

## 控制理论与应用

## 基于双雷达的轨道交通测速方法及误差分析

周媛<sup>1</sup>, 周巧莲<sup>1</sup>, 郑成鑫<sup>2</sup>, 张谦琥<sup>1</sup>

(1. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 201103; 2. 上海无线电设备研究所, 上海 201109)

**摘要:** 雷达测速是目前轨道交通测速的主要技术手段之一, 传统的单部雷达测速方法需要精确标定天线相位中心高度, 这给工程实现带来了一定的困难。为此, 文章提出了一种两部雷达联合测速方法, 其根据两部雷达的多普勒频率和高度差信息, 实时解算雷达绝对高度, 进而估计列车速度, 工程上更易于实现; 此外, 雷达测速相比激光测速环境适应性更强, 且双雷达测速系统的成本不到进口激光测速产品的一半。为了指导系统参数设计, 文章总结并分析了两部雷达测速的误差因素及其对测速精度的影响, 并通过工程试验对本文设计的双雷达系统与进口激光测速产品进行比较, 结果显示, 两者测速精度相当。

**关键词:** 轨道交通测速; 分布式双雷达; 多普勒频率; 雷达测速

**中图分类号:** U270.38; TN975<sup>+</sup>.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5427(2021)01-0030-05

**doi:**10.13889/j.issn.2096-5427.2021.01.005

A Rail Transit Speed Measurement Method Based on Dual-radar  
and Its Error AnalysisZHOU Yuan<sup>1</sup>, ZHOU Qiaolian<sup>1</sup>, ZHENG Chengxin<sup>2</sup>, ZHANG Qianxiao<sup>1</sup>

(1. Shanghai Shentong Metro Group Ltd., Shanghai 201103, China;

2. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Radar is one of the most commonly used technical methods for measuring vehicle speed in rail transit. For traditional speed measurement method by single radar, accurately calibrating phase center height of antenna is necessary, which would introduce difficulties for project implementation to a greater or lesser extent. This paper introduces a dual-radar speed measurement method which could measure metro vehicle speed by calculating absolute height of radar in real-time based on both Doppler frequency and altitude difference information of dual-radar. The proposed method is easier to realize in practical engineering, more adaptable to environment than laser speed measurement method, and the cost of dual-radar system is less than half of the imported laser speed measurement device. Moreover, for system parameter optimization, this paper studies and analyses the influence factors of error of dual-radar method and the impact on precision of velocity measurement. Engineering test results show that the dual-radar speed measurement system has nearly the same test precision than that of the imported laser radar product.

**Keywords:** rail transit speed measuring; distributed dual-radar; Doppler frequency; radar velocimetry

## 0 引言

轨道交通测速传感器是控车系统的核心设备之一, 其所获取的高精度列车速度信息是车辆安全运行

的前提和保证<sup>[1-2]</sup>。轨道交通测速主要有地感线圈测速、转动测速、视频测速、GPS 定位测速、激光测速和雷达测速等方式。地感线圈的安装和维修会对地面造成破坏<sup>[3]</sup>, 转动测速在车轮打滑、空转时测速精度低<sup>[4]</sup>, 视频测速存在监控范围有限的问题<sup>[5]</sup>, GPS 定位测速有分辨率低、在山区或隧道等存在信号盲区的缺点<sup>[6]</sup>, 激光测速对环境适应性差<sup>[7-8]</sup>, 而

收稿日期: 2020-07-27

作者简介: 周媛(1980—), 女, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通车辆专业技术研究工作。

雷达测速具有受环境影响小、精度高的优势，是目前比较主流的测速方法。传统的单部雷达测速需要精确的雷达天线相位中心高度信息，而雷达天线相位中心与天线几何中心一般不重合，这给雷达高度测量带来了困难。朱燕、刘逸通在多普勒效应原理的基础上，利用 Burg 算法提高测速精度<sup>[9]</sup>，但是实现算法需要迭代计算，时间复杂度高；陈红江、张浩等提出了一种双雷达天线测速方法，其基于非对称发射角的双天线雷达，以不同的频率发射雷达波，并利用多普勒效应相关算法进行解析计算<sup>[10]</sup>，但是双频增加了测速系统复杂度。为此，本文提出了一种双雷达联合计算列车速度的方法，其计算方法和系统设计简单、可靠性高。文中对双雷达测速技术误差原理进行了分析，并采用目前轨道交通高精度激光测速设备进行了对比测试验证。

## 1 双雷达联合测速原理

基于多普勒效应的测速雷达被安装在列车底部，雷达天线向轨面发射电磁波，电磁波经过轨面反射回天线。雷达随机车相对轨面的运动会使得发射波和接收波之间存在一定的频率差，即多普勒频率。图 1 示出雷达测速示意，其中， $H$  为雷达高度， $R$  为斜距， $V_H$  为列车相对于轨面的运行速度， $\varphi$  为雷达斜视角， $V_r$  为雷达相对于轨面的径向运行速度。

$$V_r = V_H \sin \varphi = V_H \frac{\sqrt{R^2 - H^2}}{R} \quad (1)$$

由雷达和轨面之间相对运动而产生的多普勒频率<sup>[11-13]</sup> 计算如下：

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} = \frac{2V_H}{\lambda} \frac{\sqrt{R^2 - H^2}}{R} \quad (2)$$

式中： $\lambda$ ——雷达波长。

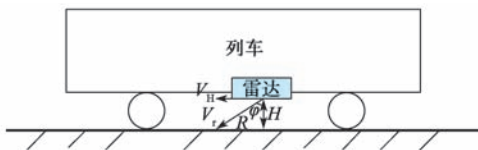


图 1 雷达测速示意

Fig. 1 Schematic diagram of radar velocity measurement

### 1.1 单雷达测速

单部雷达测速的方法如下：

(1) 对回波数据进行二维快速傅立叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 处理，从而获取二维图像；

(2) 提取图像中最强散射点，获取其所在距离门，并计算斜距  $R$ ；

(3) 利用最强散射点所在距离门的回波数据估

计其所对应的多普勒频率  $f_d$ ；

(4) 根据式 (2) 解算列车速度  $V_H$ 。

单部雷达测速需要首先测量得到精确的雷达高度  $H$ ，但是雷达天线相位中心通常不是天线的几何中心，这给单部雷达测速的工程应用实现带来了困难。

### 1.2 双雷达测速

图 2 示出两部雷达联合测速几何关系。假设存在安装高度位置不同的两部雷达（简称“低雷达”和“高雷达”），其高度分别为  $H_1$  和  $H_2$ 。利用 1.1 节所述单部雷达测速的方法，计算得到低雷达的斜距为  $R_1$ ，多普勒频率为  $f_{d1}$ ；高雷达的斜距为  $R_2$ ，多普勒频率为  $f_{d2}$ 。

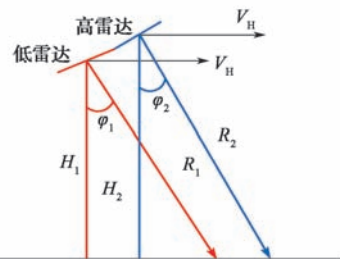


图 2 两部雷达联合测速几何关系

Fig. 2 Geometrical relationship of two-radar velocity measurement method

根据图 2 所示的几何关系，可以得到两个多普勒方程：

$$f_{d1} = \frac{2V_H}{\lambda} \sin \varphi_1 = \frac{2V_H}{\lambda} \frac{\sqrt{R_1^2 - H_1^2}}{R_1} \quad (3)$$

$$f_{d2} = \frac{2V_H}{\lambda} \sin \varphi_2 = \frac{2V_H}{\lambda} \frac{\sqrt{R_2^2 - H_2^2}}{R_2} \quad (4)$$

式中： $\varphi_1$ ——低雷达斜视角； $\varphi_2$ ——高雷达斜视角。

假设两部雷达高度差 ( $\Delta H = H_2 - H_1$ ) 已知，则式 (4) 可以表示为

$$f_{d2} = \frac{2V_H}{\lambda} \frac{\sqrt{R_2^2 - (H_1 + \Delta H)^2}}{R_2} \quad (5)$$

由于双雷达测量时速度相同，联立式 (3) 和式 (5)，可以得到

$$\frac{f_{d1}}{f_{d2}} = \frac{R_2}{R_1} \frac{\sqrt{R_1^2 - H_1^2}}{\sqrt{R_2^2 - (H_1 + \Delta H)^2}} \quad (6)$$

通过求解式 (6)，即可得到低雷达的高度  $H_1$ ，进而得到高雷达的高度  $H_2$ 。将解算得到的雷达绝对高度代入式 (3) 和式 (4) 即可解算列车速度。需要说明的是，利用双雷达联合估计雷达高度，在列车静止时，式 (6) 变为恒等式，无法解算雷达高度。此外，由于双雷达估计的斜距和多普勒频率均存在误差，导致单次解算雷达高度精度较低。在实际处理过程中，利用

多次解算结果进行平均处理,并通过固定间隔时间更新雷达高度,以此提高测算精度。

解算得到两部雷达的高度后,可以通过两种方法估计列车速度:如果两部雷达都没有损坏,则根据式(2)和式(3)分别估计列车速度,然后对获得的两个速度估计值进行加权平均得到列车估计速度;如果其中一部雷达损坏,则利用另一部雷达估计列车速度。

利用双雷达联合测速技术,不需要测量单部雷达的高度,仅需要测量两部雷达之间的高度差,工程可实现性更高。

## 2 雷达测速技术误差分析

根据第1节介绍的双雷达测速原理,其误差因素包括多普勒频率估计误差、雷达斜距估计误差、雷达高度误差和雷达垂直向速度误差4个方面。

本文的误差分析和工程试验采用同样的参数设置,具体如下:雷达工作在K波段、载频波长为1.25 cm,最大调频率带宽为500 MHz,对应的距离分辨率为0.3 m;  $H_1=0.894$  m,  $H_2=0.960$  m,  $\Delta H=0.066$  m,  $\varphi_1=60^\circ$ ,  $\varphi_2=70^\circ$ 。

根据式(2)可知,多普勒频率估计误差  $\Delta f_d$  与其产生的雷达测速误差  $\Delta V$  之间的关系为

$$\Delta V = \frac{\Delta f_d \lambda R}{2\sqrt{R^2 - H_H^2}} = \Delta f_d \frac{\lambda}{2\sin\varphi} \quad (7)$$

根据式(7)可知,当单部雷达斜视角不变时,雷达测速误差  $\Delta V$  与多普勒估计误差  $\Delta f_d$  成正比关系。两部雷达中,斜视角  $\varphi$  较小的雷达其测速精度受多普勒估计误差的影响更大。图3示出本文仿真参数下双雷达多普勒频率估计误差导致的雷达测速误差。可以看出,对于单部雷达而言,其测速误差与多普勒频率估计误差成正比关系,相同  $\Delta f_d$  对应的低雷达测速误差大于高雷达的;综合  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  参数设置可知,

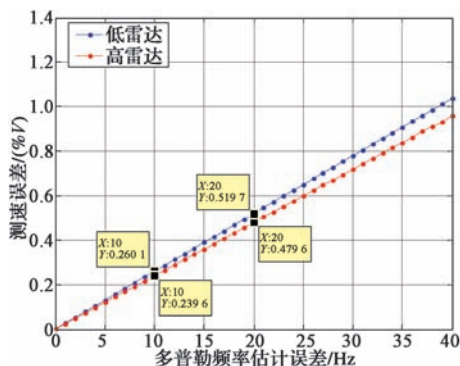


图3 多普勒频率估计误差导致的测速误差  
Fig. 3 Velocity measurement error caused by Doppler frequency estimation error

斜视角较小的低雷达测速精度受  $\Delta f_d$  的影响更大。

根据式(6),斜距误差会使计算得到的  $H$  产生误差。根据式(3),  $\Delta H$  和斜距误差  $\Delta R$  都会使测量速度产生误差。以下利用上述仿真参数分析斜距估计误差对雷达测速误差的影响。图4示出雷达的  $\Delta R$  导致的测速误差曲线,可以看出,  $\Delta V$  随着  $\Delta R$  的增大而增大,且低雷达测速精度受  $\Delta R$  的影响更大。

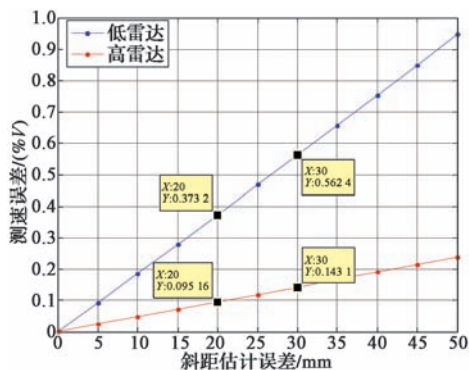


图4 斜距估计误差导致的测速误差  
Fig. 4 Velocity measurement error caused by slant distance estimation error

在数据处理过程中,固定间隔时间,利用双雷达解算雷达高度,得到的雷达高度用来计算并更新列车速度。在间隔时间内,其利用同一个高度解算列车速度。但是在列车运行过程中,雷达会存在抖动现象,使计算速度所用雷达高度产生误差。图5示出雷达高度误差导致的测速误差。可以看出,测量速度误差随雷达高度误差的增加而增加,且低雷达的测速精度受高度误差的影响更大。

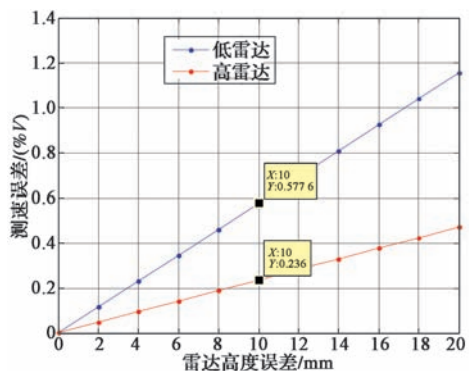


图5 高度误差导致的测速误差  
Fig. 5 Velocity measurement error caused by height estimation error

式(3)和式(4)是基于雷达运动速度方向与轨面平行工况,然而在列车实际运行过程中,列车颠簸会使雷达产生垂直方向速度。如图6所示,假设列车颠簸引起的垂直方向速度为  $V_v$ ,列车沿水平方向的速度为  $V_H$ ,二者合成的速度为  $V$ 。由于从雷达回波数据估计的多普勒频率为合成速度  $V$  引起的多普勒频率,使雷

达最终测得的速度为  $V$ ，与速度  $V_H$  间存在一定的误差。

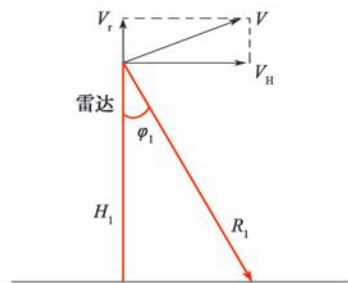


图 6 列车垂直向速度对测速精度的影响示意  
Fig. 6 Diagram of influence of vertical train speed on velocity measurement accuracy

综上分析可知，雷达垂直方向速度同样会导致测速误差，两者的关系如图 7 所示。可以看出，雷达垂直方向速度越大，测量速度误差越大，且低雷达测速精度受垂直方向速度影响更大。

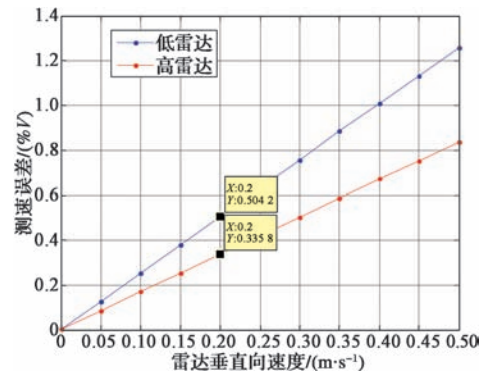


图 7 雷达垂直方向速度导致的测速误差  
Fig. 7 Velocity measurement error caused by radar vertical speed

3 工程试验结果

由于目前成熟的高精度轨道交通车辆测速设备主要采用轴端测速和激光雷达测速两种方式，其中，激光测速产品以其高精度测速特征已在国外高速铁路上有大规模应用，因此本文采用激光测速设备哈斯勒作为对标设备进行功能和测速精度的初步验证。哈斯勒是目前市场上主流列车测速产品中测速精度最高的测速设备，其在列车速度小于 100 km/h 时测速精度达 0.2 km/h，列车速度大于 100 km/h 时测速精度小于列车速度的 0.2%。但该产品由于国外技术垄断，市场价格较高。

基于双雷达测速技术制造的测速雷达样机被安装在上海申通地铁张江试验线试验车上，并分别针对列车最高速度 60 km/h 和最高速度 80 km/h、加速段和减速段、60 km/h 惰行段和 80 km/h 惰行段等几种工况展开了多批次测试。在测速列车上同时还装备了高精度激光测速设备哈斯勒（两设备性能指标

对比如表 1 所示）。将双雷达测速结果与高精度激光测速结果进行对比，以验证双雷达测速技术的测速精度和稳定性，其中采集数据点的间隔时间为 40 ms。

表 1 试验设备性能指标对比  
Tab. 1 Comparison of performance indexes of experimental equipment

| 参数          | 数值     |        |
|-------------|--------|--------|
|             | 双雷达系统  | 哈斯勒    |
| 频段          | 24 GHz | 激光     |
| 工作温度范围 / °C | -40~85 | -40~70 |
| 功耗 / W      | 7      | 35     |

图 8 示出列车从静止状态开始启动、到基本维持匀速运动、最高速度达 60 km/h、再到制动至停车的过程中，雷达测速结果与激光测速结果的对比。可以看出，雷达测速曲线与激光测速曲线基本吻合。

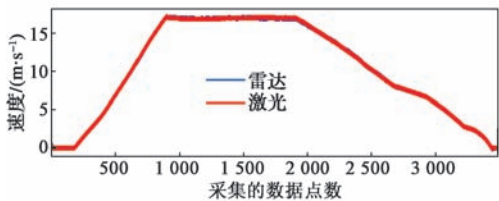


图 8 最大速度 60 km/h 雷达与激光测量结果对比  
Fig. 8 Comparison between radar and laser velocity measurement results at the maximum speed of 60 km/h

图 9 示出列车从静止状态加速到最大速度为 80 km/h、再到制动至停车过程中，雷达测速结果与激光测速结果对比。可以看出，该过程中雷达测速结果与激光测速结果也基本一致。

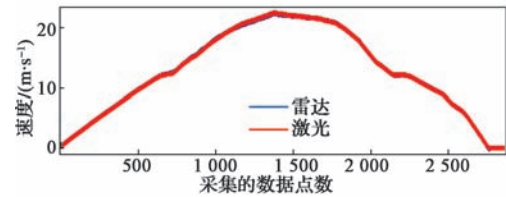


图 9 最大速度 80 km/h 时，雷达与激光测量结果对比  
Fig. 9 Comparison between radar and laser velocity measurement results at the maximum speed of 80 km/h

图 10 示出列车在加速运行阶段雷达测速结果与激光测速结果对比。可以看出，该阶段雷达测速结果与激光测速结果基本吻合，且雷达测速数据波动更小。

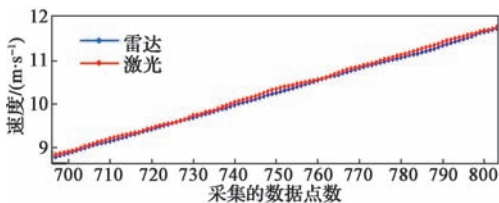


图 10 加速段测量结果对比  
Fig. 10 Comparison of velocity measurements in the acceleration section

图 11 示出列车在减速运行阶段, 雷达测速结果与激光测速结果对比。可以看出, 该阶段雷达测量结果与激光测量结果基本吻合, 且雷达测速数据波动更小。

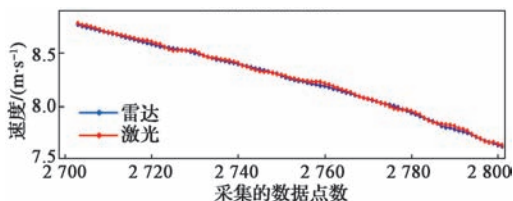


图 11 减速段测量结果对比

Fig. 11 Comparison of velocity measurement results in the deceleration section

图 12 和图 13 分别示出列车在 60 km/h 及 80 km/h 惰行阶段雷达测速结果与激光测速结果。可以看出, 在惰行阶段, 二者基本吻合, 且雷达测速数据的波动明显小于激光测速数据的。

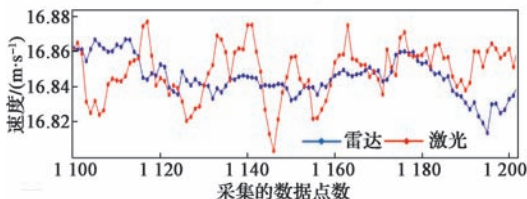


图 12 60 km/h 惰行段测量结果对比

Fig. 12 Comparison of velocity measurement results in 60 km/h idle section

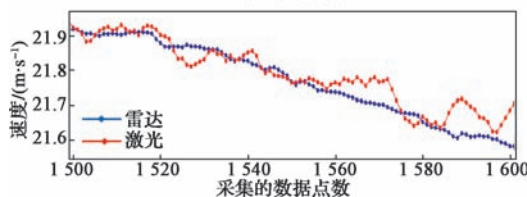


图 13 80 km/h 惰行段测量结果对比

Fig. 13 Comparison of velocity measurement results in 80 km/h idle section

综上分析可知, 双雷达系统测速精度与高精度激光测速精度相当, 且测速稳定。此前列车高精度激光测速产品均需从国外进口, 且价格较高。通过对比测试可以看出, 本文所提双雷达测速系统其功能和测速精度指标与进口激光测速产品的相当, 且成本不到激光测速产品的一半。

## 4 结语

本文提出一种双雷达测速的计算方法, 工程测试结果验证了该方法的有效性。所提双雷达测速技术具备工程化应用基础条件, 不仅可靠性高, 即使一部雷达发生故障, 另一部也可以单独完成测速工作; 而且还具有精度高的优势, 在某些测试工况下测速精度甚至高于激光测速的。后续将通过设计试验、型式

试验等多种方式来进一步优化其精度、性能指标及工程化应用技术。

## 参考文献:

- [1] 赵仲郎. 交通测速雷达系统设计与实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [2] 孙朝云, 阳红, 高怀刚. 交通雷达测速仪误差分析与改进 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 418-420.  
SUN Z Y, YANG H, GAO H G. The Error Analysis and Improving Method of Traffic Radar Speed Gun[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4): 418-420.
- [3] 刘越, 宁滨. 列车测速测距方式的探讨 [J]. 铁道通信信号, 1997(12): 1-3.  
LIU Y, NING B. Study on the Way of Distance and Speed Measurement for Train[J]. Railway Signalling & Communication, 1997(12): 1-3.
- [4] 张洋, 周达天, 刘宏杰, 等. 基于多传感器融合的列车测速定位方法 [J]. 都市轨道交通, 2011, 24(4): 30-32.  
ZHANG Y, ZHOU D T, LIU H J, et al. Research on Multi-sensor Information Fusion Based CBTC Train Speed and Position Measurement[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(4): 30-32.
- [5] 牛道恒, 刘岭, 崔俊锋, 等. 高速列车测速测距系统滤波模型与融合策略研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2011, 8(4): 8-10, 17.  
NIU D H, LIU L, CUI J F, et al. Research on Filtering Modeling and Fusion Strategy of Speed & Distance Measurement System for High-Speed Trains[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2011, 8(4): 8-10, 17.
- [6] 张成博, 张飘. 倒车雷达测距算法的研究 [J]. 工业技术创新, 2014(3): 296-301.  
ZHANG C B, ZHANG P. Research on Ranging Algorithm of Reverse Sensors[J]. Industrial Technology Innovation, 2014(3): 296-301.
- [7] 李颖宏, 马龙. 一种新型双激光测速系统的设计与应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2): 256-264.  
LI Y H, MA L. Design and application of a new dual laser velocimeter system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(2): 256-264.
- [8] 张小梅. 车载激光雷达测距方法及精度分析 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [9] 朱燕, 刘逸通. Burg 算法在雷达测速中的应用 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(4): 649-652.  
ZHU Y, LIU Y T. Application of Burg algorithm in radar speed measurement[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(4): 649-652.
- [10] 陈红江, 张浩, 汤灏, 等. 双天线雷达测速仪的研发 [J]. 中国计量, 2017, 43(6): 75-78.  
CHEN H J, ZHANG H, TANG H, et al. Development of dual antenna radar velocimeter[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(6): 75-78.
- [11] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [12] 刘永坦. 雷达成像技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
- [13] 吴卫玲, 宋喜报. 多普勒测速雷达测速误差分析 [J]. 计量与测试科学, 2000(1): 31-32.  
WU W L, SONG X B. Error Analysis of Speed Measurement by Doppler Radar[J]. Metrology and Measurement Technique, 2000(1): 31-32.