doi:10.11887/j.cn.201404011 http://journal.nudt.edu.cn

VFD滤波器的导航信道模拟器动态时延模拟方法*

沙 海,黄新明,张 鑫,牟卫华,欧 钢
(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:针对卫星导航信道模拟器信号仿真中,传统伪距多普勒模拟方法瞬时控制精度差、滤波器资源占用较大的不足,提出了基于拉格朗日插值延迟滤波器及Farrow结构实现的伪距多普勒模拟方法。在分析信道模拟器系统架构的基础上,建立了多普勒模拟方法的模型,包括延时计算模块和可变延迟滤波器两部分。与多速率采样数字延迟滤波器方法比较,该方法滤波器系数个数约为后者的0.2%,并且改变时延特性时,仅需更新1个参数。信道模拟器实测数据结果表明使用该方法伪码多普勒模拟精度可以达到0.1mHz。

关键词:卫星导航;信道模拟器;伪距多普勒;可变分数延迟滤波器;Farrow结构
中图分类号:TP914.41 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)04-0061-05

Method of pseudo-range Doppler simulation in navigation channel simulator on VFD filter

SHA Hai, HUANG Xinming, ZHANG Xin, MOU Weihua, OU Gang
(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In satellite navigation channel simulator, the traditional pseudo-range Doppler simulation method has some flaws, such as the low delay accuracy and the large filter resource. A new Doppler simulation method is proposed, using Lagrange interpolation variable fraction delay filter and Farrow structure. Based on analyzing the system architecture of channel simulator, the model of Doppler simulation was established, including the delay calculation module and variable delay filter. Compared with the multi-rate sampling digital delay filter method, the proposed method is just about 0.2% of the former filter resource, and the one parameter is just changed when the delay of filter is changed. Actual measured results with channel simulator indicate that the Doppler accuracy is 0.1 mHz.

Key words: satellite navigation; channel simulator; pseudo-range Doppler; variable fraction delay filter; farrow structure

卫星导航信道模拟器作为一种高精度的测量设备,能够精确模拟载体接收到的卫星导航信号在空间传播中的各种特性,包括空间信道传输时延、电离层延迟、对流层延迟、多普勒频移以及功率衰减等。与信号模拟器的最大区别在于,其功能的实现与输入信号的结构和播发导航电文的编排格式无关。因此信道模拟器可以在外部仅提供原始静态信号的条件下,模拟各种动态信号。目前只有少数国外公司研制卫星导航信道模拟设备。近年来,我国自主建立的北斗卫星导航系统已实现了区域服务能力,正处于全球导航信号体制及其他信号体制设计论证阶段,而信道模拟器可以为不同信号体制验证及其接收机设备的研制,提供可靠、稳定和易用的仿真测试环境,对北斗卫星导航系统的建设具有重要的现实意义。

卫星导航信道模拟器研制涉及多普勒模拟、载波相位控制、信道特性仿真等多项复杂技术。其中高动态条件下的动态多普勒模拟是卫星导航信号仿真的关键技术[1-6]。通常采用的动态多普勒模拟技术主要分为两类:一类是基于码数控振荡器(Numerically controlled oscillators, NCO)动态查表的直接数字合成(Direct Digital Synthesize, DDS)技术[1-2](简称NCO方法);另一类是基于多速率采样数字延迟滤波器的延迟控制方法[3-4]。NCO方法存在瞬时伪距控制精度、通道一致性与零值控制稳定性等缺陷[4],需要已知信号结构构造查找表;而多速率采样数字延迟滤波器控制方法在模拟较高精度和动态延迟时,需要查找并更新多个滤波器系数,占用资源较多。

动态多普勒模拟本质上是实现一定精度条件下任意时延的动态控制,因此可以采用可变分数延迟(Variable Fraction Delay, VFD)滤波器技术,

* **收稿日期**:2011-06-01
基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0144)
作者简介:沙海(1984—),男,河南新乡人,博士研究生,E-mail:sandhai@163.com;
欧钢(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:ougang@nudt.edu.cn

而多速率采样数字延迟滤波器本身也是一种分数延迟滤波器的设计方法。文献[7]对数字延迟滤波器的设计方法进行了综述;文献[8 – 13]针对 VFD 滤波器提出了各种有效及改进的设计方法;文献[14 – 16]针对 VFD 滤波器的高效实现结构进行讨论,提出了并行 Farrow 结构[14]、串行一阶微分器结构[15]、混合结构[16]等方法。

1 信道模拟器系统架构

卫星导航信道模拟器可以在输入信号结构和电文编排格式未知的条件下,根据用户的动态特性、卫星轨道数据、信道传播特性等,模拟产生接收机接收的射频信号,其系统架构如图 1 所示。

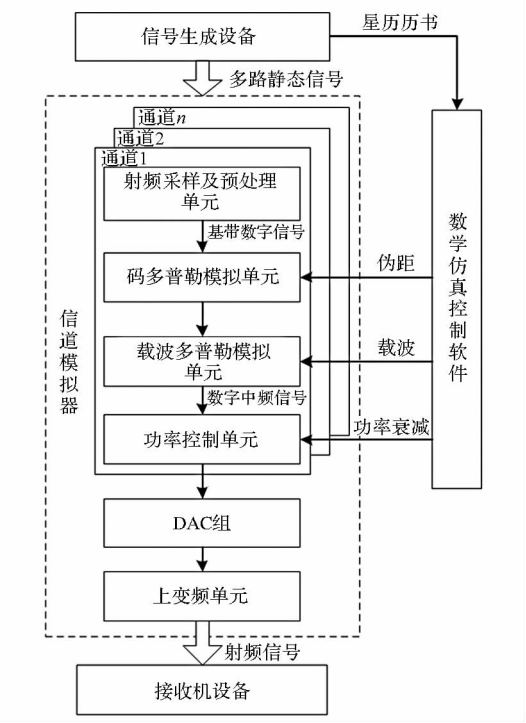


图 1 信道模拟器系统架构

Fig. 1 System structure of channel simulator

信号生成设备(例如卫星导航信号载荷、信号模拟器等)产生的多路静止原始射频信号,经过信道模拟器射频采样后,分配至不同通道分别进行信道模拟。数学仿真控制软件根据仿真场景,实时计算各个通道的伪距、载波相位、功率衰减等数据,并将仿真控制参数发送至码多普勒模拟单元、载波多普勒模拟单元和信号功率控制单元,最终实现具有信道动态特性的输出信号。

2 多普勒模拟方法

信道模拟器的多普勒模拟方法包括码多普勒模拟和载波多普勒模拟,其中载波多普勒模拟可以采用与信号模拟器相同的三阶 DDS 方法生成[5],本文不予讨论。而对于码多普勒模拟,由于信号伪码生成方式及电文格式未知,只能通过对数字正交下变频之后的基带采样信号进行动态延迟处理。其中整数采样点延时可以采用数据缓冲区地址移位操作实现,而小数采样点延迟则可以采用 VFD 滤波器实现,具体实现原理如图 2 所示。

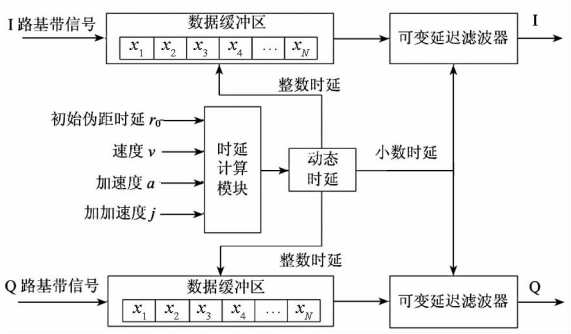


图 2 码多普勒模拟原理

Fig. 2 Theory of code Doppler simulation

经过数字正交下变频后的 I/Q 基带信号首先存储在数据缓冲区中;时延计算模块根据外部输入的伪距及其各阶变化率参数,实时计算当前动态延迟量;最后根据动态延迟量控制数据缓冲区地址及 VFD 滤波器延迟特性,实现不同时刻伪距时延的动态控制。

2.1 时延计算模块

时延计算模块根据数学仿真软件发送的伪距及其各阶变化参数,实时产生当前时刻的延迟量。为了满足高动态模拟需求,采用 3 阶累加器结构实现[2, 17]。累加器输出相位的模值 M 表示一个采样点的延迟量,因此,时延计算模块的相位值 $p(n)$ 与数学仿真软件的伪距值 $\theta(n)$ 之间的关系为

$$\frac{p(n)}{M}\frac{f_c}{f_s}=\theta\left(\frac{n}{f_s}\right) \tag{1}$$

其中,f_c 为伪码速率,f_s 为采样速率。由此可以解得各级累加参数与伪距 r、速度 v、加速度 a、加加速度 j 的关系表达式[2]。

按照文献[3]高动态仿真实验条件,验证时延计算模块的时延计算精度。取加加速度为 1000m/s^3,每 10ms 更新一次参数。仿真结果如图 3、图 4 所示,20s 时间内最大时延误差 0.8mm,最大码多普勒误差 0.04mHz。

2.2 可变延迟滤波器

可变延迟滤波器需要根据时延计算模块相位值的小数部分实时调整 VFD 滤波器的时延特性,选择基于拉格朗日插值(又称最大平坦度准则)的有限脉冲响应滤波器(Finite Impulse Filter, FIR)设计方法[7],并采用高效 Farrow 结构进行实现。该

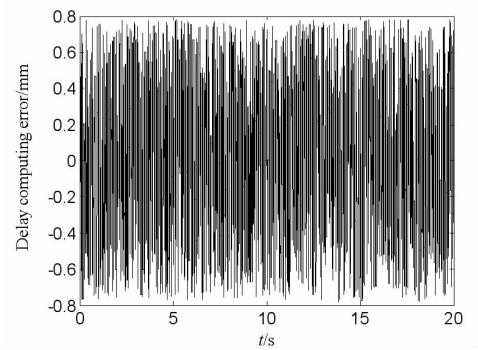


图 3　时延计算误差

Fig. 3　Delay computing error

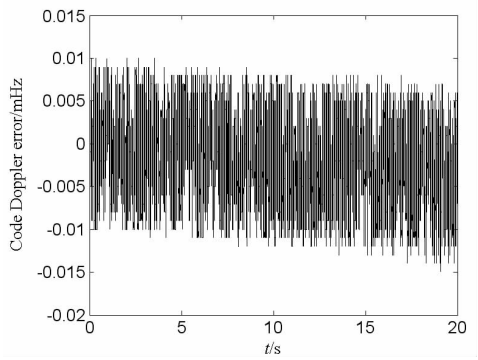


图 4　码多普勒误差

Fig. 4　Code Doppler error

方法不仅精度较高,而且滤波器结构简单、高效。适合现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array,FPGA)等器件开发。

设时延量为 $D(D<1)$ 倍采样点延迟时,理想 VFD 滤波器频域响应为

$$H_{id}(e^{j\omega}) = e^{-j\omega D} \tag{2}$$

而实际 VFD 滤波器频域响应 $H(e^{j\omega})$ 与 $H_{id}(e^{j\omega})$ 的频域误差函数为:

$$E(e^{j\omega}) = H(e^{j\omega}) - H_{id}(e^{j\omega}) \tag{3}$$

基于拉格朗日插值的 VFD 滤波器设计方法[7]的数学原理是使得频域误差函数的导数在 $\omega=0$ 处为 0,即

$$\left.\frac{d^n E(e^{j\omega})}{d\omega^n}\right|_{\omega=\omega_0} = 0,\ n=0,\ 1,\ \cdots,\ N \tag{4}$$

其中,N 为 VFD 滤波器阶数,通过求解 $N+1$ 个线性等式的解,可得基于拉格朗日插值的 VFD 滤波器系数为[7]:

$$h(n) = \prod_{\substack{k=0\\k\neq n}}^{N} \frac{D-k}{n-k} = \sum_{k=0}^{N} c(n,k) D^k \tag{5}$$

该滤波器进一步可表示为

$$\begin{aligned} H(z) &= \sum_{n=0}^{N} h(n) z^{-n} \\ &= \sum_{n=0}^{N} \sum_{k=0}^{N} c(n,k) D^k z^{-n} \\ &= \sum_{k=0}^{N} G_k(z) D^k \end{aligned} \tag{6}$$

$H(z)$ 可以看作是时延 D 对 N 个滤波器组输出的加权和,基于这种思想,Farrow 提出了滤波器高效结构[14],其实现结构如图 5 所示。

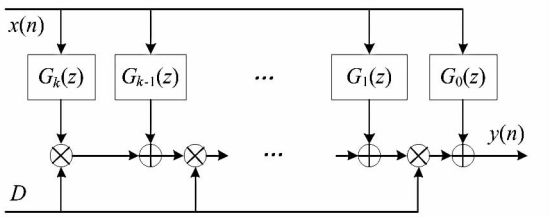


图 5　VFD 滤波器 Farrow 结构

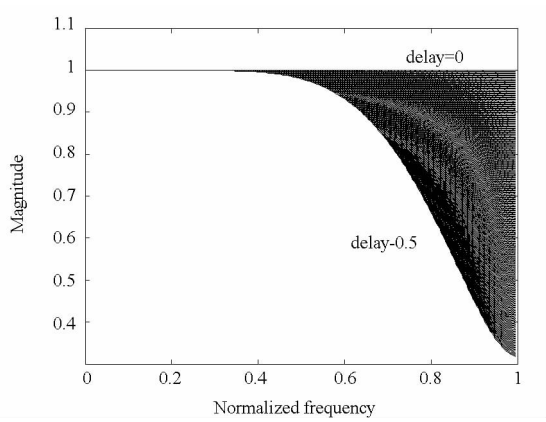
Fig. 5　Farrow structure of VFD filter

3　仿真比较与分析

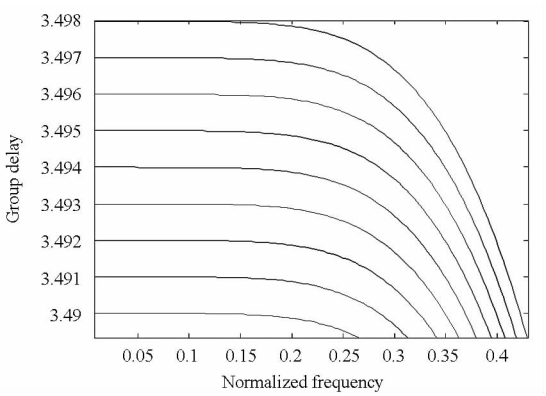
采用文献[4]给出的仿真条件,假设数字基带信号的采样频率为 40MHz,信号带宽为 10MHz,延迟精度要求小于等于 25ps,即采样点延迟的千分之一。

3.1　基于拉格朗日插值 VFD 滤波器仿真结果

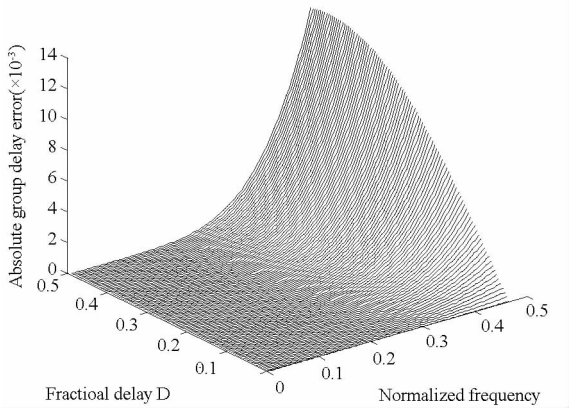
采用基于拉格朗日插值的 VFD 滤波器设计方法时,通过多次仿真结果可以得到,选择子滤波器组数 N 为 6,滤波器阶数为 5 时,即可满足指标要求。其幅度、群时延响应及群时延误差,如图 6 所示。其中,幅度响应为归一化幅度,群时延响应的单位为单个采样点。



(a)



(b)



(c)

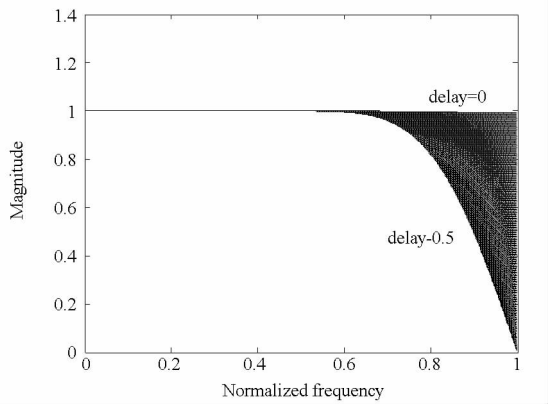
图 6　基于拉格朗日插值 VFD 滤波器设计方法

Fig. 6　Result of Lagrange interpolation VFD filter method

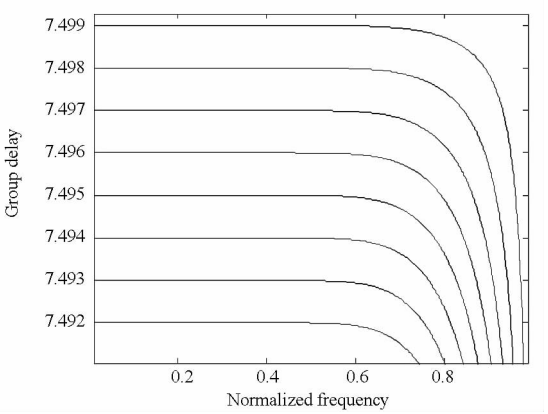
3.2　多速率采样 VFD 滤波器仿真结果

采用文献[4]的多速率采样 VFD 法，满足精度要求时，需要设计 1000 组、长度为 16 的子滤波器。其各个子滤波器的幅度、群时延响应及群时延误差，如图 7 所示。

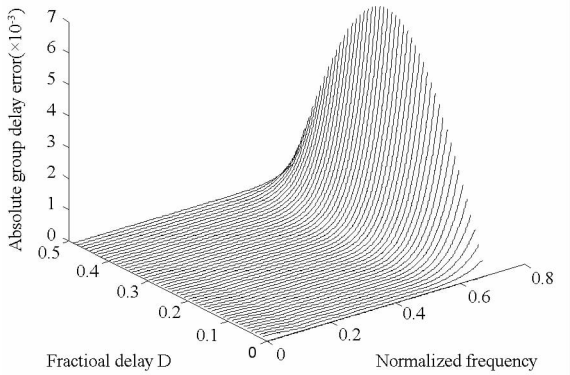
根据图 6、图 7 仿真结果可知，两种方法都达到了千分之一采样点延迟精度，表 1 给出了两种设计方法的比较结果。其中拉格朗日插值法的可用带宽为 0.18，低于多速率采样法。但拉格朗日插值法的滤波器系数数目为 30，仅占多速率采样



(a)



(b)



(c)

图 7　多速率采样 VFD 滤波器设计方法

Fig. 7　Result of multi-rate sampling VFD filter method

法的 0.2%。VFD 滤波器时延特性改变时，拉格朗日插值法仅需实时更新 1 个参数，低于多速率采样法的 16 个参数，大大降低了硬件开发难度。

表 1　两种 VFD 滤波器设计方法比较

Tab. 1　Comparing with two VFD filter design methods

	可用带宽	滤波器系数数目	实时更新参数个数
多速率采样法	0.51	16000	16
拉格朗日插值法	0.18	30	1

4　设备实测结果

将高精度伪距多普勒模拟方法应用于基于 FPGA 的信道模拟器中，通过实际设备的测试结果验证伪距多普勒模拟精度。在外同步铷原子钟的条件下，卫星载荷模拟器发射 1 路北斗导航系统 B3 频点的静止射频信号，经过信道模拟器模拟产生运动模型的动态特性信号，并根据监测接收机测量值验证伪距多普勒模拟方法的精度。其测试方法如图 8 所示。

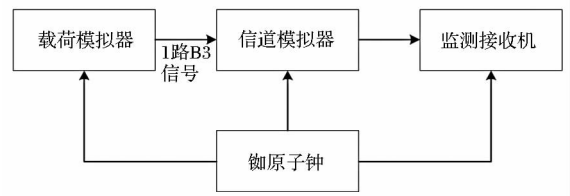


图 8　伪距多普勒测试方法

Fig. 8　Testing method of pseudo-range Doppler simulation

信道模拟器产生的伪距运动模型为振幅 200m，角速度为 0.001rad/s 的正弦运动模型，将信道模拟器模拟的伪距多普勒频率与监测接收机实际跟踪结果进行比较，伪码多普勒频率的误差在 0.1mHz 以内，具体结果如图 9、图 10 所示。

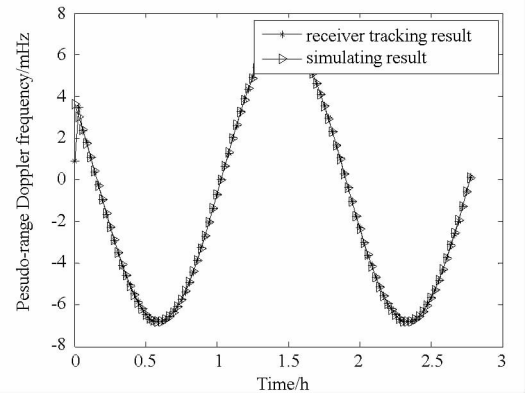


图 9　监测接收机伪距多普勒测量结果

Fig. 9　Pesudo-range Doppler measuring results in receiver

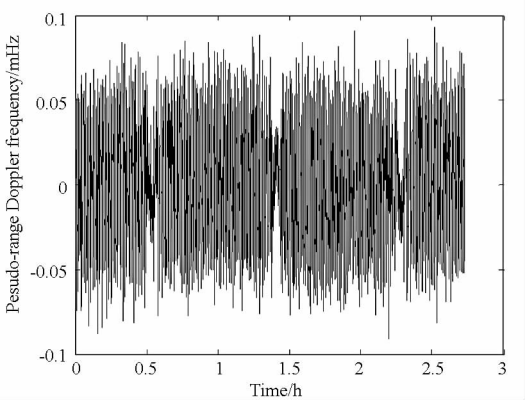


图 10　监测接收机伪距多普勒频率误差

Fig. 10　Pesudo-range Doppler frequency error in receiver

5　结论

本文提出了一种基于拉格朗日插值 VFD 滤波器的伪码多普勒模拟方法,并将该方法应用于卫星导航信道模拟器项目研制。与多速率采样 VFD 滤波器方法比较,虽然可用带宽低于后者,但是滤波器系数数目仅为后者的 0.2%,并且采样 Farrow 结构后,滤波器时延特性变化时,只需更新 1 个参数,大大降低了硬件开发难度。信道模拟器测试结果表明,在振幅为 200m、角速度为 0.001rad/s 的正弦动态环境下,伪码多普勒模拟精度可以达到 0.1mHz。

参考文献(References)

[1] 齐巍, 常青, 张其善, 等. 高动态信号模拟器中的多普勒模拟算法[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1252 – 1257.
QI Wei, CHANG Qing, ZHANG Qishan, et al. Arithmetic of doppler simulation in high dynamic signal simulator[J]. Acta Aeronoutica et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1252 – 1257. (in Chinese)

[2] 宋媛媛, 曾大治, 曾涛. 基于三阶 DDS 的卫星信号多普勒模拟方法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(10): 1213 – 1216.
SONG Yuanyuan, ZENG Dazhi, ZENG Tao. Satellite signal doppler simulation method based on third-order DDS[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(10): 1213 – 1216. (in Chinese)

[3] 陈向东, 高青, 郭莉莉. 卫星导航信号高精度模拟产生与控制技术[J]. 测绘科学技术学报, 2010, 27(3): 165 – 168.
CHEN Xiangdong, GAO Qing, GUO Lili. Technology of high accuracy simulating and control for signal of satellite navigation[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 27(3): 165 – 168. (in Chinese)

[4] 杨俊. 卫星导航信号精密产生理论与技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学机电工程与自动化学院, 2007.
YANG Jun. The research of the signal simulation theory and technologies for satellites navigation[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)

[5] Zhang B, Liu G B, Jiao W, et al. High-order DDFS applied in simulated high dynamic GNSS signal synthesis[C]//9th International Conference on Electronic Measurement & Instrments. Beijing, 2009: 102 – 106.

[6] 向洋. 高动态 GPS 载波跟踪技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
XINAG Yang. Study on high dynamic GPS carrier tracking techniques[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)

[7] Laakso T I, Valimaki V, Karjalainen M, et al. Splitting the unit delay[FIR/all pass filters design][J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(1): 30 – 60.

[8] Shyu J J, Pei S C, Chan C H, et al. A new criterion for the design of variable fractional-delay FIR digital filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2010, 57(2): 368 – 377.

[9] Zhao H, Yu J B. A simple and efficient design of variable fractional delay FIR filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2006, 53(2): 157 – 160.

[10] Tseng C C. Eigen-filter approach for the design of variable fractional delay FIR and all-pass filters[J]. IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing, 2002, 149(5): 297 – 303.

[11] Pei S C, Shyu J J, Huang Y D, et al. Improved methods for the design of variable fractional-delay IIR digital filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(5): 989 – 1000.

[12] Deng T B, Lian Y. Weighted-Least-Squares design of variable fractional-delay FIR filters using coefficient symmetry[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(8): 3023 – 3038.

[13] Huang Y D, Pei S C, Shyu J J. WLS design of variable fractional-delay FIR filters using coefficient relationship[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2009, 56(3): 220 – 224.

[14] Farrow C W. A continuously variable digital delay element[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1988: 2641 – 2645.

[15] Pei S C, Tseng C C. An efficient design of a variable fractional delay filter using a first-order differentiator[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(10): 307 – 310.

[16] Lee S L. Hybrid parallel/cascade structure for designing variable fractional-delay filter[J]. IET Signal Processing, 2012, 7(6): 661 – 672.

[17] 赵军祥. 高动态智能 GPS 卫星信号模拟器软件数学模型研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
ZHAO Junxiang. The study on mathematical model of high dynamic and intelligent GPS satellite signal simulator software[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronatics, 2003. (in Chinese)