基于 Stolt 插值的近场三维雷达合成孔径成像

李 亮 苗俊刚 江月松

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 提出了一种准单站模式雷达以步进频方式工作条件下微波三维全息成像算法,克服了传统成像算法要求远场条件的限制,通过对雷达接收目标回波数据进行合成孔径处理,提高了雷达成像的分辨力以及雷达对目标的探测能力. 采用一种新的 Stolt 插值实现方法,提高插值精度、减少插值的计算时间,通过插值,可以利用快速傅里叶变换来实现目标三维图像的快速重构. 给出了实验和模拟目标的三维图像重构结果,表明基于该插值方式的三维图像重构算法可以重构出目标的三维像,实现对目标的探测并具有良好的分辨率.

关 键 词: 雷达; 合成孔径; 三维成像; Stolt 插值; 近场

中图分类号: TN 015; TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0815-04

Near-field three-dimensional radar synthetic aperture imaging based on stolt interpolation

Li Liang Miao Jungang Jiang Yuesong

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A fully 3-D image-reconstruction algorithm that quasi-monostatic mode is used and the transmitting antenna works in step frequency was developed. The algorithm is not restricted by far field as the traditional imaging algorithm. Through synthetic aperture processing for radar data, the resolutions of the image and the detecting ability of radar are improved . A new Stolt interpolation method , which can increase accuracy of interpolation and reduce computation time, was presented. 3-D image of the objects can be achieved through the fast Fourier transform after interpolation. Numerous imaging results from simulations and experiment were presented. These results show that the algorithm for 3-D image-reconstruction based on this interpolation method can produce a microwave 3-D image with high resolutions.

Key words: radar; synthetic aperture; three-dimensional imaging; Stolt interpolation; near field

对目标进行三维成像有很高的实用价值,在军事、民用及公安武警执行任务中都有很广泛的用途,特别是对于隐匿武器及特定区域目标的探测具有很好的应用价值. 目标三维探测成像在国内发展较慢,国际上这方面研究也不很成熟. 美国太平洋西北实验室前不久刚研制出一种目标三维探测成像系统,该系统要求把目标放在一个大型开槽圆柱内从 360°范围内进行测量探测以进行成像,系统相当庞大,不方便携带,也不能实现远距离探测,作为公共场合如机场、车站等的安检设施可以,要实现对特定范围内目标的探测比较困难. 本文提出的二维孔径合成是平面扫描方式,采用主动式雷达成像技术,主动雷达可根据目标的类型及目标所处的外界环境的状况来选择雷达的工作波段及信号的发射功率,从而实现所关心的特定区域目标状况的探测. 众所周知,合成孔径雷达对目标进行成像时有很高的分辨率,目标二维像用宽带雷达通过一维孔径合成[1-2]即可以得到;同样,目标三维像可以用宽带雷达通过二维孔径合成[3]得到. 常用的二维孔径有球面、柱面和平面,为方便起见,本文只讨论平面的二维合成孔径成像,球面、柱面的二维合成孔径可以转换到平

收稿日期: 2005-08-31

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目

作者简介: 李 亮(1980-), 男, 河南淮阳人, 硕士生, liliang282@163.com.

面二维合成孔径,也可以通过特定的算法直接成像[3].系统采用准单站工作方式,即发射和接收天线分开放置,但是距离很近,计算时可以看成二者在同一位置,发射天线以步进频率发射信号.为了快速得到三维目标的像,本文采用快速傅里叶方法重构出目标的像,成像算法中进行一步 Stolt 插值[4].插值精度影响着成像质量,本文提出细胞单元平均法插值[5-6],仿真证明,利用该方法插值进行成像时,具有良好的空间分辨率.

1 基于 Stolt 插值的合成孔径成像

1.1 Stolt 插值实现近场雷达合成孔径成像

如图1,天线发射步进频率信号,当天线发射信号以频率 f 照射目标时,信号在点 (x,y,z) 反射后,信号相位延时为 $2k[(x'-x)^2+(y'-y)^2+(-d-z)^2]^{1/2}$,$k=2\pi f/c$,$c$ 为光速.假设散射点 (x,y,z) 的反射系数为 $s(x,y,z)$,则扫描平面上测量点 (x',y') 接收的总的信号为[7]

$$d(x',y',k)=\iiint_A s(x,y,z)\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2kR}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{1}$$

其中,$R=\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+(-d-z)^2}$;$d$ 为天线扫描面与目标平面间的距离;A 代表目标所在的区域.对式(1)进行二维傅里叶变换得

$$D(k_x,k_y,k)=\iiint s(x,y,z)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z\iint \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2kR}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_xx'-\mathrm{j}k_yy'}\,\mathrm{d}x'\mathrm{d}y' \tag{2}$$

其中,$D(k_x,k_y,k)$ 与 $d(x',y',k)$ 构成一对二维傅里叶变换对.令

$$D_1(k_x,k_y,k)=\iint \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2kR}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_xx'-\mathrm{j}k_yy'}\,\mathrm{d}x'\mathrm{d}y' \tag{3}$$

式(3)代入式(2),则

$$D(k_x,k_y,k)=\iiint D_1(k_x,k_y,k)s(x,y,z)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{4}$$

利用驻相法[4]求 $D_1(k_x,k_y,k)$:

令 $\phi(x',y')=-2kR-k_xx'-k_yy'$,则

$$D_1(k_x,k_y)=\iint \mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi(x',y')}\,\mathrm{d}x'\mathrm{d}y' \tag{5}$$

求解驻相点:

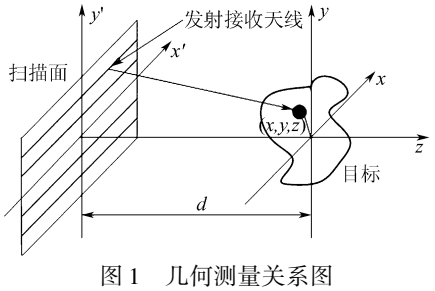


图1 几何测量关系图

$$\frac{\partial\phi(x',y')}{\partial x'}=-2k\frac{(x'-x)}{\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+(d+z)^2}}-k_x \tag{6}$$

$$\frac{\partial\phi(x',y')}{\partial y'}=-2k\frac{(y'-y)}{\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+(d+z)^2}}-k_y \tag{7}$$

令式(6)、(7)等于零,求出驻相点 x'^*、y'^*.

$$x'^*=-\frac{k_x}{\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}}(d+z)+x \tag{8}$$

$$y'^*=-\frac{k_y}{\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}}(d+z)+y \tag{9}$$

$$D_1(k_x,k_y)\approx \mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi(x'^*,y'^*)}=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}(d+z)}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_xx-\mathrm{j}k_yy} \tag{10}$$

式(10)代入式(4)得

$$D(k_x,k_y,k)=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}d}\cdot\iiint \mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_xx-\mathrm{j}k_yy-\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}z}s(x,y,z)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{11}$$

令 $k_z=\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}$,则式(11)简化为

$$D(k_x,k_y,k)=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}d}\cdot\iiint \mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_xx-\mathrm{j}k_yy-\mathrm{j}k_zz}s(x,y,z)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{12}$$

上式右边与三维傅里叶变换的形式非常类似,但是 $k_z=\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}$,$k_z$ 不是傅里叶变化所要求的等间隔分布形式,要想利用快速傅里叶变化,必须通过插值把 k_z 变成等间隔,进而可利用式(13)经过逆傅里叶(IFFT, Inverse Fast Fourier Transform)变换求出 $s(x,y,z)$ 以求出目标的像.

$$s(x,y,z)=\mathrm{IFFT}_{(k_x,k_y,k_z)}\left[D(k_x,k_y,k)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}d}\right] \tag{13}$$

上式中的 $\mathrm{e}^{\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}d}$ 相当于一个匹配滤波器[8-10],具体成像流程如图2.

1.2 Stolt 插值方法的实现及优点

令 $D_2(k_x,k_y,k)=D(k_x,k_y,k)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}d}$,为了利用式(13)实现目标三维图像的重构,必须将 $D_2(k_x,k_y,k)$ 从 (k_x,k_y,k) 空间变换到 (k_x,k_y,k_z) 空间,这一步非常关键,而其是通过插值来实现的.本文提出一种新的插值方法——细胞单元平均法[5-6],对任意给定的 k_x 和 k_y,该方法的插值公式为

$$D_{\delta_n}=\frac{1}{N}\sum_{n=N_1}^{N_2}D_2(k_x,k_y,k_n) \tag{14}$$

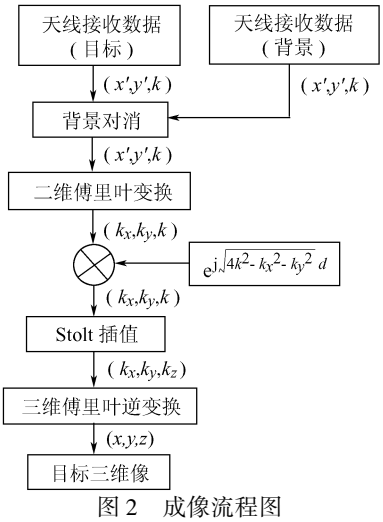


图 2　成像流程图

其中,D_{δ_n}为要插出的第 δ_n 个单元的值;$D_2(k_x,k_y,k_n)$ $(n=N_1,N_1+1,\cdots,N_2)$ 是沿 k 方向落在要插值单元间的值. 所有落在单元内的值对单元值都有贡献,取这些值的平均值作为单元值,如果插值单元内没有 D_2 落在里面,就认为该单元的值为零,经过本文的成像结果验证该插值实现方法是可行的. 对任一固定 k_y 插值过程见图 3,虚线构成的方格是待插值的单元,对任一 k_x,沿 k 方向落在每个方格单元内的所有 D_2 的平均值作为方格单元的值,没有 D_2 落在方格内,方格单元值就看成零. 由于该插值方法得到的方格单元值是由多个数据的共同作用的结果,与传统的几何插值[11]方法相比,插值精度得到了提高,而且这种插值方法实现需要的时间很短,从而提高了成像速度.

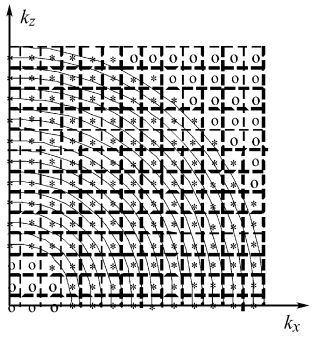


图 3　插值示意图(* 为待插的值,o 表示补零)

2　天线扫描间隔和成像空间分辨率

实验中,对天线扫描间隔应该有很恰当的选择,因为天线扫描间隔过大,采样数据不能恢复出目标的像,天线扫描间隔过小,实验和成像计算都需要很长的时间,造成不必要的浪费,使成像失去实时性. 天线扫描间隔 $\Delta x,\Delta y$ 和频率间隔 Δf 理论上应遵循式(15) ~ (17)[3]的要求.

$$\Delta f \leqslant \frac{c}{2D_z} \tag{15}$$

$$\Delta x \leqslant \frac{\lambda_{\min}}{4}\frac{\sqrt{(L_x+D_x)^2+(2d)^2}}{L_x+D_x} \tag{16}$$

$$\Delta y \leqslant \frac{\lambda_{\min}}{4}\frac{\sqrt{(L_y+D_y)^2+(2d)^2}}{L_y+D_y} \tag{17}$$

空间分辨率 $\delta_x,\delta_y,\delta_z$ 分别由式(18)、(19)、(20)[12]决定.

$$\delta_x = \frac{\lambda_c d}{2L_x} \tag{18}$$

$$\delta_y = \frac{\lambda_c d}{2L_y} \tag{19}$$

$$\delta_z = \frac{c}{2B} \tag{20}$$

其中,$\lambda_{\min}$为天线的最小工作波长;λ_c 为天线的中心工作波长;B 为天线工作带宽;L_x,L_y 分别为天线的空间扫描范围,即孔径长度;$D_x\times D_y\times D_z$ 为目标所在范围,在实际成像中,分辨率一般达不到理论值.

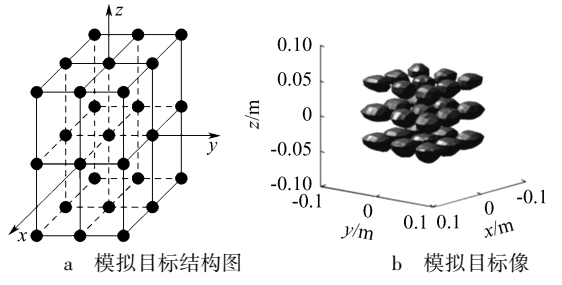
3　结果及分析

3.1　仿真结果及分析

图 4a 是仿真时的点目标组合,目标是一个由点目标构成的 3×3×3 的三维目标,其均匀分布在边长为 8 cm 的正方体内,各点目标的反射系数相等. 参数设置见表 1,由仿真参数根据文章给出的分辨率公式(18) ~ (20)可以计算出目标的空间分辨率 $\delta_x=\delta_y=\delta_z$ 均为 1.5 cm. 根据上述算法重构出目标的像如图 4b,图中可以看出目标像基本反映了目标的特点,像的坐标和模拟目标设置的相吻合,由此可以验证该算法的正确性.

表 1　仿真参数设置

参数	数值	参数	数值
L_x,L_y/m	0.5,0.5	$\Delta x,\Delta y$/m	0.008,0.008
f/GHz	10 ~ 20	N_f/个	601
d/m	0.75		



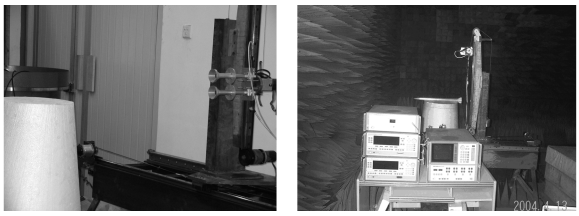
a　模拟目标结构图　　b　模拟目标像

图 4　模拟成像

3.2　实验结果及分析

基于本文介绍的算法和插值方法,对实测数据进行了处理,从成像结果可以验证算法的可行

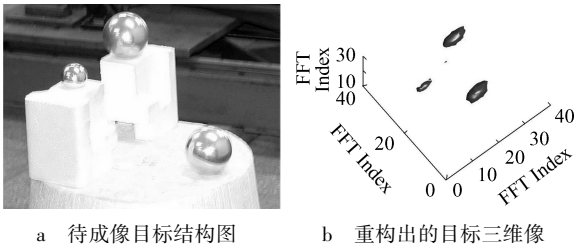
性. 实验系统如图 5 所示,实验系统的核心是 HP 8530A 微波接收机,实验采用准单站工作方式.



a 扫描系统 b 系统的实验仪器

图 5 实验系统

为了验证算法的抗噪声性能,实验在一个比较杂乱的房间里进行,目标见图 6a. 2 个大球的雷达散射截面积(RCS)为 -25 dB,直径为 6.35 cm,坐标分别为(-8.48 cm,8.48 cm,14.5 cm)和(0,-12.8 cm,4 cm). 小球的 RCS 为 -30 dB,直径为 3.56 cm,坐标(-8.13 cm,8.13 cm,13.2 cm). 实验参数设置见表 2,实验参数和仿真参数设置有一定的差别,这是为节省实验时间而考虑的. 利用本文的算法和插值方法,对实验数据进行处理得到的目标的像见图 6b,图中坐标用傅里叶变换点数表示,两点间的距离转换实际坐标为 1 cm,成像运算所需时间为 10 s,如果程序进一步优化,计算机性能比较好,则成像时间可以进一步缩短,这样可以提高成像速度达到准实时成像的目的. 由图 6b 可以看出,重构出的三维像基本反映了目标的特征,说明该算法的可行性. 但由于实验持续时间很长(近 8 h),背景难免会发生变化,造成背景对消不彻底,因此像中有一定的杂波存在.



a 待成像目标结构图 b 重构出的目标三维像

图 6 实验目标和成像结果

表 2 实验参数设置

参数	数值	参数	数值
L_x, L_y/m	0.4,0.4	$\Delta x, \Delta y$/m	0.008,0.008
t/h	3.6	f/GHz	14 ~ 16
N_f/个	101	d/m	0.75

4 结束语

本文采用平面二维孔径合成的方法来实现三维目标的探测和成像,探测雷达采用主动工作方式,成像算法是基于本文提出的 Stolt 插值实现方法的快速傅里叶变换,通过仿真和实验数据成像验证了该算法的可行性以及插值实现方法的正确性. 文章主要针对自由空间内目标的三维探测成像,要实现透过某种介质对目标的探测[13],介质特性等因素必须考虑进去,否则目标成像将出现很大的散焦[13]现象.

参考文献(References)

[1] Soumekh M. A system model and inversion for synthetic aperture radar imaging[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1992, 1(1):64-76

[2] Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1991, 39(9):2044-2055

[3] Joaquim Fortuny. Efficient algorithms for three-dimensional near-field synthetic aperture radar imaging[D]. Karslruhe, Germany: Faculty of Electrical Engineering University of Karslruhe, 2001

[4] Walter G Carrara. Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995

[5] Thompson A R. Interpolation and fourier transformation of fringle visibilities[J]. The Astronomical Journal, 1974, 79(1):11-24

[6] Jacek M. Robust weighted averaging[J]. IEEE Trans on Biomedical Engineering, 2002, 49(8):796-804

[7] Soumekh M. Echo imaging using physical and synthesized arrays [J]. Opt Eng, 1990, 29(5):545-554

[8] Brown S C M, Bennett J C. High-resolution microwave polarimetric imaging of small trees[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1):48-53

[9] Brown S C M, Bennett J C. Reduced bandwidth algorithm for near field imaging of tree targets using synthetic aperture radar [J]. IEE Proceedings -Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(5):259-266

[10] Brown S C M, Bennett J C. High resolution microwave imaging of the backscatter of a small tree and its variation with incidence angle[C]// IEEE Proceeding-Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seattle, Washington: IGARSS'98, 1998, 4:2026-2028

[11] 张春城,周正欧. 一种改进的基于 Stolt 迁移的探地雷达三维合成孔径成像方法[J]. 信号处理,2004,20(6):638-641
Zhang Chuncheng, Zhou Zhengou. A modified ground penetrating radar 3-D synthetic aperture imaging method based on Stolt migration[J]. Signal Processing, 2004, 20(6): 638-641 (in Chinese)

[12] Yuji Sakamoto, Katsuhiro Tajiri, Takaya Sawai, et al. Three-dimensional imaging of objects in accumulated snow using multifrequency holography[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 26(4):430-436

[13] Cai Lixin. Ultra-band model-based synthetic aperture radar imaging through complex media[D]. Columbus: The Ohio State University, 2000

(责任编辑:娄 嘉)