# 目标的微波散射成像方法

李 亮 苗俊刚 江月松 李志平

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘 要**: 提出了一种适用于隐匿武器探测、打击走私以及公共场合安检的微波成像探测方法. 该方法要求雷达在一个二维平面上扫描,即合成一个平面孔径,通过对雷达接收回波数据的合成孔径处理可以提高雷达的成像分辨率以及对目标的探测能力. 雷达可以工作在准单站模式下且只需以单色波照射目标,利用接收到的目标的散射回波的相位和幅度信息重构出目标的二维像. 提出了一种适用于近场条件下二维图像的重构算法,并对算法做了详细推导,利用该算法对模拟和实测数据进行了处理. 结果表明该算法具有良好的空间分辨率和辐射分辨率,以及在不进行三维成像的条件下可以实现距离向目标的探测.

**关 键 词**: 微波成像; 近场测量; 电磁散射; 合成孔径

**中图分类号**: TN 015; TP 391

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0426-04

## Microwave imaging by scattering

Li Liang Miao Jungang Jiang Yuesong Li Zhiping

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

**Abstract**: A microwave imaging method, which can be applied in detection of concealed weapons and contraband and security in public situations, is presented. In the method, the radar scans on a rectangular plane, i. e. synthesizing a rectangular planar aperture. Synthetic aperture processing for radar data can improve resolutions of the image and the detecting ability of radar. The system can be quasi-monostatic and only a monochromatic microwave is required to illuminate the target to be imaged. Utilizing the phase and amplitude information recorded over a two-dimensional(2-D) aperture can reconstruct a focused 2-D image of the target. A fully 2-D image-reconstruction algorithm, which can be applied in near-field, is developed and deduced. The processing results of simulation and measurement data show that the image-reconstruction algorithm can produce a microwave image with high spatial and radiation resolutions, and has the ability to detect in range without three-dimensional imaging.

**Key words**: microwave imaging; near-field measurement; electromagnetic scattering; synthetic aperture

由于在军事、安检等方面的需求,微波成像显得非常重要,国内在此方面起步较晚,但也取得了很大的进展. 微波二维成像在国外研究的相对来说比较成熟,但是其很多关键技术没有公开发表,国外公开发表的论文只提及成像的大致过程以及成像结果,有关的算法很少介绍. 以微波为手段对目标进行探测,能够全天候、全天时工作,而且对障碍物有一定的穿透能力,因此,其在安全检测和军事侦查等领域获得广泛应用. 为了满足不同应用领域的不同技术要求,人们不断改进现有的微波成像手段,提高其技术性能,本文正是基于公共场所的安全检测,采用微波散射成像的方法对目标进行探测. 该方法要求探测天线在平行于探测目标面内进行扫描,接收天线和发射天线共轴移动,且二者距离很近,计算时可以看成收发共用天线,即单站微波探测形式. 接收天线接收被测目标对发射波的散射波,通过对散射波的处理以得到被测目标的特征,也即是目标的二维像. 现有资料

**收稿日期**: 2005-04-18

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

上介绍的微波成像,大都是通过扫频[1,2]达到成像的目的,通过扫频以获得目标的距离向分辨率,这就出现了算法中比较复杂的插值问题[1~3],插值需要相当大的运算量,而且插值精度对图像质量影响很大.

本文采用单色波照射目标以达到成像的目的,目标的空间分辨率是通过天线的扫描来获得,简化了算法. 仿真证明,该算法成像失真度很小,成像具有很好的空间分辨率和辐射分辨率. 另外,实验结果表明,该方法在不进行三维成像的条件下,可以实现距离向目标的探测,这对于在公共场合下隐匿武器的探测具有很好的应用价值.

## 1　成像算法

成像雷达二维扫描模型如图 1,发射天线以某一频率 $f$ 发射信号,信号在点 $(x,y)$ 反射后,信号相位延时为 $2k\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+z_0^2}$,$k=2\pi f/c$,$c$ 为光速. 假设散射点 $(x,y)$ 的反射系数为 $s(x,y)$,考虑成像目标位于天线近场区域,球面波前运用一阶波恩近似[4],则扫描平面上点 $(x',y',z_0)$ 接收的总信号为[5,6]

$$d(x',y',z_0)=\iint_s s(x,y)\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2kR}\,\mathrm{d}s \tag{1}$$

式中　$s$ 为成像目标所在区域;$R$ 为扫描点与散射点间的距离;$z_0$ 为天线扫描面与目标面间的距离;$R=\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+z_0^2}$.

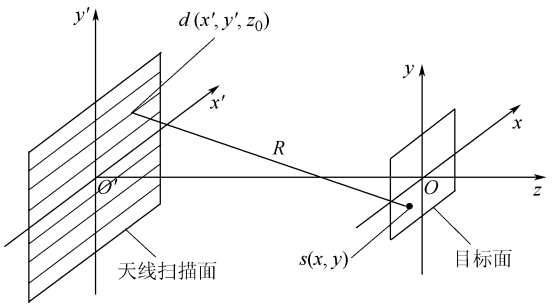



图 1　目标面与扫描面的几何关系图

对(1)式进行二维傅里叶变换得:

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

其中　$k_x,k_y$ 分别是对应于 $x',y'$ 的傅里叶变换量,$D(k_x,k_y)$ 与 $d(x',y',z_0)$ 构成一对二维傅里叶变换对. 令

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

将(3)式代入(2)式,则

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

利用驻相法[7]求 $D_1(k_x,k_y)$,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:

$$\frac{\partial\phi(x',y')}{\partial x'}=-2k\frac{(x'-x)}{\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+z_0^2}}-k_x \tag{6}$$

$$\frac{\partial\phi(x',y')}{\partial y'}=-2k\frac{(y'-y)}{\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+z_0^2}}-k_y \tag{7}$$

令(6)式、(7)式等于零,求出驻相点 $(x'^*,y'^*)$:

$$x'^*=-\frac{k_x}{\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}}z_0+x \tag{8}$$

$$y'^*=-\frac{k_y}{\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}}z_0+y \tag{9}$$

则

$$D_1(k_x,k_y)\approx\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi(x'^*,y'^*)}=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}\cdot z_0}\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_xx-\mathrm{j}k_yy} \tag{10}$$

(10)式代入(4)式整理得:

$$D(k_x,k_y)\approx\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}\cdot z_0}S(k_x,k_y) \tag{11}$$

其中　$S(k_x,k_y)=\iint s(x,y)\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(k_xx+k_yy)}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y$,即 $S(k_x,k_y)$ 与 $s(x,y)$ 构成一对傅里叶变换对. 所以:

$$S(k_x,k_y)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}\cdot z_0}D(k_x,k_y) \tag{12}$$

对(12)式两边进行二维逆傅里叶(IFFT:Inverse Fast Fourier Transform)变换得:

$$s(x,y)=\mathrm{IFFF}_{(k_x,k_y)}\cdot\left(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}\cdot z_0}D(k_x,k_y)\right) \tag{13}$$

由(13)式即可求出目标的各点散射系数,也即是目标像,该算法成像流程图如图 2. 具体成像步骤如下:

1) 把天线接收数据 $d(x',y',z_0)$ 做背景对消后沿 $x',y'$ 进行二维傅里叶变换,得到 $D(k_x,k_y)$;

2) 对 $D(k_x,k_y)$ 进行相位校正,即乘以 $\mathrm{e}^{\mathrm{j}\sqrt{4k^2-k_x^2-k_y^2}\cdot z_0}$,相当于对接收数据处理后再加一滤波器,称为匹配滤波器[8,9];

3) 对 2)所得的结果再进行二维逆傅里叶变换,即求得所要的 $s(x,y)$. $s(x,y)$ 反映了目标的二维像.

## 2　天线扫描间隔和目标空间分辨率

实验中,对天线扫描间隔应该有很恰当的选

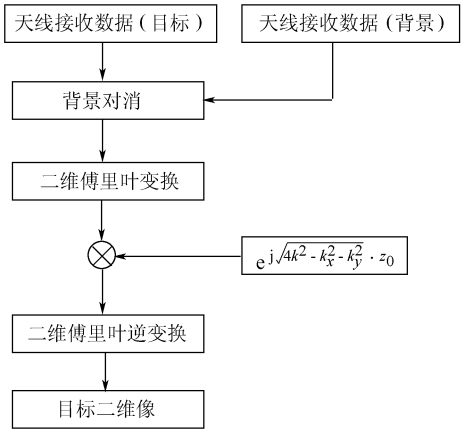



图 2 成像流程图

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,使成像失去了准实时性. 天线扫描间隔 $\Delta x$,$\Delta y$ 的大小理论上应遵循(14)式、(15)[3]式的要求:

$$\Delta x \leqslant \frac{\lambda}{4}\frac{\sqrt{(L_x+T_x)^2+(2z_0)^2}}{L_x+T_x} \tag{14}$$

$$\Delta y \leqslant \frac{\lambda}{4}\frac{\sqrt{(L_y+T_y)^2+(2z_0)^2}}{L_y+T_y} \tag{15}$$

空间分辨率[7,10] $\delta_x$,$\delta_y$ 分别为

$$\delta_x = \frac{\lambda z_0}{2L_x} \tag{16}$$

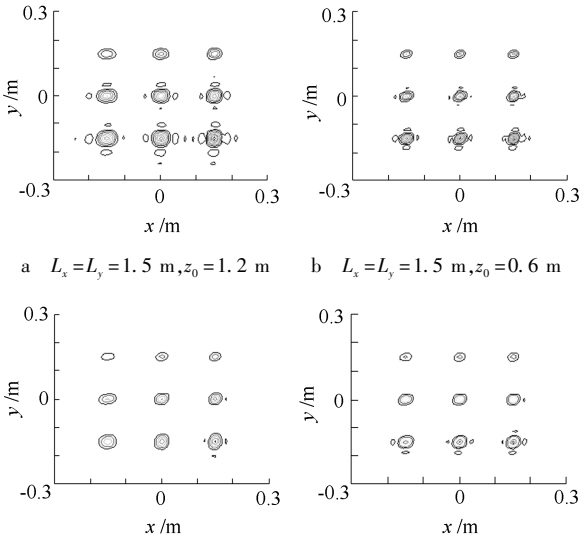
$$\delta_y = \frac{\lambda z_0}{2L_y} \tag{17}$$

其中 $\lambda$ 为天线的工作波长;$L_x$,$L_y$ 分别为天线的空间扫描范围;$T_x \times T_y$ 为目标大小. 在实际成像中,分辨率一般达不到理论值.

## 3 模拟成像结果及分析

对目标进行理论模拟成像是为了验证上述算法的正确性,并了解散射成像的基本特征以及影响成像效果的因素. 模拟时天线发射信号的频率为 10 GHz,天线扫描间隔为 0.007 5 m,对摆成正方形的 9 个点目标进行模拟,相邻点目标间距离均为 0.15 m,各行的点目标散射系数不同,3 行的散射系数比为 1∶2∶3,若以最弱散射系数为 0 dB,则各行点目标的散射系数分别为 0 dB,3 dB 和4.8 dB,它们之间的差分别为 3 dB 和 1.8 dB,取不同的天线扫描面以及目标面和天线扫描面间的距离,成像结果(等高线图)如图 3.

图 3 中可清楚的看到 9 个点目标的像,而且这些像点和点目标实际摆放的位置吻合,另外,从模拟成像的结果还可看到:①该方法可分辨出不同散射系数的点目标,说明该方法有良好的辐射分辨率[11];②成像结果特别是空间分辨率主要与天线扫描面的大小以及目标面和天线扫描面间的距离有关. 当扫描面大小一定时,随着目标面和天线扫描面间的距离增大,成像效果变差,在图中反映在像的旁瓣增大上,比较图 3a 和图 3b 就可发现该特点. 当目标面和天线扫描面间的距离一定时,随着扫描面的增大,成像效果变好,这也反映在像的旁瓣增大上,比较图 3a 和图 3d 即可发现该特点. 出现这种情况和(16)式、(17)式相吻合.




a $L_x=L_y=1.5$ m,$z_0=1.2$ m b $L_x=L_y=1.5$ m,$z_0=0.6$ m

c $L_x=L_y=0.9$ m,$z_0=0.6$ m d $L_x=L_y=2.1$ m,$z_0=1.2$ m

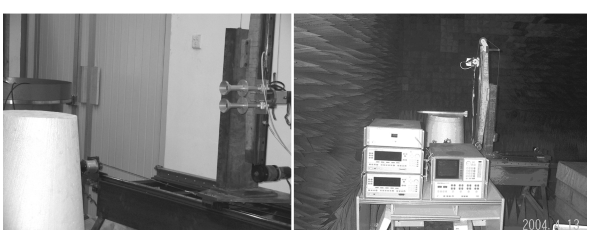
图 3 模拟点目标成像结果

## 4 实验成像结果及分析

基于本文介绍的成像算法,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. 系统实验装置如图 4 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. 为了比较频率对成像效果的影响,实验时,发射天线以步进频方式工作,成像时采用的是单个频率,实验参数见表 1.

**表 1 实验参数**

| 参 数 | 数 值 |
|---|---|
| $L_x$/m×$L_y$/m | 0.4×0.4 |



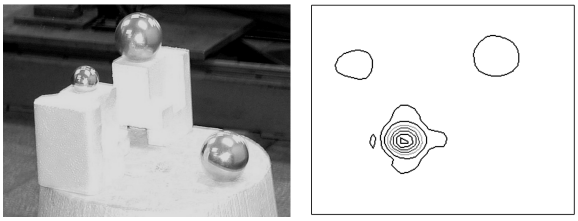
a 扫描系统 b 实验仪器

图 4 系统的实验装置

| | |
|---|---|
| $\Delta x, \Delta y$/m | 0.008,0.008 |
| $f$/GHz | 14 ~ 16 |
| 频点个数 | 101 |
| 实验所用时间/h | 4.3 |
| $z_0$/m | 0.75 |

为了检测成像算法以及系统的抗干扰能力,实验在一个比较杂乱的房间里进行,目标设置如图 5a 所示,其中两个大球的雷达散射截面积(RCS:Radar Cross Section)均为-25 dB,小球的 RCS 为-30 dB. 图 5b 是该目标的成像结果(等高线图),成像运算所需的时间为 2 s,如果计算机性能比较好,成像几乎可以达到准实时. 该图像是目标像在与扫描面平行的平面上的投影,另外,该目标像是通过各个频点所成像的非相干叠加的结果,通过非相干叠加,可以很大程度的抑制目标的背景噪声.

从图 5 中可以看到,目标虽然是一个三维目标,但是不进行三维成像仍然可以分辨出距离向的目标,即该算法具有距离向的探测能力,这一点在公共场合的安检中有很大的应用价值. 由于实验过程总会有误差存在,因此目标的像和实物不是完全相同,出现这种现象的另一个原因是所成的像是目标像的投影,目标中各个球与扫描面的距离是不同的,所成的像必定有一定的差异.



a　目标结构图　　b　重构的出的目标像

图 5　实验目标及成像结果

## 5　结　论

本文主要讨论的是一种主动式目标探测的微波成像方法,通过模拟仿真验证了算法的正确性,由天线接收数据即可以根据算法反演出目标的像,目标的空间分辨率与天线的扫描口径、天线扫描平面与目标面的距离以及信号的频率有关. 该算法适合于微波的近场扫描成像,而且具有很好的距离向探测能力,因此可以适合于公共场合的安检工作,本文不但对微波散射成像的方法进行了介绍,而且进行了实验,通过实验验证了方法的正确性以及探测目标的可行性. 本文实验采用的是单个天线扫描来合成孔径,这在实际应用中不能达到准实时成像的要求,因此在实际应用时可以考虑扫描用电开关控制线性阵天线来满足成像的要求,另外扫描面大小的选择本文也没有做具体的分析.

## 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]. Germany: Faculty of Electrical Engineering University of Karslruhe, 2001

[4] Chew Wengcho 著. 非均匀介质中的场与波[M]. 聂在平,柳清伙译. 北京:电子工业出版社,1992. 65 ~ 67
Chew Wengchao. Waves and fields in inhomogeneous media [M]. Translated by Nie Zaiping, Liu Qinghuo. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1992. 65 ~ 67(in Chinese)

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

[6] 雷文太,粟　毅,黄仕家. 探地雷达近场三维距离偏移成像算法[J]. 电子与信息学报,2003,25(6):1641 ~ 1646
Lei Wentai, Su Yi, Huang Shijia. Ground penetrating radar near field 3-D range migration imaging technique[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(6):1641 ~ 1646 (in Chinese)

[7] 保　铮,邢孟道,王　彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005. 48 ~ 87
Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar imaging technique [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 48 ~ 87(in Chinese)

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

[11] 赵曦文,张守融,王卫延. 对地观测的微波散射成像方法[J]. 电子与信息学报,2003,25(11):1531 ~ 1535
Zhao Xiwen, Zhang Shourong, Wang Weiyan. A new microwave imaging method for earth observation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(11):1531 ~ 1535 (in Chinese)