

文章编号: 1671-0576(2020)01-0033-05

一种加权解卷积波束锐化算法

胡 鑫, 吴雪微, 张 衡, 王文晴, 张 洁

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘 要: 针对 SAR 单天线时难以进行前视成像的缺陷, 提出了一种多通道解卷积波束锐化算法, 利用单脉冲雷达的和差波束回波信号进行多通道波束锐化处理。算法具有运算量小、实现简单的优点。可以在不改变系统硬件的前提下, 通过信号处理的方式改善成像效果, 得到超过固有系统极限的高分辨率图像。为优化多通道解卷积波束锐化算法的性能, 根据不同接收通道信号的通道特性差异, 提出了加权解卷积波束锐化算法, 改善了因通道特性不同导致成像结果较差的缺陷。仿真结果表明: 加权后的解卷积波束锐化算法可以获得信噪比更高的波束锐化结果。

关键词: 波束锐化; 解卷积; 加权

中图分类号: TN911.73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2020.01.007

A Weighted Deconvolution Beam Sharpening Algorithm

HU Xin, WU Xue-wei, ZHANG Heng, WANG Wen-qing, ZHANG Jie

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In view of the defect that it is difficult to perform forward-looking imaging for SAR with single antenna, a multi-channel deconvolution beam sharpening algorithm is proposed, which makes use of the sum-difference beam echo signal of monopulse radar to perform multi-channel beam sharpening. The algorithm has the advantages of small computation and simple implementation. It can improve the imaging effect by signal processing without changing the hardware of the system, and high-resolution images beyond the limits of the inherent system are obtained. In order to optimize the performance of multi-channel deconvolution beam sharpening algorithm, according to the channel characteristics of different received channel signals, a weighted deconvolution beam sharpening algorithm is proposed. The defect which leads to poor imaging effect due to different channel gains is improved. The simulation results show that the weighted deconvolution beam sharpening algorithm can obtain the beam sharpening results with higher signal-to-noise ratio.

Key words: beam sharpening; deconvolution; weighted

0 引言

实孔径成像技术是利用实孔径雷达探测目标区域的散射中心分布,来对目标区域进行微波成像的^[1]。其利用天线波束扫描进行成像,可以弥补合成孔径成像雷达单天线时难以进行前视成像的缺陷^[2]。但实孔径成像雷达的成像方位分辨率受天线波束的限制,无法分辨波束宽度内的目标,很难得到高分辨率的成像结果。而波束锐化技术^[3]可以在不改变系统的前提下,通过信号处理的方式改善成像效果,使其可以得到固有系统极限外的高分辨率图像。

传统的解卷积波束锐化技术为单通道解卷积算法,这种解卷积算法由于成像系统具有低通特性,因此求解不稳定。多通道解卷积波束锐化算法^[4]通常通过单脉冲雷达的和差波束形成多通道,进行波束锐化,具有运算量小,实现简单的优点。然而现有的解卷积波束锐化算法并没有考虑不同接收通道的通道特性差异,算法会引入更大的噪声。本文提出的加权多通道解卷积算法考虑了不同接收通道间的通道特性差异,通过加权使算法引入的噪声更小。

1 算法介绍

1.1 解卷积算法介绍

实孔径成像雷达的回波信号表现为目标散射中心分布函数与天线波束方向图函数的卷积,表达式为

$$s(m\theta_s) = f(m\theta_s) * h(m\theta_s) + n(m\theta_s) \quad (1)$$

$$m = 0, 1, \dots, M-1$$

式中: $m\theta_s$ 为角度采样序列; θ_s 为角度采样间隔; $s(m\theta_s)$ 为实孔径雷达方位向回波信号序列; $f(m\theta_s)$ 为目标散射中心分布函数的角度采样序列; $h(m\theta_s)$ 为天线波束方向图函数的角度采样序列; $n(m\theta_s)$ 为加性噪声序列; M 为序列点数。

将式(1)中 θ_s 归一化后得到

$$s(m) = f(m) * h(m) + n(m), \quad (2)$$

$$m = 0, 1, \dots, M-1$$

对式(2)进行离散傅里叶变换,有

$$S(k) = F(k) \times H(k) + N(k), \quad (3)$$

$$k = 0, 1, \dots, M-1$$

式中: $S(k)$ 、 $F(k)$ 、 $H(k)$ 和 $N(k)$ 分别为 $s(m)$ 、 $f(m)$ 、 $h(m)$ 、 $n(m)$ 的离散傅里叶变换。

由式(3)可得

$$F_0(k) = S(k)/H(k) \quad (4)$$

$$= F(k) + N(k)/H(k)$$

式中: $F_0(k)$ 为解卷积解的离散傅里叶变换。

对 $F_0(k)$ 进行离散逆傅里叶变换,得到解卷积的解

$$f_0(m) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} [F(k) + N(k)/H(k)] \times \exp\left(j \frac{2\pi}{M} mk\right) \quad (5)$$

天线的波束方向图函数是一个低通函数,输入信号的高频成分会受到抑制甚至丢失,解卷积波束锐化希望恢复目标散射中心分布函数的高频成分。然而在高频部分 $1/H(k)$ 很大, $N(k)$ 的微弱变化都将导致 $F(k)$ 的很大变动,使得对目标散射中心分布函数 $f(m)$ 的估计不连续依赖于观测数据,这就是单通道解卷积方法的病态性。

当系统存在多个通道时,可以通过合理设计多通道解卷积算子,把病态问题转换为良态,得到稳定的解。

通常情况下,天线和差波束方向图函数不同时为 0。为解决单通道解卷积方法的病态性,可以引入和差双通道来进行多通道解卷积。和差通道的回波信号表达式为

$$\begin{cases} s_1(m) = f(m) * h_1(m) + n_1(m) \\ s_2(m) = f(m) * h_2(m) + n_2(m) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $s_1(m)$ 为实孔径雷达和波束接收信号; $h_1(m)$ 为天线和波束方向图函数; $n_1(m)$ 为和通道噪声; $s_2(m)$ 为实孔径雷达差波束接收信号; $h_2(m)$ 为天线差波束方向图函数; $n_2(m)$ 为差通道噪声。

对式(6)进行傅里叶变换,有

$$\begin{cases} S_1(k) = F(k) \times H_1(k) + N_1(k) \\ S_2(k) = F(k) \times H_2(k) + N_2(k) \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可得

$$F_0(k) = \frac{S_1(k) \times H_1'(k) + S_2(k) \times H_2'(k)}{|H_1(k)|^2 + |H_2(k)|^2}$$

$$= F(k) + \frac{N_1(k) \times H_1'(k) + N_2(k) \times H_2'(k)}{|H_1(k)|^2 + |H_2(k)|^2} \quad (8)$$

式中: $H'_1(k)$ 、 $H'_2(k)$ 分别为 $H_1(k)$ 、 $H_2(k)$ 的共轭。

多通道解卷积的解 $f_0(m)$ 为 $F_0(k)$ 的离散逆傅里叶变换。

$$f_0(m) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} [F(k) + \frac{N_1(k) \times H'_1(k) + N_2(k) \times H'_2(k)}{|H_1(k)|^2 + |H_2(k)|^2}] \exp\left(j \frac{2\pi}{M} mk\right) \quad (9)$$

多通道解卷积算法,不更改工程系统的组成,仅在成像算法上进行改进,方法简单可控,工程实现简单。

1.2 加权解卷积算法

在同一系统中,不同的接收通道一般存在通道特性的差异,传统的多通道解卷积算法并没有考虑和差接收通道的通道特性差异。和差接收通道存在通道特性差异时,两个通道的增益和噪声会不一致。系统接收信号可以表示为

$$\begin{cases} S_1(k) = A_1 \times F(k) \times H_1(k) + N_1(k) \\ S_2(k) = A_2 \times F(k) \times H_2(k) + N_2(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: A_1 和 A_2 分别为两个通道的增益,在 A_1 和 A_2 不相等时,式(9)的公式并不适用。这时需要对和差通道的接收信号进行归一化。即

$$\begin{cases} S_3(k) = F(k) \times H_1(k) + N_3(k) \\ S_4(k) = F(k) \times H_2(k) + N_4(k) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $S_3(k) = S_1(k)/A_1$; $S_4(k) = S_2(k)/A_2$; $N_3(k) = N_1(k)/A_1$; $N_4(k) = N_2(k)/A_2$ 。 $N_3(k)$ 和 $N_4(k)$ 均为加性白噪声,但其平均功率通常并不相同。

由式(11)算术变换得到

$$\begin{aligned} F_0(k) &= \frac{S_3(k) \times H'_1(k) + S_4(k) \times H'_2(k)}{|H_1(k)|^2 + |H_2(k)|^2} \\ &= F(k) + \frac{N_3(k) \times H'_1(k) + N_4(k) \times H'_2(k)}{|H_1(k)|^2 + |H_2(k)|^2} \end{aligned} \quad (12)$$

为减少算法引入的噪声,对式(12)进行加权处理,设加权系数为 ω , 得到

$$\begin{aligned} F_0(k) &= \frac{S_3(k) \times H'_1(k) + \omega \times S_4(k) \times H'_2(k)}{|H_1(k)|^2 + \omega \times |H_2(k)|^2} \\ &= F(k) + \frac{N_3(k) \times H'_1(k) + \omega \times N_4(k) \times H'_2(k)}{|H_1(k)|^2 + \omega \times |H_2(k)|^2} \end{aligned} \quad (13)$$

引入的平均噪声功率为

$$P(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \left[\frac{N_3(k) \times H'_1(k)}{|H_1(k)|^2 + \omega \times |H_2(k)|^2} + \frac{\omega \times N_4(k) \times H'_2(k)}{|H_1(k)|^2 + \omega \times |H_2(k)|^2} \right]^2 \quad (14)$$

因 N_3 和 N_4 为相互独立的高斯白噪声,可知

$$P(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \left\{ \frac{N_3(k)^2 \times |H_1(k)|^2}{[|H_1(k)|^2 + \omega \times |H_2(k)|^2]^2} + \frac{N_4(k)^2 \times \omega^2 \times |H_2(k)|^2}{[|H_1(k)|^2 + \omega \times |H_2(k)|^2]^2} \right\} \quad (15)$$

为使噪声功率最小,对式(15)求导得到

$$\begin{aligned} P'(\omega) &= \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \left\{ \frac{N_3(k)^2 \times |H_1(k)|^2}{[|H_1(k)|^2 + \omega \times |H_2(k)|^2]^2} + \frac{N_4(k)^2 \times \omega^2 \times |H_2(k)|^2}{[|H_1(k)|^2 + \omega \times |H_2(k)|^2]^2} \right\}' \\ &= \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \left\{ \frac{N_3(k)^2 \times |H_2(k)|^2 \times |H_1(k)|^2}{[|H_1(k)|^2 + \omega \times |H_2(k)|^2]^3} \times \right. \\ &\quad \left. 2 \times \left[\left(\frac{N_4(k)}{N_3(k)} \right)^2 \times \omega - 1 \right] \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

令 P_{N_3} 和 P_{N_4} 分别代表 N_3 和 N_4 的平均噪声功率。显然, $\omega = (N_3/N_4)^2 = P_{N_3}/P_{N_4}$ 时, $P'(\omega) = 0$; $\omega < (N_3/N_4)^2 = P_{N_3}/P_{N_4}$ 时, $P'(\omega) < 0$; $\omega > (N_3/N_4)^2 = P_{N_3}/P_{N_4}$ 时, $P'(\omega) > 0$ 。当加权系数 $\omega = P_{N_3}/P_{N_4}$ 时, $P(\omega)$ 存在最小值,即算法引入的噪声功率最低。

2 算法仿真

为了验证加权解卷积波束锐化方法的性能,进行了 matlab 仿真:先设置目标参数,然后根据天线波束方向图,计算和差通道回波;计算加权系数,进行噪声加权解卷积,最后输出结果。

选取方位角 $-4.83^\circ \sim +4.83^\circ$ 范围的区域进行波束锐化算法的仿真,选用的天线和差波束方向图如图 1 所示。角度采样间隔为 0.01° (共计 967 点),其中和波束方向图为 $h_1(m)$,差波束方向图为 $h_2(m)$ 。归一化目标散射中心分布 $f(m)$ 为 5 个点幅度不为 0,位置-幅度坐标分别为 $(-0.04^\circ, 0.71)$, $(-0.02^\circ, 0.5)$, $(0^\circ, 1)$, $(0.02^\circ, 0.71)$, $(0.04^\circ, 0.5)$,其余点幅度为 0,如图 2 所示。

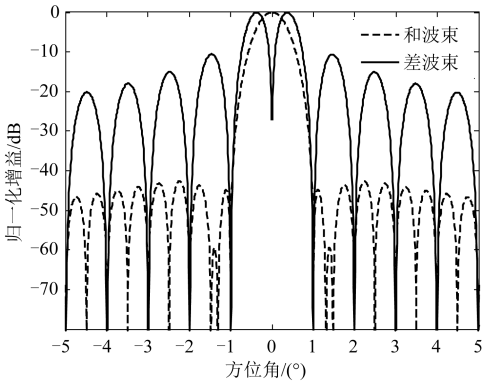


图 1 天线和差波束方向图

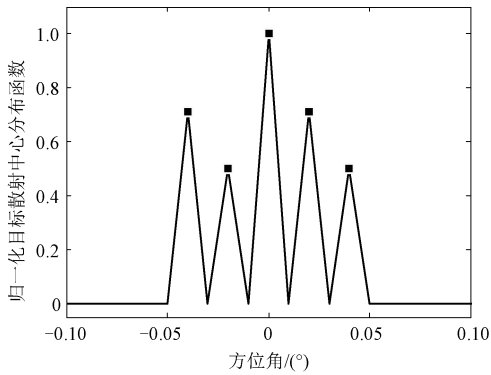


图 2 目标散射中心分布

图 3 为无噪声情况下的波束锐化结果, 图像与目标散射中心分布完全一致。

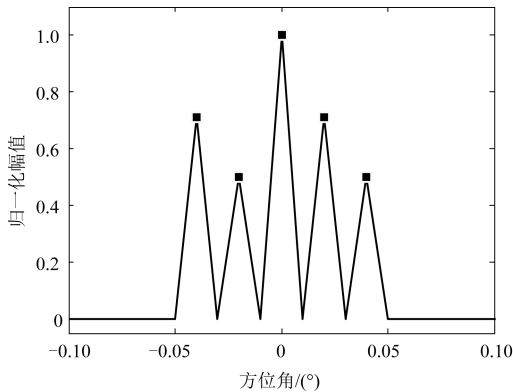


图 3 无噪声情况下的波束锐化结果

设和通道归一化平均噪声功率为 -57.25 dB, 差通道归一化平均噪声功率为 -51.25 dB, 进行仿真分析。

图 4 为该条件下微波图像的不加权波束锐化结果。用式(17)对波束锐化结果进行平均噪声功率估计可知, 归一化平均噪声功率约为 -14.46 dB。

$$E = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} [f_0(m) - f(m)]^2 \quad (17)$$

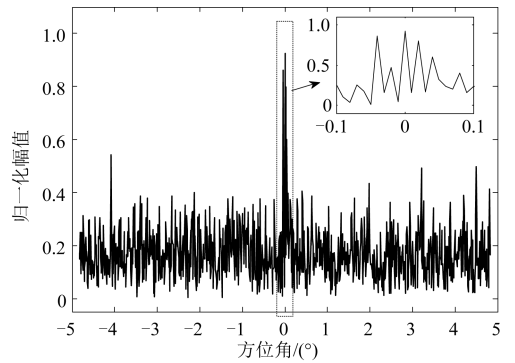


图 4 仿真条件下波束锐化结果

算法引入的噪声可以用进行解卷积运算前后信号归一化平均噪声功率的增加值来表示。图 5 为该条件下根据式(14)计算得到的不同加权系数下算法引入的噪声理论曲线。图 6 为相同条件下, 采用加权波束锐化算法, 不同加权系数下, 算法引入噪声的仿真结果。波束锐化算法引入噪声的仿真结果与理论值一致(为避免偶然性, 图 6 为 500 次仿真结果的平均值)。显然在加权系数为 -6 dB 时, 波束锐化算法输出结果的归一化平均噪声功率最低。

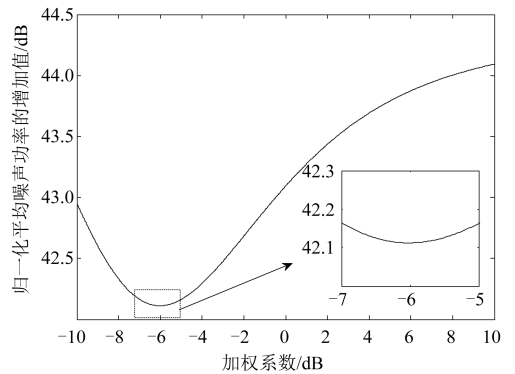


图 5 算法引入噪声的理论值

图 7 为加权系数为 -6 dB 时, 微波图像的加权波束锐化结果。用式(17)对加权波束锐化结果进行平均噪声功率估计可知, 归一化平均噪声功率约为 -15.30 dB。显然加权波束锐化算法可以获得归一化平均噪声功率更低的结果。

3 结论

本文提出了一种加权解卷积波束锐化算法,

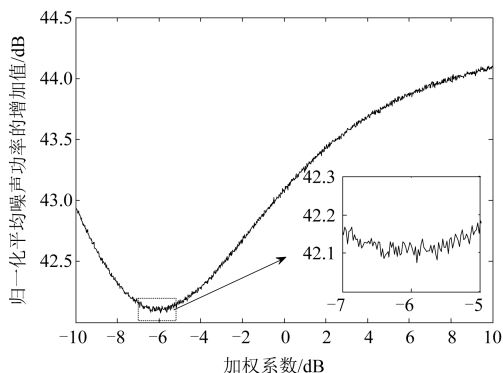


图 6 算法引入噪声的仿真结果

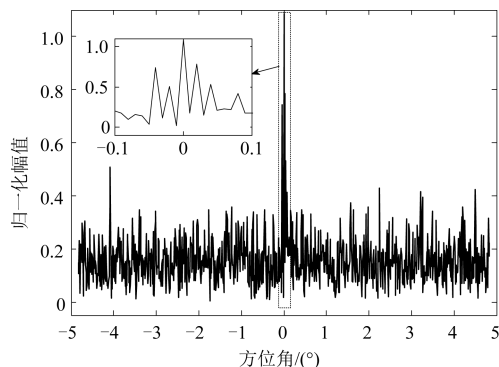


图 7 仿真条件下加权波束锐化结果

在不改变硬件的基础上,改善成像结果。并针对通道特性差异导致不同通道接收信号的幅度、噪声不一致的情况,提出了加权解卷积波束锐化算法。该算法可以利用不同通道的归一化平均噪声功率,计算并采用合理的加权系数,使算法引入的噪声最小,从而改善波束锐化结果的信噪比。仿真结果表明,相较于常规多通道解卷积的波束锐化算法,采用加权解卷积算法可以获得信噪比更高的波束锐化结果,具有较好的工程实用性和可实践性。

参考文献

- [1] 李悦丽, 梁甸农, 黄晓涛. 一种单脉冲雷达多通道解卷积前视成像方法[J]. 信号处理, 2007, 23(5): 699-701.
- [2] 吴一龙, 万红进, 刘辉, 等. 解卷积锐化算法在导引头前视成像中的应用[J]. 火控雷达技术, 2014, 43(1): 42-45.
- [3] 张立东. 一种新型天线波束锐化技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 12-13.
- [4] 李惠. 实孔径雷达波束锐化算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 47-48.

(上接第 32 页)

- [5] WAX M, KAILATH T. Detection of signals by information theoretical criteria [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1985, 33(11): 387-392.
- [6] 王蕾, 张群飞. 空间有色噪声背景下多目标检测性能研究[J]. 微处理机, 2007, 16(1): 89-91.
- [7] WU H T, YANG J F, CHEN F K. Source number estimator using gerschgorin disks [C]// IEEE International Conference on Australia, 1994: 261-264.
- [8] CHEN W G, REILLY J P, WONG K M. Detec-

tion of the number of signals in noise with banded covariance matrices [J]. IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation, 1996, 143(5): 289-294.

- [9] 侯云山, 黄建国, 史文涛. 一种低信噪比下的信号源数检测新方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1390-1394.
- [10] CHEN W G, REILLY J P, WONG K M. Detection of the number of signals in the presence of noise with an unknown, banded structured covariance matrix[C]// IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. New York: IEEE, 1991: 128-131.