2019 年 10 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

#### 文章编号: 2095-4980(2019)05-0760-05

# 太赫兹雷达的人体微多普勒特征

毕严先1,杜瑞2,焦栋1,郭晓雷1,李鑫1

(1.中国电子科技集团公司 电子科学研究院, 北京 100191; 2.伯明翰大学 工程学院, 英国 西米德兰 伯明翰 B15 2TT)

摘 要:太赫兹雷达观测的行人微多普勒特征可用于行人检测和识别,在无人车和智能驾驶领域有广泛的应用前景。通过搭建 292 GHz 太赫兹信号发射和接收环境,利用 292 GHz 太赫兹雷达观测行人的四肢和躯干摆动引起的微多普勒。本文实验中,首先利用矢量信号发生器生成基带信号,然后采用上变频器将基带信号上变频至 292 GHz,不同部位的回波信号通过下变频器下变频至基带信号。对回波信号采用短时傅里叶变换处理,提取微多普勒频谱。实验中 292 GHz 提取的人体微多普勒特征实测结果与仿真结果一致。同时,实验还对比了 292 GHz 和 24 GHz 雷达的微多普勒结果。

关键词:太赫兹;292 GHz;微多普勒;行人 中图分类号:TN911.23 文献标志码:A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0760

# Human micro-Doppler characteristics of terahertz radar

BI Yanxian<sup>1</sup>, DU Rui<sup>2</sup>, JIAO Dong<sup>1</sup>, GUO Xiaolei<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>

(1.China Academy of Electronics and Information Technology, China Electronic Technology Corporation, Beijing 100191, China;2. Department of Electronic, Electrical and Systems Engineering, University of Birmingham, Birmingham West Midland B15 2TT, Britain)

**Abstract:** The pedestrian micro-Doppler observed by terahertz radar can be used for pedestrian detection and recognition, which can be widely applied in the field of unmanned vehicle and intelligent driving. In this paper, a 292 GHz terahertz radar is utilized to observe micro-Doppler caused by the swing of pedestrians' limbs and trunk by setting up the transmitting and receiving environment of 292 GHz terahertz signal. In this experiment, the baseband signal is generated by vector signal generator, and then the baseband signal is up-converted to 292 GHz. The echo signals of the body parts are down-converted to baseband signal. The echo signal is processed by short-time Fourier transform to extract the micro-Doppler spectrum. The experimental results of human micro-Doppler characteristics extracted at 292 GHz are consistent with the simulation results. At the same time, the micro-Doppler results of 292 GHz and 24 GHz radars are compared.

Keywords: terahertz; 292 GHz; micro-Doppler; pedestrian

近年来,太赫兹雷达因具有信号带宽大、分辨力高的优势引起了很多科研工作者的注意<sup>[1]</sup>。相比于传统的 高频信号,太赫兹信号的波长短,对目标的材质和表面更加敏感。太赫兹雷达将是未来目标检测和识别的重要 设备。太赫兹雷达的天线尺寸小,角度分辨力高,随着系统集成技术的进步,整个雷达系统可以被设计得更 小,因此太赫兹雷达可以用于自动驾驶汽车的车载高分辨力成像雷达。在现代的城市驾驶环境中,行人作为最 脆弱的目标,需要无人车准确无误地发现和识别行人,并估计出行人潜在的运动轨迹,为车辆决策系统提供信 息,以避免发生碰撞事故。目标的微动会对目标的回波产生调制<sup>[2-4]</sup>,提取回波中目标的微多普勒信息,进而估 计出目标不同模块的运动信息,可以实现非刚体目标的识别和分类<sup>[5-6]</sup>。生物工程学的研究表明,人体是一个典 型的由许多刚体部分组成的协作系统,各个刚体部分通过关节力矩协调运动。不同的肢体运动产生的微多普勒 信息可以用于人体和其他目标的区分。另外,还能用于识别不同的人体运动和武器携带情况。需要注意的是, 随着雷达视线向量和人体运动速度方向的夹角变化,基于微多普勒信息的分类的最弱。

收稿日期: 2018-09-17; 修回日期: 2018-12-03 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0800507) 目前,大部分微多普勒的研究都在相对较低的频率下完成。太赫兹雷达观测的人体微多普勒效果更加稳定,本文利用 292 GHz 的太赫兹系统提取人体的微动信息,实验中 292 GHz 提取的人体微多普勒特征实测结果与仿真结果一致。另外提取了 24 GHz 信号下的人体微多普勒信息用于对比,结果显示 292 GHz 雷达提取的微多普勒细节更丰富。

# 1 测试方法

# 1.1 系统描述

本文中的行人微多普勒信息提取实验在伯 明翰大学的微波实验室完成<sup>[7-11]</sup>,分别采用了 工作在 292 GHz 的连续波雷达和 24 GHz 的连 续波雷达。24 GHz 雷达的发射、接收天线和 矢量发生器连接,天线波束的垂直平面和水平 平面宽度都是 20°。本次实验中 292 GHz 雷达 先由矢量信号发生器生成基带信号,上下变频 器用于基带信号的上变频和回波信号的下变 频。天线波束的水平和垂直平面宽度为 10°。 两套系统如图 1 所示。系统的参数设置如表 1 所示。

两套系统的输出功率设置为最大值,为了 使噪声水平一致,两套系统采用相同的中频带 宽。由多普勒频率的定义可得

$$f_{\rm d} = \frac{2v}{\lambda} \tag{1}$$

式中: *λ* 是波长; *v*是目标速度。在实验中, 24 GHz 和 292 GHz 的雷达可以测量的最大速 度分别是 6.25 m/s,2.08 m/s,满足测量正常步 态下的行人各个部分的运动需求。

实验获得的目标回波采用短时傅里叶变换法,变换时间窗口长度为 0.1 s,窗口间重叠率设置为 50%,微多 普勒提取方法如下:

$$\mu D(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) w(t - \tau) \exp(-j2\pi f t) dt$$

式中: s(t)是目标回波; w(t)是时域的窗函数。

#### 1.2 实验设置

实验场景如图 2 所示,每次实验前,将激光发射器放置在发射 和接收天线之间,保证人体位于雷达信号照射区域的中间。人体后 方布置有羊毛毯,以降低测量过程中的多径效应和背景噪声。

当人体运动方向与雷达视线正交时,人体相对于雷达的径向速 度最小,此时多普勒特征最不明显。本文将研究该场景下,行人在 太赫兹雷达照射下的微多普勒特征。

在上一节中提到,太赫兹雷达的输出功率只有-17 dBm,为了 保证回波信噪比,这里将目标到雷达的距离设置为 4 m 左右。目标 距离雷达 4 m 时,被照射的范围近似为边长为 0.7 m 的方形区域。 本文所有的实验都是在室内进行,实验对象在原地行走。292 GHz 的实验场景如图 2 所示。

表 2 给出了实验人体参数,对应的不同身体部分的雷达散射截 面积(Radar-Cross Section, RCS)参考文献[6]。



(2)

Fig.2 Pedestrian micro-Doppler extraction experiment using 292 GHz 图 2 292 GHz 的人体成像实验

表 2 仃人奓釵			
Table2 Pedestrian parameters			

Table2 Pedestrian parameters				
gender	body height	body shape		
male	1.75 m	normal		

(a) equipment for 24 GHz experiments Fig.1 Experiment equipment

图1 实验设备

表1	系统参数设置
able1 (	System narameters

Table1 System parameters				
parameter name	24 GHz system	low THz system		
frequency/GHz	24	292		
azimuth beam width of antenna/( %	20 (-3 dB)	10 (-3 dB)		
pitch beam width of antenna/( 9	20 (-3 dB)	10 (-3 dB)		
output power/dBm	10	-17		
sample frequency/Hz	2 000	8 333		
IF bandwidth/kHz	10	10		

24 GHz 和 292 GHz 的实验场景相同,其中为了保证人体被照射的面积相同,24 GHz 实验中人体相距天线 2 m。实验中天线相对地面的高度设置为 1 m。3 dB 波束覆盖的人体区域,包括人体的躯干、上肢和前肢,臀部 和大腿的上部分都在 3 dB 波束覆盖范围内。

为了区分人体不同部分对微多普勒的效应,实验中采用 4 种人体步态: a) 正常步态行走,身体的各个部分 正常运动; b) 双臂摆动,其他部分静止; c) 腿部摆动,手臂和躯干静止; d) 躯干摆动,其他部位静止。

### 2 结果和讨论

# 2.1 24 GHz 雷达和 292 GHz 雷达观测结果对比

实验中,选取时长为5s的信号提取目标微多普勒,为了能清晰地表现不同部位的微多普勒特征,这里采用 最大值对所有微多普勒幅度进行归一化处理,动态范围设置为[0,-40] dB。太赫兹雷达的输出功率小,292 GHz 系统的 SNR 比 24 GHz 系统小,由图 3 可以看出 292 GHz 系统观测到的微多普勒中噪声比 24 GHz 明显。图 3(a)、图 3(b)分别给出了行人在 24 GHz 和 292 GHz 下的微多普勒。由于太赫兹雷达的频率高很多,太赫兹雷达 得到的行人微多普勒相比于 24 GHz 雷达得到的行人微多普勒更直观。同时,多普勒曲线更粗糙,这是因为太 赫兹雷达观测人体时,电磁波的漫反射更多,相对于传统的微波雷达,目标的 RCS 变化更小。事实上,太赫兹 雷达每个分辨单元的回波强度相近,但是 24 GHz 雷达接收的主要是一些强散射点反射的回波。



图 3 24 GHz 和 292 GHz 雷达观测的人体微多普勒

# 2.2 用 292 GHz 雷达观测的身体各部位微多普勒结果

行人的躯干、四肢按照不同的摆幅协调摆动,其对应的微多普勒特征各异。为了区分不同身体部位的微多 普勒特征,分别用 292 GHz 雷达对各部位的运动进行观测,其结果如图 4~图 6 所示。同时,基于 Boulic-Thalman 人体模型,给出了人体不同部位微多普勒的仿真结果。



Fig.4 Pedestrian arms swing micro-Doppler extraction using 292 GHz 图 4 采用 292 GHz 雷达观测的手臂摆动微多普勒

图 4 给出了太赫兹雷达观测的手臂摆动的微多普勒,可以发现,实测结果和仿真结果一致。在测试过程中,靠近雷达一侧的手臂被波束主瓣完全照射,此时远侧手臂被身体的躯干遮挡。当远侧手臂处于被雷达照射的位置时,远侧手臂在雷达视线上的径向速度与近侧手臂的径向速度相似,因此人体手臂摆动产生的微多普勒近似为单个正弦/余弦曲线,而非两根相位相反的曲线。



图 5 采用 292 GHz 雷达观测的腿部摆动微多普勒

图 5(a)是太赫兹雷达人体腿部摆动的微多普勒仿真结果,这里假设微多普勒是人体左/右大腿到臀部部分的运动造成的。图 5(b)是太赫兹雷达人体腿部摆动的微多普勒实测结果。可以看出实测结果与仿真结果一致。实际上,微多普勒是由两只腿的交替摆动产生的。本实验中人体的左侧大腿先运动,右侧大腿保持静止以支撑身体,产生了图 5(b)中的第 1 个周期的微多普勒。接着右侧大腿开始运动,左侧大腿保持静止以支撑身体,产生了第 2 个周期的微多普勒。因此,行人的腿部运动引起的微多普勒曲线是一条准三角波曲线,而不是两个相位相反的波形。



人体躯干的摆动引起的微多普勒如图 6 所示。正常行走姿态下的人体躯干会左右摆动,因而引起的微多普 勒类似于单个正弦/余弦波形。

如前所述, 292 GHz 的太赫兹雷达得到的微多普勒和仿真结果一致, 这为行人的识别和轨迹预测提供了更多的应用可能性。

# 3 结论

为了研究太赫兹雷达在行人检测领域的应用,本文通过 292 GHz 太赫兹雷达的行人微多普勒实验,研究了 太赫兹雷达视线方向与行人运动方向垂直场景下的人体不同部位的微多普勒特征,在这种场景下的人体微多普 勒特征最小。实验表明,太赫兹雷达观测的人体微多普勒特征比 24 GHz 雷达观测的人体微多普勒特征更加清 晰,太赫兹雷达人体微多普勒特征用于行人识别和轨迹估计有着巨大应用潜力。

# 参考文献:

- STOVE A. Potential applications for low-Tera-Hertz radar[C]// 16th International Radar Symposium (IRS). Dresden, Germany:IEEE, 2015:191-196.
- [2] JASTEH D,HOARE E G,CHERNIAKOV M,et al. Experimental low-Terahertz radar image analysis for automotive terrain sensing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016,13(4):490-494.
- [3] WILLETTS B,GASHINOVA M,STOVE A,et al. Low-THz rough surface imaging[C]// The Thirteenth European Radar Conference. London,UK:IEEE, 2016:394-397.
- [4] CHEN V C,LI F,HO S S,et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006,42(1):2-21.
- [5] RAM S S,LING H. Micro-Doppler signature simulation of computer animated human and animal motions[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. San Diego,CA,USA:IEEE, 2008.
- [6] VAN DORP P,GROEN F. Feature-based human motion parameter estimation with radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2008,2(2):135-145.
- [7] 毕严先,王俊. 基于 ISAR 像序列的目标三维重构[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):531-534. (BI Yanxian, WANG Jun. Target 3D reconstruction based on the ISAR image movies[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):531-534.)
- [8] 经文,安健飞,成彬彬,等.一种 0.34 THz 站开式三维成像安检仪[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5):757-762. (JING Wen,AN Jianfei,CHENG Binbin, et al. 0.34 THz standoff 3D imaging radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):757-762.)
- [9] GU S M,LI C,GAO X,et al. Terahertz aperture synthesized imaging with fan-beam scanning for personnel screening[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60(12):3877-3885.
- [10] MAY T,ZIEGER G,ANDERS S,et al. Passive standoff terahertz imaging with 1 Hz frame rate[J]. Proceedings of SPIE, 2008(6949):69490C-1-69490C-8.
- [11] 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.

# 作者简介:



**毕严先**(1988-),男,安徽省桐城市人,博士,高级工程师,主要研究方向为雷达成像、基于深度学习算法的图像目标识别等.email:biyanxian@126.com.

**杜** 瑞(1989-),男,西安市人,在读博士研 究生,主要研究方向为信号处理、目标识别等.

**焦** 栋(1986-),男,山西省大同市人,博 士,高级工程师,主要研究方向为大数据、云计 算开发等.

**郭晓雷**(1985--),男,石家庄市人,博士,高级工程师,主要研究方向为云计算、人工智能开发等.

**李** 鑫(1985-),男,太原市人,博士,高级 工程师,主要研究方向为云计算、物联网等.