 DEM 的校准处理。需要指出, 这里取得 DEM 的高度值是相对于天线轨迹在地球表面投影的切平面而言。若需要绝对海拔高度图, 还要进行相应的坐标变换^[8]。

4 仿真结果

为验证上述 DEM 生成算法的正确性, 采用表 1 所示的 InSAR 参数, 假定在方位向 199.5km~200km 有半径 500m 的 1/4 圆弧地形 (如图 4(a) 曲线 2)。对天线 A2 获取的 SAR 图象在距离向上按间隔为 14.

137 1m 进行采样, 当天线 A1 的 SAR 图象与 A2 的 SAR 图象理想配准时, 两者的干涉相位差经式 (7) 转换得到的地形高度值如图 4(a) 曲线 1 所示。这时曲线 1 和曲线 2 并不重叠。再根据式 (9) 和式 (11) 对地形高度值做重采样处理, 结果如图 4(b) 所示, 两条曲线完全重合。

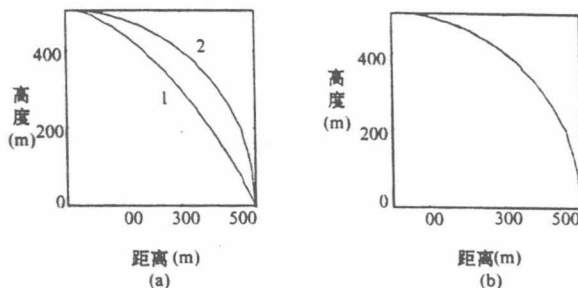


图4 仿真数据重采样示意图

(图中横坐标实际范围为 199 500m~200 000m)

5 结语

干涉相位图经过处理后, 得到三维相位图并非实际地形的真实反映。文中根据 InSAR 的近似模型, 分析了由三维相位图到 DEM 的转换以及 DEM 的校准处理, 并使用仿真数据对该处理过程进行验证。目前, 由于缺乏相应 InSAR 数据的参考点校准数据, 还无法对真实情况进行讨论, 但对此的研究还是非常必要的。

参考文献

- 1 Graham L G. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. Proc. of the IEEE, 1974, 62 (2): 763~768.
- 2 Zebker H A, Goldstein R M. Topographic mapping from interferometric SAR observations. J. Geophys. Res. 1986, 91(B5): 4993~4999.
- 3 Gabriel A K, Goldstein R M. Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results From SIR-B. Int. J. Remote Sensing, 1988, 9 (5): 857~872.
- 4 Yulong Shao, et al. Studies of Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars. SPIE'96, 1996: 1632~1635.
- 5 穆东, 朱兆达, 张焕春. 干涉合成孔径雷达成像技术研究. 遥感技术和应用, 2000, 15 (4): 256~260.
- 6 王超. 利用航天飞机成像雷达干涉数据提取数字高程模型. 遥感学报, 1997, 1(1): 46~49.
- 7 Li F K, Goldstein R M. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radar. IEEE Trans. On Geosci. And Remote Sens., 1994, 32 (5): 1017~1028.

(下转第 28 页)

基于PD算子的InSAR干涉图滤波研究

郭春生, 朱兆达, 朱岱寅

(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京, 210016)

摘要: 讨论了InSAR干涉图的滤波问题, 提出了基于PD算子的干涉图滤波算法。算法首先对干涉图作分块处理, 并假定其中各数据块上的相位值符合多项式模型, 通过PD算子分别估计各数据块的模型系数, 由此重构出近似干涉图。然后根据近似干涉图对原始干涉图进行“解调”, 降低原始干涉图的条纹密度, 并使用滑窗作低通滤波处理。最后将滑窗处理后的干涉图与近似干涉图相乘得到滤波后的干涉图。为避免因分块处理而产生干涉相位的马赛克效应, 算法通过处理两组错位的干涉图分块数据, 并对滤波后的两幅干涉相位图作加权处理, 有效地降低相邻数据块间相位值的不连续性。对X-SAR重复轨道数据产生的干涉图的处理结果表明, 该算法能够对干涉图作很好的滤波处理, 特别是在低信噪比区域, 算法具有较突出的滤波性能。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 滤波; 干涉图; 相位展开; 相位差分算子

中图分类号: TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 1005-2615(2003)01-0072-05

InSAR Interferogram Filtering Based on PD Operator

Guo Chunsheng, Zhu Zhaoda, Zhu Daiyin

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

Abstract: InSAR interferogram filtering is discussed and a new filtering algorithm is presented based on the PD operator. The algorithm firstly divides the interferogram into the blocks. Assuming that the phases of each block are in accordance with multinomial model, the approximate interferogram is reconstituted after separately estimating the model coefficients of each block through PD operator. Secondly based on the approximate interferogram, the primitive interferogram is demodulated to decrease the density of interferometric fringe. So the low pass filter can be used to process the interferogram. Finally the filtered interferogram is multiplied with the approximate interferogram to resume its interferometric fringe. To weakening the mosaic effect on the interferometric phase image produced by the blocking process, the algorithm deals with two group of partly overlapped block data. And two filtered interferometric phase images are weighted to effectively improve the phase continuity of the adjacent data block. Experimental result of the interferograms generated by X-SAR repeat-pass data demonstrates the effectiveness of the algorithm, especially its outstanding ability to resume fringe in the low SNR areas of interferogram.

Key words: InSAR; filtering; interferogram; phase unwrapping; phase difference operator

基金项目: 国家自然科学基金(60082002)资助项目。

收稿日期: 2002-08-29; **修订日期:** 2002-10-10

作者简介: 郭春生, 男, 博士研究生, 1971年1月生; 朱兆达, 男, 教授, 博士生导师, 1939年3月生; 朱岱寅, 男, 讲师, 1974年7月生。

引言

干涉合成孔径雷达^[1] (Interferometric synthetic aperture radar, InSAR 或 IFSAR) 是近几十年来发展起来的一项新型遥感技术。它是传统的 SAR 技术和干涉技术相结合的产物, 被许多学者认为是可能成为建立全球数字地形高度图 (Digital elevation models, DEM) 的惟一有效技术。

在 InSAR 成像处理中, 由于干涉相位图受到噪声的影响, 干涉条纹可能并不明显, 甚至会完全淹没在噪声之中, 因此需要对干涉相位图作滤波处理, 来降低其中由噪声引起的残点数量^[2], 提高干涉条纹的质量, 以利于干涉相位图的二维相位展开处理。在干涉相位图的滤波方法中, 通过估计干涉相位图的局部频率, 由假定的相位模型来实现干涉相位图重构是一种有效的滤波方法。Spagnolini^[3] 首先提出通过估计干涉相位图的局部频率来计算干涉相位图的相位梯度, 实现干涉相位图的重构滤波, 并分析和比较了各种不同的干涉相位图局部频率估计方法的性能。其后 Zhu^[4] 提出了使用 Chirp-Z 变换提高局部频率的估计精度和计算效率, 同时指出由于相邻数据块估计出的局部频率存在不连续性, 需要采用数据块的相互重叠技术, 来减小滤波结果的马赛克效应。在估计干涉相位图局部频率时, 特别是干涉图信噪比较低的情况下, 使用较大的数据块能够有效地降低局部频率的估计方差。但文^[3,4] 提出的滤波方法在使用较大的数据块 (如 128×128) 估计局部频率时, 由于频率估计仅采用一阶相位模型, 即使采用数据块的相互重叠技术, 也仍无法避免滤波结果出现马赛克效应。针对该问题, 本文提出了一种新的滤波方法, 即使用高阶相位多项式模型, 通过 PD 算子^[5] 来估计大干涉图数据块的相位多项式模型系数, 从而估计近似的干涉图, 使得近似的干涉图相邻数据块间的相位值不连续性得到有效降低, 并通过两组错位分块的滤波结果作加权处理, 来减小滤波后干涉相位图马赛克效应, 改善滤波效果。

1 基于 PD 算子的相位多项式模型的估计

设二维离散复信号 $v(n, m)$ 的幅度为固定值, 而相位为多项式型, 则有

$$v(n, m) = A \exp\{j\phi_{S+1}(n, m)\}$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1; m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

式中 A 为一个实正常数, 为分析上方便, 令 $A = 1$;

$$\phi_{S+1}(n, m) = \sum_{(k,l) \in I} c(k, l) n^k m^l, \text{ 其中 } I = \{k > 0, l >$$

0 且 $0 < k + l \leq S\}$, 则称 $\phi_{S+1}(n, m)$ 为 S 阶的二变量多项式。当 $\phi_{S+1}(n, m)$ 仅由常数项时, 称之为零阶的二变量多项式; 当 $\phi_{S+1}(n, m)$ 为 S 阶的多项

式时, 多项式系数 $c(k, l)$ 共有 $\sum_{i=1}^{S+1} i$ 项。

设 τ_m 和 τ_n 都为正整数, 则定义信号 $v(n, m)$ 在变量 m 方向上 PD 算子为^[5]

$$PD_m^{(q)}[v(n, m)] \triangleq v(n, m)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1; m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

$$PD_m^{(q)}[v(n, m)] \triangleq PD_m^{(q-1)}[v(n, m)] \times$$

$$(PD_m^{(q-1)}[v(n, m + \tau_m)])^*$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1; m = 0, 1, \dots, M-1 - q\tau_m \quad (3)$$

同理, 在变量 n 方向上 PD 算子定义为

$$PD_n^{(p)}[v(n, m)] \triangleq v(n, m)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1; m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

$$PD_n^{(p)}[v(n, m)] \triangleq PD_n^{(p-1)}[v(n, m)] \times$$

$$(PD_n^{(p-1)}[v(n, m + \tau_n)])^*$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1 - p\tau_n; m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

一般情况下, 假定先对信号 $v(n, m)$ 在变量 n 方向上作 P 次 $PD_n^{(P)}$ 的处理, 再在变量 m 方向上作 $S-P$ 次的 $PD_m^{(S-P)}$ 的处理, 于是可得到

$$PD_n^{(P)} PD_m^{(S-P)} v(n, m) = \prod_{q=0}^{S-P} \times \left\{ \prod_{p=0}^P \{ [v(n + p\tau_n, m + q\tau_m)]^{(-1)^{p+q}} \} \binom{P}{p} \right\} \binom{S-P}{q} \quad (6)$$

式中符号 $\binom{P}{p}$ 表示 P 中取 p 的组合数。

由于信号 $v(n, m)$ 为二维固定幅度的多项式型相位离散信号, 则上式可化简为

$$PD_n^{(P)} PD_m^{(S-P)} v(n, m) = \exp\{j[\omega_n n + \omega_m m + \gamma_S(\tau_n, \tau_m)]\} \quad (7)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1 - P\tau_n;$$

$$m = 0, 1, \dots, M-1 - (S-P)\tau_m$$

其中, $\gamma_S(\tau_n, \tau_m)$ 表示相位模型中的非线性项, ω_n 和 ω_m 分别为

$$\begin{aligned}\omega_n &= (-1)^S c(P+1, S-P)(P+1)! \times \\ &\quad (S-P)! \tau_n^P \tau_m^{S-P} \\ \omega_m &= (-1)^S c(P, S+1-P)(P)! \times \\ &\quad (S+1-P)! \tau_n^P \tau_m^{S-P}\end{aligned}\quad (8)$$

于是,对 $PD_n^{(P)}(S-P)v(n, m)$ 作二维傅氏变换得到 ω_n 和 ω_m 后,即可计算出相位多项式模型的系数

$$\begin{aligned}c(P+1, S-P) &= \frac{\omega_n}{(-1)^S (P+1)! (S-P)! \tau_n^P \tau_m^{S-P}} \\ c(P, S+1-P) &= \frac{\omega_m}{(-1)^S (P)! (S+1-P)! \tau_n^P \tau_m^{S-P}}\end{aligned}\quad (9)$$

基于二维 PD 算子的相位多项式模型的估计算法与 ML 的相位多项式模型的估计算法相比较,在性能上是次最优的,但在信噪比不是很低的情况下,算法的估计方差接近于克拉美罗限。特别是对于加性圆周高斯白噪声情况下的等幅多项式相位复信号,Francos^[6]分析了算法估计的无偏性以及估计结果均方误差后指出,对于 $S+1$ 阶相位多项式模型的等幅复信号,在任意信噪比下算法的估计都是无偏的,并且算法的变量 τ_n 和 τ_m 的近最优选择为 $\tau_n = \frac{N}{P+1}$ 和 $\tau_m = \frac{M}{S-P+1}$ 。在该选择下,可以保证相位模型估计均方误差是最小的。当 $N \gg P$,可以得到

$$\begin{aligned}E\{[\Delta c(P+1, S-P)]^2\} &\approx \\ &\frac{6c(P, S, R_{SN})}{[(P+1)! (S-P)!]^2 \left(\frac{N}{P+1}\right)^{2P+3} \left(\frac{M}{S-P+1}\right)^{2S-2P+1}}\end{aligned}\quad (10)$$

式中 $c(P, S, R_{SN})$ 是 P, S 和 R_{SN} 的函数。

2 基于 PD 算子的干涉图滤波

当使用滑窗对干涉图进行空域平均,作低通滤波处理时,在干涉条纹稀疏的区域,能够取得很好的滤波效果,但在干涉条纹密集的区域,滑窗将跨越多个干涉条纹,破坏干涉条纹的连续性,使得相位展开变得更加困难。该问题的解决方法是首先从干涉图中估计出一个近似干涉图,据此对原干涉图进行解调处理,从而降低干涉图中的条纹密度,得到一幅条纹密度较低的干涉图;然后使用滑窗对此低条纹密度的干涉图作空域平均滤波,来有效地滤除图中的相位噪声,提高干涉图的信噪比;最后再根据估计出的近似干涉图对滤波后的干涉图进行调制处理,恢复原来的干涉条纹结构,以完成整个

滤波处理过程。

在这种方法中,估计近似的干涉图是算法的关键步骤。估计出的近似干涉图的相位条纹应该尽可能正确地表征原始干涉图的相位条纹,以使得滤波中的解调处理能有效地降低干涉图中的条纹密度,从而利于滑窗的空域平均滤波处理。由于在作近似干涉相位图的估计时需要采用分块处理的方法,特别是在干涉图信噪比较低的情况下,使用较大的数据块能够有效地降低局部频率的估计方差,提高估计出的近似干涉图的质量。但若在估计算法中使用一次线性相位估计模型,对于较大的数据分块,即使采用数据块的相互重叠技术,仍会造成相邻数据块之间相位值的不连续,导致滤波后的干涉相位图出现马赛克效应。

基于 PD 算子的干涉图滤波算法,在估计近似干涉图的分块处理过程中,各复数据块被看作是等幅的复数据块,且使用多项式相位模型代替一次线性相位模型,来更加精确地描述干涉复数据块。对于各干涉复数据块可以根据 PD 算子估计相位多项式模型的系数,以此重构出近似干涉复数据块,然后拼接出整幅的近似干涉图。于是根据近似干涉图经过上述的解调、滑窗的低通滤波和调制完成对原始干涉图的滤波处理。此时滤波后的干涉图相邻数据块之间的相位值并不连续,出现称之为分块处理的马赛克效应。为解决该问题,本算法对原始干涉图作与前面分块相错位的另一组分块(如图1所示,实线表示一组分块,虚线表示与之错位的一组分块),在经过上述的一系列处理之后得到另一幅滤波后的干涉图,然后根据该干涉图对前一幅滤波后的干涉图在块与块相邻处作加权处理,来有效降低相邻数据块间的相位不连续性,减小滤波后干涉相位图的马赛克效应,提高了算法的滤波效果。

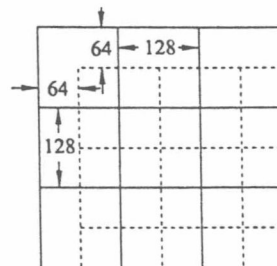


图1 两组错位的数据分块方法示意图

基于 PD 算子的干涉图滤波算法的具体处理步骤如下:

(1)将干涉复数据分成错位的两组数据块,其中各数据块大小为 128×128 ,两组分块间的错位

为(64,64)(如图 1 所示)。

(2)分别对两组数据块中的各个复数据块除以各自的模值,将其化为等幅的复数据块,然后使用 PD 算子法估计等幅复数据块的相位多项式模型系数。

(3)由各块的相位多项式模型系数重构相位数据,并分别将两组分块数据拼接合并,构成两幅完整的近似干涉相位图。

(4)将两幅近似干涉相位图转换为等幅复数据

$v_{\text{estimated}}(n, m)$, 并分别按下式进行滤波处理,得到两幅滤波后的复干涉图。

$$\{[v(n, m) \cdot (v_{\text{estimated}}(n, m))^*] \otimes h_{\text{movingbox}}(n, m)\} \cdot v_{\text{estimated}}(n, m)$$

式中 $v(n, m)$ 为原始干涉图, $h_{\text{movingbox}}(n, m)$ 为空域滑窗。

(5)分别将两幅滤波后的复干涉图之中的各数据块乘以各自的权系数,并将两幅复干涉图对应相加求和,得到滤波后的复干涉图(图 2)。

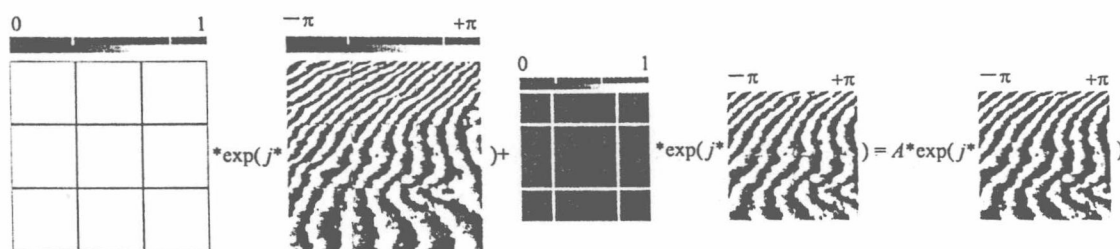


图 2 两幅复干涉图数据加权叠加消除马赛克效应示意图

3 实验结果

本节将从 3 个方面展示基于 PD 算子的干涉相位图滤波算法的处理能力:(1)基于 PD 算子的含噪信号重构;(2)复信号的相位多项式模型与相位线性模型的重构近似相位图的比较;(3)基于 PD 算子的滤波算法对真实 InSAR 数据的滤波处理。

图 3 给出了采用基于 PD 算子对 64×64 的含噪等幅复信号进行信号重构的处理结果,其中图 3(a)为理想的等幅复信号相位图;图 3(b)为加入标准差为 1.256 6 弧度高斯相位噪声后的复信号相位图,此时图中已不存在明显的相位条纹;图 3(c)为根据算法估计出的相位模型参数重构出的信号相位图,可以看出重构出的相位图与原信号的相位图十分近似。

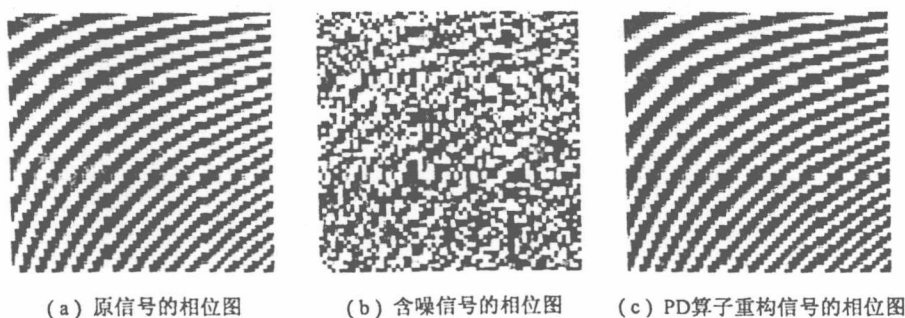


图 3 含噪信号的相位图与基于 PD 算子重构信号的相位图的比较示意图

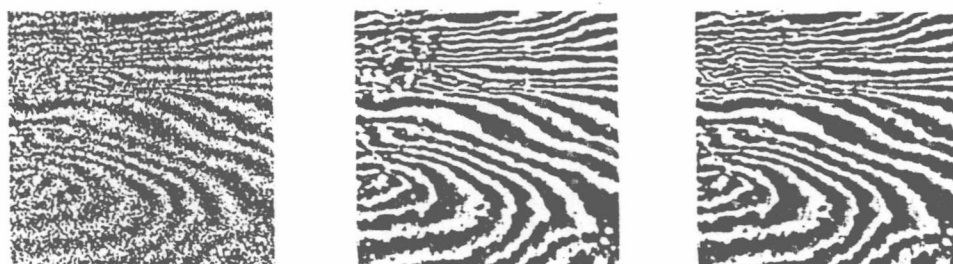
图 4 给出了采用一次线性相位模型和高次多项式相位模型的处理结果。从图中可以看出,采用多项式相位模型的滤波算法具有更高的噪声适应性(见图左上角区域),且分块处理引起的马赛克效应更加不明显。

图 5 给出了基于 PD 算子的滤波算法对 X-SAR 的 Etna 火山真实数据($1\,644 \times 1\,644$)的处理

结果。图 6 分别给出了处理结果中,高相关系数、中相关系数和低相关系数等三块区域的局部放大图。

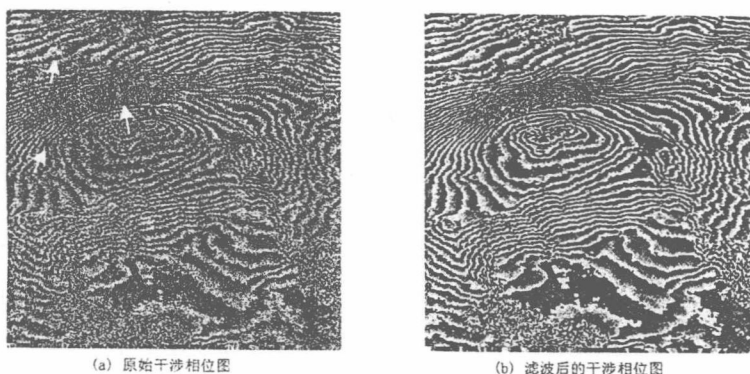
4 结束语

本文采用高阶多项式相位模型描述干涉相位图的局部特性,提出了基于 PD 算子的干涉图滤波算法。该算法不仅能够实现低信噪比情况下干涉图



(a) 原始干涉相位图 (b) 一次线性相位模型的滤波结果 (c) 多项式相位模型的滤波结果

图 4 采用不同相位模型的滤波处理结果



(a) 原始干涉相位图

(b) 滤波后的干涉相位图

图 5 基于 PD 算子滤波方法的 X-SAR 的 Etna 火山真实数据的处理结果



图 6 基于 PD 算子滤波方法的真实数据处理结果局部放大图

的有效滤波处理,并且能够有效地减弱因分块处理而引起的马赛克效应。真实数据的处理结果表明了该算法的有效性和优越性。

参 考 文 献

- [1] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333~382
- [2] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping[J]. Radio Sci, 1988, 23(4): 713~720
- [3] Spagnolini U. 2-D phase unwrapping and instantaneous frequency estimation[J]. IEEE Trans GRS, 1995, 33(3): 579~589
- [4] Zhu Daiying, Scheiber R, Zhu Zhaoda. Impacts of an efficient topography adaptive filter on coherence estimation and phase unwrapping[A]. In: EUSAR'00 [C], Munich: Association for Electrical, Electronic & Information Technologies, 2000. 319~322
- [5] Friedlander B, Francos J M. An estimation algorithm for 2-D polynomial phase signals[J]. IEEE Trans IP, 1996, 5(6): 1084~1086
- [6] Francos J M, Friedlander B. Two-dimensional polynomial phase signals: parameter estimation and bounds[J]. Multidimensional Systems and Signal Process, 1998, 9(2): 173~205

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]

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

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; $\varphi_e(l)$ 表示空不变相位误差, 且假定 $\varphi_e(1) = 0$; α_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 α_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 $\varphi_e(l)$, 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

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

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 $\varphi_e(l) = 0$, 利用第 1 列数据可求得 $\{\alpha_k\}$ 的三阶累积量, 相应地得到 $\varphi_e(l) = 2, \dots, M$ 。

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

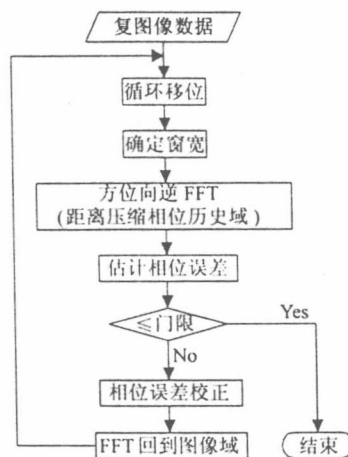
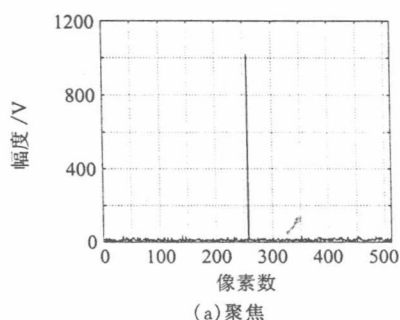


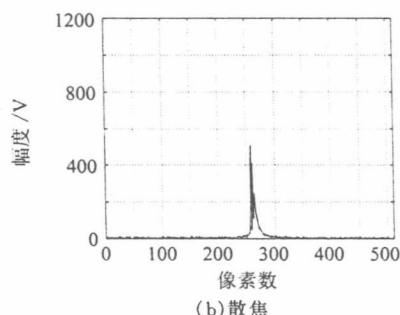
图 1 算法流程

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



(a) 聚焦



(b) 散焦

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]

$$\varphi_e(t) = \alpha t^2 + \beta t^3 + \gamma t^4 + \dots \quad (3)$$

式中: $\varphi_e(t)$ 为相位误差; α, β, γ 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。

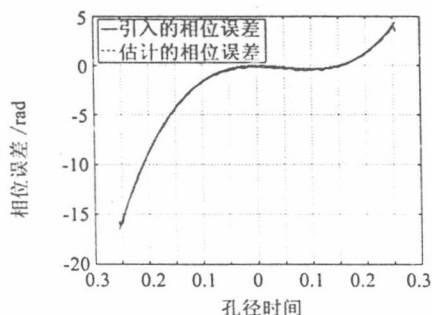


图3 相位误差

Fig.3 Phase errors

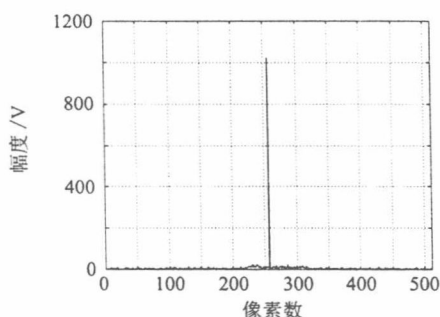


图4 自聚焦处理后的点目标一维像

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 $3 \text{米} \times 3 \text{米}$,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。

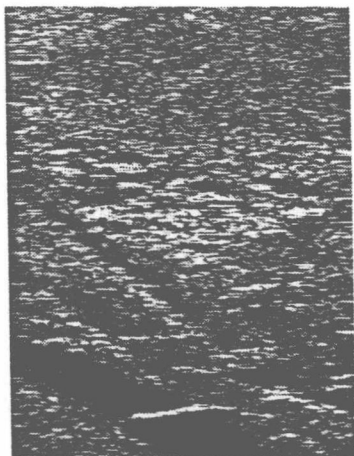


图5 原始SAR图像

Fig.5 Original SAR image

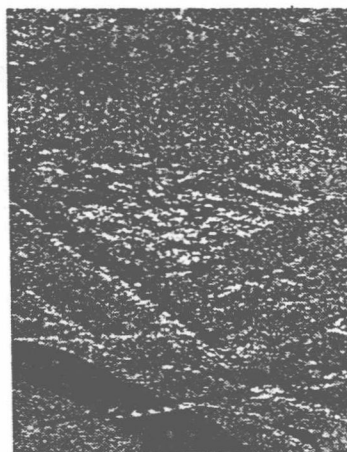


图6 自聚焦处理后的SAR图像

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, N J: 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, 中国电子学会会员, 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)

一种基于最小熵准则的 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)

摘要: 研究了一种新颖的 SAR 图像自聚焦算法。该方法从复图像域出发, 利用最小熵准则盲解卷积原理, 通过多维搜索完成相位误差校正。同相位梯度自聚焦算法相比, 最小熵算法无需在图像域分离出强点目标, 因而特别适用于无任何明显特征的图像。仿真及实测数据处理结果证明了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 自聚焦; 相位误差; 熵; 相位梯度自聚焦

中图分类号: TN957

文献标识码: A

A Novel Autofocus Algorithm Based on Minimum Entropy Criteria for SAR Images

WU Xin-wei, ZHU Zhao-da

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

Abstract: A novel autofocus algorithm for synthetic aperture radar (SAR) images is presented in this paper. Based on blind deconvolution using minimum entropy criteria, the method, which starts right with complex phase-degraded SAR images, carries out phase errors correction via multidimensional search. Compared with the PGA autofocus algorithm, the minimum entropy algorithm needs not isolate prominent point target in image domain and is especially suitable for the images without specific characteristic. The simulation and the processing results of the measured data show the validity of the proposed method.

Keywords: Synthetic aperture radar; Autofocus; Phase errors; Entropy; Phase gradient autofocus

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种能够产生高分辨率图像的相干成像系统,其高分辨能力以飞行平台与成像区域之间保持稳定的几何关系为前提条件。比如,在机载 SAR 条带成像模式下,通常假定飞机在恒定高度匀速直线飞行。实际上,由于飞行姿态的不稳定,载机的飞行轨迹往往偏离这种理想状态,因此,需要对载机的运动进行补偿。

运动补偿是保证 SAR 系统获得高分辨力的关键。随着成像分辨力的不断提高,对天线相位中心与成像目标之间运动补偿精度的要求与日俱增。即便是装有先进导航设备的 SAR 系统,在孔径合成时间内,精确跟踪载机位置也是不容易的。此外,由于成像算法上的近似以及大气传播效应等产生的相位误差,都会造成高分辨图像散焦,导致图像恶化。因此,为得到聚焦良好的图像,在传统的运动补偿之后,高分辨成像往往还要求从 SAR 回波数据中自动估计并补偿残余的相位误差,这一过程称为自聚焦。

子孔径相关(map drift, MD)和相位梯度自聚焦(phase gradient autofocus, PGA)是比较重要的两种自聚焦算法。MD 法把整个孔径分割成两个子孔径,根据子图像之间的互相关结果估计相位误差。MD 方法的缺点是只能估计二次相位误

差,往往不能适应高分辨成像的要求。改进的多子孔径相关算法原理上能估计高阶相位误差,但由于子孔径过短而使估计结果偏差更大,因此实际上很少采用这种方法。PGA 方法不需要指出待估计相位误差的最高阶数,并且能够用于大多数成像场景,因此,自其出现以来,在 SAR 领域得到广泛应用,被公认为是一种稳健的高分辨 SAR 相位校正方法^[1,2]。PGA 算法通过迭代逐步进行相位误差校正,它往往需要在图像中存在孤立的强点目标。因此,对于没有任何孤立强点目标的场景并不是很理想。

本文研究了一种利用图像最小熵准则实现 SAR 图像自聚焦的方法。该方法无需像 PGA 算法那样在图像域分离出强点目标,因而适用于任何场景,特别是对于无任何明显特征的图像,其聚焦效果好于 PGA。此外,该方法能够去除各次相位误差。仿真及实测数据处理结果证明了该方法的有效性。

2 最小熵自聚焦算法

大多数自聚焦算法用于去除空不变相位误差^[3]。这种误差对图像中所有散射点的影响是相同的。因此,可以将散焦的 SAR 图像看作是清晰图像与相位误差造成的点扩散函数的卷积结果,如图 1 所示。

收稿日期:2002-03-11 修订日期:2002-10-17

基金项目:航空科学基金资助课题(00F52057)

作者简介:武昕伟(1969-),男,博士研究生,主要研究方向为雷达成像算法及图像后处理。