

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416344

杂波背景下多普勒测速雷达信号处理算法研究*

彭泽曹¹ 郭洪民¹ 胡伟东² 蒋环宇² 刘庆国²

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所 北京 100081; 2. 北京理工大学集成电路与电子学院 北京 100081)

摘要: 多普勒测速雷达具有测速范围广、测速精度高及可靠性强的优点,广泛应用于我国轮轨及磁浮交通领域。多普勒测速雷达在测速过程中需要考虑杂波对多普勒信号的干扰,因此在轨道地杂波背景下研究信号处理方法对提高测速精度、保障行车安全具有重要意义。首先对 Kernel 分布、Weibull 分布及 Gamma 分布这 3 种典型的概率统计模型进行了理论分析,基于 77 GHz+24 GHz 双频车载测速雷达进行了杂波测量实验,采集了实际轨道地面杂波数据,并对实测数据进行了拟合分析,结果表明,该车载测速雷达的轨道地杂波数据统计特性服从 Kernel 分布。在杂波背景下,首先利用最小均方自适应滤波方法对实测信号进行去噪处理,并使用改进 Burg 算法进行频谱估计实现了高精度速度测量,实验验证了算法能够有效抑制杂波提高信噪比,在低速状态下测速误差小于 0.5 km/h,当速度大于 50 km/h 时,测速误差小于 0.5%。

关键词: Kernel 分布;杂波特性;LMS 自适应滤波;改进 Burg 算法;多普勒雷达

中图分类号: TN957.52;TN953 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Research on signal processing algorithm of Doppler speed
measurement radar under clutter backgroundPeng Zezhou¹ Gao Hongmin¹ Hu Weidong² Jiang Huanyu² Liu Qingguo²

(1. Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China;

2. School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Doppler speed measurement radar has the advantages of wide range of speed measurement, high speed measurement accuracy and strong reliability, and is widely used in the field of wheel-rail and maglev transportation in China. It is necessary to consider the interference of clutter to Doppler signal in the process of speed measurement radar, so it is important to study the signal processing method under the background of track ground clutter to improve the accuracy of speed measurement and ensure the safety of driving. In this paper, three typical probabilistic and statistical models, namely Kernel distribution, Weibull distribution and Gamma distribution, are theoretically analyzed, clutter measurement experiments are carried out using 77 GHz+24 GHz dual-band vehicle-mounted velocity radar. The results show that the statistical characteristics of the track ground clutter data of the vehicle-mounted speed measurement radar developed in this paper follow the Kernel distribution. In the background of clutter, firstly, the least mean square adaptive filtering method is used to de-noise the measured signal, and the improved Burg algorithm is used to estimate the spectrum to achieve high-precision velocity measurement. Experiments have verified that the proposed algorithm can effectively suppress clutter and improve the signal-to-noise ratio, and the final velocity measurement error is less than 0.5 km/h at low speed and less than 0.5% when the speed is greater than 50 km/h.

Keywords: Kernel distribution; noise wave peculiarity; LMS adaptive filtering; improved Burg algorithm; Doppler radar

0 引言

多普勒测速雷达是一种非接触式测量的速度传感器。

列车车载多普勒雷达基于多普勒效应进行速度测量,具有测速范围广、测速精度高及可靠性强的优点。并且相较于其他传感器,多普勒雷达对车辆制式不敏感,具有更好的适

收稿日期:2024-07-01

* 基金项目:中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2020YJ043)、中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2023YJ116)、国家重点研发计划(2023YFB4302501)项目资助

用性,在我国轮轨及磁浮等轨道交通领域得到广泛应用^[1-3]。

多普勒雷达在目标探测过程中,不可避免会受到各种杂波的干扰,杂波特性的研究对雷达信号处理具有重要意义,杂波幅度的分布统计模型是杂波特性研究的重要内容之一。孔令雄等^[4]对实际测量的人行道杂波进行分布拟合,结果表明 Weibull 分布对该太赫兹雷达系统的拟合度最优。任红霞^[5]针对海杂波的幅度分布特性进行分析,拟合分析结果表明,海杂波数据具有较长的拖尾,实际数据 K 分布拟合效果最好。袁野^[6]完成了 77 GHz 车载多普勒雷达背景杂波特性分析及建模研究,通过仿真表明结合 Weibull 分布的杂波仿真效果最好。目前对雷达杂波特性的研究主要集中在气象杂波、地杂波及海杂波等方面,对于毫米波雷达的铁路轨道杂波特性还缺乏相关理论研究和实验分析。

我国的铁路网络横跨多个不同的省市与地区,地形环境、气候条件等相当复杂,车载测速雷达在测速过程中需要考虑杂波对多普勒信号的干扰,因此在轨道地杂波背景下研究信号处理方法对提高测速精度、保障行车安全具有重要意义。黄颖^[7]利用低通滤波器抑制杂波干扰实现滤波处理。刘让雷^[8]采用小波阈值降噪方法对激光多普勒测速信号进行处理,结果表明此方法具有较好的处理效果。高猛^[9]利用卡尔曼滤波方法对机载多普勒测速雷达测速结果进行修正,滤除外部干扰导致的测量速度野值点。已知多普勒频率与列车速度成正比,以上方法滤波器的设计并没有考虑到杂波的不确定性,并且滤波器参数并不能适应列车速度的变化,即以上滤波方法均不能实现自适应最优滤波。

本文对几种广泛应用的统计模型进行了分析,并利用实测数据对本文研制的毫米波多普勒雷达轨道杂波统计特性进行了评估及检验。为了实现在轨道杂波背景下的高精度速度测量,利用最小均方(least mean square, LMS)自适应滤波算法对实测数据进行去噪处理,并采用改进 Burg 算法进行频谱估计。实验证明了该方法能有效提高信噪比抑制轨道杂波,降低速度测量误差。

1 多普勒雷达杂波概率统计模型

1.1 车载多普勒测速雷达设计

如图 1 所示,车载多普勒测速雷达安装于列车底部,雷达天线以一定的角度指向轨道面,列车与轨道的相对运行产生多普勒效应,其利用多普勒信号进行列车速度测量^[10]。图 1 中角度 θ 为俯仰角,列车运行速度为 V ,信号源与轨道面的相对速度 $V_r = V \cdot \cos\theta$,根据式(1)可以看出多普勒频率 f_d 与列车速度 V 成正比。

$$V = \frac{c}{2} \frac{f_d}{f_0 \cos\theta} \quad (1)$$

式中: c 为光速, f_0 为发射波频率。

本文使用的多普勒雷达结构如图 2 所示,该雷达采用

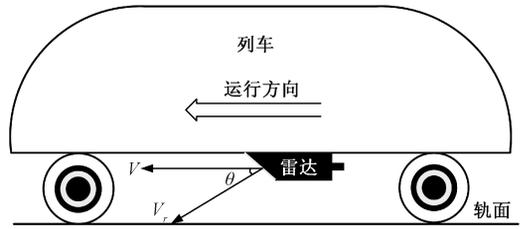


图 1 列车多普勒测速原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Doppler radar speed measurement

了基于 77 GHz+24 GHz 双频双系并行冗余架构的设计方案。多普勒雷达由高低双频测速子系统组成,子系统的工作原理及信号处理流程是一致的。子系统主要由微波模块及信号处理模块两部分组成,其工作原理为利用锁相环(phase locked loop, PLL)进行信号源合成,经过倍频后由定向发射天线向轨道面发射所需频率的连续波信号,定向接收天线接收轨道面的回波信号,然后通过零中频接收机电路得到差频信号,最后由信号处理模块进行 A/D 采样及数字信号处理。

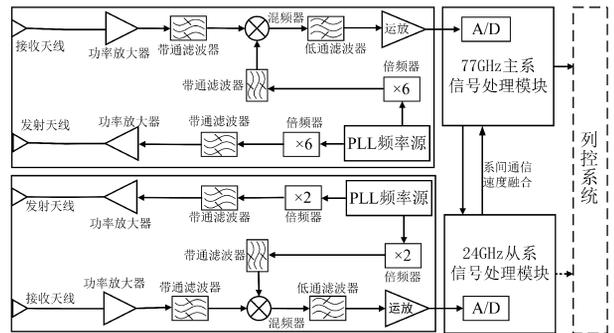


图 2 多普勒测速雷达结构图

Fig. 2 Structure diagram of Doppler speed radar

现有的列车多普勒测速雷达均为单频单系的设计方案,本文采用 24 GHz 与 77 GHz 高低双频冗余的结构,既可以有效避免同频段的相互干扰,同时通过冗余能够提高系统测速稳定性和精度。77 GHz 及 24 GHz 频段子系统的信号处理流程是一致的,并且差频信号的处理效果均比较好,因此本文主要以 77 GHz 相关内容为例进行讨论和测试分析。

1.2 杂波概率统计模型

雷达波束照射范围内存在无限多的散射单元,各散射单元的回波信号幅度、相位都具有随机性,并且几乎同时到达雷达接收天线,故雷达回波信号包含大量杂波。由于杂波分布的不确定性,通常使用概率密度函数对杂波进行建模,并根据假设检验方法进行最优拟合度计算分析,确定对杂波数据拟合最优的概率统计模型。本文主要采用以下几种概率统计模型:

1) Kernel 分布

核密度估计(kernel density estimation)是一种非参数

概率估计方法。

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (2)$$

式中： K 为核函数， h 为窗函数， n 为样本容量， x 为随机变量， x_i 为独立同分布的样本点。

研究结果证明，基于不同核函数的估计结果区别很小，高斯核的数学性能优异且应用广泛^[11]，本文选取高斯核为核函数，对应的核密度估计函数如式(3)所示。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}nh} \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2}{h^2}\right) \quad (3)$$

2) Weibull 分布

$$f(x) = \left(\frac{p}{q}\right) \left(\frac{x}{q}\right)^{p-1} e^{-\left(\frac{x}{q}\right)^p}, x \geq 0 \quad (4)$$

式中： p 为形状参数， q 为尺度参数。

Weibull 分布在可靠性研究及寿命数据分析领域得到了广泛应用。

3) Gamma 分布

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp(-\beta x), x > 0 \quad (5)$$

式中： α 、 β 分别为形状参数和速率参数。

Gamma 分布能够描述高分辨率条件下不均匀地物杂波。

2 轨道杂波测量与数据分析

为了进一步分析本文设计雷达的毫米波杂波特性，搭建如下实验环境对毫米波雷达的轨道地杂波实测数据进行测量采集和数据分析。

2.1 轨道杂波采集

根据车载测速雷达的安装及使用要求，设置如图 3~5 所示实验环境。实验中，雷达波束照射地面为 1 435 mm 的标准轨距轨道面，其中轨道环境包括砟轨道及多种无砟轨道。雷达具体安装要求如图 3 所示，雷达天线俯仰角为 45°，雷达安装高度 $h=0.5\sim 1$ m，雷达相对轨道中心的水平位置 $x=0\sim 1\ 020$ mm。

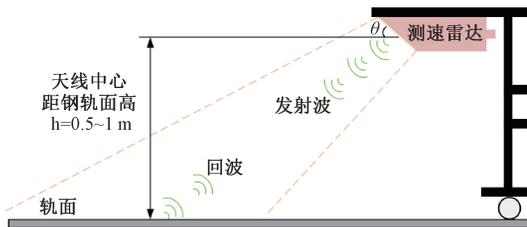


图 3 轨道杂波测量原理图 1

Fig. 3 Orbital clutter measurement schematic diagram 1

调整雷达安装高度及水平位置，在雷达不同的安装条件下，在有砟轨道及无砟轨道环境进行 24 GHz 及 77 GHz 频段毫米波的杂波数据进行采集。

如图 6 所示为 77 GHz 频段所测量的某组有砟轨道杂

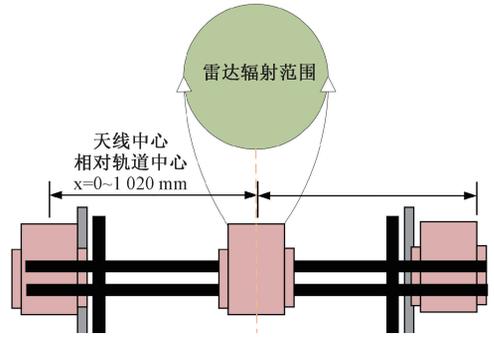


图 4 轨道杂波测量原理图 2

Fig. 4 Orbital clutter measurement schematic diagram 2

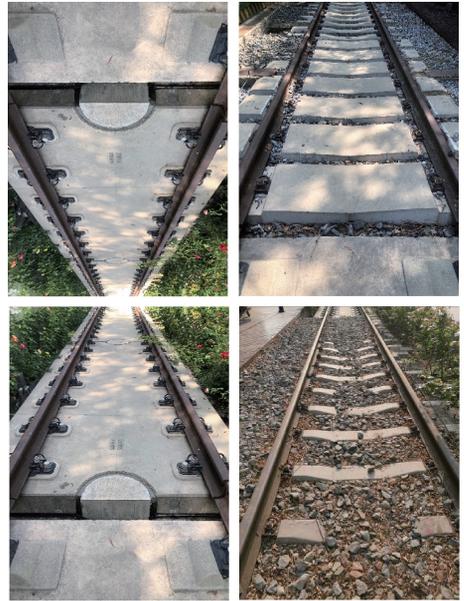


图 5 轨道示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the track

波数据，图 6(a)为杂波时域图，图 6(b)为杂波频谱图，可以看出频率在 500 Hz 以下的低频杂波成分较为明显。

2.2 杂波概率密度拟合及检验

利用概率统计模型对实测杂波数据进行拟合分析，并对各模型拟合结果进行卡方拟合优度检验，根据检验结果确定杂波的分布类型。

首先利用 Kernel 分布、Weibull 分布及 Gamma 分布拟合杂波的概率密度函数，其中 77 GHz 频段所测量的某组有砟轨道杂波数据拟合结果如图 7 所示，从拟合曲线可以看出 Kernel 分布及 Gamma 分布的拟合效果均比较好，两者拟合效果明显优于 Weibull 分布。

为进一步分析轨道杂波特性，本文利用卡方检验对模型的拟合优度进行定量分析。卡方检验是一种应用非常广泛的假设检验方法，其原理为统计样本的实际观测值与理论推断值之间的偏离程度，两者的偏离程度与卡方值 χ^2 的大小成反比，检验统计量 χ^2 的计算式如下：

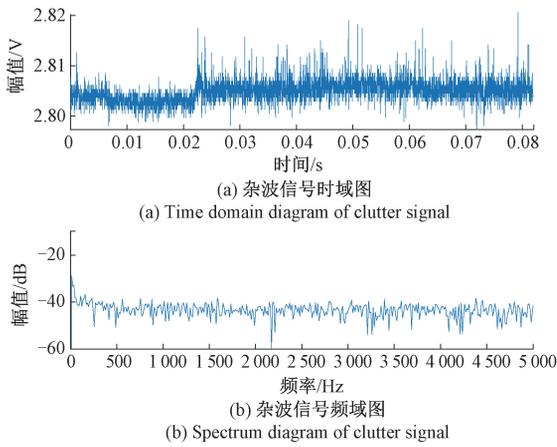


图 6 杂波信号时域及频域图

Fig. 6 Diagram of the time domain and frequency domain of the clutter signal

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i - F_i)^2}{F_i} \quad (6)$$

式中: n 为观测的样本量, f_i 为第 i 个样本在本次观测中出现的频数, F_i 为理论分布模型中第 i 个样本出现的概率。

本文使用上述的分布模型对实测数据进行拟合, 并使用卡方检验法对几种分布的拟合程度进行了分析和验证。

表 1 77 GHz 有砟轨道杂波分布模型拟合卡方检验结果

Table 1 Chi-square test results of fitting clutter distribution model of ballasted orbit at 77 GHz

实验次数	Kernel 分布			Weibull 分布			Gamma 分布			最优结果
	q	p	χ^2	q	p	χ^2	q	p	χ^2	
1	0	0.306	7.273	1	0	1 672.1	1	8.1×10^{-13}	55.683	Kernel
2	1	0.023	14.696	1	0	2 061.1	1	5.8×10^{-23}	102.418	Kernel
3	0	0.721	5.338	1	0	1 626.9	1	8.9×10^{-18}	82.515	Kernel
4	1	0.010	13.372	1	0	3 463.4	1	7.5×10^{-14}	55.937	Kernel
5	0	0.073	12.947	1	0	1 571.3	1	1.4×10^{-20}	95.625	Kernel

在有砟轨道及无砟轨道环境下分别进行杂波分布模型拟合及卡方检验。调节雷达安装位置, 使雷达安装高度 $h = 0.5 \sim 1$ m, 当水平位置 $x = 0$, 即雷达波束中心与轨道中轴线重合时, 检验结果表明, Kernel 分布对 77 GHz 及 24 GHz 频段的轨道杂波统计特性拟合度最优; 在雷达水平位置 $x = 752.5$ mm 时, 即雷达波束中心与钢轨中心重合时, Kernel 分布对 77 GHz 及 24 GHz 频段的轨道杂波统计特性拟合度最优。综上所述, 在有砟轨道或无砟轨道环境下可以认为本文研制的雷达轨道杂波统计特性服从 Kernel 分布。

3 杂波背景下多普勒信号处理算法

在分析了 77 GHz 及 24 GHz 频段的轨道杂波统计特性后, 本文根据实测数据提出了一种基于 LMS 自适应滤波的信号处理算法, 利用 LMS 滤波方法抑制杂波, 并通过

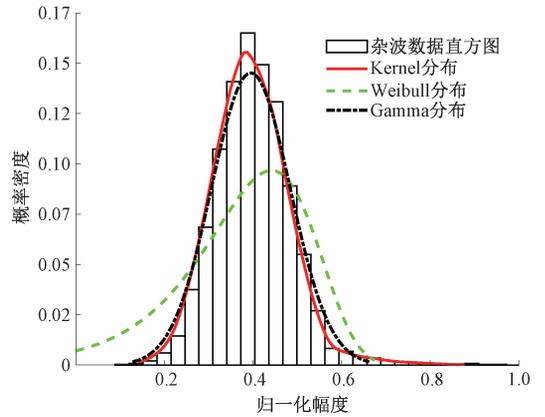


图 7 有砟轨道实测杂波数据拟合结果

Fig. 7 Fitting results of measured clutter data from ballasted tracks

77 GHz 有砟轨道杂波的分布模型拟合检验结果如表 1 所示, 其中参数 q, p 表征检验样本是否服从指定的分布, 即当 $q = 0$, 且在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下 $p > \alpha$ 时, 可以认定检验样本服从该分布, 否则不服从该分布^[12-13]。根据 5 次检验结果可以看出, 其中 Kernel 分布的卡方值最小, 并且在第 1、3、5 次的实验数据满足 $q = 0$ 且显著水平 $\alpha = 0.05$ 条件下, 其中参数 $p > \alpha$, 故说明本文雷达 77 GHz 频段的有砟轨道杂波拟合服从 Kernel 分布。

改进 Burg 算法进行多普勒频率估计, 其中信号处理流程如图 8 所示。

首先, 利用相量均值相消算法对差频信号进行静态杂波滤波, 即消除信号直流分量。通过 LMS 自适应滤波算法对差频信号进行自适应滤波, 采用改进 Burg 算法对滤波后的信号进行频谱分析, 完成谱峰搜索及速度计算。将计算得到的多普勒信号作为期望信号 $d(n)$ 输出作为 $n + 1$ 次 LMS 滤波的期望信号。

3.1 LMS 自适应滤波算法仿真研究

列车在运行过程中多普勒信号及杂波是不确定的, 多普勒信号及杂波的先验统计特性是不确定的, 目前传统的滤波方法并不能根据列车速度变化调节滤波器参数, 无法实现自适应最优滤波。相较于维纳滤波、卡尔曼滤波等线性滤波, 最小均方自适应滤波具有更强的适用性和更优的滤波性能, 具有计算量小、适用于实时信号处理的优点; 并

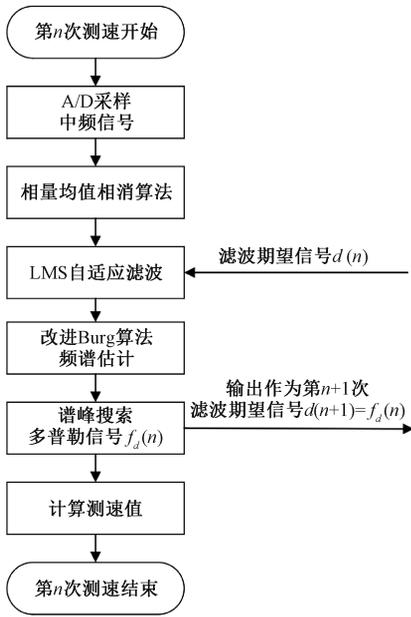


图 8 信号处理流程图

Fig. 8 Signal processing flow diagram

且卡尔曼滤波、维纳滤波等滤波方法都是建立在已知信号统计特性的条件下,而自适应滤波器不需要已知噪声及干扰的统计特性,其能够自动调节滤波器参数^[14],从而适应列车速度变化及环境干扰实现最优滤波,因此本文选择采用 LMS 自适应滤波算法对多普勒信号进行降噪滤波处理。

LMS 滤波器的基本原理为通过迭代算法使得误差 $e(n)$ 的均方值最小从而自动调节滤波参数,从而使得滤波器适应随机信号的时变统计特性^[15-16]。LMS 自适应滤波算法的原理如图 9 所示,滤波器的输入输出信号分别为 $x(n)$ 、 $y(n)$,其中 $v(n)$ 为噪声信号, $d(n)$ 为期望信号,误差信号 $e(n) = d(n) - y(n)$ 。LMS 算法迭代流程如下^[17]:

$$\begin{cases} y(n) = \mathbf{w}^T(n)x(n) \\ e(n) = d(n) - y(n) \\ \mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu e(n)x(n) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{w}(n)$ 为权系数向量, μ 为权系数更新步长参数。

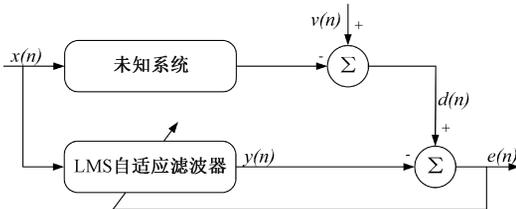


图 9 LMS 自适应滤波算法原理

Fig. 9 The principle of LMS adaptive filtering algorithm

给定输入仿真信号,信号频率为 20,采样点数为 1 000,采样频率为 100 Hz,

$$x(t) = 2\sin(2\pi \cdot 20 \cdot t + \pi/4) + 0.5\text{randn}(\text{size}(t)) \quad (8)$$

如图 10 所示,LMS 自适应滤波算法能快速收敛调整为最优滤波参数,滤波后的信号曲线较为光滑,噪声滤除效果较好。如表 2 所示,利用巴特沃斯低通滤波、FIR 低通滤波、维纳及 LMS 滤波分别对输入信号进行滤波处理,其中原始信号信噪比 SNR=8.40 dB,可以看出 LMS 滤波效果明显优于其他算法,能有效提高信噪比。

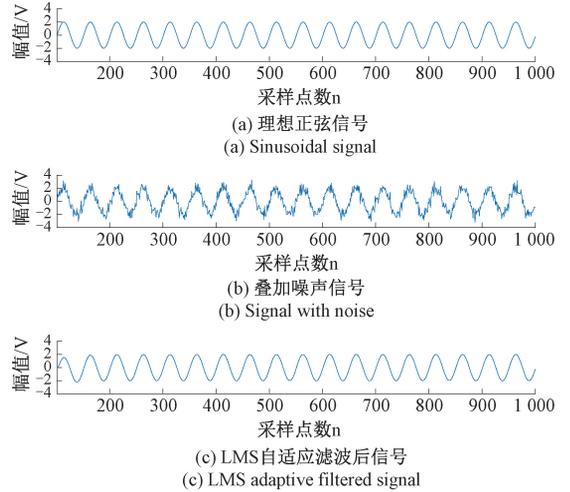


图 10 LMS 自适应滤波仿真结果

Fig. 10 LMS adaptive filtering simulation results

表 2 滤波效果仿真对比

Table 2 Simulation comparison of filtering effects

滤波器类型	巴特沃斯低通滤波	FIR 低通滤波	维纳滤波	LMS 滤波
SNR/dB	19.50	22.54	20.21	39.00

3.2 改进 Burg 算法仿真研究

为实现高精度速度测量,本文选用改进 Burg 算法对差频信号进行频谱分析。相较于快速傅里叶变换等经典谱估计算法及其他现代谱估计算法,改进的 Burg 算法具有运算较简单、频谱分辨率高、谱估计性能较好的优点。

Burg 算法基于前后向预测的总均方误差和最小原理,从给定的观测数据来估计出模型的反射系数,并通过 Levinson 递推关系如式(9)所示,计算出 m 阶次 AR 模型 (autoregressive model) 参数^[7]。AR 模型高阶参数由低阶参数迭代得到,因此模型参数在推导过程存在一定的估计误差,进而导致频谱估计误差。改进的 Burg 算法,通过式(10)、(11)直接求解得到二阶模型参数 $a_2(1)$ 和 $a_2(2)$,并由二阶参数直接推导高阶参数避免了参数的估计误差,该改进算法在不增加计算量的情况下极大提高了谱估计精度^[18]。

$$\begin{cases} a_m(i) = a_{m-1}(i) + k_m a_{m-1}(m-i) \\ a_m(m) = k_m \\ \rho(m) = \rho(m-1)[1 - |k_m|^2] \end{cases} \quad (9)$$

式中: a_m 为 AR 模型的 m 阶参数, k_m 为反射系数, $\rho(m)$ 为

预测误差功率。

$$\begin{cases} a_2(1) = -\frac{\alpha(\beta - \delta)}{\eta\beta - \alpha^2} \\ a_2(2) = -\frac{\eta\delta - \alpha^2}{\eta\beta - \alpha^2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \alpha = \sum_{n=3}^N x(n-1)[x(n) + x(n-2)] \\ \beta = \sum_{n=3}^N x(n)^2 + x(n-2)^2 \\ \eta = \sum_{n=3}^N 2x(n-1)^2 \\ \delta = \sum_{n=3}^N 2x(n)x(n-2) \end{cases} \quad (11)$$

给定输入信号 $x(t)$:

$$x(t) = \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t + \pi/4) \quad (12)$$

信号频率为 50 Hz,初始相位为 $\pi/4$,采样点数为 55,此时的数据长度和初始相位为频谱估计误差最大的情况^[18]。采样频率为 1 kHz,AR 模型阶数 $m=3$,对 Burg 及改进算法进行功率谱估计对比,仿真结果如图 11 所示,可以看出 Burg 算法的频谱估计误差为 2.9 Hz,改进 Burg 算法谱估计误差值仅为 0.04 Hz,改进 Burg 算法的频谱估计精度明显优于原算法。

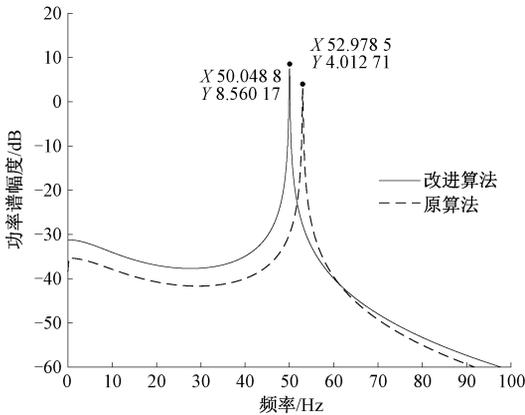


图 11 改进 Burg 算法仿真结果

Fig. 11 The simulation results of improved Burg algorithm

对目前常用的几种的谱估计算法进行仿真对比。仿真信号为两种不同频率分量组成的复合信号,如式(13)所示。

$$x(t) = 5\cos(2\pi \cdot 300t) + 3\cos(2\pi \cdot 310t) + 0.3\text{randn}(\text{size}(t)) \quad (13)$$

图 12 所示为 FFT 法、Welch 法、改进的 Burg 法及改进的协方差法的仿真结果,4 种方法均能分辨出两个主要的频率分量,现代谱估计方法的频谱估计效果要明显好于经典谱估计方法,改进的 Burg 法及改进协方差的曲线较为平滑,方差小,且两者的主瓣较小,分辨率较高,不过改

进的协方差法存在计算复杂运算量大的缺点,因此本文选用改进的 Burg 算法进行多普勒信号频谱估计,能够满足列车测速的实时性及高精度要求。

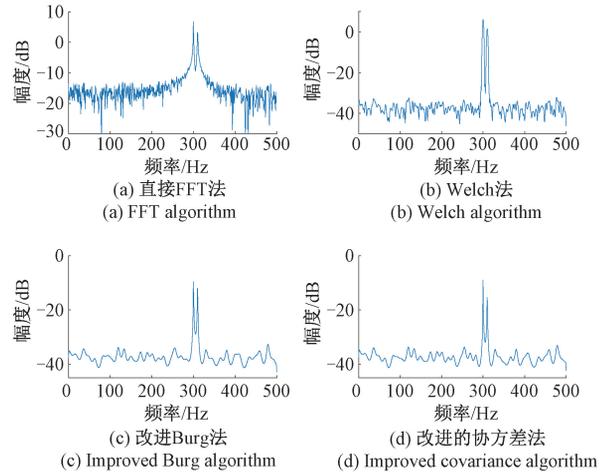


图 12 频谱分析算法对比仿真结果

Fig. 12 Spectrum analysis algorithms compare simulation results

4 测试验证

在列车实际运行工况的轨道杂波背景下,本小节以 77 GHz 频段实测信号为例,进行 LMS 自适应滤波去噪效果检验及速度测量测试。

根据本文的上述分析,设置 77 GHz 测速子系统的采样频率 $f_s=50$ kHz,采样点数 $n=4\ 096$,改进 Burg 法阶数 $m=20$ 。滤波器阶数和步长参数是影响 LMS 滤波算法收敛速度的主要因素。当滤波器阶数增加时,滤波误差逐渐减小,但收敛时间增大,同时滤波器的输出信号中,保留的输入信号数据量也随之减少。滤波器步长减小则收敛速度变慢但稳态精度高;当步长增大则收敛速度增快但稳态精度略降。因此,综合考虑滤波误差及滤波器收敛速度这两个因素,选择 LMS 滤波器阶数 $j=500$ 、滤波器步长 $u=1 \times 10^{-5}$,通过仿真测试结果表明,相较于未滤波情况下,基于 LMS 自适应滤波的信号处理算法所需的信号处理时间相对增加了 30%。

4.1 基于 LMS 自适应滤波的信号处理算法

在列车运行速度为 80 km/h 时,在轨道杂波背景中进行测速实验以及基于 LMS 自适应滤波的信号处理算法去噪效果验证。图 13 展示了未经滤波处理的差频信号与其经过 LMS 自适应滤波算法去噪后的时域对比图。从图中可以清晰观察到,在原始的差频信号中,轨道环境引入的低频杂波干扰较为明显。因为 LMS 滤波器阶数为 500,因此输出信号的前 500 个数据点呈现出零幅值状态。LMS 自适应滤波算法有效抑制了低频噪声的干扰,从而提升了信号质量,为后续的功率谱估计提供了良好的基础。

图 14 为多种滤波方法输出信号的频谱图,表 3 为多种

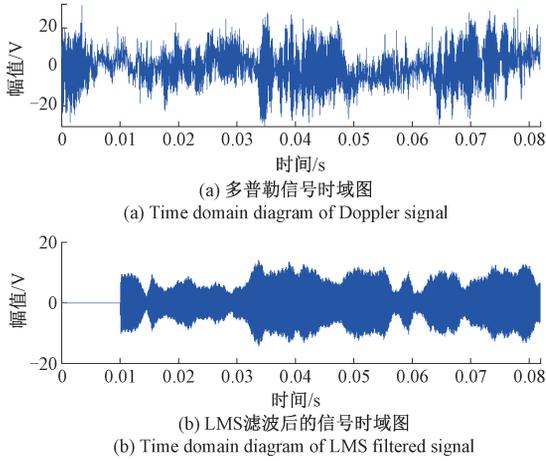


图 13 实测信号时域分析图

Fig. 13 Time-domain analysis of the measured signal

滤波算法滤波效果对比,从图 14 中可以看出,相较于其他滤波方法,维纳滤波及 LMS 滤波能够有效抑制低频干扰,并且两种滤波方法输出信号的功率谱功率谱密度曲线相对较为平滑,方差性能好,谱峰较窄频率分辨率高。根据表 3 可知,相对其他方法,对实测信号进行维纳滤波及 LMS 滤波后的测速结果最为精确。未滤波信号的信噪比为 $SNR_0 = -7.05$ dB,而维纳滤波及 LMS 滤波输出信号的信噪比分别为 -0.61 dB、 16.17 dB,基于 LMS 自适应滤波的信号处理算法滤波效果明显优于其他算法,能有效提高信噪比,测速精度较高。

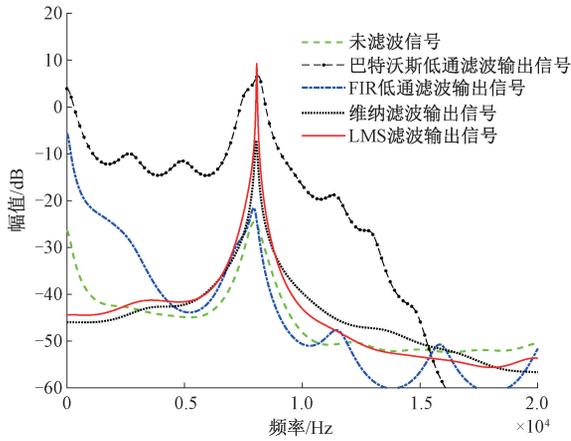


图 14 实测信号频谱分析图

Fig. 14 Spectrum analysis of the measured signal

4.2 现场测速结果分析

对本文测速方法开展现场测速实验,将测速雷达安装于试验列车底部,安装高度为 0.6 m,雷达波束中心与轨道中轴线重合,列车运行过程中选取以下测速数据如表 4 所示。当列车以低速 5 km/h 运行时,本文方法测速值为 5.02 km/h,当列车运行速度为 10 km/h 时,本文方法测速值为 10.23 km/h。根据测速结果可知,当速度小于 50 km/h 时,测速误差小于 0.5 km/h,当速度大于 50 km/h

表 3 多种滤波算法滤波效果对比

Table 3 Comparison of the filtering effects of various filtering algorithms

滤波算法	峰值频率/ Hz	测速值/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	SNR/ dB
未滤波信号	7 952.88	78.88	-7.05
巴特沃斯滤波输出信号	8 135.99	80.69	-7.03
FIR 低通滤波输出信号	7 922.36	78.57	-6.33
维纳滤波输出信号	8 038.33	79.72	-0.61
LMS 滤波输出信号	8 026.12	79.60	16.17

表 4 现场测速结果

Table 4 Speed measurement results

运行速度	本文方法测速	误差
5	5.02	0.02 km/h
10	10.23	0.23 km/h
20	20.22	0.22 km/h
30	29.78	0.22 km/h
40	39.53	0.47 km/h
50	49.94	0.06 km/h
60	60.23	0.38%
70	69.67	0.47%
80	79.60	0.50%

时,测速误差小于 0.5%,通过现场测试,证明基于 LMS 自适应滤波的信号处理算法能有效滤除轨道杂波并实现较高精度的列车测速,满足列车测速雷达设计需求。

5 结 论

本文基于 77 GHz+24 GHz 双频双系列车车载测速雷达,采集了高低双频毫米波轨道地杂波数据,进一步分析了 77 GHz 及 24 GHz 频段的轨道杂波特性,数据分析结果表明,车载测速雷达采集到的轨道地杂波数据统计特性服从 Kernel 分布。本文提出了一种在轨道杂波背景下的信号处理算法,利用 LMS 自适应滤波算法对低信噪比的差频信号进行去噪处理,并采用改进 Burg 算法进行频谱估计,实验结果表明本文算法能有效滤除杂波提高信噪比,当速度小于 50 km/h 时,测速误差小于 0.5 km/h,当速度大于 50 km/h 时,测速误差小于 0.5%。后续还需进行磁浮列车实车现场测速测试,进一步验证本文去噪算法的有效性。

参考文献

[1] 闫琪,杨奉伟,崔君晓,等. 基于动态间隔的列控系统车载设备研发[J]. 铁道通信信号, 2023,59(8):8-14,37. YAN Q, YANG F W, CUI J X, et al. Research and development of on-board equipment for train control system based on dynamic interval [J]. Railway

- Signalling & Communication, 2023, 59(8):8-14, 37.
- [2] 彭泽青, 郜洪民, 李博. 双频段高冗余度列车多普勒测速雷达设计与实现[J]. 电讯技术, 2024, 1-8, DOI: 10.20079/j.issn.1001-893x.231017003.
PENG Z Q, GAO H M, LI B. Design and implementation of dual-frequency band high redundancy train Doppler speed measurement radar [J]. Telecommunication Engineering, 2024, 1-8, DOI: 10.20079/j.issn.1001-893x.231017003.
- [3] 孟琳. 驼峰多目标测速雷达的研制与应用[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(12):38-43.
MENG L. Development and application of hump multi-target speed measuring radar [J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(12):38-43.
- [4] 孔令雄, 李跃华, 陈秀琴. 太赫兹雷达杂波背景中小目标检测研究[J]. 微波学报, 2023, 39(S1): 248-252.
KONG L X, LI Y H, CHEN X Q. Research on tiny target detection with terahertz radar in clutter background [J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(S1): 248-252.
- [5] 任红霞. 雷达海杂波统计建模与仿真[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.
REN H X. Statistical modeling and simulation of radar sea clutter [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2016.
- [6] 袁野. 基于 77 GHz 车载毫米波雷达背景杂波特性与目标提取方法的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
YUAN Y. Research on background clutter characteristics and target extraction method of 77 GHz vehicle-mounted millimeter-wave radar [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [7] 黄颖. 列车多普勒测速信号处理方法研究与系统设计实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
HUANG Y. Research on Doppler velocity signal processing method and design implementation of train speed measurement system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [8] 刘让雷. 激光多普勒测速中信号的分析与处理研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
LIU R L. Research on signal analysis and processing in laser Doppler velocimetry [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018.
- [9] 高猛. 机载多普勒测速雷达信号处理系统的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
GAO M. Design and implementation of airborne Doppler speed radar signal processing system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [10] 尚智宇, 唐波, 张龙斌, 等. 海上风电机雷达回波及其微多普勒特征[J]. 电子测量技术 2023, 46(11): 49-56.
SHANG ZH Y, TANG B, ZHANG L B, et al. Radar echoes simulation and micro-Doppler characterization of offshore wind turbine [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(11):49-56.
- [11] EPANECHNIKOV V A. Non-parametric estimation of a multivariate probability density [J]. Theory of Probability and its Applications, 1969, 14 (1): 153-158.
- [12] 喻洋, 皮亦鸣. 太赫兹高分辨率雷达杂波测量与分析[J]. 雷达学报, 2015, 4(2):217-221.
YU Y, PI Y M. Terahertz high-resolution radar clutter measurement and analysis [J]. Journal of Radars, 2015, 4(2):217-221.
- [13] 孔贵琴, 李智. 基于卡方拟合度的无线传感器网络数据复原原聚方法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(4):130-133, 136.
KONG G Q, LI ZH. Resilient data aggregation method for WSNs based on Chi-square goodness of fitting [J]. Sensors and Microsystems, 2015, 34 (4): 130-133, 136.
- [14] 李昊宇, 黄丹平, 罗凡. 非整周期低信噪比科氏流量计相位差测量研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(11):89-96.
LI H Y, HUANG D P, LUO F. Research on phase difference measurement of Coriolis flowmeter with non-integer period and low signal-to-noise ratio [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(11):89-96.
- [15] 袁军, 李军, 孟祥胜, 等. 压缩机噪声的主动噪声控制系统研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(4): 33-38.
YUAN J, LI J, MENG X SH, et al. Research on active noise control system for compressor noise [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (4): 33-38.
- [16] 梁静远, 陈明惠, 王惠琴, 等. 无线光通信自适应阈值检测技术研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7):1-16.
LIANG J Y, CHEN M H, WANG H Q, et al. Research progress of adaptive threshold detection technology for optical wireless communication [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7):1-16.
- [17] 石欣, 范智瑞, 张杰毅, 等. 基于 LMS-随机森林的肌电信号下肢动作快速分类[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6):218-224.
SHI X, FAN ZH R, ZHANG J Y, et al. Rapid classification of lower limb movements of EMG signals based on LMS-random forest [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6):218-224.
- [18] 黄颖, 施清平, 任延群. 多普勒信号的 Burg 算法优化研究[J]. 测控技术, 2019, 38(3):84-87.
HUANG Y, SHI Q P, REN Y Q. Research on Burg algorithm optimization of Doppler signal [J]. Measurement and Control Technology, 2019, 38(3): 84-87.

作者简介

彭泽青, 硕士研究生, 主要研究方向为列车测速定位技术。

郜洪民(通信作者), 硕士研究生, 研究员, 主要研究方向为铁路通信信号。

E-mail: gaohm@rails.cn

胡伟东, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹雷达、空间太赫兹遥感。

蒋环宇, 博士研究生, 主要研究方向为微波与太赫兹技术。

刘庆国, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹无损检测技术、微波频率源技术。