

窄带色散系统的群时延与包络时延的关系

王建武^{*①②} 冯正和^①

^①(清华大学电子工程系 北京 100084)

^②(空军空降兵学院二系 桂林 541003)

摘要: 该文探讨了调制信号经过色散窄带系统时,群时延与相关时延之间的关系,分析了色散对系统时延校准的影响。当信号经过系统时,信号包络的时延主要由上升沿与下降沿的变形引起。对矩形脉冲调制、三角脉冲调制、余弦脉冲调制以及线性调频脉冲调制的研究表明,相关时延不等于系统在载波频率点的群时延,近似为群时延的加权平均,加权值为信号频谱分布与系统幅度响应的乘积。利用群时延对系统相关时延校准时,系统相位响应的线性度越好,校准精度越高。

关键词: 信号处理;色散;群时延;相关时延;滤波器

中图分类号: TM931

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)12-3042-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2014.00008

The Relationship between the Group Delay and Envelope Delay of a Narrow-band Dispersive System

Wang Jian-wu^{①②} Feng Zheng-he^①

^①(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(Second Department, Air-force Air-Born Academy, Guilin 541003, China)

Abstract: In this paper, the relationship between the group delay and correlation delay is discussed, and the influence of dispersion on the calibration of a system is analyzed, when a modulated signal passes through a dispersive narrow-band system. The envelope delay of a modulated signal is caused by the distortion of its rising and falling edges when it passes through a system. The researches on the modulated signals, including the rectangular pulse modulation, triangular pulse modulation, cosine pulse modulation and chirp modulation, show that the correlation delay is different from the group delay of the system at the point of the carrier frequency. The correlation delay is approximate to the weighted average of the group delay, and the weighting factor is the product of the spectrum of the signal and the amplitude response of the system. When the group delay is used to calibrate the correlation delay, the linearity of the phase response of the system becomes better, the calibration is higher.

Key words: Signal processing; Dispersion; Group delay; Correlation delay; Filter

1 引言

信号时延的测量在测距、定位、深空探测等领域发挥着至关重要的作用。特别是随着高精度定位、深空探测的发展,要求系统与系统间具有高精度的时间同步,对信号绝对时延的测量精度要求日益提高。在工程中,利用调制信号实现时延的测量。因此,信号时延的测量在本质上就是测量信号调制包络的时延。相关法与群时延法被广泛地应用于信号时延的测量。其中,相关法是最基本、应用最广泛的方法^[1,2]。相关法的基本原理是:将输出信号与参

考信号进行相关运算,通过搜索相关函数的峰值实现信号时延的测量。为了获得高精度的时延估计,相关法测量时延的研究主要集中于算法的研究^[3-7]。相关法的测量精度主要受到时间截取长度、噪声、A/D采样率以及垂直分辨率等因素的影响。群时延法在频域实现信号时延的测量^[8-10],克服了相关法中时间截取长度、A/D采样率以及垂直分辨率等因素的影响。随着混频器群时延测量技术的发展,群时延法无法应用于变频系统的缺陷也得到了有效地弥补^[11-14]。

相关法与群时延法在工程中具有不同的应用侧重点。相关法主要应用于具体的长距离时延测量系统中,如各种雷达、全球定位系统等。群时延法主要应用于通用测量仪器中,如矢量网络分析仪,用

2014-01-03 收到, 2014-06-13 改回

国家 973 计划项目(2013CB329002)和国家自然科学基金(61371012)资助课题

*通信作者: 王建武 wangjianwuradar@163.com

于对器件、收-发系统等的时延进行分析、测量以及校准。通过合理的调整测量口径及改进算法，能够实现高精度地群时延测量^[10]。然而，当将群时延应用于高精度的系统时延校准时，存在一个不可忽视的问题：收-发系统，特别是窄带收-发系统，是色散的，群时延在一定带宽内并不是唯一的；而相关法测量时延时，只要系统与信号波形一定，时延的测量值是唯一的。要将群时延应用于系统时延的高精度校准，必须讨论群时延与相关法测得的包络时延之间的关系，分析色散对系统时延校准的影响。文献[15]研究了色散对DS-chirp信号匹配接收性能的影响；文献[16,17]将群时延进行泰勒展开，分别研究了线性和抛物线色散对伪距的测量的影响。在现有的研究中，研究者将重点放在了群时延的定义的研究上，没有对色散系统的群时延与相关法测得的包络时延之间的关系进行探讨。针对这种情况，本文将讨论调制信号经过色散系统时的相关法测得的包络时延与群时延间的关系，分析色散对系统时延校准的影响。由于在窄带收-发系统中，系统的带宽主要由滤波器决定，且滤波器是引起系统包络时延以及色散的一个重要因素。因此，本文就以带通滤波器为研究对象。为便于描述，本文将相关法测得的包络时延简称为相关时延。

2 相关时延与群时延

在测距、定位系统中，为了有效地抑制带外的干扰，系统都具有带通特性。典型的带通系统都具有色散特性，即群时延在通频带内是非恒定的，且过渡带越陡、带宽越窄，色散现象越明显。在信号经过色散的带通系统时，输出信号 $g(t)$ 与激励信号 $f(t)$ 的相关函数为^[1,2]

$$R_{gf}(\zeta) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t+\zeta)f(t)dt \quad (1)$$

当 $R_{gf}(\tau) = \max[R_{gf}(\zeta)]$ 时，即 $g(t)$ 与 $f(t)$ 具有最大相似程度时， τ 为信号包络的时延。由相关运算与傅里叶变换的关系^[18,19]，可将式(1)表示为

$$\begin{aligned} R_{gf}(\zeta) &= \text{FFT}^{-1}[-jG(\omega)F^*(\omega)] \\ &= \text{FFT}^{-1}[-jF(\omega)H(\omega)F^*(\omega)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $F(\omega)$ ， $G(\omega)$ 分别为 $f(t)$ ， $g(t)$ 的傅里叶变换。 $H(\omega)$ 为系统响应函数； FFT^{-1} 为傅里叶逆变换；由式(1)和式(2)可以看出，相关法测量信号的包络时延时，将信号在整个频域作为一个整体考虑，测得的时延由信号频谱、系统响应函数共同决定。

群时延的定义为^[8-10]

$$\tau_d = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (3)$$

式中， $\phi(\omega)$ 为系统的相位响应函数。依据微分的原始定义，式(3)描述的物理意义为：单位频率调制的信号经过系统时，调制信号的相位在载波频率点 ω 处产生的延迟。由于当信号相位一致时，信号间具有最大的相似程度。因此，群时延在本质上也是利用信号间的最大相似程度进行测量，与相关法测量信号的时延在本质上是一致的。二者的差异为：相关法将信号视为一个整体，测量的是信号在整个带宽内的合成时延；群时延测量的是信号带宽内各频率分量的时延，没有将整个信号带宽作为一个整体来考虑。因此，相关法测得的时延才是信号的整体时延，群时延不具备描述信号整体时延的能力。由群时延确定信号整体时延的问题，本质就是寻找局部时延与整体时延间的关系。

为了体现局部与整体的关系，将相关时延 τ 与群时延 τ_d 的关系假设为

$$\tau = \frac{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} A(n\Delta\omega)\tau_d(n\Delta\omega)}{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} A(n\Delta\omega)} \quad (4)$$

式中， $A(\omega) = |F(\omega) \cdot H(\omega)|$ 为输出信号的频谱分布函数； $\tau_d(\omega)$ 为系统的群时延函数。推广到连续谱分布情形，相关时延 τ 与群时延 τ_d 的关系可以假设为

$$\tau = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) \cdot \tau_d(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) d\omega} \quad (5)$$

然而，式(4)和式(5)仅仅是一种假设，其合理性需进一步验证。

3 仿真实验

3.1 仿真验证及分析

本文采用时域瞬态仿真实验的方法来验证式(4)的计算结果与相关法测量结果的一致性。仿真时，选取了矩形脉冲调制、三角脉冲调制、余弦脉冲调制以及线性调频脉冲调制 4 种调制方式。图 1 为载波频率 100 MHz 时，上述 4 种调制脉冲分别经过中心频率 100 MHz、带宽 10 MHz 的四阶巴特沃斯滤波器时的时延值。由图 1 可见，对于本文研究的 4 种调制信号，由式(4)得到的结果与相关法得到的时延在整体变化趋势上一致。因此，式(4)和式(5)在一定程度上描述了窄带色散系统群时延与相关时延间的关系。

在图 1 所示的结果中，矩形调制脉冲存在一个特殊的现象：当脉冲宽度较宽时，相关法得到的时延为常数，与式(4)的计算结果存在明显的差异。由于信号经过滤波器时，信号包络的波形发生变形，且信号包络的这种变形主要集中于上升沿与下降沿，如图 2 所示。信号经过系统时所产生的包络时延，主要就是由上升沿与下降沿的变形引起的。对

于三角调制脉冲和余弦调制脉冲, 上升沿与下降沿的陡峭程度随信号带宽(脉冲宽度)变化, 使得上升沿与下降沿的变形也与信号带宽有关; 而对于线性调频脉冲, 脉冲内部的变化与带宽有关, 使得调频包络内部的变形与信号带宽有关。因此, 对上述3种调制信号, 信号包络的变形与系统的色散特性有关, 而式(4)和式(5)考虑了色散对信号包络的影响, 从而能够近似地描述相关时延与脉冲宽度(或带宽)之间的关系。对于矩形调制脉冲, 无论脉冲宽度多宽, 上升沿与下降沿的波形是固定的。当系统一定时, 上升沿与下降沿的最大变形一定。因此, 当矩形脉冲宽度达到一定值时, 相关法得到的时延为常数, 且这个常数不等于载波点的群时延。

3.2 色散对时延校准的影响

从图1可以看出, 式(4)虽然在总体上反映了群时延与相关时延之间的关系, 但是由于色散带来的包络变形的复杂性, 由式(4)计算得到的时延与相关

时延之间依然存在一定的误差。图3为不同调制信号分别经过中心频率100 MHz、带宽10 MHz的四阶巴特沃斯滤波器和六阶贝塞尔滤波器时, 式(4)计算的时延与相关时延之间的误差。相比于巴特沃斯滤波器, 贝塞尔滤波器在通带内具有更好的线性相位响应。由图3可见, 本文研究的4种调制信号经过贝塞尔滤波器时, 由式(4)计算得到的时延与相关时延之间的误差明显小于它们经过巴特沃斯滤波器时的误差。因此, 要基于群时延的测量实现高精度的系统时延校准, 系统具有良好的线性相位响应是一个重要的前提条件: 相位响应的线性度越好, 利用群时延的校准精度越高。

4 结束语

本文对窄带色散系统相关时延与群时延的关系进行了研究, 为利用群时延实现高精度的系统时延校准提供了有益的指导意见。理论分析与时域仿真

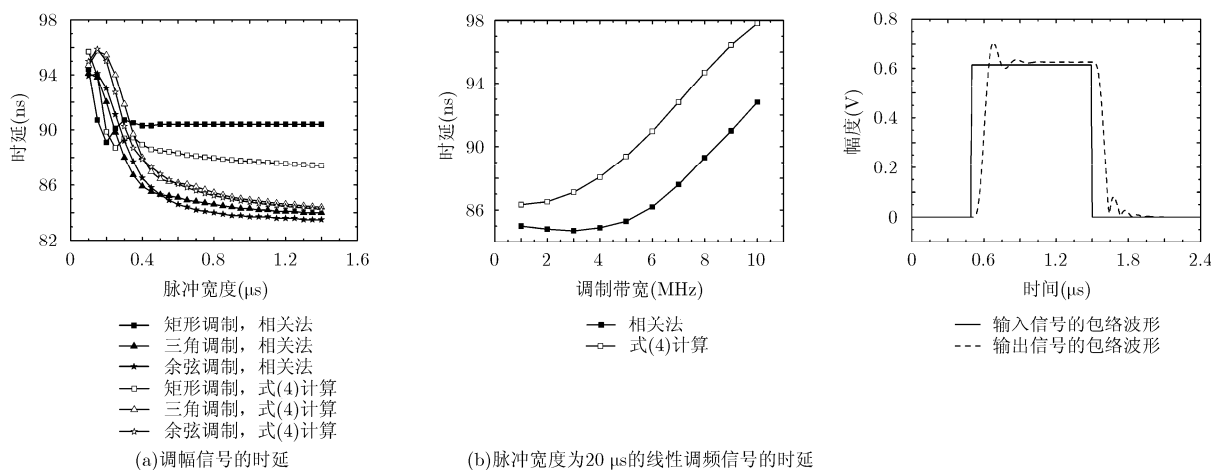


图1 调制信号经过巴特沃斯滤波器时的时延

图2 矩形调制信号的输入与输出包络波形

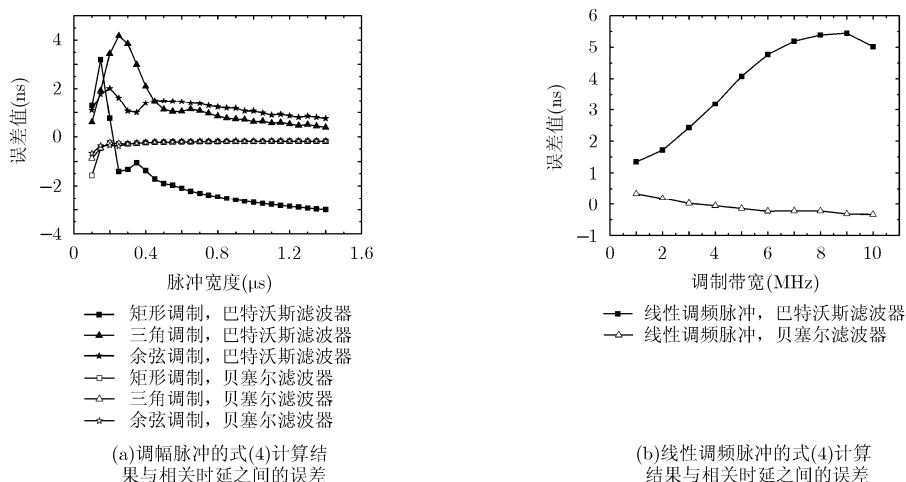


图3 调制信号经过滤波器时式(4)的计算结果与相关时延间的误差

实验表明, 对于窄带色散系统, 相关时延区别于载波频率点的群时延, 近似为系统群时延的加权平均。利用群时延的加权平均来近似地计算信号的包络时延时, 误差与系统的色散特性有关: 系统色散越明显, 误差越大。而在窄带系统设计时, 良好的线性相位响应与优良的带外抑制性能之间是相互矛盾的。因此, 如何有效地解决这对矛盾, 对利用群时延测量实现高精度的系统时延校准具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 黎英云. 微弱多径信号时延估计技术研究[D]. [博士学位论文], 华中科技大学, 2009.
Li Ying-yun. Research on time delay estimation technologies for extremely weak signal in multipath environments[D]. [Ph.D.dissertation], Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [2] 张光斌. 双/多基地雷达参数估计算法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2006.
Zhang Guang-bin. Study on parameter estimation algorithms for bi/multi-static radar[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2006.
- [3] Wang Zhi, Luo Ji-an, and Zhang Xiao-ping. A novel location-penalized maximum likelihood estimator for bearing-only target localization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(12): 6166-6181.
- [4] Viola F and Walker W F. A spline-based algorithm for continuous time-delay estimation using sampled data[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonic's, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2005, 52(1): 80-93.
- [5] Hayvaci H T, Setlur P, Devroye N, et al. Maximum likelihood time delay estimation and Cramér-Rao bounds for multipath exploitation[C]. Proceedings of 2012 IEEE Radar Conference (RADAR), Atlanta, USA, 2012: 764-768.
- [6] Masmoudi A, Bellili F, and Sofiene A. A maximum likelihood time delay estimator in a multipath environment using importance sampling[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(1): 182-193.
- [7] Fang Xi, Yang Chuan-chuan, and Zhang Fan. Time-domain maximum-likelihood channel estimation for PDM CO-OFDM systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(6): 619-622.
- [8] 朱峰, 李孝辉, 王国永. 滤波器群时延分析及其对导航信号的影响[J]. *电子测量技术*, 2013, 36(5): 54-57.
Zhu Feng, Li Xiao-hui, and Wang Guo-yong. Analysis of the filter group delay and its impact on navigation signal[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2013, 36(5): 54-57.
- [9] 刘涛. 群时延的快速测量方法[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(2): 369-371.
Liu Tao. Fast method of group delay measurement[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(2): 369-371.
- [10] Zhu Xiang-wei, Li Yuan-ling, Yong Shao-wei, et al. A novel definition and measurement method of group delay and its application[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(1): 229-233.
- [11] Scott J and Hoy M. Group-delay measurement of frequency-converting devices using a comb generator[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(11): 3012-3017.
- [12] Thilo B. Phase- and group delay measurements over large distances[C]. Proceedings of the 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Prague, Czech Republic, 2012: 2275-2279.
- [13] Korotkov K S, Frolov D R, and Levchenko A S. The method for accurate measurements of absolute phase and group delay of frequency converters[C]. Proceedings of the 2013 23rd International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), Sevastopol, Ukraine, 2013: 938-939.
- [14] Truong M L, Knox M, and Dunsmore J. Highly accurate absolute group delay measurement technique for frequency-translation devices[C]. Proceedings of the 28th European Microwave Conference, Amsterdam, Netherlands, 1998: 98-103.
- [15] 王永民, 苟彦新. 群时延波动对DS-chirp信号匹配接收性能的影响[J]. *空军电讯工程学院学报*, 1997, (1): 1-6.
Wang Yong-min and Gou Yan-xin. The analysis of the effect on matched receiving performance of DS-Chirp signal produced by group- delay distortion[J]. *Journal of Air Force Telecommunication Engineering Institute*, 1997, (1): 1-6.
- [16] 田嘉, 王伟, 史平彦. 群时延对测距误差的影响[J]. *空间电子技术*, 2012, (3): 14-16.
Tian Jia, Wang Wei, and Shi Ping-yan. Effects of group delay on the range error[J]. *Space Electronic Technology*, 2012, (3): 14-16.
- [17] 朱祥维, 孙广富, 雍少为, 等. 相位非线性畸变对 GPS 伪距测量的影响[J]. *国防科技大学学报*, 2008, 30(6): 101-106.
Zhu Wei-xiang, Sun Guang-fu, Yong Shao-wei, et al. The impact of phase nonlinear distortion to GPS[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(6): 101-106.
- [18] Perry P and Brazil T J. Hilbert-transform-derived relative group delay[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, 45(8): 1214-1224.
- [19] Cabot R C. A note on the application of the Hilbert transform to time delay estimation[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, 29(3): 607-609.

王建武: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为系统时延的测量与校准。

冯正和: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字技术与计算电磁学、射频与微波电路、无线通信、智能天线以及空时信号处理。