

doi: 10.7690/bgzd.2018.10.017

相位测频法在雷达脉冲载频提取中的应用

王磊¹, 曹司磊¹, 曾维贵²

(1. 海军航空大学研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学科研部, 山东 烟台 264001)

摘要: 脉内载频特征是雷达被动信号分选的关键参数, 为提高雷达信号载频特征提取精度, 引入相位测频法。利用希尔伯特变换将原始信号转换为复信号, 进而求取各采样点对应的相位及瞬时频率, 对各点瞬时频率取均值作为信号载频特征。将相位测频法与傅里叶变换法、计数法进行了仿真对比, 结果表明: 相位测频法在低载频、短脉宽的情况下测频精确度优于傅里叶变换法和计数法。因此相位测频法应用于雷达载频特征提取, 能有效提高测频精度和稳定性, 为复杂背景下雷达被动信号分选与识别提供支持与保障。

关键词: 相位测频; 希尔伯特变换; 傅里叶变换; 瞬时频率

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A

Application of Phase Frequency Measuring Method in Radar Pulse Carrier Frequency Measuring

Wang Lei¹, Cao Silei¹, Zeng Weigui²

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Navay Aeronautical University, Yantai 264001, China;*

2. *Department of Scientific & Research, Navay Aeronautical University, Yantai 264001, China)*

Abstract: Pulse carrier frequency measuring is very important in the radar passive signal sorting, in order to improve the accuracy of the radar signal carrier frequency feature extraction, the phase frequency measuring method is introduced in this paper. The original signal is converted into complex signal by using the Hilbert transform, and the phase and instantaneous frequency corresponding to each sampling point are obtained. The mean frequency of each point is taken as the signal carrier frequency characteristic. The phase frequency measuring method is compared with the Fourier transform method and the counting method. The results show that the accuracy of the phase frequency measuring method is better than the Fourier transform method and the counting method in the case of low carrier frequency and short pulse width. Therefore, the phase frequency measuring method which is applied to the radar carrier frequency feature extraction, can effectively improve the accuracy and stability of frequency measurement. It provides support and guarantee for radar passive signal sorting and identification in complex background.

Keywords: phase frequency measuring; Hilbert transform; Fourier transform; instantaneous frequency

0 引言

脉内载频的提取一直都是雷达被动信号分选的重要环节, 所提取载频特征的精确度直接影响信号分选的成功率和后续对目标的识别判读。目前对于数字信号常用的测频方法主要有直接计数法、傅里叶变换法和相位测频法^[1]。直接计数法是一种最简单的测频方法, 通过计量一定信号周期数所占的时间来推算频率。但该方法受信噪比的影响大, 在原始信号为正时, 加上噪声后有可能变为负, 从而造成半周期计数加一, 在很多情况下这种差错是不能容忍的。傅里叶变换法将信号从时域信息变换为频域信息, 在频域中的峰值点所对应的频率即为信号载频, 其测频精度与采用傅里叶变换的点数有关, 点数一般取 2 的整数幂, 点数越大频率分辨率越高,

测频精度也越高, 但伴随而来的是计算复杂度的增加, 且对于短时长低载频的脉冲, 可能会出现基频分量大于真实载频分量的情况, 因而提取的载频为零而非真实载频。

在工程应用中发现, 对于较低信噪比条件下的短脉冲, 以上 2 种方法都无法取得良好的效果。因此, 笔者引入相位测频法, 结合希尔伯特变换, 以期取得良好的测频效果。该方法是通过各点的瞬时相位来求取频率, 不受脉冲长短的影响, 对各点频率做均值滤波, 可以滤除由噪声引起的干扰。

1 希尔伯特变换

希尔伯特变换 (Hilbert transform) 是以著名数学家大卫·希尔伯特 (David Hilbert) 命名。一个连续时间信号的希尔伯特变换, 等于该信号通过具有冲

收稿日期: 2018-07-31; 修回日期: 2018-09-05

作者简介: 王磊 (1992—), 男, 河南人, 硕士, 从事雷达被动信号分析与处理研究。

击响应的线性系统的输出响应,当输入为 $f(t)$ 时,记输出信号为 $\hat{f}(t)$,称 $\hat{f}(t)$ 为 $f(t)$ 的希尔伯特变换^[2],其定义如下:

$$\hat{f}(t) = f(t) \otimes h(t) = f(t) \otimes \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \frac{1}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t-\tau) \frac{1}{\tau} d\tau \quad (1)$$

信号的希尔伯特变换可以看成是信号通过一个幅度为 1 的全通滤波器输出,所以信号经希尔伯特变换后,在频域各频率分量的幅度保持不变,但相位将出现 90° 相移,即对正频率滞后 $\pi/2$,对负频率超前 $\pi/2$;因此,希尔伯特变换器又称为 90° 移相器。信号作希尔伯特变换前后只是相位谱不同,而振幅谱、能量度谱和功率谱都不变,能量和功率也相同,且互为正交^[3]。

假定某雷达脉冲载频经过下变频后,幅值为

$$\begin{aligned} \hat{X}(t) &= [X(t) + \text{noise}] \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \cos[2\pi f_c(t-\tau)] \frac{1}{\pi\tau} d\tau + \text{noise} = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [\cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c \tau) + \sin(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_c \tau)] \frac{d\tau}{\tau} + \text{noise} = \\ &= \frac{\cos(2\pi f_c t)}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(2\pi f_c \tau)}{\tau} d\tau + \frac{2\sin(2\pi f_c t)}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\sin(2\pi f_c \tau)}{\tau} d\tau + \text{noise} = \sin(2\pi f_c t) + \text{noise} \quad (3) \end{aligned}$$

Hilbert 变换后所得信号波形如图 2 所示。

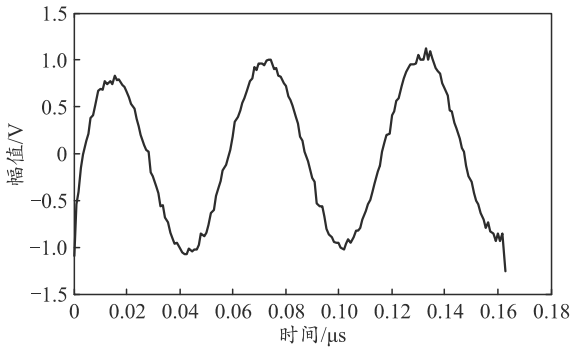


图 2 Hilbert 变换所得信号波形

可得 $X(t) + j\hat{X}(t)$ 形式的复信号如图 3。

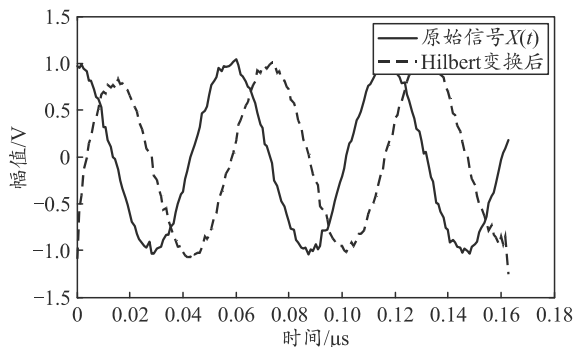


图 3 复信号实部、虚部波形

$A=1\text{V}$, 加上信噪比为 30 dB 的白噪声,采样频率 $f_s=1.1\text{GHz}$,载波频率 $f_c=17\text{MHz}$,脉冲信号波形如图 1 所示,脉冲数据为

$$X(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi_0) + \text{noise} \quad (2)$$

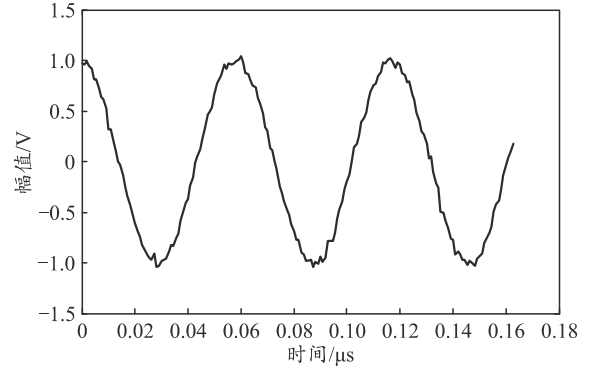


图 1 原始脉冲信号波形

对上述脉冲信号进行希尔伯特变换,根据希尔伯特变换定理^[4]及卷积的分配率可得:

由图可知:原脉冲信号经过 Hilbert 变换后,在信号头和尾处会出现少许畸变,但整体实现了 90° 的相移,为后续各点瞬时相位的提取提供了支持。

2 瞬时相位测频

根据 Hilbert 变换得到的复信号来求取各采样点瞬时相位,进而完成对雷达脉冲信号载频特征的提取^[5]。

2.1 基脉内瞬时相位提取

$$\phi(t) = \begin{cases} \arctan \left[\frac{\hat{X}(t)}{X(t)} \right], & \hat{X}(t) > 0, X(t) > 0 \\ \pi/2, & \hat{X}(t) > 0, X(t) = 0 \\ \pi + \arctan \left[\frac{\hat{X}(t)}{X(t)} \right], & X(t) < 0 \\ 3\pi/2, & \hat{X}(t) < 0, X(t) = 0 \\ 2\pi + \arctan \left[\frac{\hat{X}(t)}{X(t)} \right], & \hat{X}(t) < 0, X(t) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\phi(t)$ 为脉内各点的瞬时相位^[6]，仍以上述载频为 17 MHz 的雷达脉冲信号为例，其脉内各点瞬时相位如图 4、5 所示。

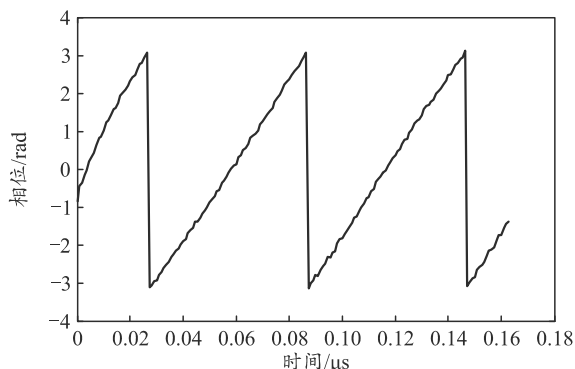


图 4 信号各点瞬时相位

进一步进行相位调整，使整个信号的相位连续。

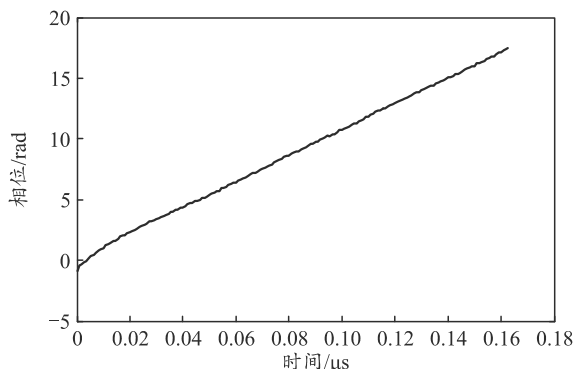


图 5 调整后的各点瞬时相位

2.2 序相位差分提取载频

在提取各点的瞬时相位之后，常用的载频特征求取方法有 2 种：1) 线性拟合，瞬时相位的斜率即为频率，但该方法计算复杂度稍高，对于实时性要求较高的场合不适用；2) 对各点瞬时相位做差分，作为各点的瞬时频率，然后取波形较平稳的区域段做均值^[6]。笔者采取第 2 种方法，即各点瞬时频率取平均。

$$R_f = \frac{\Delta P_h}{T_s} = \Delta P_h \cdot T_s \quad (5)$$

式中： R_f 为各点瞬时频率； ΔP_h 为各点相位差； T_s 为采样周期。

3 仿真分析

为验证相位测频法的有效性，用 Matlab 进行仿真实验，在不同信噪比条件下对不同脉宽的雷达脉冲信号进行测频，并与傅里叶变换法、计数法进行对比分析，其中傅里叶变换采用 1 024 点。设定 4 组脉冲，分别在 30 和 20 dB 信噪比条件下，载频为

17 和 3.5 MHz 的雷达脉冲进行测频对比。每组实验进行 100 次，分别用 100 次测频结果的均值和结果的标准差对比各算法的测频准确度和稳定性。

第 1 组：30 dB 信噪比条件下的脉宽为 0.18 μ s，载频为 17 MHz 的脉冲，如表 1 所示。

表 1 30 dB 信噪比 17 MHz 载频测量对比 MHz

测频方法	测频均值	测频标准差
傅里叶变换法	17.19	0
计数法	17.09	0.82
相位测频法	17.08	0.10

第 2 组：30 dB 信噪比条件下的脉宽为 0.18 μ s，载频为 3.5 MHz 的脉冲，如表 2 所示。

表 2 30 dB 信噪比 3.5 MHz 载频测量对比 MHz

测频方法	测频均值	测频标准差
傅里叶变换法	0	0
计数法	7.36	4.39
相位测频法	3.51	0.15

第 3 组：20 dB 信噪比条件下的脉宽为 0.18 μ s，载频为 17 MHz 的脉冲，如表 3 所示。

表 3 20 dB 信噪比 17 MHz 载频测量对比 MHz

测频方法	测频均值	测频标准差
傅里叶变换法	17.19	0
计数法	23.25	5.81
相位测频法	16.97	0.22

第 4 组：20 dB 信噪比条件下的脉宽为 0.18 μ s，载频为 3.5 MHz 的脉冲，如表 4 所示。

表 4 20 dB 信噪比 3.5 MHz 载频测量对比 MHz

测频方法	测频均值	测频标准差
傅里叶变换法	0	0
计数法	25.33	7.96
相位测频法	3.50	0.42

对比前 2 组数据可以发现：在信噪比较高的条件下，对于较高载频的脉冲信号，3 种方法都能取得较好的效果，其中傅里叶变换法的稳定性最好。对于较低载频的脉冲信号，傅里叶变换法受到基波影响，零频处幅度最大，测频值为零；计数法受到噪声的影响，测频结果严重偏离真实频率；只有相位测频法能够得出较为准确的结果。对比后 2 组数据可以看出，在较低信噪比条件下，对于较高载频的脉冲信号，傅里叶变换法和相位测频法都能得到较为准确的结果。其中傅里叶变换法的稳定性非常好，而计数法由于噪声的干扰，测频误差很大。对于较低载频的脉冲信号，傅里叶变换法和计数法得出的结果都偏离真实值非常大，只有相位测频法依然能够得出比较理想的结果。由于本仿真实验采用 1 024 点的傅里叶变换算法，1.1 GHz 采样频率，故

其频率分辨率约为 1.07 MHz, 只要频率波动不超过分辨率的一半, 其测频结果就不会有变动; 因此, 在 4 组数据中傅里叶变换的测频结果标准差才一直为零。

4 结束语

笔者针对被动雷达测频精度问题, 引入了相位测频法, 并在多种条件下与测频常用的傅里叶变换法、计数法进行了仿真对比。实验结果表明: 在较高载频和信噪比的条件下, 3 种方法相差无几; 但对于信噪比较低且波形未达到一个完整周期的低载频频脉冲而言, 傅里叶变换法和计数法都无法准确提取载频值, 只有相位测频法在所进行的 4 组实验中一直表现良好。由此可知, 相位测频法可应用于雷达脉冲载频提取, 能明显提高测频精度和鲁棒性, 可进一步应用于雷达脉内载频调制和脉内动态指纹

(上接第 80 页)

通过以上仿真结果可以看出: 在电视跟踪系统其他参数确定的情况下, 分别改变目标有效反射面积、系统焦距、能见度等参数, 能够对系统的作用距离产生较为明显的影响。

另外, 在本仿真算法中, 初始作用距离 R_0 与步长 d 的选取对计算量有直接影响, 适当的取值可减少仿真计算次数、提高计算精度。如果 R_0 较实际值大, 则 d 为负值; 如果 R_0 较实际值小, 则 d 为正值。如果 d 值较大, 则收敛速度较快; 反之, 则收敛速度较慢, 但计算精度较高。 d 的选取应根据实际计算精度要求确定。

5 结束语

笔者分析了电视跟踪需要满足的 3 个条件, 提出了一种基于 MODTRAN 的电视跟踪系统作用距离仿真计算方法, 建立了基于 MODTRAN 的电视跟踪系统作用距离仿真计算系统, 进行了多次仿真计算, 并通过 Matlab 对仿真结果进行了分析。该仿真计算方法可以对比分析单一因素对作用距离的影响, 能为电视跟踪系统设计提供参考, 有一定的工程实用价值。

特征的分析识别。

参考文献:

- [1] 胡来招. 数字瞬时测频——直接计数法测频[J]. 电子对抗, 2004, 27(5): 44-49.
- [2] HAHN S L. Hilbert Transform in Signal Processing[J]. Artech House Publish, 1996, 23(4): 34-38.
- [3] 颜彪, 杨娟. 关于希尔伯特变换的分析和研究[J]. 电气电子教学学报, 2004, 26(5): 27-29.
- [4] 胡志祥, 任伟新. 基于递归希尔伯特变换的振动信号解调和瞬时频率计算方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 39-43.
- [5] 朱泽锋, 张军, 孟凯. 基于 DRFM 的脉冲雷达干扰信号产生方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016(12): 90-94.
- [6] 刘莲霞, 孔辉, 谢一春. 相位测频法在雷达信号脉内特征分析中的应用[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(4): 77-79.
- [7] 汪正军, 潘磊, 纪国瑞. 基于离散相位差检测的频率测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 994-1000.

参考文献:

- [1] 史学舜, 刘红元. 成像跟踪系统作用距离测试方法探讨[J]. 科技信息, 2009, 26(29): 807-807, 845.
- [2] 赵妙娟, 车宏. 军用光电系统作用距离分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(Z2): 501-503.
- [3] 赵建川, 姜润强, 王伟国. 光电跟踪仪作用距离分析[J]. 光电技术应用, 2009, 24(3): 15-16, 43.
- [4] 王杰, 孙艳丽, 周伟. 基于多特征直方图的红外图像目标跟踪[J]. 兵器装备工程学报, 2017(8): 103-106.
- [5] 王伟国, 陈涛, 张同双, 等. 电视成像系统作用距离分析[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 948-950.
- [6] 王迪, 李承芳, 熊飞. 大气红外辐射传输的简便算法与 MODTRAN 的比较[J]. 光学技术, 2006, 32(Z1): 293-295.
- [7] 马鹤. 基于 MODTRAN 的复杂大气条件下红外系统作用距离计算[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [8] 楚天鹏. 不完全信息下分布式目标跟踪算法[J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 39-44.
- [9] 张志波. Lowtran 在红外成像仿真中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(7): 24-26.
- [10] 邱杰, 吴涛, 孙进平. 一种被动雷达探测系统仿真平台的设计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(2): 64-65.
- [11] 远菲, 毛征, 吕春花, 等. 激光探测系统仿真技术研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(2): 144-147, 187.
- [12] 李惠明, 赵东华, 李超, 等. 基于 FPGA 技术的旋转编码器跟踪模拟训练系统研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(4): 32-34.