

# 基于SystemVue的微多普勒雷达校准信号生成方法

王新齐, 孙海洋, 陈丁\*, 沈岭南, 杨子钰

(西安工业大学 兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 微多普勒雷达可有效识别如人体步行姿态等微运动的微动特性, 但针对此类雷达测量性能行之有效的校准信号生成方法尚不完善。因此, 提出了一种采用半实物仿真平台手段来产生微多普勒模拟信号的方法, 以便于对面向步行姿态的微多普勒雷达的校准。首先, 介绍了步行姿态微动特性测量原理, 分析了刚体平移和旋转运动特性, 构建了关键部位散射点的行人姿态简化模型; 然后, 基于SystemVue雷达仿真软件, 搭建面向步行姿态的微多普勒雷达半实物校准平台, 利用正交调制和傅里叶变换提取分析了人体模型产生的微多普勒信号频率并生成微多普勒时频分布特征。经试验证明, 由人体躯干的频率数据计算出的步行速度平均值和预设值的数值相对误差不超过3%, 说明该方法是可行且可靠的。

**关键词:** 雷达信号生成; 微多普勒效应; 人体步行姿态; 时频分布特征; 半实物仿真

**中图分类号:** TP212

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025050

**引用格式:** 王新齐, 孙海洋, 陈丁, 等. 基于SystemVue的微多普勒雷达校准信号生成方法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(4): 460-466.

WANG Xinqi, SUN Haiyang, CHEN Ding, et al. A method for generation of micro-doppler radar calibration signals based on SystemVue[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(4): 460-466.

## A Method for Generation of Micro-Doppler Radar Calibration Signals Based on SystemVue

WANG Xinqi, SUN Haiyang, CHEN Ding\*, SHEN Lingnan, YANG Ziyu

(School of Defence Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Micro-Doppler radar has the potential to facilitate the recognition of pedestrian posture. However, the current generation of approaches to the micro-Doppler radar verification signals has limited effectiveness. Accordingly, with prescribed walking posture feature parameters, a novel method was proposed for the generation of micro-Doppler signals via a semi-physical simulation platform. The principles of the micro-Doppler effect were initially elucidated through an analysis of the translational and rotational motions of a rigid body. Subsequently, a pedestrian model was established by simplifying the structure of the pedestrian into 17 interconnecting scattering points, which represented key parts of the pedestrian. Furthermore, a SystemVue software-based system for calibrating the micro-Doppler radar has been developed. IQ modulator and Fourier transform were also employed to extract and analyze the micro-Doppler signals generated by the human body model. Then, a micro-Doppler versus time plot for micro-Doppler

**收稿日期:** 2024-09-19

**基金项目:** 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2024JC-YBMS-508); 2023年西安工业大学优秀硕士学位论文培育基金资助项目(YS202313); 陕西省教育厅科学研究计划重点项目(24JR078)

**作者简介:** 王新齐(1984-), 男, 硕士生, 主要从事雷达相关研究。E-mail: wangxinqill@163.com。

\* **通信作者:** 陈丁(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事兵器靶场测试和雷达相关领域研究。E-mail: chending@xatu.edu.cn。

signals was obtained. During the experiment, the relative error of the pedestrian velocity was no more than 3%, which demonstrated the reliability and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** radar signal generation; micro-Doppler effect; pedestrian posture; time-frequency analysis; semi-physical simulation

## 0 引言

若雷达和目标之间存在相对径向运动,则回波信号相对于发射信号的频率会发生变化,此现象称为多普勒效应<sup>[1]</sup>。根据回波信号的频率偏移,可确定目标沿着雷达视线的相对运动速度。实际情况中,多数被测目标的某部分构件存在相对主体运动之外的机械振动、周期旋转或者摆动,如直升机叶片的旋转、树木的摇摆、行走人体的摆臂、飞鸟翅膀的扇动等,此时回波信号的主多普勒频率将会产生额外的频率调制,这种附加的多普勒调制称为微多普勒效应<sup>[2]</sup>。这里的“微”并非“位移量变化小”,而是指运动目标除了主体移动外,目标或其任何结构部件还存在微运动,如振动、旋转、翻滚等小幅度的运动。其不仅仅针对位移的变化,例如,在分析直升机的雷达回波时,微多普勒效应可以用来确定旋翼叶片的旋转速度,从而帮助识别悬停空中直升机的型号,这主要体现了主体和局部的区分特点。微多普勒信号包含了目标形状、结构、姿态、表面材料电磁参数、受力状态及目标独一无二的运动特性等信息。因此,基于微多普勒效应的雷达测量方法日益受到广泛关注,如单兵行走时手臂等部位的周期性运动产生了微多普勒的周期性特征,战场侦察雷达可以有效地实现对单兵目标的检测<sup>[3-4]</sup>。直升机的旋翼、固定翼飞机的螺旋桨同样是机械振动或旋转的例子,雷达可有效测量直升机叶片的微多普勒特征,在与特征样本库比较后,便可有效地判断出武器直升机的型号。此外,在医疗监测或安全监控中,微多普勒效应可以用来分析人体的微小运动,如心跳、呼吸或肢体微小动作,从而监测生命体征或异常行为。然而,任何装备在正式投入使用前,均应进行系统误差校准,基于微多普勒特征的探测雷达也不例外。因此,能否采用一种合理、有效的校验方法对该类雷达进行科学精确地校准,将有助于提升微多普勒特征探测雷达的应用价值。

目前有多种方法校验微多普勒雷达的系统误差,主要包括:简单旋转振动验证法、图像验证法、可穿戴设备方法和常规多普勒雷达校验法。在直升机旋

转叶片等简单刚体的转速已知的情况下,可以直接推算出微多普勒频移,实现对多普勒雷达的系统误差校准。但这种方法的实用性受限,在实际应用中测量对象多为较为复杂的被测目标(如人体、动物等),其微运动的微多普勒频移具有非周期、强度低和难以处理等特点,这与简单刚体生成的规律性微多普勒信号存在较大差异。视觉检测旨在通过图像方法(如摄影、摄像等)记录如人体步行姿态等复杂目标的参数,并将其和被校验雷达所提取的微多普勒特征数据进行对比以达到验证的目的。但为了弥补多角度视觉产生的盲区,需要多个图像拍摄设备进行配合,这将造成系统过于复杂且会产生误差叠加的问题<sup>[5]</sup>。可穿戴设备由若干姿态传感器组成,可直接贴敷在人体关节处用以提供更精确、更可靠的人体运动数据<sup>[6-7]</sup>,但这样会阻碍行人的正常步态,特别是其无法获取剧烈运动状况下的相关数据,鉴于此,姿态传感器测量的参数与真实参数有所出入<sup>[8]</sup>。此外,利用常规手段(即上/下变频)的多普勒雷达原理提供校准信号只对目标主运动产生的多普勒信号有效,而对目标的微运动产生的微多普勒信号无效,拍差频率(即多普勒频移量)几乎接近于0 Hz。综上,微多普勒信号由目标的微运动产生,与主体运动产生的多普勒频移叠加。由于这种信号复杂多变,传统方法生成的微多普勒信号存在预设的校准基准信号难以获取和处理且与真实信号有较大差别等诸多问题。因此,亟须研究一种针对微多普勒雷达的系统误差校验方法。

本文首先介绍了基于微多普勒效应的微动特性测量原理;接着,鉴于人体姿态运动的特殊性和应用广泛性,选取步行人体为研究对象,建立了简化的行人模型,从而避免复杂的人体参数建模;其次,在 SystemVue 软件上搭建了一个半实物仿真平台,模拟生成面向运动学参数可调的步行行人的微多普勒频率信号,此时任意待验证微多普勒雷达接收并分析该信号以提取其中的微多普勒特征参数,随后用提取的参数与预设的特征参数进行对比来实现雷达校准工作;之后,对生成的多普勒信号进行傅里叶变换以获得时频分布图,以此来检验生成信号的正确性;最后,针对躯干部分的频率数据结果进行

分析并给出结论。

## 1 方法原理

### 1.1 人体姿态微动特性测量

如图1所示,一静止雷达置于雷达坐标系 $(X, Y, Z)$ 的原点 $O$ 上。目标被简化为一个保留了所有微多普勒特征的圆柱形刚体,其形心位于物体固定坐标系 $(x, y, z)$ 的原点 $O$ 上。为了更准确地描述刚体除平动之外的旋转运动,还建立了一个旋转坐标系 $(U, V, W)$ ,其原点与物体坐标系相同。雷达与物体坐标系原点之间的距离为 $R$ <sup>[9]</sup>。

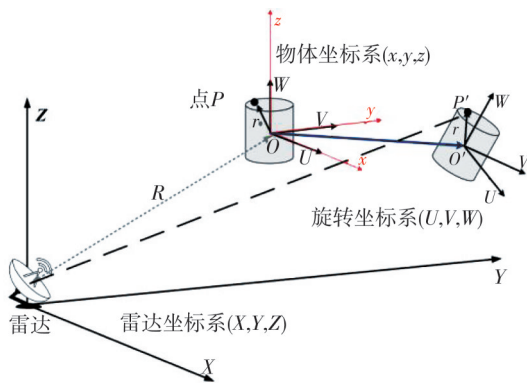


图1 平移和旋转运动目标的坐标系示意图

Fig. 1 Schematic of target with translation and rotation

为简化研究,依据刚体特性,仅以目标上的点 $P$ 作为研究对象。假设目标以速度 $v$ 从点 $O$ 平移到点 $O'$ ,然后以角速度 $\omega$ 进行旋转,这时点 $P$ 位置变为 $P'$ 。此时,从 $Q$ 处的雷达到 $P'$ 处的距离矢量为

$$r(t) = R + vt + R_r r_0, \quad (1)$$

式中:旋转矩阵 $R_r$ 描述的是 $P$ 点到 $P'$ 点的以一定角速度旋转的过程。

若雷达向目标发射了一个载频为 $f$ 的信号,则点 $P$ 返回的信号基带为

$$S_r(t) =$$

$$\rho \cos [2\pi(f - f_d)t] = a \cos [2\pi ft - \phi(t)], \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为点 $P$ 的反射率函数; $f$ 为雷达发射信号的频率; $\phi(t)$ 为目标移动产生的微多普勒频移,

$$\phi(t) = 2\pi f \frac{2r(t)}{c}. \quad (3)$$

使用正交调制器从回波信号中提取微多普勒频率。正交调制器的原理如图2所示<sup>[10-11]</sup>,其由2个混频器、2个低通滤波器和1个移相器组成。接收到的回波信号 $S_r(t)$ 和发射信号 $S_i(t)$ 在第1个混频器中进行混频。同时,回波信号与移相信号 $S_p(t)$ 在第2个混频器中进行混频。第1个混频器输出为

$$S_r(t)S_i(t) =$$

$$\frac{a^2}{2} \cos [4\pi f_0 t + \phi(t)] + \frac{a^2}{2} \cos [\phi(t)]. \quad (4)$$

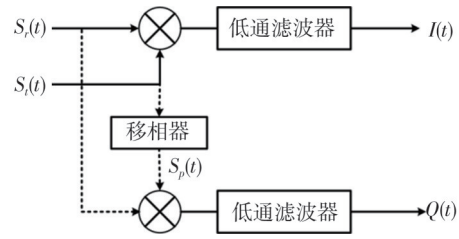


图2 混频器示意图

Fig. 2 I-Q modulator

低通滤波器滤除混频信号中的高频部分得到第一路信号 $I(t)$ 为

$$I(t) = \frac{a^2}{2} \cos [\phi(t)]. \quad (5)$$

第2个混频器的输出为

$$S_r(t)S_p(t) =$$

$$\frac{a^2}{2} \cos [4\pi f_0 t + \phi(t)] - \frac{a^2}{2} \sin [\phi(t)]. \quad (6)$$

经过低通滤波器后得到 $Q(t)$ 为

$$Q(t) = -\frac{a^2}{2} \sin [\phi(t)]. \quad (7)$$

组合两路信号可以得到复多普勒信号为

$$S_D(t) = I(t) + jQ(t) = \frac{a^2}{2} \exp(-j\phi(t)). \quad (8)$$

尽管人体行走是非刚体运动的,但在研究时可以将其视为由多个简单刚体组成的整体。如图3所示为所建立的简化人体模型,该模型包括17个可以反射雷达信号的雷达散射点,分别代表人体的关键运动部位:头部、脊柱基底、左右肩、肘部、手部、臀部、膝盖、脚踝和脚趾<sup>[12]</sup>。

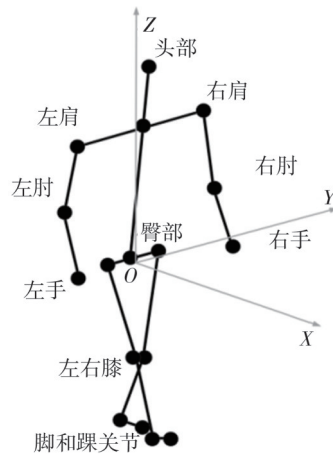


图3 人体模型

Fig. 3 Human model

人体的其余部分则简化为若干直线刚体, 这些互相连接最终组成一个整体。在以脊柱基底为原点建立的人体坐标系基础上, 可以获得模型中每个散点在每个时刻的微多普勒信号值和每个散点的坐标值, 最终综合生成行人在每个采样时间内总的雷达回波信号。

### 1.2 半实物校准平台

面向步行姿态的微多普勒雷达信号生成和校验半实物仿真平台示意图如图 4 所示。该平台主要由天线、任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)、本地振荡器(Local Oscillator, LO)、上变频模块(Up Conversion, UC)、低噪声放大器

(Low Noise Amplifier, LNA)、人体模型、信号处理机和PC机等部分组成<sup>[13-14]</sup>。该平台的工作过程主要分为6个步骤: 首先, 基于在PC中已经构建好的人体模型和仿真系统生成步行行人微多普勒信号, 并将其通过网线下下载至 AWG 以生成中频信号(Intermediate Frequency, IF); 其次, UC 模块和 LO 模块将中频上变频为射频信号(Radio Frequency, RF); 再次, 天线将经 LNA 放大后的 RF 信号向待校准雷达天线的方向发射; 然后, 和发射平台同步的待校准雷达接收微多普勒信号以进行校准工作; 最后, 为了验证发射信号的正确性, 通过正交调制器来提取多普勒频移信号, 并且利用时频傅里叶变换生成信号时频分布图<sup>[15]</sup>。

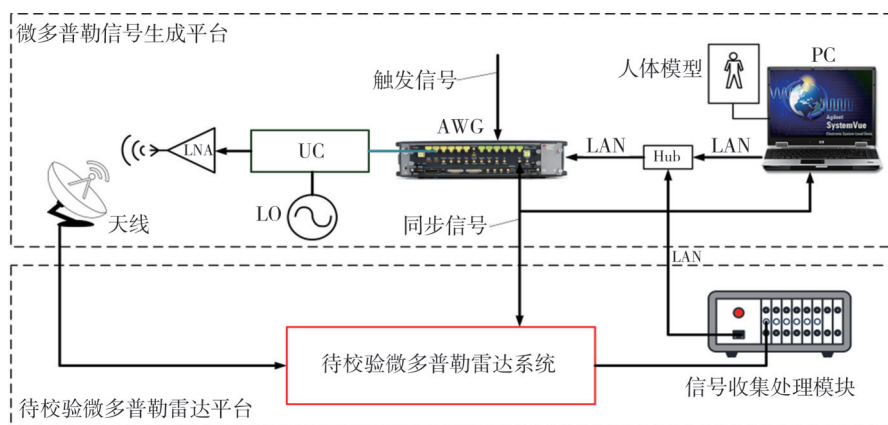


图 4 面向步行姿态的微多普勒雷达校准半实物仿真平台

Fig. 4 Schematic diagram of simulation platform of radar

平台的微多普勒信号生成部分的仿真使用 SystemVue 软件实现。SystemVue 是一款专门用于电子系统级别设计的软件。其仿真库内容丰富, 如雷达模型库提供了大量参数化的原始模块, 可用于构建脉冲或连续波雷达系统<sup>[15]</sup>。仿真系统的细节如图 5 所示, 其主要由轨迹层和信号层组成。轨迹层用于设置发射信号和接收信号模

块的属性以及步行行人的步行速度、身高、初始坐标位置等参数。信号层则用于生成微多普勒回波信号, 其核心为雷达回波生成(Automotive Radar Echo Generator, AREG)模块。连续波信号(Continuous Wave, CW)模块产生的初始信号和轨迹层产生的行人姿态信号被一同输入该模块, 最终产生步行行人的微多普勒信号。

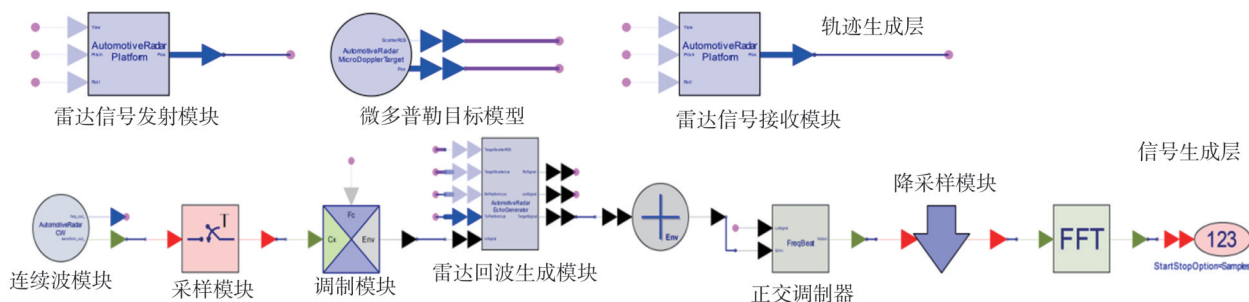


图 5 仿真系统示意图

Fig. 5 The schematic diagram of the simulation platform of radar

信号层的工作原理为: 首先, 使用 CW 模块生成参数可调的基带信号(Baseband, BB); 其次, 调制

器模块将 BB 信号转换为载波频率为 77 GHz 的中频信号, 然后将其输入 AREG 模块, 配合轨迹层的信

号,以生成微多普勒雷达信号;再次,通过TCP/IP方式连接测试仪表并下载波形到信号发射仪器,发射仪器发射微多普勒信号到待验证的微多普勒雷达;最后,基于待验证的微多普勒雷达所测参数和已编译的微多普勒信号,在待验证的微多普勒雷达平台上进行其性能的验证工作。此外,为了保证编译生成的步行行人多普勒雷达信号的正确性,还需根据前述正交调制原理,在混频器(Frequency Beat, FB)模块和快速傅里叶(Fast Fourier Transfer, FFT)模块中进行微多普勒频移参数提取工作,以将生成的参数与预设的参数进行对比。

## 2 实验结果与分析

在上述信号生成半实物仿真平台的基础上,对步行人体微多普勒信号进行仿真生成工作。首先按照表1所示的参数在PC中编译波形以及步行行人模型的初始姿态参数。将编译生成的信号经过网线下载到测试仪器即任意波形发生器来生成真实的微多普勒雷达信号。

表1 编译波形的参数值

参数	数值或类型	定义
波形	锯齿波	生成信号的类型
信号幅值/V	1	信号的幅度
PRI/ $\mu\text{s}$	0.2	脉冲重复间隔
频宽/MHz	20	信号频带宽度
CPI	128	相参处理时间
散点数	17	人体模型的雷达散射点数量
身高/m	1.8	人体身高
初始位置/m	[2, 0, 0]	人体模型在人体坐标系中的初始位置
初始速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	[1, 0, 0]	人体模型在人体坐标系中的初始速度

同时,步行行人姿态模块可以根据所设定的行人姿态参数生成散点位置,然后依据位置数据在PC上动态显示基于所建立的人体模型的步行姿态图,如图6所示。

图6中,红色圆点代表人体模型的17个散点,即代表前文所述构建的人体模型的17个关键位置。此人体模型的坐标点是以脊柱基点为中心的。

对生成的微多普勒信号数据作时频傅里叶变换得到时频分布图,如图7所示。从图可见,步行人体不同部位的频率曲线随时间变化各异。正弦波状曲线代表脚部运动频率数据,因为行走时脚部摆动速率最高。0 Hz水平线附近几条高功率频率曲线对应人体躯干(脊柱、左右肩、臀部等)行走时的微多普勒频移信号。因躯干微运动幅度小、面积大,反射雷达信号功率最大,所以其对应

数据频率值小。

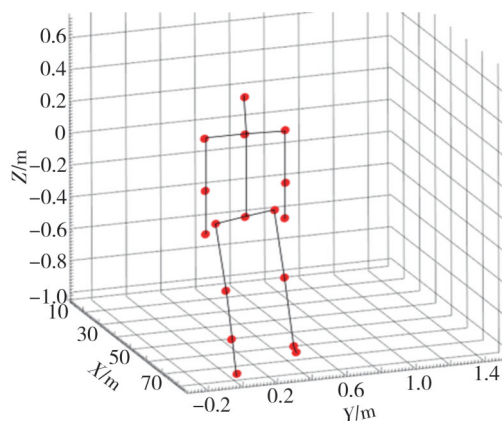


图6 步行行人姿态图

Fig. 6 Dynamic display of pedestrian

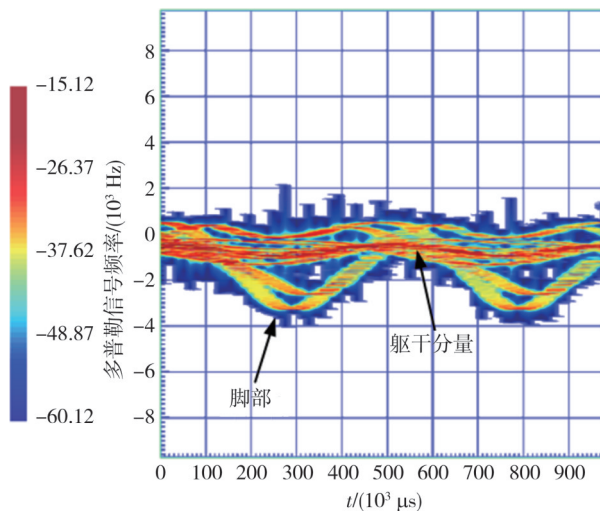


图7 生成的微多普勒时频分布图

Fig. 7 Micro-Doppler in time-frequency domain

为了验证方法的准确性和适用性,选取3种不同的行人步行速度进行仿真,即[1, 0, 0], [2, 0, 0]和[3, 0, 0](m/s)。因为躯干分量微多普勒在频谱中具有最大信号强度,且躯干的移动速度可视为与步行速度一致,故选取微多普勒时频分布频谱中的关于躯干部分的数据进行分析处理<sup>[16]</sup>,并计算出3组数据的平均值 $\bar{v}$ 以及方差 $\sigma$ ,数据结果如表2所示。同时通过式(9)计算行人的步行速度。

$$\bar{v} = \frac{f_{\text{mean}} \lambda}{2}, \quad (9)$$

式中: $\lambda$ 为雷达信号的波长,为0.0039 m。表中3组数据的速度计算结果分别为0.98854, 2.02728和3.01046 m/s。由计算结果可知,仿真方法所得的步行速度结果与预设的步行速度数值基本一致,3组数据相对测量误差分别为1.146%, 2.728%和

1.046%。数据分析结果说明本方法提出的仿真平台具有好的准确性和适用性。

表 2 测量频率数据值

Tab. 2 Measured data of micro-Doppler frequency

序号	第1组频率/Hz	第2组频率/Hz	第3组频率/Hz
1	518.483 591 9	1 033.118 205	1 541.428 804
2	518.064 240 1	1 042.305 405	1 540.731 788
3	517.587 205 2	1 048.907 589	1 540.456 451
4	513.849 215 9	1 026.869 591	1 538.357 463
5	516.250 925 7	1 041.284 745	1 538.819 790
6	518.390 824 4	1 035.269 793	1 537.831 867
7	516.005 894 0	1 040.923 087	1 534.126 621
8	517.520 929 6	1 040.702 907	1 539.202 374
9	513.692 351 2	1 036.547 974	1 538.764 924
10	513.849 813 2	1 041.965 494	1 543.197 305
11	518.141 811 4	1 023.449 143	1 540.915 693
12	517.204 009 6	1 049.131 831	1 542.361 660
13	517.772 551 2	1 033.118 205	1 539.196 112
14	516.077 800 7	1 042.305 405	1 542.458 077
⋮	⋮	⋮	⋮
75	518.064 240 1	1 026.869 591	1 540.731 788
均值	516.27	1 039.63	1 538.46
标准差	7.92	7.62	7.24

### 3 结 论

微多普勒雷达校准是雷达系统投入使用前的必要工作。本文在介绍微多普勒原理、对步行人体建模的基础上,提出了一种面向步行姿态的微多普勒雷达校准方法,并结合 SystemVue 软件和其他仪器进行半实物仿真。该方法具有如下特点:1)能生成和真实信号几乎一致的微多普勒信号,以达到用其对微多普勒雷达进行验证的目的;2)便于生产步行人体的参数化模型,直接将人体看作由几个关键散射点和若干直线刚体组成的系统,简化了计算过程;3)在参数估计过程中使用了1s时长的雷达回波信号。1s一般只包含1~2个步态周期,不会使数据量过大,影响计算速度。

本方法的微多普勒频率数据分析方法还需进一步改进,未来将针对如手部等不同部位的姿态信号进行分析处理,以便获取更丰富的步行姿态信号。此外,姿态模型有待进一步扩展到其他非刚体运动模型。本方法还可用于雷达电子对抗,针对敌方的战场微多普勒雷达,生成虚假的行人信号以进行欺骗性干扰。综上所述,本文提出的微多普勒雷达校准信号生成方法具有实用价值。

### 参考文献:

[ 1 ] LIANG J, FENG H. Doppler estimation based on Doppler-invariant signals[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2024, 31: 581-585.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] CHEN V C. Detection and analysis of human motion by radar [C]//2008 IEEE Radar Conference, 2008: 1-4.

[ 4 ] SOROWKA P, ROHLING H. Pedestrian classification with 24 GHz chirp sequence radar [C]//2015 16th International Radar Symposium(IRS), 2015: 167-173.

[ 5 ] SONG Z J, DUAN W Y, XU G D, et al. Experimental and numerical study of the water entry of projectiles at high oblique entry speed [J]. Ocean Engineering, 2020, 211: 107574.

[ 6 ] 夏资厚, 刘吉晓, 刘均益, 等. 基于 RFID 的人体姿态识别方法研究[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(1): 36-39.

XIA Zihou, LIU Jixiao, LIU Junyi, et al. Study on human posture recognition method based on RFID[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(1): 36-39. (in Chinese)

[ 7 ] 郑凯. 基于物联网的可穿戴式游泳姿态测量系统设计与数据分析[J]. 测试技术学报, 2019, 33(2): 131-137.

ZHENG Kai. Wearable system of monitoring swimming posture based on internet of things and experimental data analysis[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2019, 33(2): 131-137. (in Chinese)

[ 8 ] CHOW J W, HIRKO R J, HEMLEBEN M E, et al. Light curtain for detecting footfall instants during treadmill walking: an exploratory study [J]. Gait & Posture, 2010, 31(3): 403-406.

[ 9 ] KWON J, KWAK N. Human detection by Neural Networks using a low-cost short-range Doppler radar sensor [C]//2017 IEEE Radar Conference, 2017: 755-760.

[10] CHEN V C. The Micro-doppler effect in radar[M]. Boston: Artech House, 2011.

[11] YAMAZAKI H, SAIDA T, GOH T, et al. Dual-carrier dual-polarization IQ modulator using a complementary frequency shifter [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 3400208.

- [12] 刘今越, 刘彦开, 贾晓辉, 等. 基于模型约束的人体姿态视觉识别算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 208-217.  
LIU Jinyue, LIU Yankai, JIA Xiaohui, et al. Research on human pose visual recognition algorithm based on model constraints[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 208-217. (in Chinese)
- [13] CHEN D, NI J P, BAI L, et al. Evaluation on safety performance of a millimetre wave radar-based autonomous vehicle[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11(1): 1-10. (in Chinese)
- [14] 陈丁, 王放, 张军, 等. 基于AWG超宽带雷达信号测试系统的实现[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(3): 279-283.  
CHEN Ding, WANG Fang, ZHANG Jun, et al. Realization of UWB radar signal test system based on AWG[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(3): 279-283. (in Chinese)
- [15] 张文辉, 张永宁, 田雨书, 等. 基于SystemVue的复杂电磁环境中雷达半实物仿真[J]. 火控雷达技术, 2018, 47(2): 85-90.  
ZHANG Wenhui, ZHANG Yongning, TIAN Yushu, et al. System vue based hardware-In-loop simulation of radar in complicated electromagnetic environment [J]. Fire Control Radar Technology, 2018, 47(2): 85-90. (in Chinese)
- [16] 孙忠胜, 王俊, 孙进平, 等. 单人行走运动参数估计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(4): 789-795.  
SUN Zhongsheng, WANG Jun, SUN Jinping, et al. Motion parameters estimation method of single walking human[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(4): 789-795. (in Chinese)