

文章编号: 2095-4980(2018)04-0649-05

## Burg 算法在雷达测速中的应用

朱 燕, 刘逸通

(安康学院 电子与信息工程学院, 陕西 安康 725000)

**摘 要:** 为将Burg算法应用在汽车测速中, 在多普勒效应原理的基础上, 推导出移动物体发射波频率与接收波频率之间的关系, 并分别用直接法和Burg算法估计测速模型中发射波频率82 Hz与接收波频率81 Hz。经Matlab仿真表明: 直接法估计的发射波与接收波主频率分别接近于82 Hz和81 Hz, 但频率主峰旁边存在大量噪声频率的假峰; Burg算法估计出的发射波与接收波主频率更准确, 同时主峰清晰且较其他噪声频率突出明显。故Burg算法对间隔不大的发射波与接收波的频率分辨率远远优于直接法, 可应用于测速环境中。

**关键词:** 多普勒效应; 测速模型; 直接法; Burg 算法

中图分类号: TN953<sup>+</sup>.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0649

## Application of Burg algorithm in radar speed measurement

ZHU Yan, LIU Yitong

(Department of Electronics and Information Engineering, Ankang University, Ankang Shaanxi 725000, China)

**Abstract:** In order to apply Burg algorithm in the vehicle speed measurement environment, based on the principle of Doppler effect, the relationship between the transmitted wave frequency and received wave frequency of moving vehicles is derived, then the transmitted wave of 82 Hz and received wave of 81 Hz are estimated with the direct method and the Burg algorithm respectively in the vehicle speed measurement model. The Matlab simulation shows that the estimated values of transmitted wave and received wave are separately close to 82 Hz and 81 Hz by the direct method, but there are a lot of false peaks of noise frequency near the peak frequency. The estimated values of transmitted wave and received wave are accurate by the Burg algorithm, and the main peak is clear and prominent than other noise frequency. Therefore, the Burg algorithm performs better than the direct method in resolving the frequency difference which is small between the transmitted wave and received wave, and it can be applied to the speed measurement environment.

**Keywords:** Doppler effect; speed measurement model; the direct method; Burg algorithm

近年来, 我国道路建设发展愈发迅速, 汽车时代提前到来, 汽车的购买量与日俱增。在当今这个汽车时代, 存在很多交通隐患。如何实时准确地反映驾驶者当前驾车速度, 对于预防交通事故尤为重要。目前, 交通管理部门常采用雷达测速方法, 雷达测速原理来自于多普勒效应的应用, 借分析探测波的频率变化来计算汽车的行驶速度, 以给予其正常行驶或者超速行驶的判定。因此, 如何准确估计探测波前后的频率显得尤为重要, 本文从理论上推导出一种测速方法, 使用直接法与 Burg 算法对理论参数进行估计, 进而分析论证不同算法的实用性。

### 1 雷达测速简介

交通中测速的方法有许多, 如使用测速发电机、磁脉冲传感器、多普勒雷达等, 其中雷达测速法因其精确度高、稳定性强<sup>[1]</sup>等特点而被广泛应用。对于机械波、声波、光波和电磁波而言, 当波源和观察者(或接收器)之间发生相对运动时, 由多普勒效应可知: 观察者接收到的波的频率与发出的波的频率不相同<sup>[2]</sup>。如果用  $f$  表示频率,  $v$  表示速度,  $\lambda$  表示波长, 理论上波长、频率和速度关系如式(1)所示:

收稿日期: 2017-05-08; 修回日期: 2017-08-21

基金项目: 陕西省教育厅科学研究计划资助项目(16JK1016)

$$f=v/\lambda \quad (1)$$

下面讨论4种情况下物体接收波的频率 $f_j$ 和发射波频率 $f$ 的关系,其中 $v$ 为发射波的波速<sup>[3]</sup>。

1) 当波源静止,物体相对于波源以 $v_y$ 远离时, $f_j$ 和 $f$ 的关系如式(2)所示:

$$f_j = \frac{v-v_y}{v} f \quad (2)$$

2) 当物体静止,波源相对于物体以 $v_y$ 远离时, $f_j$ 和 $f$ 的关系如式(3)所示:

$$f_j = \frac{v}{v+v_y} f \quad (3)$$

3) 当波源静止,物体相对于波源以 $v_y$ 靠近时, $f_j$ 和 $f$ 的关系如式(4)所示:

$$f_j = \frac{v+v_y}{v} f \quad (4)$$

4) 当物体静止,波源相对于物体以 $v_y$ 靠近时, $f_j$ 和 $f$ 的关系如式(5)所示:

$$f_j = \frac{v}{v-v_y} f \quad (5)$$

雷达测速中通常是由发射器发射一束频率为 $f_t$ 速度为 $c_0$ 的电磁波,当它遇到以速度 $v$ 运动的汽车时,汽车处接收到的频率为 $f_q$ ,此时产生多普勒频移,而频率的偏移只与发射源和运动物体之间的相对速度有关,可以用于速度测量<sup>[4]</sup>,由式(2)的结论可以推导出式(6):

$$f_q = \frac{c_0-v}{c_0} f \quad (6)$$

然后,接收器接收由汽车反射回来的反射波,根据式(3),接收波的频率 $f_z$ 为:

$$f_z = \frac{c_0}{c_0+v} f \quad (7)$$

将式(6)、(7)联立,可以得到接收波的频率 $f_z$ 与发射波的频率 $f_t$ 的关系,如式(8)所示:

$$f_z = \frac{c_0}{c_0+v} \frac{c_0-v}{c_0} f_t = \frac{c_0-v}{c_0+v} f_t \quad (8)$$

## 2 直接法估计

直接法是把随机信号 $x(n)$ 的 $N$ 点观察数据 $x_N(n)$ 看作能量有限信号,直接对其进行傅里叶变换,可得到 $X_N(e^{j\omega})$ ,再对其幅值取平方,然后除以 $N$ ,作为对 $x(n)$ 真实功率谱 $P(e^{j\omega})$ 的估计。这里用 $\hat{P}_{\text{PER}}(e^{j\omega})$ 表示直接法估计出的功率谱,根据文献[5]可知:

$$\hat{P}_{\text{PER}}(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} |X_N(k)|^2 \quad (9)$$

将 $\omega$ 在单位圆上等间隔取值,得式(10):

$$\hat{P}_{\text{PER}}(k) = \frac{1}{N} |X_N(k)|^2 \quad (10)$$

$X_N(k)$ 可以使用FFT快速计算,因此,可以方便的求出 $\hat{P}_{\text{PER}}(k)$ 。

## 3 自回归模型

一个自回归(Auto Regressive, AR)模型可以看作是一个输入序列 $u(n)$ 激励一个线性系统 $H(z)$ 的输出 $x(n)$ <sup>[6]</sup>,其中输入序列 $u(n)$ 是白噪声序列,方差为 $\sigma^2$ 。该模型现在的输出是现在的输入和过去 $p$ 个输出的加权和。由文献[7]可知,输出 $x(n)$ 可以表示为式(11),其中 $a_k$ 为AR模型的参数, $p$ 为AR模型的阶次。

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n) \quad (11)$$

功率谱 $P_x(e^{j\omega})$ 与AR模型参数之间的关系如式(12)所示,由该式可以看出,AR模型功率谱的准确度与模型参数 $a_k$ 和 $\sigma^2$ 密切相关。

$$P_x(e^{j\omega}) = \sigma^2 / \left| 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k} \right|^2 \tag{12}$$

### 4 Burg 算法

AR 模型有 3 种求解方法, 分别是自相关法、改进协方差法和 Burg 算法。自相关法对于 2 个小间隔频率的分辨能力不好, 需要增大阶数来提高其精确度; 改进协方差法的计算方式过于复杂; Burg 算法可有效估计出所需的 2 个小间隔频率, 且模型阶数也不会过大, 计算量较小。相对于直接法估计的精确度取决于采样信号的长度以及采样点的多少, Burg 法则利用递推的方法, 先计算 AR 模型阶次  $p$  从 1 到  $m$  时, 前、后向预测误差  $e_m^f(n)$ 、 $e_m^b(n)$ , 利用各阶次前、后向预测误差来求取反射系数  $k_m$ , 然后使用 Levinson 关系式求得 AR 模型的参数, 将该参数代入式(12)中求取功率谱。由文献[8-9]可知, 计算  $m$  阶预测误差的递推公式如式(13)~式(15)所示, 式中  $m=1,2,\dots,p$ 。

$$e_m^f(n) = e_{m-1}^f(n) + k_m e_{m-1}^b(n-1) \tag{13}$$

$$e_m^b(n) = e_{m-1}^b(n) + k_m^* e_{m-1}^f(n-1) \tag{14}$$

$$e_m^f(n) = e_0^f(n) = x(n) \tag{15}$$

求取反射系数的公式如下:

$$k_m = \frac{-2 \sum_{n=m}^{N-1} e_{m-1}^f(n) e_{m-1}^b(n-1)}{\sum_{n=m}^{N-1} |e_{m-1}^f(n)|^2 + \sum_{n=m}^{N-1} |e_{m-1}^b(n-1)|^2} \tag{16}$$

估计出  $k_m$  后, 在阶次  $m$  时的 AR 模型的参数仍然由 Levinson 算法递推求出<sup>[10]</sup>。

$$a_m(k) = a_{m-1}(k) + k a_{m-1}(m-k) \tag{17}$$

$$a_m(m) = k_m \tag{18}$$

$$p_m = p_{m-1} [1 - k_m^2] \tag{19}$$

得到模型的参数后, 就可按照式(12)估计出功率谱。经式(13)~(19)推导, Burg 算法不仅免去了大量的测量时间, 而且使用递推方式巧妙避开了对已知数据段之外的数据做人为的假设。

### 5 汽车测速模拟

现有一车速为  $v=40$  m/s 的小汽车远离测速器驶去, 测速器发射出的波速为  $c_0=6120$  m/s, 频率为  $f_1=82$  Hz, 根据式(8)可知, 接收器接收波的频率为  $f_2=81$  Hz。在 Matlab 下生成频率分别为 82 Hz 和 81 Hz 的正弦波, 叠加 0.1 dB 的白噪声后, 分别视为发射信号和接收信号, 绘制其时域波形, 如图 1 所示。根据采样定理可知, 本采样频率必须不小于  $2f_1$ 。为方便计算, 本次所选的采样频率为 200 Hz, 采样时间取为 1 s, 即采样点数也为 200。为使图像更直观, 选取 512 点 FFT, 这时, 第 512 个点恰好就是  $f_s/2$ , 也就是 100 Hz。此时, 仿真的图像的横轴长度合适, 用直接法估计出的发射波和接收波的功率谱如图 2 所示。

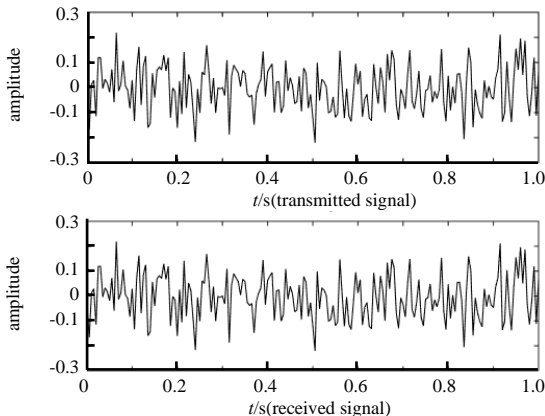


Fig.1 Time domain waveform of signal  
图 1 信号的时域波形

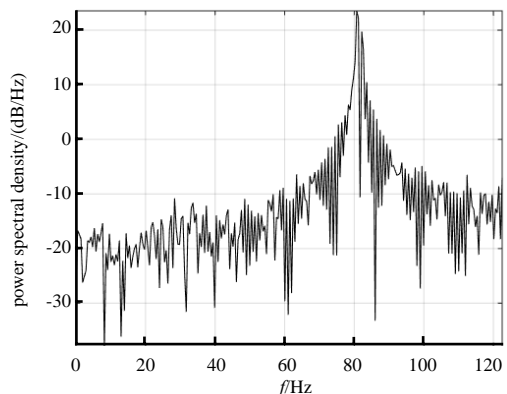


Fig.2 Power spectrum estimated by direct method  
图 2 直接法估计出的功率谱

从图 1 可以看出,发射信号和接收信号的波形极为相似,频率特别接近。从图 2 的仿真结果可以发现,直接法可以估计出 2 个信号的主频率,分别接近于 82 Hz 和 81 Hz,但频率主峰旁边存在很多噪声频率的假峰,容易使人产生误读。同时可以看出,直接法估计抗噪声性能较差,假如加大噪声的干扰,直接法估计的效果还会变差,一定程度上,直接法将不再适用。

当  $\sigma^2=0.1$  dB,阶次为 25 时,Burg 算法估计出的结果如图 3 所示。比较图 2 和图 3 可以清晰地看出,Burg 算法估计出的功率谱图像比经典法要好的多,它的图像波动很小,波形很平滑,2 个信号的频率主峰很清晰,频率主峰较其他噪声频率突出明显。从图 3 中可以轻松读出发射波频率和接收波频率分别为 82 Hz 和 81 Hz,这与前面设定一致,验证了 Burg 算法估计有很强的频率分辨力和抗噪声性能,估计出的功率谱对无关噪声和主信号分辨的很清晰,可以很好地应用于雷达测速中。

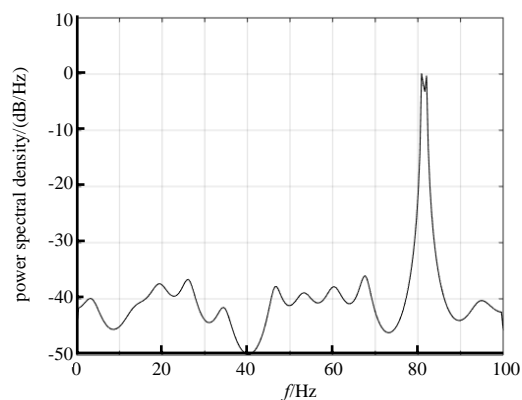


Fig.3 Burg algorithm estimation  
图 3 Burg 算法估计

## 6 结论

本文介绍了雷达测速,对雷达测速的原理多普勒效应进行推导,得出一种测量汽车速度的方法,并根据推导关系设计了小车测速模型,在 Matlab 下分别用直接法和 Burg 法估计发射器频率和接收器频率。通过仿真,结果表明,Burg 算法具有较强的分辨力和抗噪声性能,在功率谱估计上优于直接法,更适用于雷达测速环境中。

### 参考文献:

- [1] 谭星,张睿兴. 城轨系统中几种常用测速方法的误差与应用分析[J]. 铁路通信信号, 2012,48(1):60-63. (TAN Xing, ZHANG Ruixing. Errors analysis of common speed measurement methods in urban rail transit system and their application[J]. Railway Signaling & Communication, 2012,48(1):60-63. doi:10.13879/j.issn1000-7458.2012.01.023.)
- [2] 刘丽华. 多普勒雷达测速系统研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007. (LIU Lihua. Research on Doppler radar speed measurement system[D]. Wuhan,China:Huazhong University of Science and Technology, 2007.)
- [3] 代伟,方小兵. 大学物理实验[M]. 北京:科学出版社, 2010. (DAI Wei,FANG Xiaobing. University physics experiment[M]. Beijing:Science Press, 2010.)
- [4] 胡修林,汤琥. 雷达高度表进行多普勒测速系统仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2005,3(2):126-128. (HU Xiulin, TANG Hu. System simulation of measuring airborne velocity using Doppler technology with radar altimeter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2005,3(2):126-128.)
- [5] 刘金星. 现代谱估计技术的研究应用与 FPGA 实现[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (LIU Jinxing. Modern spectral estimation technology research and application of FPGA implementation[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)
- [6] 单东升,张培强,李超. 基于 AR 模型的功率谱估计[C]// 第六届全国信号和智能信息处理与应用学术会议. 张家界:[s.n.], 2012:518-521. (SHAN Dongsheng,ZHANG Peiqiang,LI Chao. The power spectrum estimation based on AR model[C]// The Sixth Signal and Intelligent Information Processing and Application Conference. Zhangjiajie,Hunan,China:[s.n.], 2012:518-521.)
- [7] 孙新建,曾亚平,苏振妍. AR 模型在爆破震动信号频谱分析中的应用[J]. 爆破, 2016,33(1):40-44. (SUN Xinjian,ZENG Yaping,SU Zhenyan. Application of AR model in spectrum analysis of blasting vibration signals[J]. Blasting, 2016,33(1):40-44.)
- [8] 黄超,王伟,单凉. 基于 Burg 算法功率谱估计的参数选择[J]. 舰船电子对抗, 2016,39(5):85-89. (HUANG Chao,WANG Wei,SHAN Liang. Parameters selection of power spectrum estimation based on Burg algorithm[J]. Ship Electronic Countermeasure, 2016,39(5):85-89.) doi:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2016.05.022.
- [9] 钱莹晶,周群. Burg 频谱估计算法的硬件加速方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(9):1382-1390. (QIAN Yingjing,ZHOU Qun. Research on hardware acceleration method for Burg spectrum estimation algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015,29(9):1382-1390.) doi:10.13382/j.jemi.2015.09.017.