

基于 SRMF 和序列 CLEAN 的空间碎片 ISAR 成像算法

王保平, 郭俊杰, 孙超, 方阳

(西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对太空碎片围绕其主轴进行高速自旋运动的特点, 利用单距离匹配滤波(Single Range Matching Filtering, SRMF) 方法可以实现小尺寸太空碎片的逆合成孔径雷达成像。通过相干 CLEAN 技术的引入, SRMF-CLEAN 算法可有效地解决傅里叶变换带来的高旁瓣问题。然而在低信噪比情况下, 利用 SRMF-CLEAN 成像方法提取的散射点位置误差偏大, 甚至某些弱散射点无法被提取; 当散射点距离较近时, 该算法提取的散射点中存在虚假散射点的情况。针对此, 提出了一种改进的 SRMF-CLEAN 成像方法, 该方法利用序列 CLEAN 技术可以有效地解决高旁瓣、虚假散射点问题。仿真实验结果验证了新方法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 太空碎片; 单距离匹配滤波; 相干 CLEAN; 序列 CLEAN

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3410-07

ISAR imaging algorithm based on SRMF and sequence CLEAN

Wang Baoping, Guo Junjie, Sun Chao, Fang Yang

(Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Considering the characteristics of space debris, high-speed spinning around its main axis, Single Range Matching Filtering (SRMF) method can be used for ISAR imaging of space debris with small dimension. By introducing coherent CLEAN technique, high sidelobe problem brought by Fourier transform can be solved with SRMF-CLEAN method effectively. However, under the condition of low signal-to-noise ratio, the position error of scattering centers extracted by SRMF-CLEAN method is big, and even some weak scattering centers cannot be extracted. When the distance between the scattering centers is close, some of scattering centers extracted by the method are false. Therefore, an improved SRMF-CLEAN imaging method was proposed in this paper. The method utilizes sequence CLEAN instead of coherent CLEAN to effectively solve the above problems of high sidelobe and false scattering centers. The experiment results verify effectiveness of the proposed method.

Key words: ISAR; space debris; SRMF; coherent CLEAN; sequence CLEAN

收稿日期: 2013-01-05; 修订日期: 2013-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61073106); 航天科技创新基金(CASC201105); 航空科学基金(2011ZC53042); 西北工业大学研究生创业种子基金(Z2014131)

作者简介: 王保平(1964-), 男, 副教授, 研究生导师, 主要从事图像处理、雷达成像等方面的研究。Email: wbp100@sina.com

0 引言

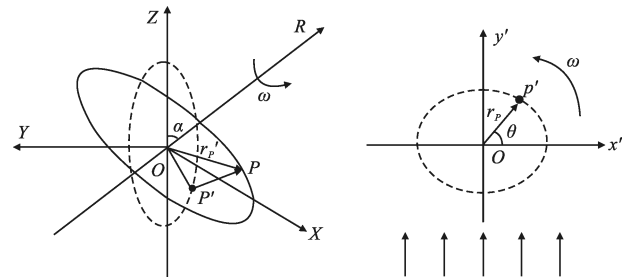
随着各国对空间利用的重视与投入,空间活动规模的不断扩大,轨道上聚集了越来越多的人造航天器,太空碎片的数量也急剧上升。由于卫星、弹道导弹残留碎片的运行速度很高(通常为 10km/s),任何航天器与其碰撞都可能产生灾难性的后果。因此,对空间碎片的探测和识别成为一项重要的任务。目前,根据空间碎片尺寸的大小对其进行处理的方法主要从以下几个方面出发:对于直径小于 1 cm 的碎片通过设计适当的防护罩来保护航天器;直径大于 10 cm 的碎片通过环球雷达网络和光学传感器对其进行检测和跟踪,所以对尺寸介于 1~10 cm 之间碎片的检测和防护就成为一项亟待解决的问题。由于没有有效的空间碎片回收和处理方法,因此,如何通过雷达对这类目标进行有效成像,获取目标二维结构信息,实现对其检测和识别成为一项重要的任务。然而,太空碎片通常会围绕主轴进行高速自旋运动,其对回波的 Doppler 调制与常规运动目标回波的 Doppler 调制有很大的区别,因此基于转台模型的传统 ISAR 成像方法是失效的。窄带条件下,经运动补偿后回波信号可压缩在一个距离单元内,其方位的时频分布表现为周期性正弦分布。单距离多普勒干涉(SRDI)算法^[1]利用太空碎片围绕其主轴进行自旋运动的事实,通过分析迁徙一个周期的多普勒谱,可得到目标的二维像。但是该算法需要将单个距离单元的回波数据转化到时频域,然后沿固定曲线进行积分,具有运算复杂、计算量大的缺点。单距离匹配滤波(SRMF)成像算法^[2]主要通过构造不同旋转半径下的匹配滤波器,分别对横向回波数据进行匹配滤波,得到不同半径上点散射强度的估计,从而可估计出目标的形状、尺寸。SRMF 利用快速傅里叶变换(FFT)有效地提高成像速率,与 SRDI 算法相比具有分辨率高、计算量少的优点。但是傅立叶图像冲激响应具有高旁瓣的缺点,给目标的精确成像带来了一定的影响。SRMF 和相干 CLEAN 算法^[3]相结合,可以有效地解决 SRMF 成像算法高旁瓣的问题,提高成像质量。在高信噪比且散射点间隔较远时,利用该方法成像效果比较理想。但是当散射点的间隔很近或低信噪比时,利用这种方法成像,所提取的散射点位置误差

偏大,甚至某些弱散射点无法被提取。

为此,文中利用 Bose 提出的序列 CLEAN 算法^[4-6]代替相干 CLEAN 算法,解决了相干 CLEAN 算法自身的不稳定性,一定程度上提高了目标散射中心的重构精度。最后,通过多组仿真实验结果验证了改进的 SRMF-CLEAN 算法在解决高旁瓣、虚假散射点问题上的有效性。

1 SRMF 成像算法

假设观测时间内目标自旋角速度恒定且平动完全补偿。由于目标高速自旋,在相干积累时间内,自旋往往转过几个周期,而目标相对于雷达的转角通常只有几度,因而可以忽略其影响。图 1(a)中实线圆表示目标的旋转平面,虚线圆则表示与之对应的成像平面。 P 为目标上的某一散射点, P' 为散射点 P 在成像平面上的投影点,若目标自旋的角速度为 ω ,二维成像平面上 P' 的成像几何模型如图 1(b),其中 $\theta = \omega\tau_m + \gamma_p$ 为 P' 点在相干积累时间内的转角。



(a) 自旋目标三维成像模型 (b) 二维成像平面模型
(a) Three-dimensional imaging model of spinning target (b) Model of two-dimensional imaging plane

图 1 目标高速自旋运动模型

Fig.1 Model of target spinning exercise

假设目标上某一散射点 p 与旋转中心的距离为 r_p' ,其与 X 轴的初始夹角为 γ_p ,则某一慢时间 τ_m 时刻该点与雷达之间的瞬时斜距为:

$$R_p(t_m) = R_0 + r_p' \sin(\omega\tau_m + \gamma_p) \sin\alpha \quad (1)$$

式中: R_0 为雷达与目标旋转中心之间的距离。当雷达发射窄带信号时,距离向分辨率较差,经过距离压缩后,回波包络都被压缩到某一距离单元内。距离脉压信号的表达式为:

$$s_p(\tau_m) = A_p \exp[j2\pi f_c(t - 2R_p(\tau_m))/c] \quad (2)$$

式中: A_p 为该散射点的散射强度; f_c 为雷达发射信号

载频; t 为一固定距离单元到达时间; c 为电磁波的传播速度。将接收到的回波信号与载波混频后得到基带信号为:

$$s_p(\tau_m) = A_p \exp[j4\pi f_c R_p(\tau_m)/c] = A_p \exp[j4\pi R_p(\tau_m)/\lambda] \quad (3)$$

式中: $\lambda = c/f_c$ 表示波长。假设目标平动分量被完全补偿掉, 瞬时距离中只含有转动分量。在相干积累时间内, 假设 α 为常量, 可将 $r_p' \sin \alpha$ 等效为散射点在成像平面内的半径 r_p 。此时, 瞬时距离表达式为:

$$\Delta R_p(\tau_m) = r_p \sin(\omega\tau_m + \gamma_p) \quad (4)$$

经过平动补偿后的回波信号为:

$$s_p(\tau_m) = A_p \exp\left[\frac{-j4\pi}{\lambda} r_p \sin(\omega\tau_m + \gamma_p)\right] \quad (5)$$

该点对应的多普勒频移为:

$$f_D(\tau_m) = -\frac{1}{2\pi} \times \frac{d\phi(\Delta R_p(\tau_m))}{d\tau_m} = -2\omega r_p \cos(\omega\tau_m + \gamma_p) / \lambda \quad (6)$$

在高频近似情况下, 自旋目标中的强散射中心回波按照相位线性叠加就构成了目标散射回波^[7], 所以含有 K 个散射点目标的回波信号模型表示为:

$$s(\tau_m) = \sum_{k=1}^K A_k \exp[-j4\pi r_k \sin(\omega\tau_m + \gamma_k) / \lambda] \quad (7)$$

分析公式(7)可知, 假设相干积累时间内目标自旋转角速度恒定, 目标的横向回波可由一系列以旋转半径和相位为参变量的波形之和表示。当目标上某一散射点的位置固定后, 就可以根据其位置信息建立该点的理论回波波形。然后以该散射点波形作为参考信号, 将横向回波相位校正后相加作相干处理就可得到该散射点的冲激响应。当对选择的某一散射点作相干处理时, 该散射点附近的其它目标点的匹配滤波输出信号不会完全相干, 使得输出信号幅度下降, 从而实现该点的聚焦。依次处理可以得到目标上不同位置处的各个散射点的冲激响应, 最终得到目标完整的二维像。由于两个信号在时域上通过卷积作匹配滤波的运算量较大, 因此可以将其分别转换到频域上作相乘运算然后再作逆 Fourier 变换, 这样可以大大提高运算效率。经 FFT, 公式(7)转换到频域为:

$$S(f) = \sum_{k=1}^K \int_{T_1}^{T_2} A_k \exp[-j4\pi r_k \sin(\omega\tau_m + \gamma_k) / \lambda] \exp(-j2\pi f \tau_m) d\tau_m \quad (8)$$

式中: $[T_1 T_2]$ 为采样区间, 针对每个旋转半径 r_i 建立

参考匹配信号:

$$S_{\text{ref}}^k(\tau_m) = \exp[-j4\pi r_i \sin(\omega\tau_m) / \lambda] \quad (9)$$

式中: $r_i \in (0, r_{\text{max}})$ 。对公式(9)作 FFT 变换将匹配信号转换到频域上, 其形式为:

$$S_{\text{ref}}^k(f) = \int_{T_1}^{T_2} \exp[-j4\pi r_i \sin(\omega\tau_m) / \lambda] \exp(-j2\pi f \tau_m) d\tau_m \quad (10)$$

令 $t = \tau_m + \frac{\gamma_k}{\omega}$, 则公式(8)转换为:

$$S(f) = \sum_{k=1}^K \int_{T_1 + \frac{\gamma_k}{\omega}}^{T_2 + \frac{\gamma_k}{\omega}} A_k \exp[-j4\pi r_k \sin(\omega t) / \lambda] \exp\left[-j2\pi f \left(t - \frac{\gamma_k}{\omega}\right)\right] dt \quad (11)$$

通常情况下, 周期信号的抽样点数必须包含整数周期, 否则会出现频谱泄露, 带来不利影响。那么取 $\omega(T_2 - T_1) = 2k\pi, k=1, 2, \dots$, 由此可得到:

$$S(f) = \sum_{k=1}^K \int_{T_1}^{T_2} A_k \exp[-j4\pi r_k \sin \omega t / \lambda] \exp(-j2\pi f t) d(\tau_m) \exp\left[j2\pi f \frac{\gamma_k}{\omega}\right] \quad (12)$$

实际情况中, 在半径为 r_i 处可能存在着 M 个散射点, 在匹配滤波过程中除了该半径上的散射点外, 其它半径上的散射点均视为杂波。回波信号就可表示为:

$$S(f) = \sum_m \int_{T_1}^{T_2} A_m \exp[-j4\pi r_i \sin \omega t / \lambda] \exp(-j2\pi f t) \cdot d(\tau_m) \exp\left[j2\pi f \frac{\gamma_m}{\omega}\right] + n = S_k(f) + n \quad (13)$$

其中, 公式(13)的 n 表示除了该半径上的信号外其它回波信号之和, 相对于参考信号而言这些信号被视为杂波, 因为在与参考信号匹配滤波过程中它们不会形成相干输出。则半径为 r_i 的信号的频域表达式为:

$$S_k(f) = \sum_m A_m S_{\text{ref}}(f) \exp\left[-j2\pi f \frac{\gamma_m}{\omega}\right] \quad (14)$$

式中: A_m 为半径 r_i 上第 m 个散射点的散射强度, 其中 $m=1, 2, \dots, M$ 。则经过匹配滤波并且忽略杂波影响后的输出为:

$$s(t) = F_f^{-1} [S(f) S_{\text{ref}}^*(f)] = F_f^{-1} \left[\sum_m A_m S_{\text{ref}}(f) S_{\text{ref}}^*(f) \exp(-j2\pi f \gamma_m / \omega) \right] \quad (15)$$

最终得到旋转半径 r_i 信号的输出表达式为:

$$s(t) = \sum_m A_m \text{psf}\left(t - \frac{\gamma_m}{\omega}\right) \quad (16)$$

式中: $\text{psf}(t) = F_f^{-1} [|S_{\text{ref}}|^2]$, $\text{psf}(g)$ 为点扩展函数(Point Spread Function, PSF), 可以用来确定分辨率。通过上面的步骤可以得到旋转半径为 r_i 上各个散射点的点目标散射强度。然后选用不同的旋转半径匹配滤波参考信号就可以得到目标上所有散射点的位置估计, 最终得到旋转目标的极坐标二维图像, 然后经坐标转换生成直角坐标系下二维像。

假设相干积累时间大于一个自旋周期, 可以根据式(6)得出方位向多普勒带宽为 $B_d = 4R_i\omega_s/\lambda$, 其与目标到旋转中心的距离 R_i 成正比, 因此采用 SRMF 算法成像时方位分辨率随距离空变。通过上面的分析可以看出目标上不同旋转半径的散射点对应不同的点扩散函数, 分辨率也不同。设雷达发射信号载频 $f_c = 1 \text{ GHz}$, 波长 $\lambda = 0.3 \text{ m}$, 图 2(a)~(c) 分别为目标上某一散射点分别在旋转半径为 $0.5\lambda, \lambda, 2\lambda$ 时得到的一维像。通过分析发现不同旋转半径的分辨能力不同, 旋转半径越大角度分辨性能越好。

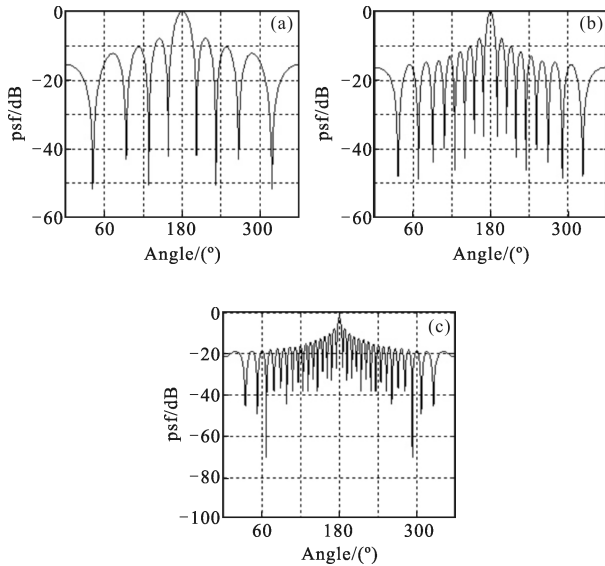


图 2 不同旋转半径的 psf
Fig.2 psf of different rotate radii

2 SRMF 和序列 CLEAN 结合的新算法

通过 SRMF 方法可以在散射点对应空间位置处产生峰值, 然后根据峰值对应的匹配参数得到散射点空间位置的估计值。但是由于在匹配滤波过程中利用快速傅里叶变换重构出的信号为点扩展函数, 形式如公式(16), 匹配过程中不可避免会产生旁瓣且

主瓣也有一定的宽度。当主瓣宽度较大时, 图像分辨率较差, 会直接影响散射点位置的正确识别。另外, 当目标中存在着散射强度不同的散射点时, 强散射中心的旁瓣会淹没弱散射中心的主瓣。为此, 可以采用 SRMF 与相干 CLEAN 进行结合的方法^[3]对空间碎片进行成像。

当散射点间隔较大时, 利用 SRMF-CLEAN 算法可以有效地重建出目标中的散射点。但是, 当散射点距离较近时, 就会出现不同散射点旁瓣和旁瓣、主瓣和旁瓣的幅度的叠加, 导致出现幅值较大的虚假散射点。由于相干 CLEAN 在查找最大峰值过程中只是查找最大的幅值, 并未对查找到的峰值处对应的目标点进行判断。在上述情况下, 利用相干 CLEAN 对 SRMF 所成像进行峰值的查找时就会发生所查找到的点为虚假散射点的情况, 最终影响成像效果。低信噪比情况下, 利用相干 CLEAN 提取的散射点位置偏差较大, 甚至某些弱散射点无法被提取。针对相干 CLEAN 的自身存在的不稳定性, 提出一种基于序列 CLEAN 的改进的 SRMF-CLEAN 算法, 能够有效地提取目标的散射点位置。

序列 CLEAN 在图像中幅度最大的点是虚假目标的情况下仍能够较准确地重构出所有散射点。该方法将该点的主瓣和旁瓣一起消除, 使信号的能量得到消减, 从而暴露出那些被该点旁瓣所掩盖的真实点。如果每次消减的点都是真实的目标点, 当算法结束时信号所剩的能量肯定是最小的。这是序列 CLEAN 算法的最优判别标准。序列 CLEAN 是搜索 m 叉树所有序列中能量消减最多的序列。相干 CLEAN 算法是序列 CLEAN 算法中特殊的一种, 即 $m=1$ 。在序列 CLEAN 中为了能够搜索到目标消减的最佳路径, 每次迭代过程中对信号的评估很重要, 它直接关系到 CLEAN 算法的终止条件和最佳路径的选择。

改进的 SRMF-CLEAN 成像算法的主要步骤如下:

(1) 提取距离压缩后的单个距离单元内的信号 $S_{-r(k)}$, 并利用下面公式计算信号 $S_{-r(k)}$ 的能量 $T(k)$:

$$T(k) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{-r(k)} S_{-r(k)}^* dx \quad (18)$$

- (2) 利用 SRMF 对单个距离单元的横向回波进行处理, 得到一幅二维复图像 I_k ;
- (3) 提取图像 I_k 中最大的 m 个峰值, 并且记录

下每个峰值对应的位置参数和幅值信息;

(4) 利用第 i 个 ($i=1, 2, \dots, m$) 峰值对应的信息 (坐标和幅值) 构造点扩散函数, 在 $S_{r(k)}$ 中对应位置减去该点的点扩散函数, 即: $S_{k,i} = S_{r(k)} - m * BP_{(k,i)}$, 从而得到新的信号 $S_{k,i}$;

(5) 计算新信号 $S_{k,i}$ 所对应的能量为:

$$T_i(k+1) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{k,i}(x) S_{k,i}^*(x) dx \quad (19)$$

(6) 比较 $T_i(k+1)$ 与 $T(k)$, 如果前者大于后者认为本次相减的为虚假目标, 终止该点的迭代过程; 反之, 存储该点的位置和幅度, 然后令 $k=k+1$, 将 $S_{k,i}$ 作为新的输入信号, 重复步骤(1)~(5);

(7) 对 m 个峰值重复步骤(4)~(6);

(8) 如果目标中的散射点都已找到或者是达到噪声水平, 终止迭代过程。

改进的 SRMF-CLEAN 算法通过在每次迭代中对 m 个峰值进行检测, 存储符合条件的峰值, 最终得到一个由真实目标组成的不完全 m 叉树。在生成的 m 叉树中找到信号能量最小的节点, 从此节点向上搜索路径, 存储该路径的所有节点, 然后利用这些节点的相关信息就可构造出目标二维像。利用改进算法能够得到真实目标位置和幅度的最佳估计, 为了能够搜索到目标消减的最佳路径, 每次迭代过程中对剩余信号能量的评估很重要, 它直接关系到改进算法的终止条件和最佳路径的选择。在利用 CLEAN 技术消减过程中, 如果每次减去的都是真实的目标点, 则当 CLEAN 完成后, 信号所剩下的能量肯定是最小的, 这是改进算法的最优判别准则。

改进的 SRMF-CLEAN 算法是 m 叉树搜索的过程, 当目标散射点较多时, 会导致数的层数很大, 树中节点的个数也会随着层数 N 成指数增长, 如果直接搜索会导致时间和空间复杂度很高, 因此可以借助粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 来实现 m 叉树最优路径的搜索^[8-10]。首先在搜索空间中随机初始化一群“粒子”(搜索空间中的每一只鸟), 每个待重构散射点作为一个“粒子”, 经过若干次迭代后, 这些粒子按照一定的速度来寻找全局最优值。每一个粒子的适应值用最优化问题的目标函数来评价, 目标函数直接关系到算法收敛的速度和质量。可以将第一个虚假散射点之前真实目标点的个数作为间接评价参数之一, 最优路径为全部散射

点为真实时的节点序列, 此时信号的残余能量最小。

3 实验仿真及性能分析

实验一: SRMF 算法仿真及性能分析

雷达发射信号载频为 1 GHz, 波长为 $\lambda=0.3$ m, 带宽为 50 MHz, 三个散射点的极坐标分别为 $(3\lambda/2, 0)$, $(3\lambda/2, \pi/2)$, $(\lambda/2, \pi)$, 其后向散射系数均为 1。图 3(a) 和(b)分别为 SRDI 和 SRMF 方法所得的二维像, 图 3(c) 和(d)分别为 SRDI 和 SRMF 方法在 $y=0$ 时的切片图。从成像效果比较得出, SRMF 方法较 SRDI 方法具有更好的分辨率, 而且由于采用快速傅里叶变换, 成像速率也得到了一定的提高。

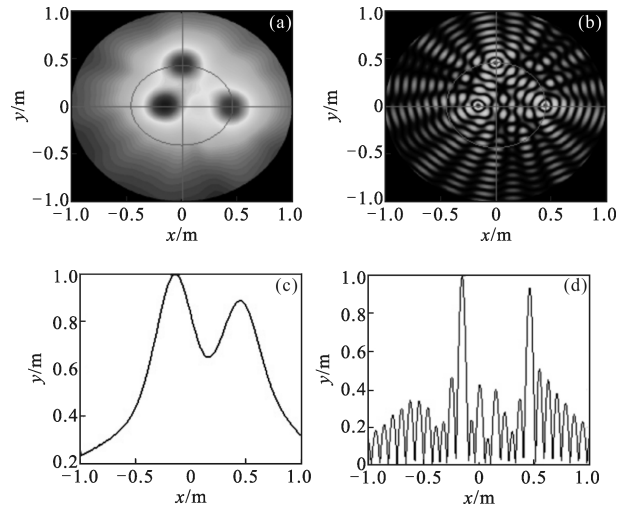


图 3 SRMF 算法的成像效果

Fig.3 Imaging result of SRMF algorithm

实验二: SRMF 与 SRMF-CLEAN 算法性能分析

雷达发射信号载频 f_c 为 10 GHz, 波长为 $\lambda=0.03$ m, 带宽为 50 MHz, 三个散射点的极坐标分别为 $(0.5\lambda, 0)$, $(1.5\lambda, 0)$, $(1.5\lambda, \pi)$, 对应散射点的后向散射系数设为 1、0.6、0.3。图 4(a) 为 SRMF 算法成像结果图, 图 4(b) 为 SRMF 算法成像结果三维显示图, 从图中可以看出散射强度小的散射点被强散射点旁瓣淹没, 无法区分开。图 4(c) 为 SRMF-CLEAN 算法成像结果图, 图 4(d) 为 SRMF-CLEAN 算法成像结果三维显示图, 从图中可以看出利用 SRMF-CLEAN 算法可以有效地提取出仿真的 3 个目标点, 表 1 是 SRMF-CLEAN 算法成像结果后散射点对应的半径和散射系数, 从表中可以看出当散射点距离较远时, SRMF-CLEAN 算法较准确地估计出散射点位置参数及后向散射系数。

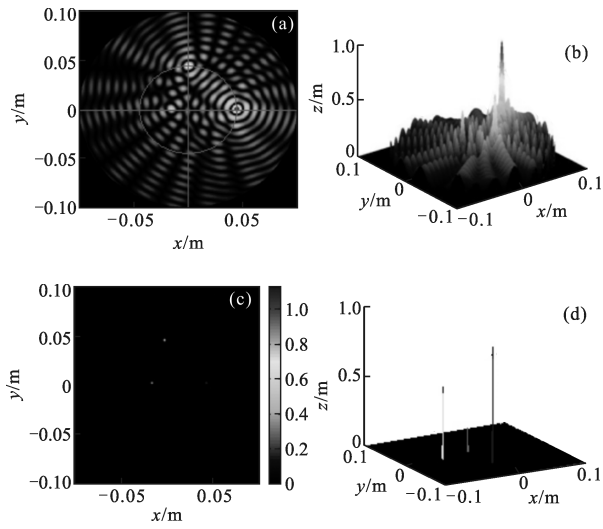


图 4 SRMF-CLEAN 算法成像效果图

Fig.4 Imaging result of SRMF-CLEAN

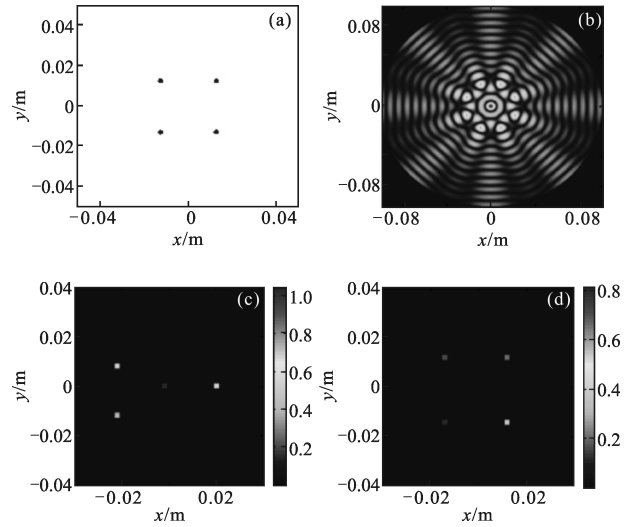


图 5 虚假散射点影响

Fig.5 Effect of false scatterers

表 1 SRMF-CLEAN 算法成像后的参数

Tab.1 Parameters after SRMF-CLEAN imaging algorithm

Serial number	Radius/m	Angle/(°)	Back-scattering coefficient
1	0.0445	0.35	1.064 8
2	0.045	89.65	0.621 4
3	0.015	179.65	0.285 6

实验三:改进算法与 SRMF、SRMF-CLEAN 算法性能比较

雷达发射信号载频 f_c 为 10 GHz, 带宽为 50 Mhz, 波长 $\lambda=0.03\text{m}$ 。图 5(a)为仿真的点目标模型, 4 个散射点位于同一旋转半径, 极坐标分别 $(0.6\lambda, 0.25\pi)$, $(0.6\lambda, 0.75\pi)$, $(0.6\lambda, 1.25\pi)$, $(0.6\lambda, 1.75\pi)$ 。假设仿真的 4 个散射点的后向散射系数均为 1。图 5(b)为 SRMF 算法成像效果图, 从图中可以看出当目标点距离较近, SRMF 算法在匹配滤波中不可避免地产生旁瓣, 会导致散射点旁瓣与旁瓣以及主瓣与旁瓣响应交叠影响, 造成图像中的峰值点往往不是真实目标点的响应。从图 5(b)也可以发现图像中特显点并不是真实的目标点。图 5(c)为 SRMF 和相干 CLEAN 结合的成像效果图, 从该图中可以看出相干 CLEAN 并不能保证查找到的最大峰值点是真实目标点。图 5(d)为改进的 SRMF-CLEAN 算法成像效果图, 从该图中可以看出改进算法能够比较准确地查找到真实的目标点, 成像效果较好。

另外, 低信噪比情况下, 利用 SRMF-CLEAN 方法提取的散射点位置偏差较大, 甚至某些弱散射点无法被提取, 下面通过仿真实验结果进行说明。雷达发射信号载频 f_c 为 10 GHz, 带宽为 50 MHz, 波长 $\lambda=0.03\text{m}$ 。图 6(a)为点目标模型, 8 个点极坐标分别为 $(2\lambda, 0.25\pi)$, $(2\lambda, 0.75\pi)$, $(2\lambda, 1.25\pi)$, $(2\lambda, 1.75\pi)$, $(0.6\lambda, 0.25\pi)$, $(0.6\lambda, 0.75\pi)$, $(0.6\lambda, 1.25\pi)$, $(0.6\lambda, 1.75\pi)$ 各散射点的后向散射系数分别为 1、0.8、0.6、0.2、1、0.8、0.6、0.2。同时在回波信号中加入了 -15 dB 的噪声。图 6(b)为利用 SRMF 成像算法的效果图, 从图中可以看出由于图像具有较高的旁瓣, 某些弱散射点被淹没了, 同时出现了虚假散射点。图 6(c)为 SRMF-CLEAN 算法成像结果, 从该图可以看出弱散射点无法被重建出来。因为相干 CLEAN 每次只查找最大的峰值点, 并未对该点是否为真实目标点进行判断。图 6(d)为改进 SRMF-CLEAN 算法的成像结果, 由于利用消减前后的能量对每次查找到的散射点进行判断, 故所有散射点都被准确地重建出来。

欧氏距离计算公式为:

$$r = \sqrt{(\hat{x}_p - x_p)^2 + (\hat{y}_p - y_p)^2} \quad (20)$$

式中: (x_p, y_p) 为第 p 个散射点坐标的真实值, (\hat{x}_p, \hat{y}_p) 为第 p 个散射点坐标的估计值。表 2 中的欧氏距离 1 指的是利用 SRMF-CLEAN 算法所成像点坐标与原始坐标的差值, 欧氏距离 2 指的是利用改进的 SRMF-CLEAN 算法所成像点坐标与原始坐标的差

值。欧氏距离越大,说明所成像中散射点的位置与原始目标点位置的差异越大。从表格中可以直接发现利用序列 CLEAN 所成图像中点的位置要比相干 CLEAN 得到的结果更准确。

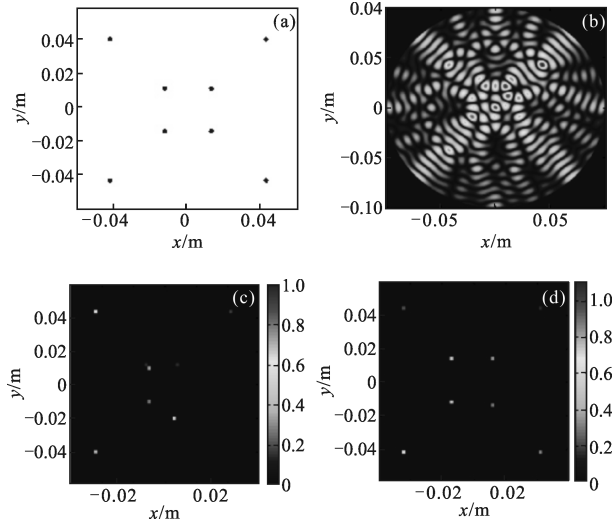


图 6 噪声和虚假散射点影响
Fig.6 Effect of noise and false scatterers

表 2 坐标位置对比(单位:cm)

Tab.2 Comparison of the scatterer location(Unit:cm)

Serial number	Original coordinate	SRMF-CLEAN algorithm	Euclidean distance1	Improved algorithm	Euclidean distance2
1	(4.24,4.24)	(4.34,4.29)	1.1180	(4.3,4.25)	0.6083
2	(-4.24,4.24)	(4.23,4.33)	0.6083	(4.23,4.27)	0.3606
3	(-4.24,4.24)	(-4.33,-4.23)	0.9055	(-4.23,-4.18)	0.6083
4	(-4.24,-4.24)	(0.01,-0.01)	5.8339	(4.22,-4.27)	0.0361
5	(1.27,1.27)	(1,1.05)	0.2955	(1.31,1.23)	0.0566
6	(-1.27,1.27)	(-1.12,1)	0.3089	(-1.27,1.27)	0
7	(-1.27,-1.27)	(-0.94,-1.04)	0.4022	(-1.3,-1.32)	0.2319
8	(1.27,-1.27)	(0.72,-0.92)	0.9031	(1.28,-1.4)	0.1304

4 结论

基于太空碎片围绕其主轴进行自旋运动的规律,SRMF 算法针对不同的旋转半径建立不同匹配滤波器进行滤波可得到目标散射点的极坐标估计。通过这种方法得到的图像具有较高的旁瓣,利用相干 CLEAN 技术对 SRMF 进行修正可以消除旁瓣的

影响。但是当信噪比较小或散射点距离较近时,这种方法不能正确地重建所有散射点。利用序列 CLEAN 算法代替原来的相干 CLEAN 算法与 SRMF 结合进行成像,可以准确地重建所有的散射点。实验仿真结果表明文中方法的有效性和准确性。

参考文献:

- [1] Sato T. Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry [J]. *IEEE Trans Geosci Remote*, 1999, 37: 1000-1005.
- [2] Wang Qi, Xing Mengdao, Bao Zheng. Single range matching filtering based space debris radar image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30 (5): 1037-1040.
- [3] Wang Qi, Xing Mengdao, Lu Guangyao, et al. SRMF-CLEAN imaging algorithm for space debris [J]. *IEEE Transaction on Antennas Propagation*, 2007, 55(12): 3524-3533.
- [4] Bose R, Steinberg B D, Freedman A. Sequence CLEAN: A modified deconvolution technique for microwave images of contiguous targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002 38(50): 89-97.
- [5] Schwarz U J. Mathematical-statistical description of the iterative beam removing technique (method CLEAN) [J]. *Astron Astrophys*, 1978, 65(2): 345-356.
- [6] Bose R, Steinberg B D, Freedman A. Sequence CLEAN: A modified deconvolution technique for microwave images of contiguous targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(50).
- [7] Li H J, Farhat N H, Shen Y S. A new iterative algorithm for extrapolation of data available in multiple restricted regions with applications to radar imaging [J]. *IEEE Trans on AP*, 1987, 35(5): 581-588.
- [8] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [J]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 1995, (11): 1942-1948.
- [9] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [J]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 1995, (10):39-43.
- [10] Bai Lianfa, Han Jing, Zhang Yi, et al. Registration algorithm of infrared and visible images based on improved gradient normalized mutual information and particle swarm optimization[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 248-254. (in Chinese)