

# 基于单频信号的 662 GHz 多普勒雷达层析成像

江 舸<sup>1,2</sup>, 成彬彬<sup>1,2</sup>, 陈 鹏<sup>1,2</sup>, 安健飞<sup>1,2</sup>, 张 健<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;  
2. 中国工程物理研究院 太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

**摘要:**首先介绍了多普勒雷达层析成像的原理及该成像方法的极限分辨率理论推导,并通过仿真获得了单频信号的点目标扩展函数(PSF),验证了该成像方法在单频条件下的理论极限分辨率为波长的四分之一.然后,介绍了中物院构建的662GHz单频雷达系统,并针对该实验系统设计了基于卷积反投影的多普勒雷达层析成像算法.最后,通过实验在太赫兹频段验证了多普勒雷达层析成像的有效性,并利用测量获得的360°全姿态回波信号数据给出了分辨率优于1cm的成像结果.

**关键词:**太赫兹成像;多普勒雷达;层析成像  
**中图分类号:**TN95 **文献标识码:**A

## T-ray tomography using single-tone Doppler radar at 662 GHz

JIANG Ge<sup>1,2</sup>, CHENG Bin-Bin<sup>1,2</sup>, CHEN Peng<sup>1,2</sup>, AN Jian-Fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electronics Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;  
2. Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** In this paper, the Doppler radar tomography is investigated and the theoretical spatial resolution is analyzed. Then the algorithm of the Doppler radar tomography based on convolution back-projection method was proposed. Finally, some measurement results of imaging using 662 GHz single-tone signals were presented.

**Key words:** terahertz imaging, doppler radar, tomography  
**PACS:** 43.30.Pc

### 引言

太赫兹雷达成像作为一种高分辨率成像技术近年来受到越来越多的关注,它采用超外差接收技术具有分辨率高、灵敏度高、增益高、选择性好和适用性广等优点.从信号波形上看,太赫兹雷达成像可分为两大类:一种是宽带波形<sup>[1-3]</sup>,另一种是单频波形<sup>[4]</sup>.对比两者的成像极限分辨率,前者的分辨率受瞬时带宽的制约,目前已知的瞬时带宽最大的太赫兹宽带雷达系统为JPL的超宽带675 GHz雷达系统<sup>[1]</sup>,其理论分辨率约为5 mm;后者的理论极限分辨率为波长的四分之一,同样用675 GHz做对比,后者的理论极限分辨率约为0.1 mm,比前者高出一个量级以上.从二维成像空间谱理论<sup>[5]</sup>分析两者各有

优势,前者需要大的瞬时带宽(frequency diversity)和小的空间观测角(spatial diversity),后者需要小的瞬时带宽和大的空间观测角.从系统复杂度上看,后者具有系统相对简单、不需要对宽带信号失真进行补偿、成本低等优点.此外,后者易于实现匹配滤波,因此在最小可检测信噪比恒定的条件下,后者的最大可检测距离大于前者.综上所述,基于单频信号的太赫兹雷达成像系统具有图像分辨率高、系统简单、大空间观测角等特点,在某些特定的应用场景具有优势.

多普勒雷达层析成像是一种典型的单频成像方法,其原理最早是由D. Mensa在文献[6]中提出.多普勒雷达层析成像原理为:当照射目标相对雷达视线存在转动分量时,雷达目标回波的包络将产生多

收稿日期:2014-06-20,修回日期:2015-06-08

Received date: 2014-06-20, revised date: 2015-06-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2015CB755406)

Foundation items: Supported by the National Key Basic Research and Development Program (2015CB755406)

作者简介(Biography): 江 舸(1982-),男,四川省乐山市人,在职博士研究生,助理研究员,主要研究方向为雷达成像与信号处理. E-mail: jiangge321@163.com

普勒展宽,该包络可以看作为目标沿方位向的一维投影,随着目标的旋转将获得一系列连续的一维投影数据,对投影数据做逆 Radon 变换即可得到目标的二维重构图像.后来,G. Fliss 利用该方法解决了直升机旋翼的成像问题<sup>[7]</sup>.文献[8]在 X 波段利用雷达层析概念分别给出了宽带和窄带信号的成像结果.文献[9]、[10]采用时频分析技术获取进动目标散射中心的多普勒历程,通过滤波反投影算法实现了窄带雷达对空间进动目标的二维重构.由于多普勒雷达层析成像的分辨率与波长成正比,该方法获得的分辨率在微波段优势不明显.同时,该方法还具有重构图像的点扩展函数(PSF)旁瓣高的缺点.以上两点以及其他方面的因素共同作用,导致该方法从 80 年代提出概念到现在获得的研究及实验成果并不多.

但是,随着雷达频率的提升特别是太赫兹雷达的出现,多普勒雷达层析成像的理论分辨率有了极大的提高.针对点扩展函数(PSF)旁瓣高的缺点,H. T. Tran 提出了利用分数傅立叶结合 S 方法的成像方法<sup>[11]</sup>,有效的降低了点目标扩展函数(PSF)的旁瓣电平.随着分辨率的提高及旁瓣电平的降低,可以预见基于单频信号的太赫兹多普勒雷达层析成像在无损检测、安检等近程应用领域将具有广泛的研究前景.此外,太赫兹频段更有利于微多普勒特征参数提取,太赫兹多普勒雷达层析成像还可以应用于识别空间进动目标、飞机旋翼、发动机振动等具有微动特征的目标.但是,目前在国内外的公开报道中,均尚未见到采用多普勒雷达层析技术进行太赫兹成像的研究及实验成果.本文首次将多普勒层析成像技术与太赫兹雷达技术相结合,提出了基于卷积反投影的多普勒层析成像算法,并在中物院构建的 662GHz 单频雷达系统上对算法进行了验证,通过对实验数据进行处理获得了二维重构图像.文章结构安排如下:第 1 节介绍 662GHz 单频雷达及成像实验;第 2 节介绍多普勒层析成像原理并进行了理论分析;第 3 节介绍基于卷积反投影的成像算法;第 4 节分析实验数据并给出了成像结果.

## 1 成像实验介绍

### 1.1 662 GHz 雷达系统

662 GHz 单频雷达系统<sup>[12]</sup>包括:收发前端模块、中频模块、信号采集及处理模块、计算机及显示,雷达系统实物如图 1 所示,成像实验场景如图 2 所示,成像实验的系统架构如图 3 所示.实验中,收发

天线分置,被测目标放置在转台上,转台中心与天线距离为 2.6 m.整个系统采用 100 MHz 信号源作为参考信号,保证了整个雷达系统的相干性.发射端由 27.6 GHz 信号发生器、宽带肖特基 24 倍频链、喇叭天线组成,发射信号频率为 662.4 GHz;接收端通过 12 倍频链将 27.5 GHz 信号倍频至 330 GHz,然后利用 330 GHz 信号驱动谐波混频器(SHM)将接收天线收到的目标回波信号下变频至 2.4 GHz;中频模块由低噪声放大器、带通滤波器、混频器、本振源、中视放组成,通过下变频将 2.4 GHz 中频信号搬移到 10 MHz,并将信号放大至 ADC 能采集的范围.



图 1 662 GHz 雷达实验平台集成实物图  
Fig. 1 Integrated 662 GHz single-tone radar

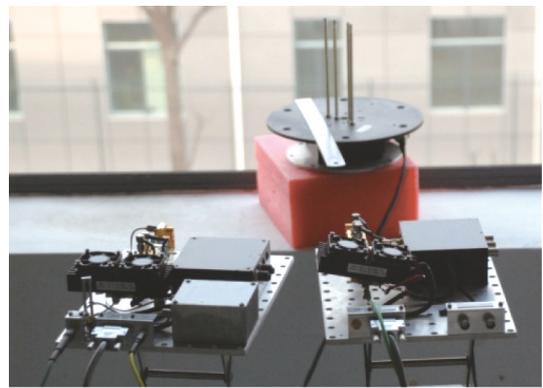


图 2 662 GHz 雷达成像实验场景  
Fig. 2 Imaging scenes for 662 GHz radar experiment

### 1.2 目标 RCS、发射功率与成像距离

利用雷达方程对目标 RCS、雷达发射功率和成像距离等实验指标进行论证.由于实验中雷达系统采用天线收发分置体制,本应采用双基地雷达方程.但是,收发天线与被照射目标之间的夹角小且收发天线到目标的距离相同.为简化问题,本文将双基地雷达方程近似为单基地雷达方程,如式 1 所示:

$$R = \left[ \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2 \tau G_N}{(4\pi)^3 L_0 L_s k T_0 N_F (S/N)} \right]^{1/4}, \quad (1)$$

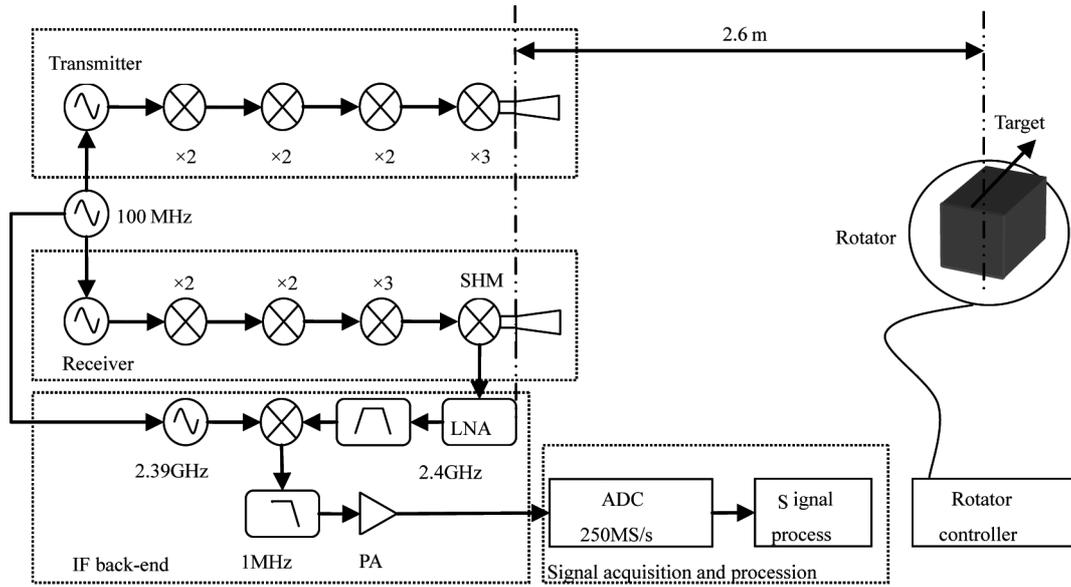


图 3 662 GHz 雷达成像实验架构框图  
Fig. 3 Architecture of 662 GHz radar experiment

式中,  $R$  为雷达作用距离;  $P_t$  为雷达峰值发射功率;  $G_t$ 、 $G_r$  分别为雷达发射天线和接收天线的增益;  $\sigma$  为照射目标的雷达散射截面 (RCS);  $\lambda$  为雷达工作波长;  $\tau$  为发射脉冲宽度;  $G_N$  为雷达脉冲积累增益;  $L_0$  为大气衰减;  $L_s$  为雷达系统损耗;  $k$  为波尔兹曼常数;  $T_0$  为接收机工作温度;  $N_F$  为接收机的噪声系数;  $S/N$  为检测所需最小信噪比. 在实验中, 收发天线最大增益均为 25 dBi; 被照射目标为高 8 cm、直径 0.6 cm 的金属棒, 在入射角为  $0^\circ$  时 662 GHz 处的雷达散射截面  $\sigma$  约为  $0.27 \text{ m}^2$ ; 考虑本地的海拔高度约为 0.5 km, 设大气衰减系数  $L_0 = 0.07 \text{ dB/m}$ ; 考虑混频器变频损耗为 15 dB, 各种连接及未知损耗约为 5 dB, 因此设雷达系统损耗  $L_s = 20 \text{ dB}$ ; 接收机噪声系数按照 10 dB 计算. 根据上述情况, 雷达方程参数设为:  $G_t = 25 \text{ dBi}$ ;  $G_r = 25 \text{ dBi}$ ;  $\sigma = 0.27 \text{ m}^2$ ;  $\lambda = 0.45 \text{ mm}$ ;  $\tau = 100 \text{ us}$ ;  $L_0 = 0.7 \text{ dB}$ ;  $L_s = 20 \text{ dB}$ ;  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $T_0 = 300 \text{ K}$ ;  $N_F = 10 \text{ dB}$ ;  $S/N = 12 \text{ dB}$ . 雷达最大作用距离与发射功率之间的关系如图 4 所示.

由图 4 可以看出, 雷达最大作用距离随着发射功率的增大而增大. 本实验中, 雷达系统在频率 662 GHz 处的发射功率为 -5 dBmW 时, 对应的作用距离约为 5.8 m, 考虑一定的性能余量, 实验将天线与目标的距离定为 2.6 m.

### 1.3 相位稳定度与成像距离

为获得目标的多普勒一维投影, 雷达系统需要

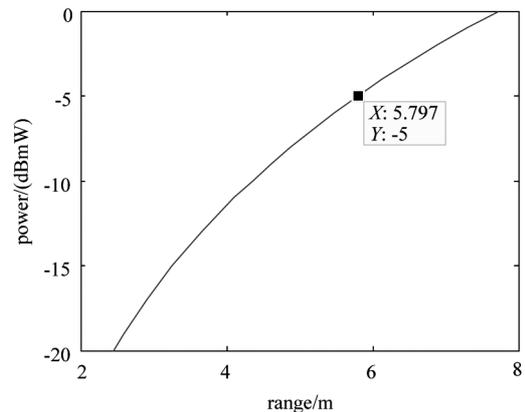


图 4 雷达探测距离与发射功率的关系曲线  
Fig. 4 Graph of the relationship between radar range and power

对一串目标回波信号进行相参处理, 这对雷达系统的相位稳定度  $\Delta\varphi$  有较高的要求. 相位稳定度的计算公式为  $\Delta\varphi = 360^\circ R \Delta f / c$ . 其中,  $R$  为目标到雷达天线的距离,  $\Delta f$  为系统频率稳定度,  $c$  为光速. 雷达系统频率稳定度测试场景如图 5 所示, 发射天线的主瓣对准接收天线的主瓣, 发射信号频率为 662 GHz. 当收发天线相距 3 m (单程) 时, 系统在 1 s 以内的相位稳定度约为  $\pm 15^\circ$  左右, 测试结果如图 6 所示. 根据相位稳定度的计算公式, 当目标与收发天线的距离为 2.6 m (双程) 时, 雷达系统的相位稳定度优于  $\pm 26^\circ$ . 由于在相参处理的积累时间内单个目标散射中心的相位变化值远大于该雷达系统的相位稳

定度. 因此, 在本实验中雷达相位稳定度以及成像距离是满足系统相参处理以及成像信号处理的基本要求, 但成像质量将下降.



图5 662 GHz 雷达相位稳定度测试场景  
Fig. 5 Imaging scenes for 662 GHz radar phase stability test

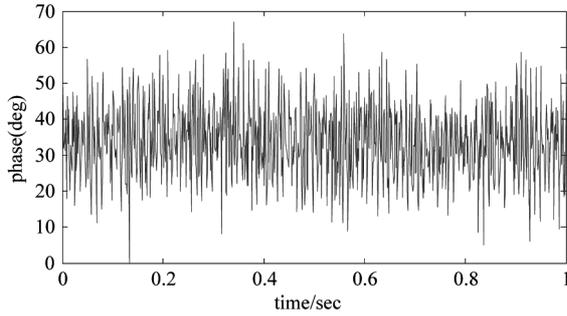


图6 662 GHz 雷达在 3m(单程)处的相位稳定度在 1 s 内的测试曲线

Fig. 6 Phase stability of the 662 GHz radar over a second period for 3m path

#### 1.4 转台角速率与脉冲重复频率

对于窄带脉冲雷达系统, 脉冲重复频率应满足多普勒测量不模糊的条件. 具体来说, 假设照射目标的半径为  $L$ , 转台的角速率为  $\omega$ , 该目标最大能产生的多普勒频移值为  $2L\omega/\lambda$ . 根据奈奎斯特采样定律, 系统脉冲重复频率应大于  $2L\omega/\lambda$  的两倍. 因此, 转台角速度与雷达系统脉冲重复频率应满足的关系式如下所示:

$$\text{PRF}_{\min} > \frac{4L\omega}{\lambda} \quad (2)$$

## 2 多普勒层析成像原理

### 2.1 多普勒一维方位像

雷达发射电磁信号到物体并接收物体的回波信号, 如果物体是移动的, 接收信号的频率将偏离发射信号的频率, 称为多普勒效应. 本实验雷达收发天线不动且照射目标沿中心点旋转, 单频雷达的回波信号将产生多普勒频移, 导致回波的包络被展宽, 该展宽的包络可以看作为目标在方位向上的一维投影.

假设一串雷达目标回波信号为  $s(t, \tau, t_k)$ ,  $t_k$  为起始时间, 与之对应的方向角度设为  $\theta$ ,  $\tau$  为系统相参处理时间, 其短傅立叶  $S(f, \tau, t_k)$  如式 3 所示. 同时, 假设旋转轴为  $z$  轴, 目标上某散射中心的坐标

为  $(x, y)$ , 旋转中心的坐标为  $(0, 0)$ , 该散射中心到旋转中心的距离  $r$  为  $x\cos\theta + y\sin\theta$ , 该散射中心的多普勒频移  $f_d$  为  $2r\omega\cos\theta/\lambda$ . 对  $S(f, \tau, t_k)$  取模, 即可得到照射目标在角度  $\theta$  的一维投影  $p_\theta(r)$ , 如式 4 所示.

$$S(f, \tau, t_k) = \int_{t_k}^{t_k+\tau} s(t, \tau, t_k) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

$$p_\theta(r) = |S(f, \tau, t_k)| \quad (4)$$

### 2.2 多普勒层析成像原理

在照射目标上, 多普勒频移值为  $f_d$  的散射中心集合可以由直线  $L$  方程  $x\cos\theta + y\sin\theta - r = 0$  表示, 其中  $r = f_d\lambda/(\omega\cos\theta)$ . 根据多普勒频移值的不同,  $p_\theta(r)$  代表与直线  $L$  平行的一系列射线束. 假设  $q(x, y)$  表示照射目标的二维空间分布, 对函数  $q(x, y)$  在垂直于角度  $\theta$  的方向上做投影, 引入 Dirac 函数, 一维投影  $p_\theta(r)$  可表示为:

$$p_\theta(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) \delta(x\cos\theta + y\sin\theta - r) dx dy \quad (5)$$

对  $p_\theta(r)$  做傅立叶变换得  $P_\theta(f_r)$ , 其中  $f_r$  称为波数或空间(角)频率. 并将式 5 代入  $P_\theta(f_r)$ , 可得  $P_\theta(f_r)$  等于  $q(x, y)$  的二维傅立叶变换  $Q_\theta(f_x, f_y)$ , 如式 6 所示.

$$\begin{aligned} P_\theta(f_r) &= \int_{-\infty}^{\infty} p_\theta(r) e^{-j2\pi f_r r} dr \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \\ &= Q_\theta(f_x, f_y) \end{aligned} \quad (6)$$

上式表明, 角度  $\theta$  方向上的投影数据的一维傅立叶变换等于照射目标的二维傅立叶变换的一部分, 即通过原点的角度为  $\theta$  的直线上的数据. 若连续改变投影方向角  $\theta$ , 经  $360^\circ$  旋转可获得覆盖整个频谱的平面空间谱的数据. 这称为投影的中心频谱定理, 或者称为傅立叶切片定理.

根据傅立叶切片定理, 若已知目标函数  $q(x, y)$  在极坐标系下各等间隔方位的平行投影数据, 对于本实验该投影数据为照射目标的一维多普勒像可由式 3、4 得出. 然后, 对投影数据实施一维傅立叶变换得  $P_\theta(f_r)$ , 并将  $P_\theta(f_r)$  从极坐标系插值到笛卡尔坐标系, 可以得到目标函数  $q(x, y)$  的二维傅立叶变换  $Q_\theta(f_x, f_y)$  的分布. 最后, 再经过二维傅立叶变换得到目标函数  $q(x, y)$ .

### 2.3 理论极限分辨率

#### 2.3.1 基于点目标扩展函数 (PSF) 的理论极限分辨率推导<sup>[5]</sup>

通过对雷达散射场的波矢量分析和电磁逆散射原理分析,均可推导得出如下结论:如果在波矢量三维空间和角频率全谱域内进行目标测量,则理论上可以重构照射目标的三维形状与体积<sup>[13]</sup>.而实际应用时,信号的瞬时带宽总是有限的,观测目标的姿态角也只能在有限的欧拉角之内,因此从回波信号中不能精确的确定目标函数  $q(x, y)$  的位置,而是以  $(x, y)$  为中心的一个二维模糊范围,这个二维模糊范围分布可用数学式来表达,称之为重构图像的点目标扩展函数(PSF).

由 2.2 节可知,目标函数  $q(x, y)$  与投影数据的傅立叶变换  $P_\theta(f_r)$  之间在极坐标下的关系式如式 7 推导所示,式中笛卡尔坐标系与极坐标系之间的转换公式为  $df_x df_y = f_r df_r d\theta$ .

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q_\theta(f_x, f_y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} df_x df_y \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} Q_\theta(f_r) e^{-j2\pi f_r (x \cos\theta + y \sin\theta)} f_r df_r d\theta \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\pi} |f_r| p_\theta(f_r) e^{-j2\pi f_r (x \cos\theta + y \sin\theta)} df_r d\theta \end{aligned} \quad (7)$$

注意到信号形式为单频信号,即  $f_r = f_0 = 2/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  为载波波长,公式 7 可进一步简化为:

$$q(x, y) = 2\pi f_0 J_0(2\pi f_0 \rho) \quad (8)$$

上式中  $J_0(\cdot)$  为第一类零阶 Bessel 函数<sup>[14]</sup>. 根据 Bessel 函数的性质和瑞利分辨准则,当  $J_0(2\pi f_0 \rho_{3dB}) = 0.5$  时根据式 9 可得  $q(x, y)$  的峰值-3dB 处的名义分辨率为  $\lambda/4$ .

$$\rho = \rho_{3dB} = \frac{1.52}{2\pi f_0} \approx \frac{\lambda_0}{4} \quad (9)$$

### 2.3.2 基于二维空间谱的理论极限分辨率推导

由 2.3.1 可知,目标回波信号与目标函数之间构成傅立叶变换关系,经过在空间谱域的整形和傅立叶变换,即可重构目标图像.单频信号在  $360^\circ$  观测角度范围内的空间谱域分布是以  $2/\lambda_0$  为半径的线圆,如图 7 所示.根据傅立叶变换关系式可推导出单频信号在  $360^\circ$  观测角度范围内的理论极限分辨率为  $\lambda_0/4$ .

### 2.3.3 仿真验证

PSF 函数出发得到的理论极限分辨率是一种对主瓣下降峰值的估算,该结论与从空间谱的角度得到的理论极限分辨率近似相等.可以说,两种方法得出的极限分辨率是一致的.通过仿真计算,662 GHz 单频信号  $360^\circ$  观测角范围内的 PSF 函数如图 8 所示.仿真结果表明单频信号的 PSF 都是各向均匀

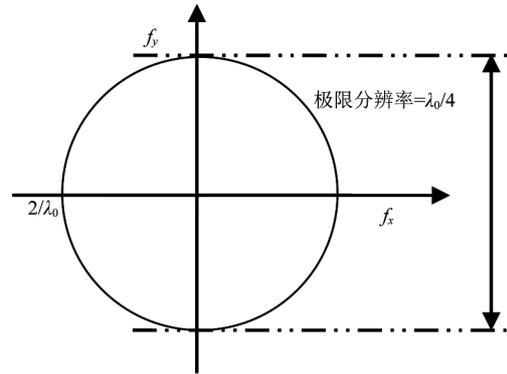


图 7 空间谱极限分辨率示意图

Fig. 7 Resolution of single-tone frequency based on space spectrum

的,其极限分辨率约为  $\lambda_0/4$ ,第一电平旁瓣约为 8dB.

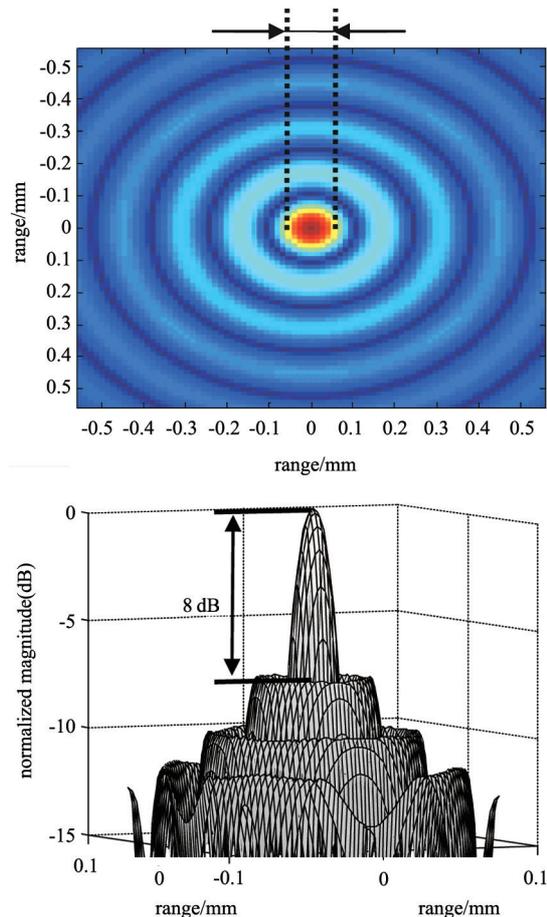


图 8 单频信号的 PSF

Fig. 8 PSF when single-tone frequency is used

## 3 基于卷积反投影的多普勒雷达层析成像算法

依据傅立叶切片定理,若已知极坐标系下各等

角间隔方位的平行投影数据,对其实施傅立叶变换可得重构函数 $f(x, y)$ . 但由于必须把频域极坐标的采样点插值为笛卡尔坐标系点值. 采用插值的方法将带来计算误差,导致重构图像质量的退化. 卷积反投影算法通过近似避免了插值计算且运算速度快,是目前在层析成像中广泛应用的图像重建算法<sup>[15]</sup>. 它在本质上是 Radon 逆变换公式在图像重建中的具体应用. 以目标函数 $q(x, y)$ 与投影数据的傅立叶变换 $P_\theta(f_r)$ 极坐标系关系式为基础,式 7 可以做如下变换:

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\pi} |f_r| P_\theta(f_r) e^{j2\pi f_r(x \cos\theta + y \sin\theta)} df_r d\theta \\ &= \int_0^{\pi} F^{-1}[|f_r| P_\theta(f_r)]_{x \cos\theta + y \sin\theta} d\theta \\ &= \int_0^{\pi} [p_\theta(t) * h(t)]_{t = x \cos\theta + y \sin\theta} d\theta \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $*$ 为卷积符号, $h(t)$ 表示为 $|f_r|$ 的傅立叶逆变换,即

$$h(t) = F^{-1}(|f_r|) \quad (11)$$

公式 10 集中体现了卷积反投影滤波的各个步骤. 基于该方法的多普勒雷达层析成像算法可分为 4 个步骤:

(1) 对雷达目标回波信号 $s(t, \tau, t_k)$ 做短时傅立叶变换得 $S(f, \tau, t_k)$ ,对 $S(f, \tau, t_k)$ 取模,即可得到照射目标在角度 $\theta$ 的一维方位向(多普勒)投影数据 $p_\theta(r)$ ;

(2) 将角度 $\theta$ 探测得到的投影数据 $p(r)$ ,经过滤波后可得到矫正后的投影数据 $p_\theta(t) * h(t)$ ;

(3) 将各个角度 $\theta$ 上得到的滤波投影值 $p_\theta(t) * h(t)$ 投射到满足 $t = x \cos\theta + y \sin\theta$ 对应曲线上;

(4) 然后把各个角度 $\theta$ 的滤波投影值 $p_\theta(t) * h(t)$ 进行累加,最终获得要目标的二维重构图像.

## 4 实验结果介绍与分析

### 4.1 实验结果

为验证并演示基于单频信号的太赫兹多普勒层析成像算法的性能. 利用 1 节介绍的实验系统,在转台上放置高 8 cm、半径 0.6 cm 的金属棒,并摆放为‘T’、‘H’、‘Z’的图形,目标在 $x$ - $y$ 轴平面内的尺寸约为 12 cm  $\times$  12 cm,如图 9 所示. 利用 662 GHz 单频信号对目标进行方位角 360°全姿态照射,回波数据角度采样间隔 0.1°. 对回波信号进行时频分析并利用第 3 节提出的算法进行成像,目标的时频多普勒曲线及二维重构图像如图 10 所示. 图 10a) 表明目标的时频多普勒曲线是一组三角函数,其频率为转台角频率,幅度、相位则与目标尺寸等参数有关. 此外,图 10a) 中 $y$ 轴零点附近有一条固定的亮线,这是由墙、支架、转台等背景目标回波信号以及收发天线的耦合信号带来的,导致在重构图像的坐标原点处存在虚假目标点,如图 10b) 所示. 针对图 10 中暴露出的背景噪声大的问题,本文采用 CLEAN 算法提取背景噪声的散射点位置和幅度等参数,通过算法消除其对成像的影响<sup>[16]</sup>. 经 CLEAN 算法去噪声后,获得的图像结果如图 11 所示.

对成像分辨率进行分析,考虑到金属棒回波信号各向同性,单独一根金属棒的重构图像可以认为是点目标的扩展函数. 从图 12 可以看出,一根金属棒的重构图像的主瓣宽度约为 0.8 cm 左右. 因此,粗略估计本实验系统的空间分辨率优于 1 cm.

### 4.2 误差分析

成像结果表明,图像分辨率与理论分辨率有数量级上的差距. 在本实验中,影响图像质量的因素有雷达系统的相位稳定性、转台运动精度、成像算法以及金属棒的散射机理等,具体分析如下:

#### (1) 系统相位稳定性



图 9 金属棒摆放的图形‘T’、‘H’、‘Z’

Fig. 9 Metal rods arranged in the shape of ‘T’, ‘H’, ‘Z’

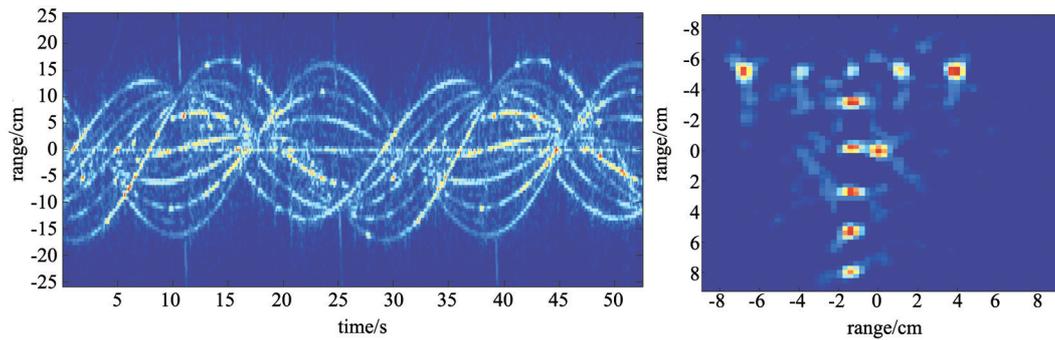


图 10 图形 'T' 回波信号的时频图及重构图像

Fig. 10 Time-frequency graph and reconstructed images of the 'T' target echo

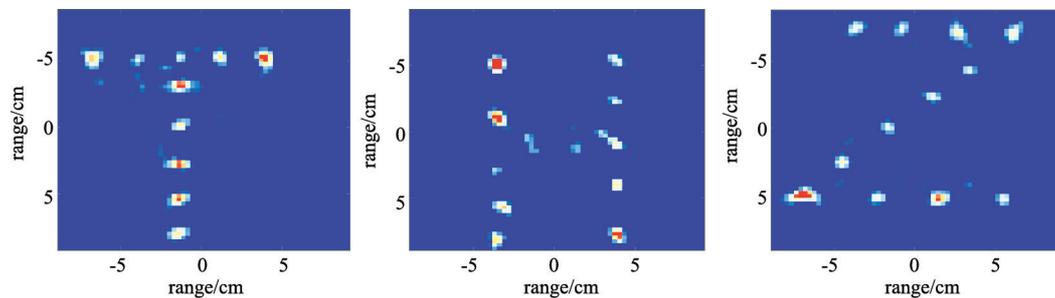


图 11 去除背景噪声后的成像结果

Fig. 11 Imaging results without background noise

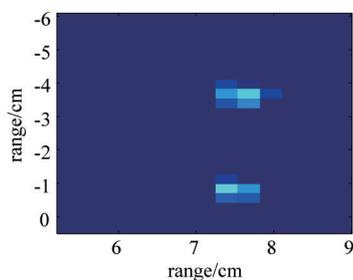


图 12 重构图像的 PSF

Fig. 12 PSF when single-tone frequency is used

系统相位稳定度对图像质量的影响主要表现为点目标扩展函数主瓣和副瓣结构的恶化. 总的来说, 低频误差影响主瓣结构, 例如: 信号时间两端因二次相位畸变造成的相位误差达  $\pi$  时, 主瓣增宽到原宽度的 1.5 倍, 峰值损失为 2dB. 而高频误差影响副瓣结构, 表现为无规律的杂乱副瓣. 图 13 给出了系统相位稳定度为  $\pm 40^\circ$  时点目标扩展函数的仿真结果. 可以看出, 点目标扩展函数的主瓣下降 12dB 左右, 主瓣的展宽并不严重, 副瓣呈无规律分布的尖峰.

#### (2) 散射中心稳定度

文献[17]分析了金属球的散射机理, 指出金属球的散射中心位于靠近雷达的表面顶点, 而不是球

心. 同理, 在本实验中直径为 0.6 cm 的金属棒的散射中心不是球心, 而是金属棒靠近雷达的表面顶点, 且随着观测视角沿与目标轮廓有关的空间曲线滑动. 这将导致成像获得的点目标扩展函数主瓣的展宽. 这也是实验获得的图像分辨率与理论分辨率差数量级的主要原因. 此外, 目标受转台运动精度的影响, 造成目标散射中心的扰动, 从而导致了点目标扩展函数主瓣及旁瓣结构的进一步恶化.

## 5 结论

多普勒雷达层析成像具有图像分辨率高、系统简单、空间观测角大的特点, 而且随着频率的升高特别是到了太赫兹频段, 该成像方法的分辨率理论上能达到亚毫米级, 在无损检测、安检以及微动特征目标识别等领域有广泛的应用前景. 本文将多普勒雷达层析技术与太赫兹雷达技术相结合, 首次构建了基于多普勒层析的太赫兹雷达成像系统, 利用 662 GHz 的单频信号在太赫兹频段验证了成像算法的有效性, 获得了分辨率优于 1 cm 的重构图像. 在未来的研究中, 应重点研究以下两点内容: 1. 研究成像算法, 降低成像 PSF 的主瓣宽度及旁瓣电平. 2. 提高相位稳定度等系统指标, 设计改进实验, 提高成像质量.

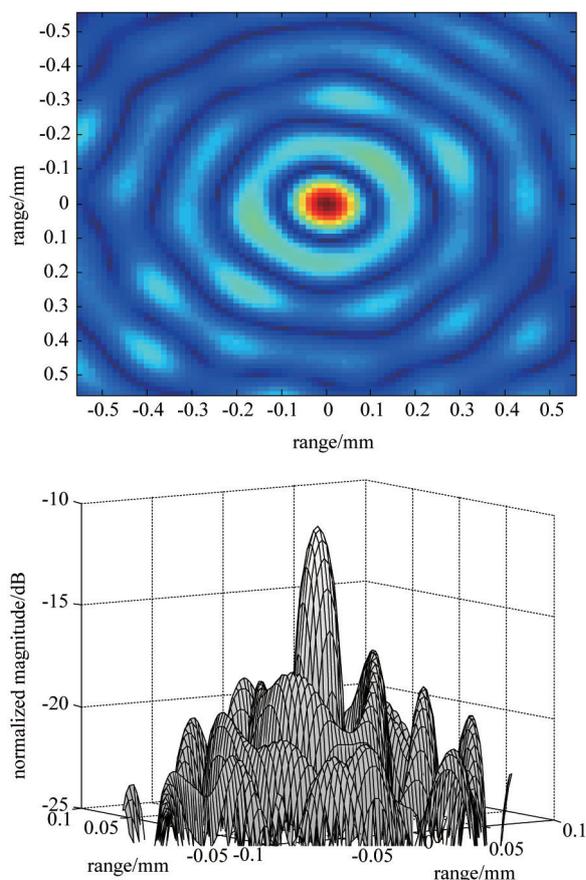


图 13 系统相位稳定性为  $\pm 40^\circ$  时的 PSF  
Fig. 13 PSF when phase stability is  $\pm 40^\circ$

## References

- [1] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, *et al.* THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screening [J]. *IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2011, **1**(1):169-182.
- [2] Stanko S, Caris M, Wahlen A, Sommer R, *et al.* Millimeter resolution with radar at lower terahertz [C]. *14th International Radar Symposium (IRS)*, 2013: 235-238.
- [3] Goyette T M, Dickinson J C, Waldman J, *et al.* Three Dimensional Fully Polarimetric W-band ISAR Imagery of Scale-Model Tactical Targets Using a 1.56 THz Compact Range [C]. *Proc. SPIE* 2003, **5095**: 66-74.
- [4] Danylov A A, Goyette T M, Waldman J, *et al.* Terahertz inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter [J]. *OPTICS EXPRESS*, 2010, **18**(5):16264-16272.
- [5] XU Hao. The Radar Imaging Based on Space Spectrum and Temporal-Spatial Stochastic Radiation Field [D]. He-fei: University of science and technology of China (徐浩. 基于空间谱理论和时空二维随机辐射场的雷达成像研究. 中国科学技术大学博士学位论文), 2011.
- [6] Mensa D L, Halevy S, Wade G. Coherent Doppler tomography for microwave imaging [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, **71**(2):254-261.
- [7] Fliss G G. Tomographic radar imaging of rotating structures [C]. *SPIE*, 1992, 1630: 199-207.
- [8] Wicks M C, Himed B, Bracken L J E, *et al.* Ultra narrow band adaptive tomographic radar [C]. *IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing*, 2005: 36-39.
- [9] Toru Sato. Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(2):1000-1005.
- [10] DING Xiao-Feng, FAN Mei-Mei, WEI Xi-Zhang, *et al.* Narrowband imaging method for spatial precession cone-shaped targets [J]. *Sci Chian Sci* (丁小峰, 范梅梅, 魏玺章, 黎湘, 肖怀铁. 空间进动锥体目标窄带雷达成像算法. *中国科学:技术科学*), 2010, **40**(6):686-694.
- [11] Tran H T, Melino R. Application of the fractional fourier transform and S-method in Doppler radar tomography [R]. 2010.
- [12] CHENG Bin-Bin, JIANG Ge, CHENG Peng, *et al.* 0.67 THz high resolution imaging radar [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* (成彬彬, 江舸, 陈鹏等. 0.67THz 高分辨力成像雷达. *太赫兹科学与电子信息学报*), 2013, **11**(1):7-11.
- [13] HUANG Pei-Kang, YIN Hong-Cheng, XU Xiao-Jian. *Radar target characteristics* [M]. Bei-jing: Publishing House of Electronic Industry (黄培康, 殷红成, 许小剑. *雷达目标特性*. 北京:电子工业出版社), 2010.
- [14] FAN Qin-Shan, *et al.* *Mathematics handbook* [M]. Bei-jing: Higher education press (范钦珊等. *数学手册*. 北京:高等教育出版社), 2002.
- [15] LIU Yuan-Peng, ZHANG Feng-Shou. *Cone beam CT imaging system* [M]. Bei-jing: Intellectual Property Publishing House (刘元朋, 张丰收. *锥束计算机断层成像系统*. 北京:知识产权出版社), 2008.
- [16] JIANG Ge, CHENG Bin-Bin, ZHANG Jian. 0.14 THz radar imaging based Radar Cross Section measurement [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* (江舸, 成彬彬, 张健. 基于 0.14THz 成像雷达的 RCS 测量. *太赫兹科学与电子信息学报*), 2014, **12**(1):19-23.
- [17] ZHAO Jing-Chen, HONG Tao. Application of metallic sphere in rotator ISAR imaging [J]. *Acta Armamentarii* (赵京城, 洪韬. 金属球在转台逆合成孔径雷达成像中的应用. *兵工学报*), 2010, **31**(12):1617-1621.