

# 引入双程传播损耗的近场大型目标 球面逆投影成像算法研究

孙厚军, 李世勇, 胡伟东, 吕 昕  
(北京理工大学信息科学技术学院, 北京 100081)

摘 要: 球面波双程传播损耗对大型目标近场成像的幅度影响显著, 通过引入双程传播损耗补偿, 改进了球面逆投影算法, 改进后的算法可以明显提高成像的幅度精度. 同理, 利用双程传播损耗补偿可以得到改进的球面卷积逆投影算法. 二者的成像质量基本相同, 但前者的计算量要更小.

关键词: 近场成像; 算法; 传播损耗; 球面逆投影; 球面卷积逆投影

中图分类号: TN959.6 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2009)03-0449-05

## Near Field Imaging Algorithm of the Large Target by Considering Roundtrip Propagation Loss

SUN Hou jun, LI Shi-yong, HU Wei-dong, LV Xin  
(School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: The roundtrip propagation loss of spherical wave is remarkable for the near field imaging of large and complicated targets. The spherical back projection(SBP) algorithm was modified by introducing a compensation factor for the roundtrip propagation loss. The magnitude precision of the image is increased by the modified algorithm. In the same sense, the spherical convolution back projection(SCBP) algorithm was also modified. Comparisons of the numerical simulating between the modified SBP and the modified SCBP indicate that the precisions of the two algorithms are almost the same but the computation cost of the modified SBP is reduced.

Key words: near-field imaging; algorithm; propagation loss; spherical back projection; spherical convolution back projection

### 1 引言

近场目标二维成像技术可以实现目标主要散射中心的精确定位. 对于目标特性的研究, 如获取目标特征数据、检验系统性能、建立各种目标的特征数据库以及有效地进行 RCS 缩减等均有重要意义<sup>[1]</sup>. 80 年代初期, D. C. Munson 和 D. L. Mensa 等人将层析成像的方法运用到聚束式合成孔径雷达中, 并揭示了层析成像与合成孔径雷达成像在数学结构上的相似性<sup>[2-4]</sup>. 目前, 逆投影类算法已经广泛应用于雷达测量之中<sup>[5]</sup>.

文献[6~8]中利用球面逆投影(简称为 SBP)算法实现了导体目标的近场成像, 但没有考虑在近距离大尺寸目标情况下, 对球面波双程传播损耗的补偿. 由于目标特性测量的核心之一是尽可能提高测试精度, 因此, 在近距离大尺寸目标测量情况下, 对于传播损耗的补偿是必要的. 例如, 测量距离为 100m, 目标最大尺寸为 12m 的情况下, 双程传播损耗可以达到约 2.1dB, 这一误差在高精度的测量中是不能容忍的. 作者针对独立分布的点散射模型, 通过引入双程传播损耗补偿, 改进了球面

逆投影算法, 进一步提高了成像精度.

### 2 转台目标二维成像的层析原理

图 1 所示为转台目标的二维成像示意图. 其中,  $g(x, y)$  为目标二维散射密度函数, 目标与  $x-y$  坐标系一起绕原点  $O$  顺时针旋转, 角速度为  $\omega$ ,  $\theta$  为  $x$  轴相对于  $u$  轴的旋转角度;  $R_0$  为雷达到目标旋转中心的距离, 为常数;  $R_\theta$  为目标在相对  $u$  轴转过角度  $\theta$  时, 目标上任一点到达雷达天线的距离;  $(R_\theta, \phi)$  为目标各点的极坐标(相对于  $u-v$  坐标系); 弧线  $S$  代表到达雷达天线等距离的散射点连线.

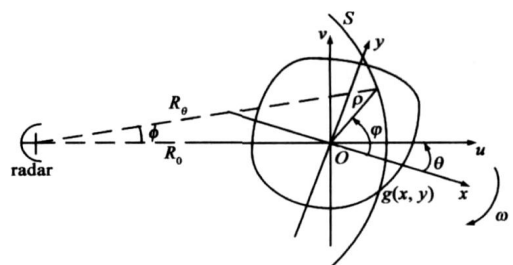


图1 转台目标成像示意图

在远场测量条件下, 混频之后的接收数据  $y_\theta(k)$  与极坐标格式的散射密度函数  $g(\rho, \varphi)$  为傅里叶变换对形式:

$$g(\rho, \varphi) = \int_0^{\infty} y_\theta(k) \cdot \exp(j2kR_0) \cdot \exp[j2\pi k\rho \cos(\varphi - \theta)] / |k| dk d\theta \quad (1)$$

其中,  $k = 2\pi f/c$  为波矢量.

式(1)即为远场情况下最基本的层析再现公式. 由于没有极坐标格式下的快速傅里叶变换算法, 通常可以采用两种算法进行上式的再现, 一种是卷积-逆投影算法, 另一种是首先将其插值到直角坐标系, 然后采用二维 FFT 算法进行图像再现<sup>[9]</sup>.

### 3 补偿双程传播损耗的球面逆投影算法

在近场情况下, 目标区域的入射电磁波近似为球面波, 其形式如下:

$$\hat{s}(\hat{k}, t) = \hat{C} \frac{\exp(j(\omega t - kr))}{r} \quad (2)$$

其中,  $\hat{C}$  为球面波的复幅度. 回波信号经混频并做坐标变换之后, 可以表示为:

$$y_\theta(k) = \int_{R_0} \int_{\phi} g(R_0, \phi) \frac{e^{j2kR_0}}{R_0^2} R_0 dR_0 d\phi \quad (3)$$

令

$$p_\theta(R_0) = \int_{\phi} g(R_0, \phi) R_0 d\phi \quad (4)$$

$p_\theta(R_0)$  为目标沿弧线  $S$  的投影积分, 因此有:

$$y_\theta(k) = \int_{R_0} p_\theta(R_0) \frac{e^{-j2kR_0}}{R_0^2} dR_0 \quad (5)$$

$y_\theta(k)$  与  $p_\theta(R_0)/R_0^2$  为傅里叶变换对, 为使变换对具有对称形式, 以下令  $k = 2f/c$ , 于是有:

$$p_\theta(R_0) = r_0^2 \int_k y_\theta(k) e^{-j2\pi k R_0} dk \quad (6)$$

上式即为曲线 Radon 变换的形式.

求解上述 Radon 变换的逆变换, 即可求得  $g(R_0, \phi)$ . 直接的求解是在柯西主值意义下进行的, 计算非常复杂. 但是在满足一定条件下, 可以简单的利用逆投影方法计算. 本文根据求解直线逆 Radon 变换的代数重建方法模型<sup>[11]</sup>, 给出以下求解曲线逆 Radon 变换的模型.

(1) 目标区域包含  $M \times N$  个像素(即分辨率单元), 设散射强度在每个像素内是均匀的.

(2) 投影角度数为  $M$ , 每个投影下的积分曲线有  $N$  条(对应目标图像的  $N$  个距离单元).

(3) 第  $m$  个观测角度下, 第  $n$  条积分曲线的投影值满足如下表达式:

$$p(m, n) = \sum_{k \in \Omega_n} g(x_k, y_k) \Delta S_{k, n} \quad (7)$$

其中,  $p(m, n)$  表示在第  $m$  个观测角度下, 第  $n$  条积分

曲线的投影值;  $g(x_k, y_k)$  表示第  $k$  个像素的散射强度;  $\Delta S_{k, n}$  为第  $k$  个像素与第  $n$  条积分曲线的相交长度(等于分辨单元的长度);  $\Omega_{nk}$  为所有与第  $n$  条积分曲线相交的像素集合;  $m = 0, 1, \dots, M-1, n = 0, 1, \dots, N-1$ .

上述模型在满足以下条件时, 图像可以直接由逆投影重建.

(1) 对任意一个像素, 在每一个投影角度下, 有且仅有一条积分曲线通过它; 一条曲线积分仅对和它相交的像素有贡献, 而对其他像素没有贡献.

(2) 第  $n$  条积分曲线对一个像素的贡献与它的散射强度成正比.

(3) 经过某一像素的所有曲线积分值(对应不同观测角)相干叠加.

在满足以上条件时, 图像重建可以表示为:

$$g(x_k, y_k) = \sum_m p(m, n) \Delta S_{k, n} \quad (8)$$

其中:  $\Delta S_{k, n} = \begin{cases} A, & \text{第 } n \text{ 条积分曲线经过第 } k \text{ 个像素} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$

$A$  为一个常数, 可以通过定标来抵消掉.

独立分布的点散射模型满足以上条件, 因此, 可以利用直接逆投影来重建散射密度函数分布. 以下将带有双程传播损耗补偿的球面逆投影算法称为改进的球面逆投影算法(简称改进 SBP 算法). 结合式(8)与式(6), 改进 SBP 算法的图像重建可表示为:

$$\hat{g}(R_0, \phi) = A \sum_{m=0}^M R_0^2 \exp(j2\pi k_0 R_0) Q_s(R_0 - R_0) \quad (9)$$

其中,  $\hat{g}(R_0, \phi)$  表示对理想散射密度函数  $g(R_0, \phi)$  的重建;  $\theta = -\varphi/2 + m\Delta\theta, m = 0, 1, \dots, M, \varphi = M\Delta\theta; A$  可通过定标来确定, 并且有:

$$Q_s(R_0 - R_0) = \int_k y_s(k, \theta) \exp(j2\pi n \Delta k R_0) \cdot \exp[j2\pi n \Delta k (R_0 - R_0)] dk \quad (10)$$

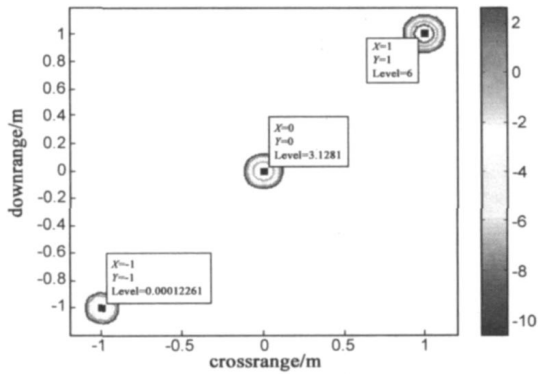
可见,  $Q_s(R_0 - R_0)$  恰好为目标在观测角度  $\theta$  时的一维距离像.

## 4 仿真与实测数据成像

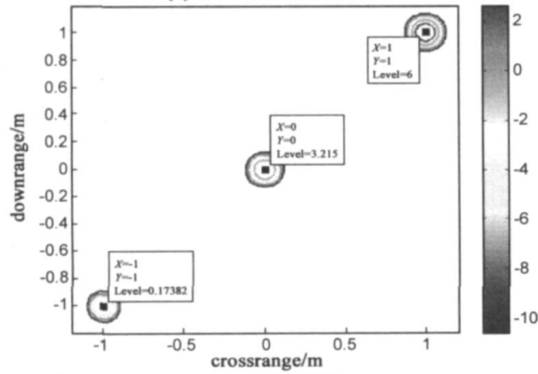
### 4.1 改进 SBP 算法与 SBP 算法的比较

选取仿真目标的散射点坐标分别为  $(-1, -1), (0, 0)$  和  $(1, 1)$ ; 三个散射点的散射强度分别为 0、3 和 6dBsm. 图 2, 图 3 给出了改进 SBP 算法与文献[6]中 SBP 算法的成像比较. 文献[6]中考虑了球面波前的影响, 但没有做双程传播损耗的补偿. 图 2 为目标与雷达相距 100m 时两种方法的成像比较, 可见在距离较远时二者差别较小. 图 3 为目标与雷达相距 10m 时二者的比较. 由图中所标数值可见, 文献[6]中方法的成像幅度发生了明显的非线性变化, 最大误差约为 1.7dB(左下角散射点), 而改进 SBP 方法成像的散射强度仍然保持较好

的线性关系.

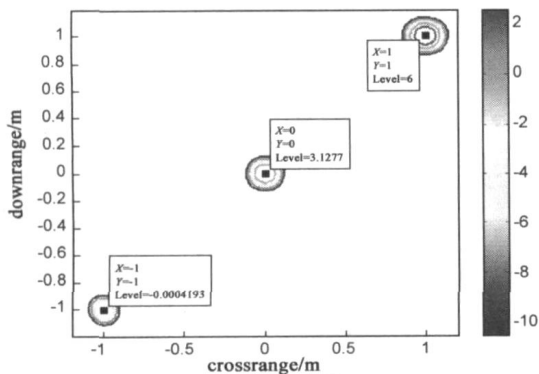


(a) 改进SBP算法成像

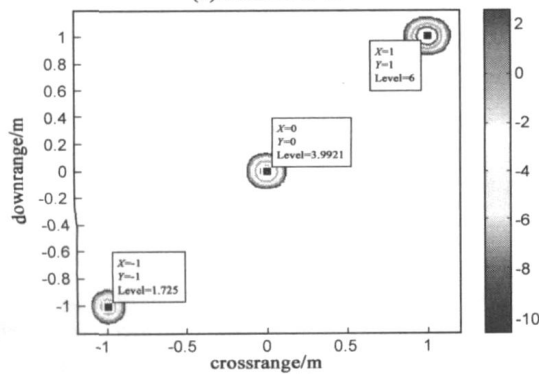


(b) SBP算法成像

图2 改进SBP与文献[6]中SBP算法成像比较, 目标旋转中心距雷达100m



(a) 改进SBP方法

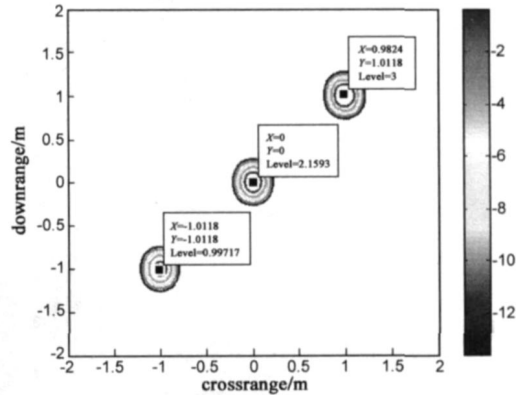


(b) SBP方法

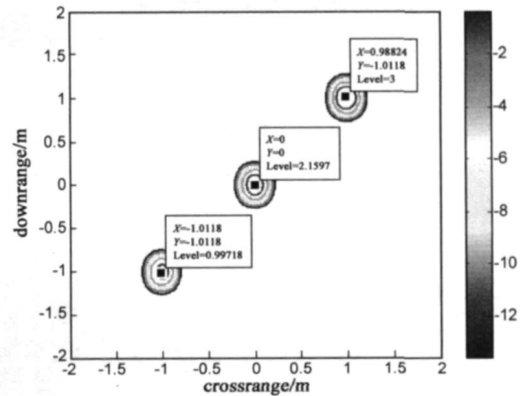
图3 目标旋转中心距雷达10m, 其余同图2说明

### 4.2 改进 SBP 算法与改进球面卷积 逆投影算法的比较

同理, 利用球面波双程传播损耗补偿可以得到改进的球面卷积 逆投影算法( 简称为改进 SCBP 算法). 图 4 给出了改进 SBP 算法与改进 SCBP 算法对上述模型的仿真比较, 散射强度改为 1、2 和 3dBsm, 测量距离为 10m. 由对比可见, 二者的成像效果基本一致( 散射强度有极细微差别). 但是, 改进 SBP 算法不包含原始数据与滤波函数的相乘过程, 因而计算量要小于改进 SCBP 算法.



(a) 改进SBP算法成像



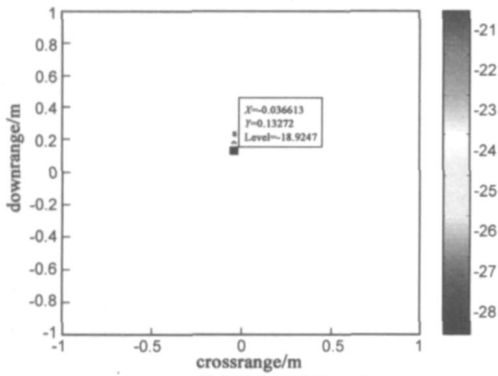
(b) 改进SCBP算法成像

图4 改进SBP算法与改进SCBP算法的成像结果对比, 观测角度数为128

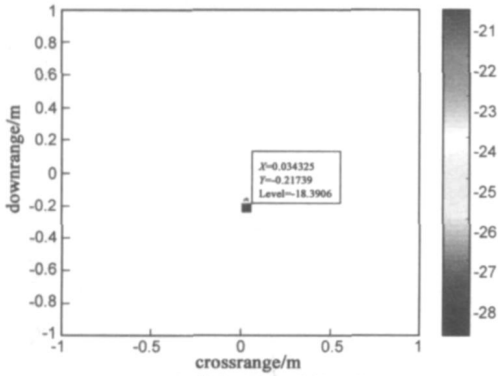
### 4.3 改进 SBP 算法的实测数据成像

首先给出双程传播损耗补偿前后的成像比较, 为避免目标之间的差异带来的影响, 选取一个光滑圆柱体作为测试目标. 对其在不同位置的成像进行比较, 如图 5, 图 6 所示. 理论上, 目标的 RCS 与测量距离无关, 两个位置处的目标散射强度应该相同. 补偿之前两个位置处的圆柱散射强度之差为:  $-18.3906 + 18.9247 = 0.5341\text{dB}$ ; 补偿之后变为:  $-18.7213 + 18.7361 = 0.0148\text{dB}$ . 可见, 补偿之后提高了成像的幅度精度.

由于上述成像是在暗室内进行的, 测量距离和目标尺寸均比较小, 因而补偿效果并不明显. 但是对大型复杂目标的外场测量, 目标尺寸较大, 补偿会具有明显

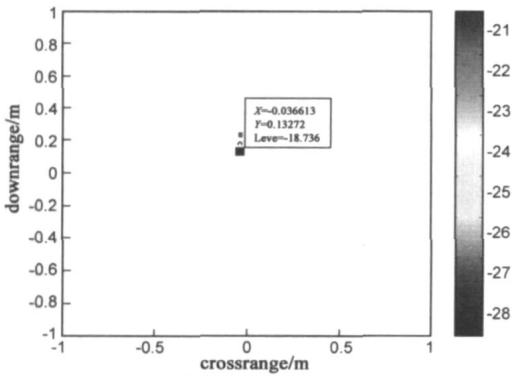


(a) 圆柱体位于离天线较远处

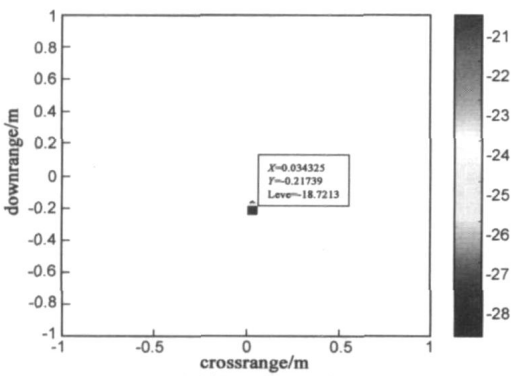


(b) 圆柱体位于离天线较近处

图5 没有传播损耗补偿的SBP算法成像



(a) 圆柱体位于离天线较远处



(b) 圆柱体位于离天线较近处

图6 具有传播损耗补偿的改进SBP算法

的效果. 例如, 当外场测量距离为 100m, 目标最大尺寸为 12m 的情况下, 目标范围内的最大传播损耗约为

2. 1dB. 因此对大型目标而言, 传播损耗补偿是必需的.

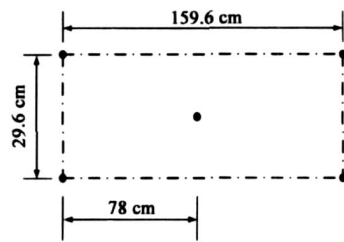


图7 测量模型尺寸

最后给出暗室内的组合目标的成像结果. 图7为5个钉子组成的目标模型示意图, 成像结果如图8所示. 其中, 转台中心至天线的距离为 11.89m, 测量频率为 31GHz ~

39GHz. 对于中心频点而言, 目标所需的经典远场距离约为 594m, 因此目标处于近场球面波照射情况下. 由图上所标数据可见, 改进 SBP 算法的成像与实际目标模型吻合较好.

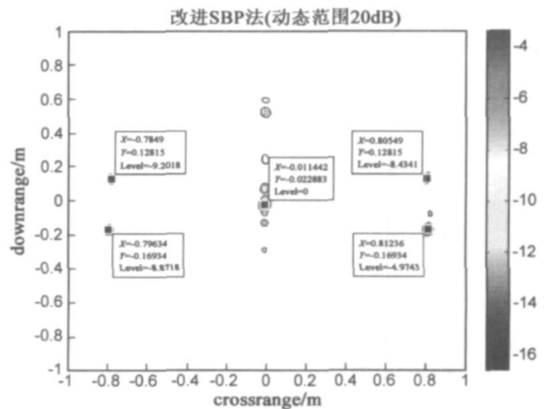


图8 改进SBP算法暗室数据成像

### 5 结论

本文针对近场情况下的目标二维测量应用, 通过引入双程传播损耗补偿, 改进了球面逆投影算法, 进一步提高了成像的幅度精度. 与文献[6]的仿真比较表明, 在近场情况下改进 SBP 算法的成像结果能够保持良好的线性关系. 与改进 SCBP 算法的成像比较表明, 二者精度基本一致, 但改进 SBP 算法的计算量要更小.

### 参考文献:

- [1] Knott E F, Shaaffer J F, et al. Radar cross section[ M]. Boston: Artech House, 2004. 11- 13.
- [2] Mensa D L. High resolution radar cross section imaging[ M]. Boston: Artech House, 1991. 201- 216.
- [3] Munson D C, O' Brien J D, et al. A Tomographic Formulation of Spotlight Mode Synthetic Aperture Radar[ J]. IEEE Proceedings, 1983, 71( 8) : 917- 925.
- [4] Mensa D L, Halevy S, et al. Coherent Doppler Tomography for Microwave Imaging [ J]. Proceedings of the IEEE, 1983, 71 (2): 254- 261.
- [5] Frolind P O, Ulander L M H. Evaluation of angular interpolat

- tion kernels in fast back projection SAR processing[J]. IEE Proc.- Radar Sonar Navig., 2006, 153(3): 243- 249.
- [6] Li Hsueh Jyh, Lin Feng Li. Near field imaging for conducting objects[J]. IEEE Trans. Antennas, Propag., 1991, 39(5): 600- 605.
- [7] Li Hsueh Jyh, Farhat N H, et al. Image interpretation and prediction in microwave diversity imaging[J]. IEEE Trans. Geoscience, Remote sensing, 1989, 27(1): 98- 101.
- [8] Li Hsueh Jyh, Farhat N H, et al. Image Understanding and interpretation in microwave diversity imaging[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 1989, 37(8): 1048- 1057.
- [9] 黄培康, 等. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993. 180- 183.  
Huang Peikang, et al. Radar target signature[M]. Beijing: Astronautic publishing house, 1993. 180- 183. (in Chinese)
- [10] Yazgan B, Paker S, et al. Image reconstruction with diffraction tomography using different inverse Radon transform algorithms [C]. Biomedical Engineering Days. Proceedings of IEEE, 1992. 170- 173.
- [11] 李铮. CT 重建算法的理论及综合应用的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2002.  
Li Zheng. The study of the theoretical aspects and their applications of the CT reconstruction algorithms [D]. Shenyang: Northeastern University, 2002. (in Chinese)

#### 作者简介:



孙厚军 男, 1968 年 11 月出生于山东高密市, 北京理工大学信息科学技术学院电子工程系副教授, 博士生导师。主要从事微波/毫米波电路集成技术、毫米波探测技术、毫米波天馈技术、目标特性测试技术等方面的研究。主持并完成科研项目近二十项, 获得国防科工委技术奖二等奖一项。

E-mail: sunhoujun@bit.edu.cn



李世勇 男, 1979 年 7 月生于山东德州市。于 2002 年在山东大学获得工学学士学位, 目前为北京理工大学电磁场与微波技术专业博士研究生。主要从事目标特性测试技术方面的研究。

E-mail: lisy\_98@bit.edu.cn