

# 城市轨道交通多普勒雷达测速算法研究

王强<sup>1</sup>, 史学森<sup>2</sup>, 詹洁<sup>2</sup>, 张子龙<sup>3</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051; 2. 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081;  
3. 北京中电科卫星导航系统有限公司, 北京 100040)

**摘 要:** 针对基于多普勒频偏估计的雷达测速方法精度不高的问题, 提出采用自相关处理和改进的能量重心法相结合的频偏估计方法。该方法对接收信号进行自相关处理以抑制噪声的影响, 并根据能量重心法中谱线选择与矫正精度的关系, 对能量重心法进行改进。对所提算法进行了仿真验证。结果表明, 与常规算法相比, 本算法有效提高了多普勒频偏估计的精度和多普勒雷达测速的精度。

**关键词:** 轨道交通; 雷达测速; 算法研究; 多普勒效应; 能量重心法

**中图分类号:** TN911.71    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2021)03-0140-04

## Research on Velocity Measurement Based on Doppler Radar for Urban Rail Transit

WANG Qiang<sup>1</sup>, SHI Xuesen<sup>2</sup>, ZHAN Jie<sup>2</sup>, ZHANG Zilong<sup>3</sup>

(1. The 13th Research Institute of China Electronic Science and Technology Corporation, Shijiazhuang 050051, China;  
2. School of Information and Electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
3. Beijing CETC Satellite Navigation System Co., Ltd., Beijing 100040, China)

**Abstract:** Concerning low accuracy of radar velocity measurement based on Doppler frequency offset estimation, the method of combining autocorrelation processing and improved energy barycenter method is adopted to improve the estimation accuracy. The received signal is processed by autocorrelation to control noise. According to the relationship between the selection of spectral lines and the correction accuracy in the energy barycenter method, the energy barycenter method is improved. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively improve the estimation accuracy of Doppler frequency offset and the velocity measurement accuracy of Doppler radar.

**Keywords:** rail transit; radar velocity measurement; algorithm research; Doppler effect; energy barycenter method

## 0 引言

城市轨道交通系统具有运量大、占地少、单位运量能耗小等诸多优点, 成为世界各国交通建设的重点<sup>[1]</sup>。随着以高铁和地铁为代表的轨道交通系统的快速发展, 轨道交通车辆的速度检测作为列车运行控制系统的关键技术之一, 是列车安全保障体系的重要组成部分<sup>[2]</sup>。实时、准确地获得列车速度是列车安全高效运行的重要保障。随着列车运行速度的不断提升, 对列车测速的精度及可靠性也提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。

比较常用的测速方法有列车转轴转动测速、GPS (global positioning system) 导航定位测速和雷达测速<sup>[4]</sup>。转动测速是一种直接接触式的测量方法, 结构简单, 测量误差较大。GPS 导航测速是一种非接触式的测量方法, 利用 GPS 卫星定位实时获得列车的运行速度, 受天气及环境影响较大。雷达测速也是一种非接触式测速方法, 根据多普勒效应, 通过测量多普勒频率差, 得到列车的运行速度信息。雷达测速在测速原理、精度及可靠性方面的优势

使之更加适合对高速列车进行速度测量, 特别是随着微处理器技术的飞速发展, 雷达测速技术在列车测速领域具有广阔的应用前景。雷达测速的原理是根据列车的运行与发射信号之间的多普勒频差, 解算出列车运行速度信息。因此, 高精度频偏估计方法是雷达测速的关键技术之一。

频偏估计方法大致可以分为时域估计法和频域估计法。时域法存在较高的信噪比门限, 适用于高信噪比条件, 而频域法的信噪比适用范围和频偏估计范围均较时域法广, 因此得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。频域估计法基于信号周期图, 通常先利用傅里叶变换获得信号的频谱峰值信息, 再利用频谱矫正技术对初始估计的频率进行修正。由于能量泄露和栅栏效应, 频率估计值与实际频率值存在较大误差, 因此众多学者研究了各种频率校正算法。常见的主要有插值法<sup>[6]</sup>和能量重心法<sup>[7]</sup>。插值法的估计精度受到频率真实谱线位置分布的影响, 估计性能不理想。能量重心法是以周期图频率粗估计为基础, 根据加窗后信号功率谱的能量重心逼近主瓣重心的特性, 对信号频率峰值进行修正。实际中, 信号叠加噪声会干扰谱线的正确选择, 从而影响能量重心法频率矫正的精度<sup>[8]</sup>。因此通过优化

第一作者简介: 王强 (1973—), 男, 河北石家庄人, 高级工程师, 学士, 研究方向为微波射频电路设计封装、电子陶瓷封装、小整机微系统的开发和应用。

谱线选择可以有效提高频率估计精度。另外,学者们还把自相关技术应用到频率修正算法中<sup>[9-11]</sup>,提高了现有信号频偏估计的精度。在前人研究的基础上,针对现有的基于能量重心法在频率修正方面存在的局限,本文对能量重心法进行改进,并采用自相关处理来抑制噪声,提高频偏估计的精度。

## 1 多普勒雷达测速原理

### 1.1 系统组成

多普勒测速雷达通过检测多普勒频移完成对目标运动速度的检测,其主要由信号处理单元、基带、射频发射接收单元、天线和接口电路(串口)等构成,系统原理框图如图1所示。测速雷达实物图如图2所示。基带和射频发射接收单元主要产生一定频率的微波信号,并由天线将这个信号定向发射出去,同时对于反射回来的信号进行接收、混频等;信号处理单元主要完成基带信号的处理,以便获得能反映目标真实运动的多普勒频率;接口电路按照使用要求将获得的目标运动速度信息送出。

为获得稳定可靠的多普勒频率,本系统在一部雷达上集成两个不同角度的多普勒测速模块。通过提取轨道方向的分量进行各自处理,得出最终的结果。即使某一个模块出现了问题也可以保证测速正常,能够有效提高产品的可靠性。

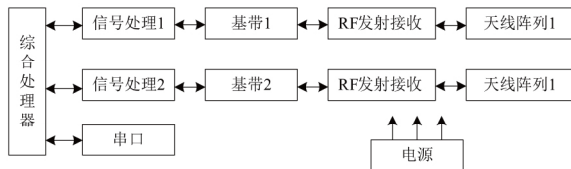


图1 多模块雷达测速原理框图



图2 测速雷达实物图

### 1.2 雷达测速算法原理

雷达测速的原理是利用多普勒效应对目标速度进行测量,如图3所示。当目标与雷达存在相对运动时,会产生多普勒频移,而目标的速度大小可通过多普勒频移计算得到,计算公式为

$$v = \frac{f_d \lambda}{2 \cos \varphi} \quad (1)$$

其中: $f_d$ 为多普勒频移; $\lambda$ 为雷达波的波长; $\varphi$ 为雷达天线与地面的夹角。从公式(1)可知,提高频率估计精度可以

有效提高雷达测速精度。

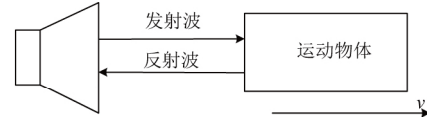


图3 多普勒效应示意图

## 2 基于自相关和改进能量重心法的频偏估计算法

设信号模型为单频复正弦信号,对信号进行采样截断后得

$$x(n) = A \exp(2\pi f_0 n / f_s + \varphi_0) + n_r(n) \quad (2)$$

其中: $A$ 为信号幅度; $f_0$ 为信号频率; $f_s$ 为采样频率;信号功率 $E_s = A^2$ ;  $n_r(n)$ 表示复高斯白噪声,其实部和虚部的均值为0、方差都是 $\sigma^2$ ,所以复噪声功率为 $N_0 = 2\sigma^2$ ,信噪比(SNR)为 $E_s / N_0 = A^2 / (2\sigma^2)$ 。对信号进行 $N$ 点傅里叶变换得

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} = \frac{A \sin[\pi(f_0 N T_s - k)]}{2 \sin[\pi(f_0 T_s - \frac{k}{N})]} e^{j[\varphi_0 + \frac{\pi(N-1)}{N}(f_0 N T_s - k)]} \quad (3)$$

其中 $T_s$ 为采样周期。频谱分辨率为 $\Delta f = f_s / N$ ,  $X(k)$ 幅值最大处谱线的索引记为 $k_{\max}$ ,  $k_{\max}$ 是最接近信号频率真实值的谱线。由于信号截断引起的能量泄露和采样引起的栅栏效应,不可避免地导致估计精确度受限。利用频谱矫正技术计算修正因子 $\delta$ 进行补偿,可以得到矫正后频率估计值为

$$f = \frac{k_{\max} + \delta}{N} f_s \quad (4)$$

其中修正因子 $\delta$ 的实际物理意义是:信号实际频率 $f$ 对应谱线的位置相对于幅度峰值谱线 $k_{\max}$ 的偏差,并且有 $-0.5 \leq \delta < 0.5$ 。

### 2.1 自相关处理

根据信号与噪声之间的相关特性可知,对信号进行自相关预处理,可以有效抑制噪声,提高信噪比,从而提高信号的频率估计精度<sup>[12]</sup>。对信号进行自相关预处理后的自相关函数可以表示成<sup>[13]</sup>

$$R(l) = \frac{1}{N-l} \sum_{n=l}^{N-1} x(n) x^*(n-l) = \frac{1}{N-l} \sum_{n=l}^{N-1} \exp[j(2\pi f_M l T_D + M \varphi_l)] \quad (5)$$

其中 $l$ 表示相对时延。从上式可以看出,自相关函数包含了信号的频率和相位信息; $\varphi_l$ 表示零均值相位噪声,其概率密度分布函数为:

$$p(\Delta\phi | \chi) = \frac{1}{2\pi} e^{-\chi} \left[ 1 + \sqrt{2\chi} \cos(\Delta\phi) \cdot e^{\chi \cos^2(\Delta\phi)} \int_{-\infty}^{\cos(\Delta\phi) \sqrt{2\chi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right] \quad (6)$$

其中 $\chi = A^2 / 2\sigma^2$ 表示信噪比。 $x(n)$ 的自相关序列表

示为<sup>[14]</sup>:

$$R_{xx}(l) = R_{ss}(l) + R_{sz}(l) + R_{zs}(l) + R_{zz}(l) \quad (7)$$

其中:  $R_{ss}$  和  $R_{zz}$  分别是正弦分量  $s(n)$  和余弦分量  $z(n)$  的自相关函数;  $R_{sz}$  和  $R_{zs}$  分别是  $s(n)$  和  $z(n)$  的互相关函数,  $z(n)$  是随机噪声, 和  $s(n)$  没有相关性。

当  $N$  足够大时, 则  $s(n)$  和  $z(n)$  的自相关函数分别为:

$$R_{zz}(l) = \sigma^2 \delta(l) \quad (8)$$

$$R_{ss}(l) = \frac{1}{N-l} \sum_{n=l}^{N-1} A^2 e^{jC 2\pi f_M T_D + M\phi_n} e^{-jC 2\pi f_M (n-l) T_D + M\phi_{n-l}} = A^2 e^{j2\pi f_M T_D} \frac{1}{N-l} \sum_{n=l}^{N-1} e^{jM C \phi_n - \phi_{n-l}} \quad (9)$$

近似有:

$$\frac{1}{N-l} \sum_{n=l}^{N-1} e^{jM C \phi_n - \phi_{n-l}} \approx E[e^{jM C \phi_n - \phi_{n-l}}] = e^{-\frac{M^2 \sigma^2}{4A^2}} \quad (10)$$

所以  $R_{xx}(l)$  可以写成

$$R_{xx}(l) \approx A^2 e^{-\frac{M^2 \sigma^2}{4A^2}} e^{jC 2\pi f_M T_D} + \sigma^2 \delta(l) \quad (11)$$

综上所述可见, 对信号进行自相关预处理, 可以有效抑制噪声, 提高信号处理的信噪比, 从而提高频率估计性能。

## 2.2 改进的能量重心法

能量重心法是根据信号功率谱的重心逼近主瓣重心的特性为基础, 对频率估计值进行修正的方法。设  $G(k)$  为信号的功率谱, 有

$$G(k) = |X(k)|^2 / L \quad (12)$$

其中  $L$  为自相关参数。

设  $\delta_{\text{ECC}}$  为能量重心法计算得到的频率修正值, 则有

$$\delta_{\text{ECC}} = \frac{\sum_{k=-M_1}^{M_2} G(k_{\max} + k) (k_{\max} + k)}{\sum_{k=-M_1}^{M_2} G(k_{\max} + k)} \quad (13)$$

由能量重心法计算得到的修正值与谱线的选取有关, 当真实频率接近量化频点时, 估计精度较高, 当真实频率接近量化频点中间位置时, 估计精度较低。对此文献[8]提出了一种改进算法, 记为 ECC\_m。该算法在峰值谱线左右各增加一条谱线用于计算修正值, 方法如下:

$$\delta_{\text{ECC}_m} = \begin{cases} \delta_l, R(1) < 0, R(-1) > 0 \\ \delta_r, R(1) > 0, R(-1) < 0 \\ (\delta_l + \delta_r) / 2, \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中  $\delta_l$  和  $\delta_r$  分别为峰值谱线左侧和右侧增加一根谱线计算得到的修正值  $R(\pm 1) = \text{Re}[X(k_{\max} \pm 1) X^*(k_{\max})]$  为谱线之间幅角相位差的余弦值。

能量重心法的精度不仅与谱线选择有关, 还与频偏真实值的分布有关<sup>[14]</sup>。当真实频率与峰值谱线对应的频率差位于区间  $[-0.2, 0.2]$  采用奇数根谱线能量重心法获得的估计精度较高, 而位于  $< -0.2$  和  $> 0.2$  的区间时, 增加一根谱线来获得修正值可以提高频率估计精度。

所以本文对能量重心法进行改进, 基于改进的能量重

心法的频率估计算法描述如下:

- 1) 对采样后的接收信号进行自相关预处理;
- 2) 利用周期图法得到频率的粗略估计值;
- 3) 采用常规能量重心法计算频率修正值  $\delta_0$ ;
- 4) 根据  $\delta_0$  的所在区间获得最终的频率估计结果。

当  $\delta_0$  位于  $[-0.2, 0.2]$  区间上时, 则直接采用  $\delta_0$  作为信号频率估计的修正值。当  $|\delta_0| \geq 0.2$  时, 如果  $\delta_0$  的符号为正, 增加一根峰值谱线右侧的谱线计算得到  $\delta_1$  的值作为信号频率修正值, 如果  $\delta_0$  的符号为负, 增加一根峰值谱线左侧的谱线计算得到  $\delta_1$  的值作为频率修正值。

## 3 仿真验证

本文通 MATLAB 软件对所提算法的频偏估计性能进行 Monte-Carlo 仿真, 并与现有基于能量重心法的频偏估计算法进行比较, 实验次数为 2 000 次。采用修正克拉美罗界 (MCRLB) 作为频偏估计参考指标, 其表达式为<sup>[5]</sup>

$$M_{\text{CRLB}} = \frac{3T_s}{2\pi^2 (NT_s)^3 \chi} \quad (15)$$

其中  $\chi$  为接收信号的信噪比。设置接收信号采样频率  $f_s$  为 60 MHz, 数据长度为 1 024 点, 自相关参数为 512, 对自相关序列  $R(l)$  进行 512 点 FFT 运算。

对改进后的能量重心法在不同条件下的性能进行仿真验证, 并与常规能量重心法进行比较。所有算法均进行自相关预处理, 仿真结果如图 4 所示。ECC\_tra 为常规能量重心法, ECC\_left 和 ECC\_right 分别为峰值左侧和右侧增加谱线的改进型能量重心法。仿真结果表明, 随着信噪比的增加, 频率估计精度所有提升。常规算法在区间  $\delta = [-0.2, 0.2]$  的估计精度最高, 峰值左侧增加谱线法在区间  $\delta > 0.2$  时的估计精度最高, 而峰值右侧增加谱线法在区间  $\delta < -0.2$  时的估计精度最高。

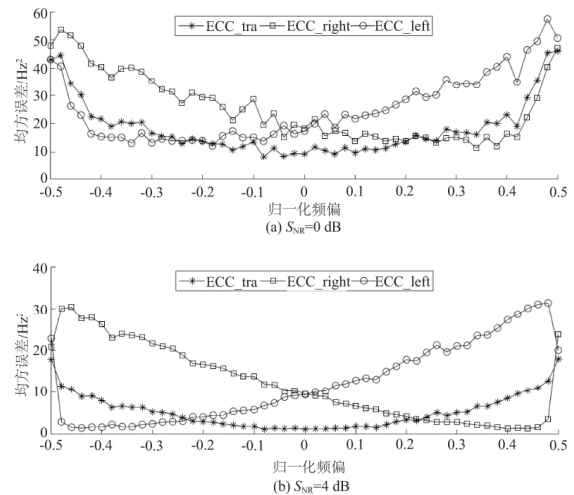


图 4 谱线选择对能量重心法精度的影响

对所提算法在不同  $\delta$  条件下的估计性能进行仿真, 并与现有的能量重心改进算法进行比较, 所有算法均进行自相关预处理。ECC\_m 为现有的能量重心改进算法, 分别设置信噪比为 0 dB 和 4 dB, 仿真结果如图 5 所示。仿真结果显示, 随着信噪比增加, 频率估计精度有所提升。本

文所提的能量重心改进算法在区间  $\delta = [-0.2, 0.2]$  内的估计性能最好, 而在  $-0.2$  和  $0.2$  附近时的估计性能较差, 这是由于此时根据 5 根谱线估计的  $\hat{\delta}_0$  结果存在较大偏差。当  $|\delta| > 0.2$  时, 两种改进算法的估计性能接近。

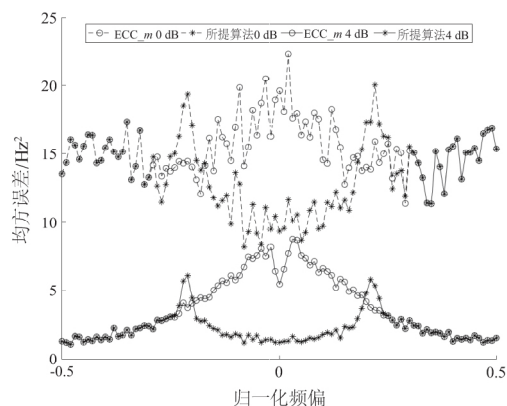


图5 不同  $\delta$  条件下的频偏估计精度

对所提算法在不同信噪比条件下的估计性能进行仿真, 常规的插值法 (IC\_tra) 和 ECC\_m 算法进行比较, 所有算法均进行自相关预处理, 仿真结果如图 6 所示。在此取仿真的频偏区间为  $[-4\delta, 4\delta]$ , 并对频率的均方误差关于  $\delta$  取平均。仿真结果表明, 随着信噪比的增加, 信号的频率估计性能有所提升。所提算法的平均估计性能优于另外两种算法, 尤其在低信噪比条件下, 所提算法相较于插值算法的优势更加明显。

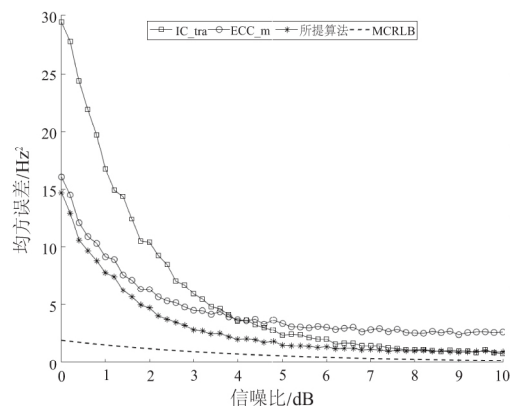


图6 不同信噪比条件下的频偏估计平均精度

由于 3 种算法均进行傅里叶变换运算和自相关处理, 在运算量上的差异仅体现在对修正值的计算, 修正值计算的运算量相比于自相关处理和傅里叶变换运算占比很小, 所 3 种算法的运算量在一个量级上。能量重心法通过功率谱计算修正值, 运算量比插值方法略大, 而所提算法的运算量与常规改进的能量重心法相比运算量相同。

## 4 结语

多普勒雷达测速可实现对列车运动速度的高精度测量, 而频偏估计算法的性能对雷达测速的精度至关重要。本文提出了一种基于自相关预处理和改进能量重心频谱矫正的频偏估计方法。采用自相关处理进行噪声抑制, 然后利用改进的能量重心算法对多普勒频偏进行估计。最后通过仿真对所提算法进行了仿真验证。结果表明: 所提算法比常规算法具有更好的频偏估计性能。目前该算法被成功应用到西安、长沙等地铁项目的测速设备中, 有效提高了测速的精度。

### 参考文献:

- [1] 朱东飞, 王永皎, 杨烨, 等. 基于光栅阵列的城市轨道列车定位与测速方法[J]. 光子学报, 2019, 48(11): 159-166.
- [2] 孟凡江, 尹逊政. 一种基于多传感器融合的冗余测速测距系统设计[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(1): 46-50.
- [3] 陈文赛. 高安全高可靠测速测距系统的设计与实现[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 131-134, 147.
- [4] 张龙, 王兴理, 马婧, 等. 脉冲雷达测速方法的改进研究[J]. 现代雷达, 2019, 41(10): 74-77.
- [5] 万灵达, 杨晓光. 一种基于 FFT 的高精度频率估计算法[J]. 电子科技, 2010, 23(10): 79-81.
- [6] 郑威, 陈德昶, 刘红星. 改进的 DFT 插值频率估计算法及其 DSP 实现[J]. 数据采集与处理, 2017, 32(3): 588-594.
- [7] 张云飞, 郎兵, 张东欣. 基于能量重心法和动态加窗谐波分析法估计计算[J]. 电测与仪表, 2016, 53(3): 18-22.
- [8] 陈平, 王佳昌, 吴兴研. 能量重心法的改进 FFT 算法分析及应用研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(12): 1883-1889.
- [9] 曾金芳, 滕召胜, 唐求. 自卷积检测方法及其在离散频谱校正中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4976-4982.
- [10] 侯盼卫, 杨录. 基于自相关检测法和能量重心法的正弦信号频率估计算法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(3): 97-102.
- [11] 杨青青, 马训鸣, 李海海, 等. 基于 LabVIEW 的冲击振动信号监测系统的设计[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6): 210-212.
- [12] 曹燕, 王一歌, 李欣雯, 等. 一种基于窄带自相关的实信号频率估计算法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2756-2761.
- [13] SHAN X S, TANG L, WEN H, et al. Analysis of vibration and acoustic signals for noncontact measurement of engine rotation speed[J]. Sensors, 2020, 20(3): 683.
- [14] LINN Y. Efficient M-PSK lock detectors and SNR estimators[C]// 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Toronto, ON, Canada: IEEE, 2014: 1-8.
- [15] ZHANG J L, ZHAO N, LIU M Q, et al. Modified Cramér-Rao bound for M-PSK signal parameter estimation in Cauchy and Gaussian noise[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 10283-10288.

收稿日期: 2021-03-22