一种基于 DCT 的 SAR 图像自聚焦算法

马 仑 廖桂生

(西安电子科技大学 雷达信号处理重点实验室, 西安 710071)

摘 要: 研究了一种基于离散余弦变换(DCT, Discrete Cosine Transform)的 SAR(Synthetic Aperture Radar)图像自聚焦算法. 该方法从复图像域出发,通过在距离压缩相位历史域引入相位误差模型,改变图像的聚焦程度直至一维像的 DCT 序列在高序数区域的权值达到最大,从而完成误差校正. 同相位梯度自聚焦算法相比,该方法无需在图像域分离出强点目标,因此特别适用于无任何明显特征的图像. 由于 DCT 存在快速算法,使得该自聚焦算法计算量较少,更易实现. 实测数据及仿真数据的成像结果证明了此方法的可行性.

关 键 词: 合成孔径雷达; 离散余弦变换; 自聚焦; 相位误差

中图分类号: TN 957

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0417-04

Novel autofocus algorithm based on DCT for SAR images

Ma Lun Liao Guisheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel autofocus algorithm for SAR(synthetic aperture radar) images is presented, which is based on DCT(discrete cosine transform). The method, which starts with complex phase-degraded SAR image, after phase errors model is introduced into the range-compressed phase-history domain, carries out phase errors correction by changing the focus until the intensity of the weight function of the azimuth profile in the area of high sequencies is maximized. Compared with the PGA autofocus algorithm, this autofocus algorithm needs not isolate prominent point target in image domain and is especially suitable for the images without specific characteristic. This autofocus algorithm is of less computational complexity and easy to implement, because there are fast algorithms for DCT. The simulation and the processing results of the measured data show the validity of the proposed method.

Key words: SAR(synthetic aperture radar); DCT(discrete cosine transform); autofocus; phase errors

合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)通过载机沿理想航线匀速运动而形成长的合成阵列,从而获得高的横向分辨率. 机载 SAR,特别是中低空飞行的载机,由于气流的影响,运动的不稳定性是较大的. 当载机偏离理想飞行方向时,需要利用惯性导航系统(INS, Inertial Navigation System)和全球定位系统(GPS, Global Positioning System)对其进行运动补偿. 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(MD, Map Drift)[1],相位梯度自聚焦(PGA, Phase Gradient Autofocus)[2]和最小熵法[3]是几种较为重要的自聚焦算法. MD 算法把整个孔径分割成 2 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,而且当数据中的方位波束比较窄时,导致 2 个子孔径之间的相关性比较弱,使估计误差变大. PGA 算法通过迭代逐步进行相位误差校正,但它往往需要在图像中存在孤立的强散射点,因此,对于没有任何孤立强点目标的场景并不是很

收稿日期: 2005-04-11

作者简介: 马 仑(1981-),男,北京人,博士生, lunma@126.com.

理想. 最小熵法从复图像域出发,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. 但计算图像的熵值计算量较大,从而不能满足实时成像的要求.

文献[4]提出可以利用离散余弦变换(DCT, Discrete Cosine Transform)来衡量图像的清晰程度. 本文提出在距离压缩相位历史域引入包含高阶相位误差的模型,利用 DCT 生成图像聚焦的目标函数,通过多维搜索完成相位误差校正.

1 离散余弦变换(DCT)

文献[5]给出了 DCT 的定义. 给定序列 $x(n)$, $n=0,1,\cdots,N-1$,其离散余弦变换定义为

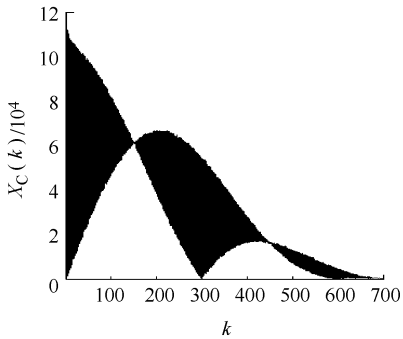
$$X_{\mathrm{C}}(0)=\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{n=0}^{N-1}x(n) \tag{1}$$

$$X_{\mathrm{C}}(k)=\sqrt{\frac{1}{N}}\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\cos\frac{(2n+1)k\pi}{2N}$$
$$k=1,2,\cdots,N-1 \tag{2}$$

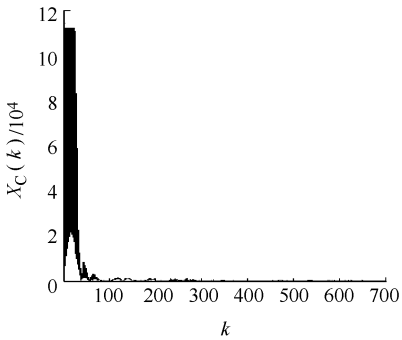
DCT 变换的基矢量是最逼近 K-L 变换的基矢量的,而 K-L 变换被称为最优变换. 因而 DCT 有着近似 K-L 变换的良好性质,在所有存在快速算法的正交变换中,DCT 变换集中能量的效果是最好的[6,7].

2 DCT 与 SAR 图像清晰度的联系

在过去的几十年中,DCT 广泛应用于图像特征提取,维纳滤波以及图像压缩等领域[8]. 经研究发现 DCT 系数与图像的清晰程度也有着密切的联系[4]. 由于 DCT 变换基不是真正意义上的频率,所以以下用序数来表示,但实际上两者是相互联系的. 图 1 所示为对一点目标的一维像作 DCT 的仿真结果,容易看出当 SAR 图像聚焦良好时,其一维像 DCT 序列在高序数区域的权值比散焦的 SAR 图像的权值大得多. SAR 成像是基于匹配滤波原理的,当图像聚焦也就是匹配时,信号能量损失最小,谱峰最尖锐,其高频分量也就越显著;而当图像散焦也就是失配时,信号能量损失变大、主瓣展宽、峰值降低,其高频分量也就越小. 由于距离压缩相位历史域与图像域呈傅里叶变换的关系,散焦 SAR 图像某距离单元的 DCT 系数相当于聚焦 SAR 图像 DCT 系数卷积点扩散函数的 DCT 系数,其高序数区域权值扩散到低序数区域,这与图 1 所示结果是一致的. 因此可在距离压缩的相位历史域引入相位误差,通过改变误差模型,调整图像聚焦直至一维像 DCT 序列在高序数区域的权值达到最大,从而实现 SAR 图像自聚焦.



a 聚焦图像的 DCT 系数



b 散焦图像的 DCT 系数

图 1 SAR 图像的 DCT 系数

3 基于 DCT 的 SAR 成像自聚焦算法

SAR 数据经过距离压缩后可以写成如下形式:

$$s(\hat{t},t_{\mathrm{m}};r)=A\sin c_{\mathrm{r}}(\hat{t}-\frac{2r}{c})a_{\mathrm{a}}(t_{\mathrm{m}},Q)\cdot$$
$$\exp[\mathrm{j}\cdot\varphi_{\mathrm{n}}(t_{\mathrm{m}};r)+\mathrm{j}\cdot\varphi_{\mathrm{e}}(t_{\mathrm{m}};r)] \tag{3}$$

其中 $\hat{t}$ 为距离快时间;t_{m} 为方位慢时间;$a_{\mathrm{a}}(\cdot)$ 为方位窗函数;$\varphi_{\mathrm{n}}(t_{\mathrm{m}};r)$ 为理想相位;$\varphi_{\mathrm{e}}(t_{\mathrm{m}};r)$ 为相位误差. 值得说明的一点是,经过沿距离向将数据矩阵分块后,未补偿的相位误差 $\varphi_{\mathrm{e}}(t_{\mathrm{m}};r)$ 对于各距离单元可以认为是相同的.

在某一距离单元的距离压缩相位历史域引入相位误差 $\hat{\varphi}_{\mathrm{e}}(t_{\mathrm{m}};r)$. 相位误差模型为

$$\hat{\varphi}_{\mathrm{e}}(t_{\mathrm{m}};r)=\alpha t_{\mathrm{m}}^2+\beta t_{\mathrm{m}}^3+\gamma t_{\mathrm{m}}^4+\cdots \tag{4}$$

式中 α,β,γ 分别代表二次、三次、四次相位误差系数.

该距离单元经方位压缩后作离散余弦变换,如上所述,当引入相位误差 $\hat{\varphi}_{\mathrm{e}}(t_{\mathrm{m}};r)=\varphi_{\mathrm{e}}(t_{\mathrm{m}};r)$ 时,该 DCT 序列在高序数区域的权值达到最大,SAR 图像的聚焦效果最好. 由此引入衡量 DCT 序列在高序数区域权值强度的目标函数:

$$I(r)=\sum_{k=K_1}^{K_2}|X_{\mathrm{C}}(k,r)| \tag{5}$$

其中 k 为 DCT 序列的序列号;$X_{\mathrm{C}}(k,r)$ 为该距离单元一维像的 DCT 序列,长度为 N,而 $0<K_1<K_2<$

$N-1$, 这相当于对 $X_C(k,r)$ 加窗以降低低序数区权值对目标函数的影响,从而提高信噪比,对于 K_1 与 K_2 选取,考虑到工程应用的易实现性,可以借鉴信号傅里叶变换中对频谱低频以及高频的划分,当一维像 DCT 系数长度为 N 时,K_1 可定义为 $N/2$,K_2 定义为 N. 另一方法为利用初始调频率对选定距离单元做匹配滤波后进行 DCT,提取 DCT 系数的包络后以主瓣与第一副瓣的凹口作为 K_1 的取值,例如如图 1b 所示为经初始调频率匹配后的一维像,K_1 可定义为 45. 基于 DCT 的 SAR 成像自聚焦算法就是搜索最大$I(r)$的值所对应的引入的相位误差. 完整的算法流程如图 2 所示.

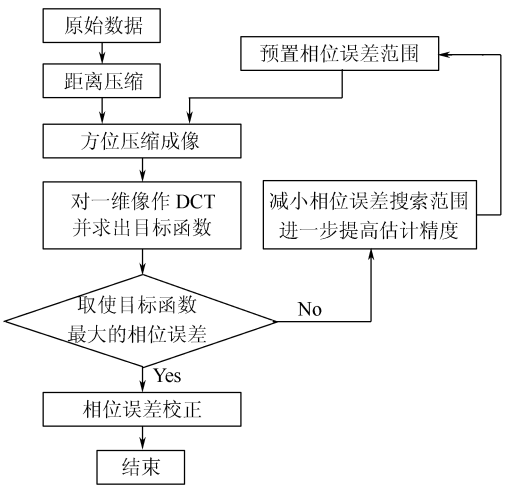


图 2　算法流程

4　算法仿真

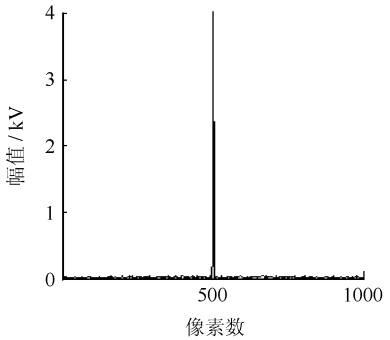
为便于说明基于 DCT 的自聚焦算法,可以合理假定相位误差包含二次和三次误差. 即

$$\hat{\varphi}_e(t_m;r) = \alpha t_m^2 + \beta t_m^3 \qquad (6)$$

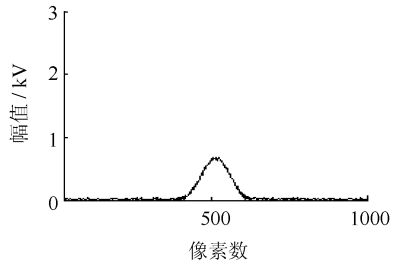
因为分析各次相位误差对脉压结果的影响,实际上由四次以上的高阶相位误差相对较小,对主瓣影响不大[8].

产生一幅包含 1 024×1 024 像素的复图像. 各距离单元上强点目标复反射系数呈高斯分布. 在各像素位置上叠加零均值高斯分布随机变量. 图 3 为某一距离单元一维像,图 3a 对应的点目标完全聚焦. 引入(6)式相位误差,由于距离压缩相位历史域与图像域呈傅里叶变换关系,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 3b 所示.

如图 4a 所示为上述图像某一距离单元的目标函数与相位误差系数的关系. 由于低频相位误差中的高阶分量较小,当斜视角较小时对主瓣的影响很小. 可以看出,目标函数主要取决于二次相位误差,受三次误差的影响相对较小,这与各阶相



a　聚焦图像的一维像

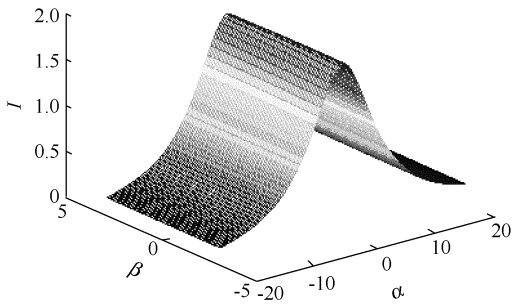


b　散焦图像的一维像

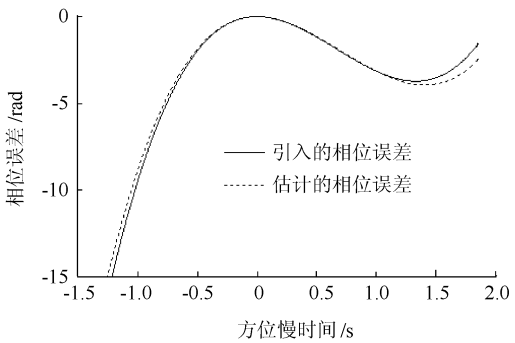
图 3　点目标一维像

位误差对 SAR 图像的影响有关.

图4b绘出了信噪比为15 dB时利用DCT目



a　目标函数与相位误差系数的关系



b　相位误差估计

图 4　目标函数与相位误差

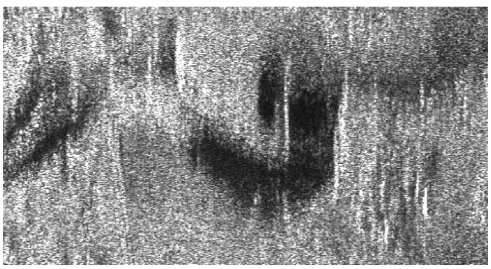
标函数所得到的相位误差估计曲线. 显然,基于 DCT 的相位误差估计算法能够有效地克服噪声的影响.

值得说明的一点是在估计相位误差时可以将目标函数取负,然后进行搜索,因为如图 4a 所示 DCT 目标函数为一上凸函数,而大部分的搜索方法都是基于下凸函数的.

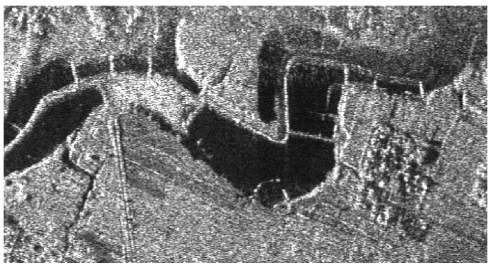
5 实测数据验证

本文利用某机载雷达回波数据验证了基于 DCT 的 SAR 自聚焦算法. 该雷达工作于 X 波段,以条带模式录取数据,工作模式为正侧视,分辨率为 3 m×3 m,相位误差未知,图像大小为 512×256 像素.

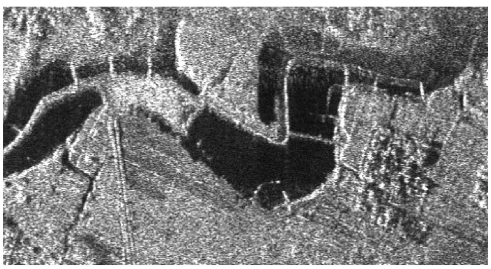
如图 5a 所示为利用 R-D 算法未经运动补偿得到的原始图像,可以看出该图像是散焦的. 如图 5b 所示为利用基于 DCT 的自聚焦算法估计运动参数的成像结果. 可以看出运动误差所带来的相位误差已被校正,该图像聚焦效果良好. 最小熵法是一种重要的自聚焦算法,该方法以图像的熵作为目标函数. 为便于比较,图 5c 给出利用最小熵自聚焦算法的成像结果,从成像结果来看,两幅图像的聚焦效果并无明显差别. 最小熵法与本文提出方法的本质区别在于目标函数不同,由于 DCT 变换存在快速算法,所以基于 DCT 的自聚焦算法计算量更小,更易实现从而更加符合实时成像的要求.



a 未运动补偿处理结果



b DCT 处理结果



c 最小熵处理结果

图 5 实测数据成像结果

6 结 论

本文研究了一种新颖的 SAR 图像自聚焦算法,通过在距离压缩相位历史域引入相位误差模型,采用的搜索方式调整图像的聚焦程度直至一维像 DCT 序列在高序数区域的权值达到最大,从而完成相位误差校正. 仿真及实测数据处理结果证明了该算法的可行性. 与经典 PGA 算法相比,本文方法无须提取 SAR 图像中强点目标的回波信号,对于不存在特显点的 SAR 场景同样适用. 由于 DCT 良好的聚集能量的性能且存在快速算法,所以通过 DCT 来构造目标函数进行相位误差校正,计算量更小,更易实现.

参考文献 (**References**)

[1] Li F K, Held D N, Curlander J, *et al*. Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic aperture radar[J]. IEEE Trans on GRS, 1985, 23(1): 47 ~ 56

[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 Trans on AES, 1994, 30(3): 827 ~ 835

[3] 武昕伟,朱兆达. 一种基于最小熵准则的 SAR 图像自聚焦算法[J]. 系统工程与电子技术,2003, 25(7): 865 ~ 869
Wu Xinwei, Zhu Zhaoda. A novel autofocus algorithm based on minimum entropy criteria for SAR images[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(7): 865 ~ 869(in Chinese)

[4] Charfi M, Nyeck A, Tosser A. Focusing criterion[J]. IEEE Electronics Letters, 1991,27(14):1233 ~ 1235

[5] Ahmed N T, Natarajan, Rao K R. Discrete cosine transform [J]. IEEE Trans on Computer, 1974,23(1): 90 ~ 93.

[6] Rao K R, Yip P. Discrete cosine transform: algorithms, advantages, applications[M]. New York: Academic Press,1990

[7] 奥本海姆 A V, 谢弗 R W, 巴克 J B. 离散时间信号处理[M]. 第二版. 西安:西安交通大学出版社, 2001. 474 ~ 483
Oppenheim A V, Schafer R W, Buck J R. Discrete-time signal processing[M]. 2nd. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. 474 ~ 483(in Chinese)

[8] 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. 163 ~ 178
Zhang Chengbo. Synthetic aperture radar theory, system analysis and applications[M]. Beijing: Science Press, 1989. 163 ~ 178 (in Chinese)