

# 一种基于误差能量判别的单脉冲雷达测速功能优化方法

程望东

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

**摘要:** 对单脉冲雷达测速系统的原理进行了描述, 并针对回波信号的相位发生跳变致使频谱展宽, 出现跟错谱线, 导致测速出错的问题, 提出了基于鉴频器输出信号能量判别的准则。通过对鉴频器输出信号进行判别, 当回波信号的相位发生持续跳变时, 鉴频器输出振荡, 积分器输出就会超过门限, 测速系统重新消模糊; 当回波信号的相位稳定后, 测速结果可以回到正确的结果上, 从而可以修正跳谱线导致的测速误差。

**关键词:** 单脉冲雷达; 测速; I、Q 信号; 模糊

中图分类号: TN953+.1

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191261

中文引用格式: 程望东. 一种基于误差能量判别的单脉冲雷达测速功能优化方法[J]. 电子技术应用, 2020, 46(5): 50-52, 58.

英文引用格式: Cheng Wangdong. Monopulse radar velocity measurement function optimization method based on error energy discrimination[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(5): 50-52, 58.

## Monopulse radar velocity measurement function optimization method based on error energy discrimination

Cheng Wangdong

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** In this paper, the principle of monopulse radar velocimeter system is described, and the criterion of energy discrimination based on frequency discriminator output signal is put forward because of the phase jump of echo signal, which leads to the broadening of spectrum, the occurrence of error line and the error of velocity measurement. By discriminating the output signal of the frequency discriminator, when the phase of the echo signal continues to jump, the output of the discriminator oscillates, the output of the integrator will exceed the threshold, and the speed measuring system will eliminate blurring again. When the phase of the echo signal is stable, the speed-measuring result can be returned to the correct result, so that the speed-measuring error caused by the jump line can be corrected.

**Key words:** monopulse radar; velocity measurement; I/Q signal; ambiguity

### 0 引言

单脉冲测量雷达可以精确测量飞行目标的方位角、俯仰角、径向距离、径向速度等参数, 而径向速度参数的测量结果对目标定轨具有重要意义。相比较连续波测速系统, 单脉冲测量雷达的测速结果是有模糊的, 因此对测速结果解模糊就是单脉冲测量雷达测速系统的关键。而在单脉冲测量雷达对导弹、火箭等目标进行非合作测量时, 由于存在级间分离、抛洒物体等事件, 非常容易造成测速结果跳谱线, 同样在对目标进行合作测量时, 如果应答机信号出现跳变, 也容易造成测速结果跳谱线。如何及时判别跳谱线现象, 并及时纠正错误, 保证测速结果连续有效, 就成了单脉冲测量雷达测速系统的关键<sup>[1-4]</sup>。

### 1 单脉冲雷达测速原理

单脉冲雷达是利用多普勒效应进行测速, 对目标速度的测量就是对多普勒频率  $F_d$  的测量, 因此, 数字测速系统实际上就是一个频率测量系统。

首先, 将输入的基带信号正交数字量  $I(n)$ 、 $Q(n)$  和反馈的基带相参正交数字量进行数字混频, 求得差频正交数值  $\varepsilon_I(n)$  和  $\varepsilon_Q(n)$ ; 接着, 对  $\varepsilon_I(n)$  和  $\varepsilon_Q(n)$  进行幅度归一化; 其次, 进行数字鉴频处理, 得到频率误差数据; 然后这一频率误差数据经  $\alpha$ - $\beta$  滤波器平滑后, 即产生了目标的径向速度与加速度值; 最后, 预测的径向速度换算成多普勒频率预测值  $F_p$ , 送至相位累加器, 再通过查表得到反馈的基带相参正交数字量  $\cos(\omega_p n)$  和  $\sin(\omega_p n)$ , 与输入的基带信号正交数字量  $I(n)$ 、 $Q(n)$  进行数字混频, 形成基带差频信号, 从而完成频率的闭环跟踪。由于受雷达脉冲重复频率的限制, 测速回路测出的目标径向速度可能出现模糊, 需要利用测距系统测得的目标距离数据  $R$  和测速系统测得的模糊速度进行相关运算后, 消除速度模糊, 速度消模糊常采用不变量嵌入算法。消除速度模糊后, 得到一个实时的、精确的、无模糊的目标径向速度<sup>[1, 4-5]</sup>。测速系统的工作原理框图如图 1 所示。

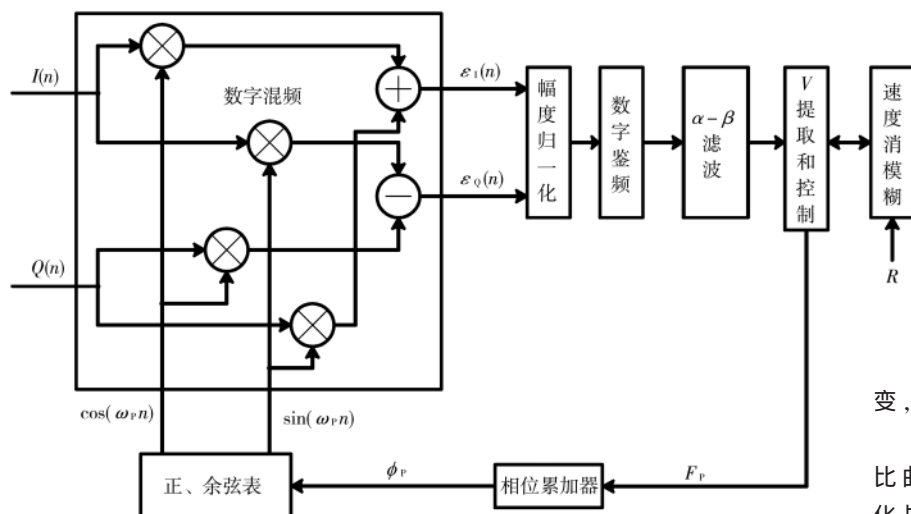


图1 测速系统的工作原理框图

糊速度为  $\delta = \lambda \cdot \text{PRF}/2$ , PRF(Pulse Recurrence Frequency) 即脉冲重复频率。如果回波信号的相位发生跳变, 导致频谱展宽, 可能出现跟错谱线的现象, 导致测速出错。

图2为某雷达在跟踪飞机时的测速结果, 可见在275 s~290 s之间发生了速度跳变。

由图3、图4可以看出, 在270 s~275 s间, 应答机信号发生持续性跳变, 频谱发生展宽, 导致测速结果出错。

图5为测速结果与和信号相位变化对比曲线的局部放大, 图6为和信号相位变化与鉴频器输出对比曲线的局部放大, 可以看出, 在测速结果出错前, 应答机回波相位发生持续性跳变, 导致鉴频器输出持续性振荡, 进而导致测速结果出错。

## 2 单脉冲雷达测速存在的跳谱线问题

由上述分析可见, 单脉冲雷达测速系统本质上是一个细谱线(频率)跟踪系统, 由于受雷达脉冲重复频率的限制, 测速回路测出的目标径向速度可能出现模糊, 模

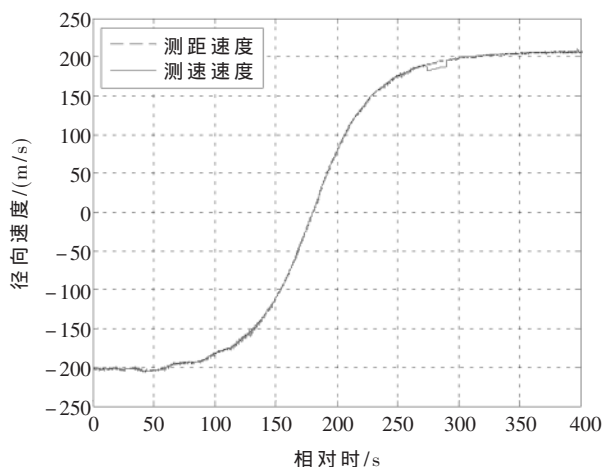


图2 某雷达跟踪机载应答机的测速结果

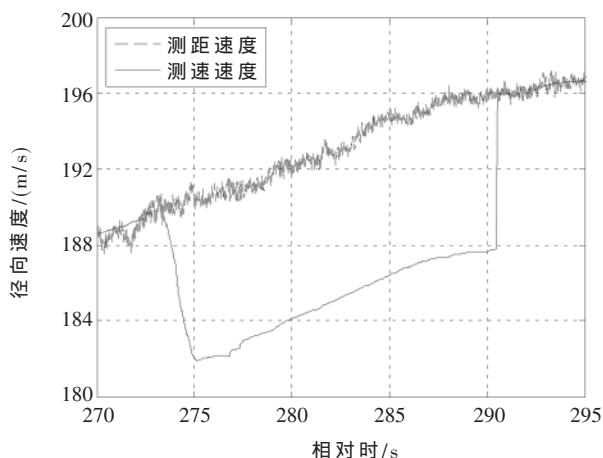


图3 某雷达跟踪机载应答机的测速结果的局部放大

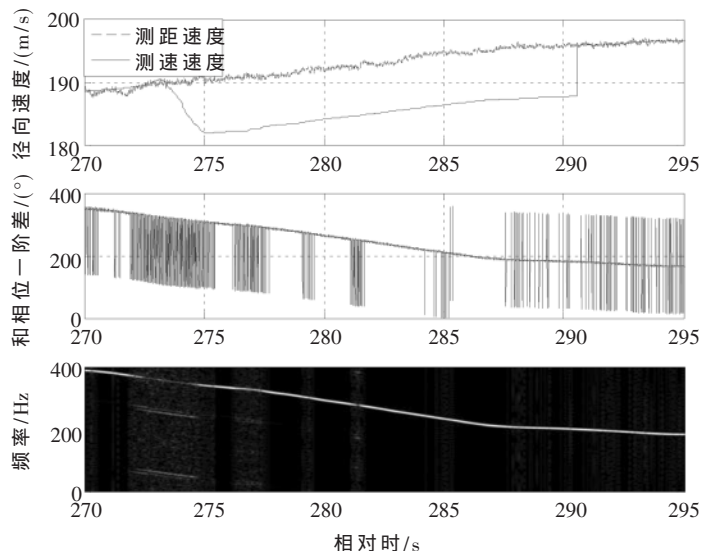


图4 某雷达跟踪机载应答机的测速结果、相位变化与时频图的局部放大

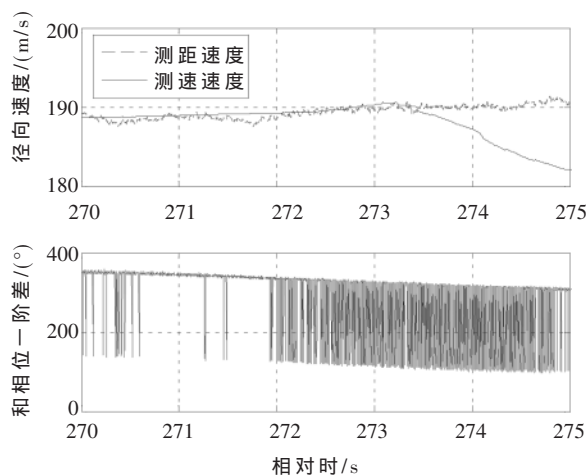


图5 测速结果与和信号相位变化对比曲线的局部放大

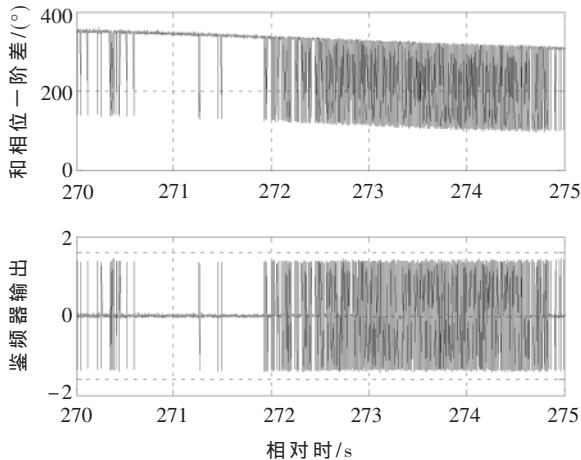


图6 和信号相位变化与鉴频器输出对比曲线的局部放大

### 3 基于误差能量判别的单脉冲雷达测速功能优化方法

针对上述现象,本文采取对鉴频器输出信号(即频率误差信号)进行判别,增加了基于鉴频器输出信号能量判别的准则,过程如图7所示。

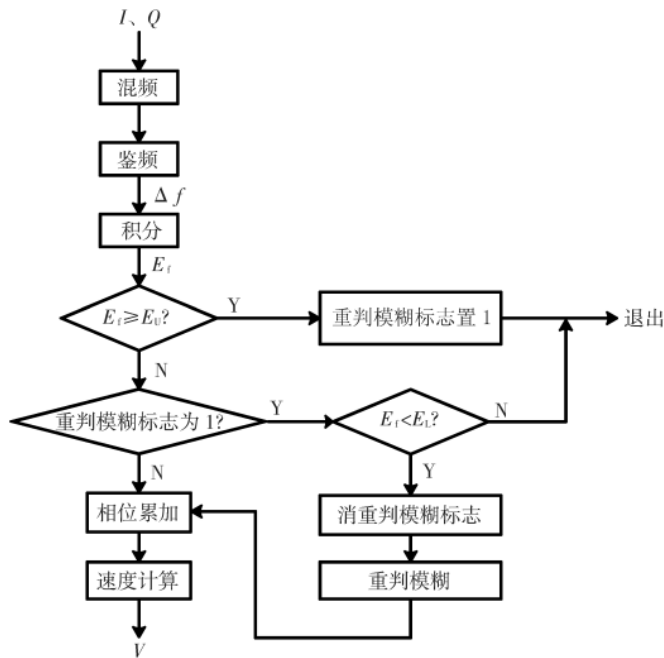


图7 基于鉴频器输出信号能量判别的准则

图中,  $I$ 、 $Q$  为基带信号正交分量,  $\Delta f$  为鉴频器输出的频率误差,  $E_t$  为误差能量积分,  $E_U$ 、 $E_L$  分别为误差能量积分的上、下限。

鉴频器输出时间序列:

$$\Delta f = \{\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \Delta f_4, \dots, \Delta f_N\} \quad (1)$$

误差能量积分:

$$E_t = \sum_{i=1}^N \Delta f_i^2 \quad (2)$$

$E_U$ 、 $E_L$  分别为:

$$E_U = aE_N \quad (3)$$

$$E_L = bE_N \quad (4)$$

其中,  $E_N$  为信噪比为 12 dB 时, 误差能量积分的统计均值, 作为判别的基准值;  $a$ 、 $b$  分别为确定误差能量积分上限与误差能量积分下限的比例系数,  $a > b$ 。

采用上述判别准则, 当回波信号相位发生持续性跳变时, 鉴频器输出振荡, 积分器输出就会超过门限, 测速系统重新消模糊, 当分离事件结束后, 测速结果可以回到正确的结果上, 从而可以修正跳谱线导致的测速误差。

当误差能量积分  $E_t \geq E_U$  时, 测速结果出错, 由测距速度取代测速速度, 重判模糊标志置 1; 当误差能量积分  $E_t < E_L$  且重判模糊标志为 1 时, 表明目标分离事件结束, 回波信号趋于正常, 启动重判模糊, 自动纠正由于目标分离事件导致的跳模糊现象。

### 4 验证效果

本文利用某雷达跟踪飞机时记录的  $I$ 、 $Q$  信号及距离信息与状态码, 对多个圈次的测速过程进行了反演, 采用基于误差能量判别的准则, 测速结果如图 8~图 11 所示, 可见当应答机回波信号发生持续性跳变时, 本方

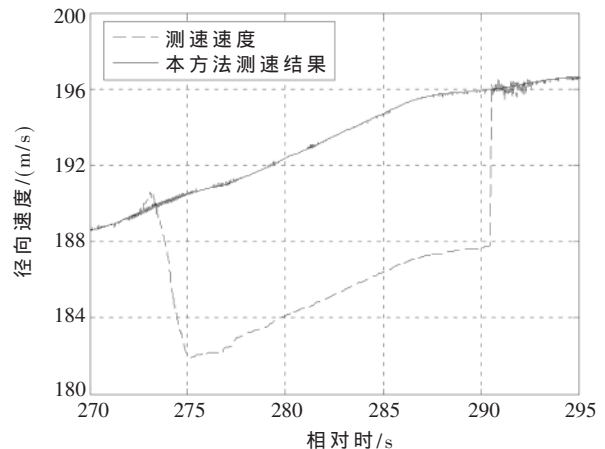


图8 某雷达跟踪机载应答机的测速结果 1

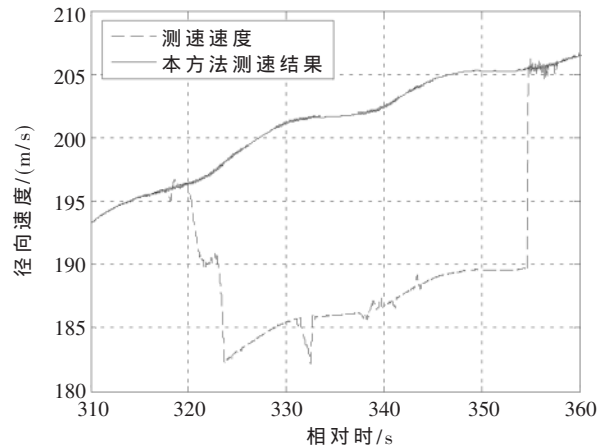


图9 某雷达跟踪机载应答机的测速结果 2

(下转第 58 页)

# 测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

气体检测模块检测、视频拍摄、电缆电子读取均能正常运行,气体浓度种类显示、视频拍摄传输、电缆电子标签读取均达到预期设计效果,证明该装置对于辅助电力检修工人有较大帮助。

## 参考文献

- [1] 陈燕,陈阳.基于 ARM 的井下便携式多气体检测仪研究[J].仪表技术与传感器,2014(3):20-22.
- [2] 郝艳梅,石岩,岳红新.煤矿危险气体探测机器人结构和防爆设计[J].煤炭技术,2016,35(9):260-261.
- [3] 张恒,贺秀玲.基于电力线载波传输技术的井下有毒气体监测系统的设计[J].工矿自动化,2010,36(2):87-89.
- [4] 倪少军.煤矿井下电力电缆故障分析及探测技术应用[J].神华科技,2011,9(2):24-25.
- [5] 杨占龙.恶劣环境下电力电缆故障分析及探测方法[J].商情,2017(5):201.
- [6] 张信安.地下管线探测在电力电缆线路排查中的应用[J].城市道桥与防洪,2014(7):399-401.

- [7] 耿旭旭,张丽,郭灿新,等.便携式 XLPE 电缆绝缘检测装置[J].电工技术,2009(11):27-29.
- [8] 冯凯,郭雨,赵端,等.井下热能量收集装置研究与设计[J].电子技术应用,2018,44(12):93-96.
- [9] 杨扬,陈亮.有毒气体检测报警系统的研究[J].科技风,2019(25):86.
- [10] 岳云涛,贾佳,王靖波.基于 LoRa 无线传输技术的电气火灾监控系统设计[J].电子技术应用,2018,44(12):32-35.
- [11] 喻旻,何峰,徐俊,等.基于窄带物联网技术的电力井感知网络构建[J].江西电力,2018,42(10):40-42.

(收稿日期:2019-10-31)

## 作者简介:

黄震希(1992-),男,硕士,助理工程师,主要研究方向:电力系统及其自动化。

黄毅标(1982-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统及其自动化。

(上接第 52 页)

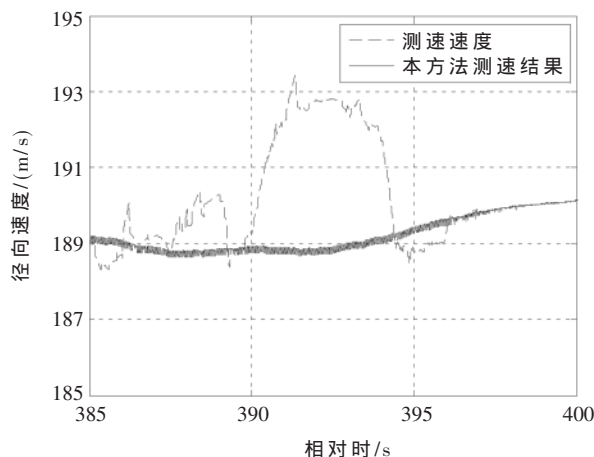


图 10 某雷达跟踪机载应答机的测速结果 3

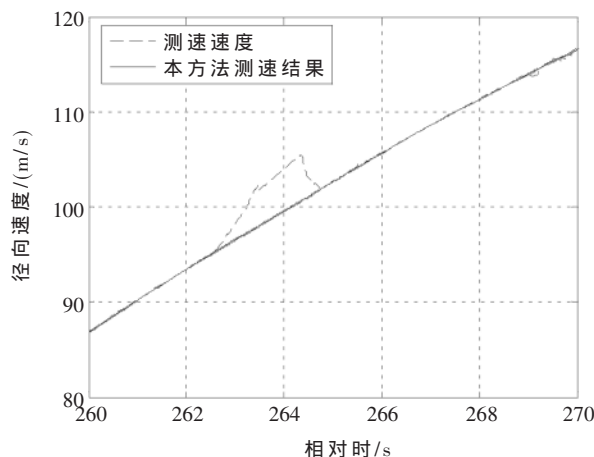


图 11 某雷达跟踪机载应答机的测速结果 4

法均可以保证测速系统持续连续稳定地跟踪,消除了跳谱线的错误。

## 5 结束语

单脉冲测量雷达径向速度参数的测量结果对目标定轨具有重要意义,而测速结果解模糊又是单脉冲测量雷达测速系统的关键,受目标特性的影响,回波信号出现时常跳变,非常容易造成测速结果跳谱线。本文提出的方法通过对测速回路误差能量的判别,可以及时判别跳谱线现象,并及时纠正错误,保证测速结果连续有效。通过对实际雷达记录信号的反演,证明该方法是有效的。

## 参考文献

- [1] 王德纯,丁家会,程望东.精密跟踪测量雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2006.

- [2] 杰里 L·伊伏斯,爱德华 K·里迪.现代雷达原理[M].卓荣邦,杨士毅,张全金,等,译.北京:电子工业出版社,1991.
- [3] BARTON D K, LEONOV S A. Radar technology encyclopedia[M]. [S.l.]: Artech House, 1997.
- [4] 徐敏.单脉冲测量雷达测速技术研究[J].现代雷达,2005,27(1):58-61.
- [5] 蔡玖良,桂佑林,汪文英.一种单脉冲测量雷达测速新方法[J].现代电子技术,2014,37(15):15-19.

(收稿日期:2019-11-21)

## 作者简介:

程望东(1963-),男,研究员级高级工程师,主要研究方向:雷达总体、雷达伺服系统等。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所