

## 星载柔性转发器系统性能分析

张春晖<sup>1,2</sup>, 张俊祥<sup>1,2</sup>, 李 辉<sup>1</sup>, 岳 田<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;

2. 通信网信息传输与分发技术重点实验室, 河北 石家庄 050081)

**摘 要** 基于多相滤波和调制滤波器组的数字信道化技术是实现星上柔性转发的主要方法。由于调制滤波器组使用的原型滤波器不是理想滤波器, 不同用户信号间存在功率泄漏, 同时柔性转发器对信号进行处理时还会使信号产生微小失真, 这些最终都会表现为系统信噪比的损失或误码率的增大。为了研究功率泄露和信号失真对系统性能的影响, 分析柔性转发器中调制滤波器组的性能特性, 将滤波器组的设计转换为原型滤波器的设计, 再针对不同用户带宽下系统的误码率性能进行仿真, 最终确定在原型滤波器固定后影响系统性能的主要原因为用户信号的带宽大小。

**关键词** 柔性转发; 数字信道化; 调制滤波器组; 功率泄露; 信号失真

**中图分类号** TP391.4 **文献标识码** A **文章编号** 1003-3106(2015)01-0036-04

## Analysis on System Performance of Satellite Flexible Transponder

ZHANG Chun-hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun-xiang<sup>1,2</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, YUE Tian<sup>1</sup>

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China;

(2. Science and Technology on Information Transmission and Dissemination in Communication Networks Laboratory, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

**Abstract** Digital channelization based on polyphase filtering and modulated filter banks is the main method to realize satellite flexible transponder. As the prototype filter is not an ideal filter, there will be power leakage among different signals and slight distortions when the signals are processed by the flexible transponder, which will finally cause a loss of SNR or an increase of BER. In order to study the influence of power leakage and signal distortion on system performance, the paper analyzes the performance of the modulated filter banks in flexible transponder, which results in the replacement of the filter banks design by a prototype filter design. Then simulations of BER with different user bandwidths are performed, and it is concluded that the main factors affecting system performance are user bandwidths when the prototype filter is determined.

**Key words** flexible transponder; digital channelization; modulated filter banks; power leakage; signal distortion

## 0 引言

卫星通信<sup>[1]</sup>中柔性转发技术可以很好地解决传统有效载荷存在的问题, 实现频带资源的灵活调配和管理, 支持跨频段和跨波束交换等需求<sup>[2]</sup>。星载柔性转发器包括信道化器、路由交换和星载路由交换控制器<sup>[3,4]</sup>, 其中信道化器完成多波束信号的分解与合成, 是柔性转发器的核心部分, 同时也是通信信号处理领域研究的热点。文献[5]针对信道化技术进行了详细的描述, 本文在此基础上, 基于多相滤波<sup>[6]</sup>和调制滤波器组<sup>[7]</sup>的相关理论进行了研究, 采用改进的 Parks-McClellan 算法<sup>[8]</sup>设计原型滤波器, 仿真不同带宽下系统的误码率性能, 确定影响系统性能的主要因素。

## 1 调制滤波器组基础理论

$M$  通道滤波器组的基本结构如图 1 所示, 其中包括 1 个分析滤波器组和 1 个综合滤波器组。

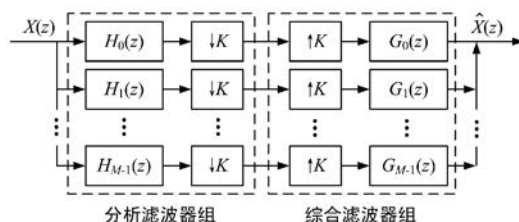


图 1  $M$  通道滤波器组的基本结构

分析滤波器组将输入信号划分到  $M$  个不同的

收稿日期: 2014-09-28

基金项目: 国家部委基金资助项目。

子信道中,而综合滤波器组将各个子信道中的子信号重新合成一个频分多路信号。因为每一个子信号占用的带宽只为输入频带的很小一部分,所以可以对其进行下采样以减少中间处理时的计算量,定义  $K$  为采样因子,当  $K=M$  时,称其为临界采样滤波器组;当  $K<M$  时,称其为过采样滤波器组。

分析得出,滤波器组的输出信号  $\hat{X}(z)$  和输入信号  $X(z)$  满足关系式<sup>[9]</sup>:

$$\hat{X}(z) = T_0(z)X(z) + \sum_{k=1}^{K-1} T_k(z)X(z e^{-j2\pi k/K}),$$

$$T_k(z) = \frac{1}{K} \sum_{m=0}^{M-1} H_m(z W_K^k) G_m(z), \quad 0 \leq k \leq K-1.$$

式中,  $W_K = e^{-j2\pi/K}$ ;  $T_0(z)$  为系统的失真函数,表示柔性转发器对信号处理时产生的失真;而  $T_k(z)$  ( $1 \leq k \leq K-1$ ) 为系统的混叠函数,决定混叠信号  $X(z e^{-j2\pi k/M})$  的衰减程度。当且仅当  $T_0(z) = z^{-D}$ ,  $T_k(z) = 0$  时,滤波器组可以完全无失真的还原出输入信号  $X(z)$ 。

由于  $M$  通道滤波器组需要同时设计和优化  $M$  个分析滤波器和  $M$  个综合滤波器,使系统很难满足好的频率选择特性和高的阻带衰减特性,因此利用调制滤波器组的相关理论对其进行设计。调制滤波器组各子信道滤波器都是由原型滤波器进行频谱搬移得到的,除开中心频率不同外,频谱特性都完全相同。这样,滤波器组的设计就转变为了原型滤波器的设计,为了消除系统的幅度失真和混叠失真,希望原型滤波器的频谱特性为:

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \omega \leq \omega_p \\ 0, & \omega_p \leq \omega \leq \omega_s \end{cases}.$$

但理想滤波器是无法物理实现的,只能近似实现,因此可以通过原型滤波器的重构特性模拟理想滤波器。然而,当系统的子信道数目较大或滤波器长度较长时,滤波器设计参数的高度非线性化使得完全重构 (Perfect Reconstruction, PR) 滤波器组<sup>[10]</sup>的优化非常困难;同时,在很多实际应用中系统不需要满足 PR 条件。因此,可以将 PR 条件放宽到近似完全重构 (Nearly Perfect Reconstruction, NPR) 条件<sup>[11]</sup>,即允许设计的滤波器组存在小的重构误差。此时针对余弦调制滤波器组 (Cosine-modulated Filter Bank, CMFB)<sup>[12]</sup> 设计一个  $M$  通道实系数原型滤波器,  $H(e^{j\omega})$  的截止频率为  $\pi/(2M)$ , 希望  $H(e^{j\omega})$  能满足如下关系:

$$|H(e^{j\omega})|^2 + |H(e^{j(\omega - \frac{\pi}{M})})|^2 = T(e^{j\omega}) = 1 + e_r(\omega),$$

$$0 \leq \omega \leq \frac{\pi}{M}, \quad (1)$$

$$|H(e^{j\omega})| = e_s(\omega), \quad \frac{\pi}{M} \leq \omega \leq \pi. \quad (2)$$

式(1)表示原型滤波器满足近似功率互补特性,式(2)表示原型滤波器有高的阻带衰减。好的功率互补特性可以保证通带的平坦度,减小柔性转发器对信号处理时产生的失真<sup>[13]</sup>;而高的阻带衰减可以降低信道间的相互泄露,减少混叠失真。但 2 种特性在一定意义上是相互对立的,即为了满足功率互补特性,原型滤波器通带外必须有一定滚降,这一部分滚降必然带来信道间的功率泄露。如果要同时满足 2 种特性则原型滤波器必须有非常陡的滚降,这样滤波器的阶数就会非常大,系统的存储量和计算量也会急剧增加。若利用最优化方法对上述两式进行优化,即定义

$$E_r = \int_{\omega=0}^{\pi/M} [e_r(\omega)]^2 d\omega, \quad E_s = \int_{\omega=\omega_s}^{\pi} [H(e^{j\omega})]^2 d\omega,$$

$$E = t E_r + (1-t) E_s.$$

式中,  $t$  为通带阻带能量之比,为了平衡功率互补特性和阻带衰减,将  $t$  设置为 0.5。运用改进的 Parks-McClellan 算法对原型滤波器进行迭代处理,经过  $m$  次迭代后  $E$  变为  $E_m$ ,当满足迭代终止条件  $\varepsilon$  时,整个迭代过程结束:

$$\frac{E_m - E_{m+1}}{E_{m+1}} < \varepsilon.$$

## 2 仿真模型

文献[14]指出:CMFB 可以转化为 DFT 调制滤波器组的形式,即若一个原型滤波器可以使其对应的 CMFB 满足 PR 条件,则它对应的 DFT 调制滤波器组也同样满足 PR 条件。考虑到调制模式为 QPSK,中频信号为复信号,因此采用 DFT 调制滤波器组。同时与临界采样滤波器组相比,过采样滤波器组能够增加设计自由度,容易满足 PR 条件,可以使滤波器组满足线性相位条件<sup>[15]</sup>。过采样 DFT 调制滤波器组的多相结构如图 2 所示。

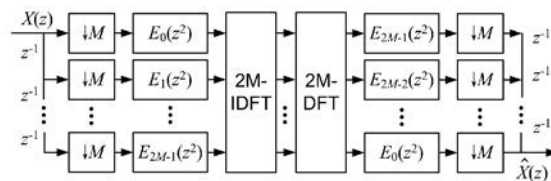


图 2 过采样 DFT 调制滤波器组多相结构

图中,

$$E_l(z) = \sum_{n=0}^{N/(2M-1)} h(n2M+l) Z^{-n}, \quad 0 \leq l \leq 2M-1,$$

为原型滤波器的多相分量。调制滤波器组的多相结

构利用多相分解和 Noble 等效变换将下采样操作提到滤波之前,同时运用快速傅里叶变换,大大降低了系统的运算量。

### 3 仿真结果分析

利用上述原型滤波器和过采样 DFT 调制滤波器组模型对不同用户带宽下的误码率性能进行仿真,设定参数如下:通道数  $M = 64$ ,抽取倍数  $K = 32$ ,滤波器长度  $N = 640$ ,通带阻带能量之比  $t = 0.5$ ,迭代终止条件  $\varepsilon = 10^{-9}$ 。原型滤波器的衰减特性和用户信号占据 1 路、2 路、4 路、8 路、16 路和 32 路子信道时系统的误码率曲线以及理论曲线如图 3 所示,在仿真时用户使用信道外的子信道均被单路信号占据充当干扰信号。

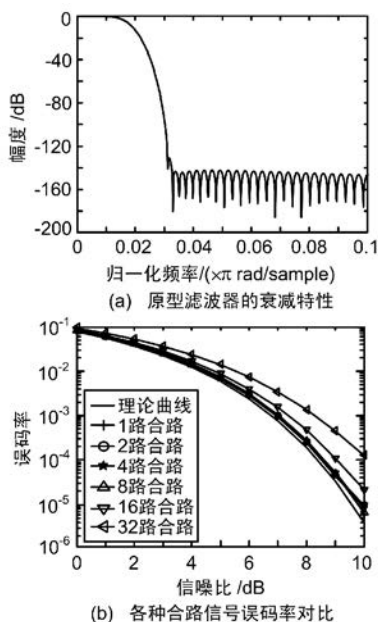


图3 仿真结果

由图 3(a) 可以发现,原型滤波器的阻带衰减在 120 dB 以上,且通带边缘满足功率互补特性;而由图 3(b) 可以看出,系统误码率性能最优到最差的排列顺序为:2 路信道信号、4 路信道信号、8 路信道信号、单路信号、16 路信道信号、32 路信道信号。单路信号性能处在中间位置的情况看似无法理解,但通过分析原型滤波器特性便能找到合理的解释。

原型滤波器对单路信号的影响主要有 2 个方面:一是信号边缘由于滤波器边缘滚降带来的微量失真;二是单路信号带宽小,临近信道信号对其泄漏的功率影响较大。

同理,原型滤波器对多路信号的影响也主要有

2 个方面:一是通带内信号由于各信道等效滤波器拼接处未能实现完全的功率互补产生微小的波动,使信号产生失真,滤波器边缘滚降对其影响反而降低;二是多路信号带宽较大,临近信道信号对其泄漏的功率对整个信号而言相对较小。

2 路信道的情况下,通带内只有一处等效滤波器拼接,边缘失真亦小,此时临近信道间功率泄露对性能的影响占主导地位,因此其误码率性能较单路情况好,4 路信道和 8 路信道也是如此。随着占用信道数的增加,通带内等效滤波器拼接数也增多,其影响增大到不可忽视并逐渐变为主导,此时多路信号的误码率性能便不如单路信号好,16 路信道和 32 路信道信号的情况就是这个原因。

### 4 结束语

通过上述理论分析和仿真可以发现,系统的误码率性能与用户信号占用的带宽有关,大致规律是随着用户信号带宽的增加,系统的误码率性能逐渐变差,当用户信号占据的子信道数达到系统总信道数的 1/4 时,系统性能已恶化到非常明显的地步,因此在实际使用中应尽量避免用户带宽过大。如果无法减小信号带宽,可以在对原型滤波器进行设计时适当增大通带阻带能量之比  $t$ ,优先保证原型滤波器好的功率互补特性,以减小各通道等效滤波器互补时通带的波动。根据上述结论和用户需求,可以在应用前就预先分析系统性能,用以指导系统设计,减小实际应用风险。

#### 参考文献

- [1] 张俊祥.卫星通信发展展望[J].无线电通信技术, 2012,38(4):1-4.
- [2] 阳志明,周波,曹志刚.一种基于复指数调制精确重构滤波的宽带星载数字信道化器[J].电子与信息学报,2010,32(11):2 554-2 559.
- [3] Wim de Jong, Frans A M Dam, Gerard J Kunz, et al. IR Seeker Simulator and IR Scene Generation to Evaluate IR Decoy Effectiveness [J]. SPIE Technologies for Optical Countermeasures, 2004, 5615:100-111.
- [4] 李丽娟.红外成像空空导弹的抗干扰分析[J].光电对抗与无源干扰,1999(2):1-8.
- [5] KUMAR R, NGUYEN T M, WANG C C. Signal Processing Techniques for Wideband Communications Systems [C] // Military Communications Conference. New Jersey: IEEE, 1999(1):452-457.



- [6] 路后兵,李永亮.一种高效的宽带数字信道化接收方法[J].无线电工程,2011,36(2):33-35.
- [7] 陈迎春.群信号信道化技术实现方法的仿真与分析[J].电视技术,2008,48(5):69-73.
- [8] 辛守庭.余弦调制滤波器组的设计及应用研究[D].兰州:西北师范大学硕士学位论文,2009.
- [9] 岳田,李辉,米健.全数字可配置信道分路技术的设计方法[J].无线电工程,2013,43(12):25-28.
- [10] HOANG P, VAIDYANATHAN P P. Nonuniformmultirate Filter Banks: Theory and Design [C] // IEEE Int.Symp.on CAS, Portland, Oregon, 1989:371-374.
- [11] LI J, NGUYEN T Q, TANTARATANA S. A Simple Design Method for Near-perfect Reconstruction Nonuniform Filter Banks[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1997, 45(8):2105-2109.
- [12] 张子敬,焦李成. M 带余弦调制滤波器组的设计[J]. 电子学报, 2001(1):84-86.
- [13] 王浩波,黄伟,刘存才.无线信道干扰概率对网络性能影响分析[J].无线电通信技术,2012,38(1):10-11,45.
- [14] ABU-AI-SAUD W A, STUDER G L. Efficient Wideband Channelizer for Software Radio Systems Using Modulated PR Filterbanks [J]. IEEE Trans. SP, 2004, 52(10):2807-2820.
- [15] HELMUT. Oversampled Filter Banks: Optional Noise Shaping, Design Freedom, and Noise Analysis [C] // I CASSP, 1997:2453-2456.

#### 作者简介

张春晖 男,(1990—),硕士研究生。主要研究方向:卫星通信。

张俊祥 男,(1963—),研究员。主要研究方向:卫星通信。

(上接第12页)

## 5 结束语

针对某小型无人机,在地面控制站系统中成功应用了新兴的 WPF 技术进行设计。利用 WPF 技术,实现了无人机地面控制站所涉及的基本功能,解决了地面站面临的关键技术难题。同时,地面控制站的开发效率得到提高,人机交互界面得到优化。通过仿真实验和野外实验的验证,所设计的地面站可以满足无人机对地面控制站的功能需求。✧

#### 参考文献

- [1] HOFFMANN G M, TOMLIN C J. Decentralized Cooperative Collision Avoidance for Acceleration Constrained Vehicles [C] // The 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, 2008:4357-4363.
- [2] HOFFMANN G M, HUANG H, WASLANDER S L. Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment [C] // The 2007 Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Hilton Head, South Carolina, 2007:1-20.
- [3] TISDALE J, RYAN A, ZENNARO M. The Software Architecture of the Berkeley UAV Platform [C] // The 2006 IEEE International Conference on Control Applications, Munich, 2006:1420-1425.
- [4] 解龙龙.无人机群控系统的地面站设计与实现[D].北京:北京理工大学,2011.
- [5] 肖征宇.无人机地面站软件的设计与实现[D].浙江:浙江大学,2010.
- [6] Matthew MacDonald. WPF 编程宝典 C#2010 版[M].王德才,译.北京:清华大学出版社,2012.
- [7] 柴立功,樊甫华,董世友,等.无人机群通用控制站的技术需求分析[J].无线电工程,2013,43(10):1-3,39.
- [8] 宁金星,卢京潮,闫建国.基于 VC++ 的无人机飞控地面站软件的开发[J].计算机测量与控制,2007(3):596-598.
- [9] 孔令涛,汤浩.战术通信无线传播研究[J].无线电通信技术,2011,37(3):26-29.
- [10] 周祥生.无人机测控与信息传输技术发展综述[J].无线电工程,2008,38(1):30-33.
- [11] 李红雨,华宇,于静.基于 MapX 的散射通信链路分析系统的开发[J].无线电通信技术,2011,37(1):53-55.
- [12] 张睿萍.基于 DirectShow 的数字视频监控系统的研究与实现[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [13] 汪春杰,李明禄,吴凡.基于 DirectShow 的虚拟摄像头开发框架[J].计算机工程,2009(16):253-255.

#### 作者简介

王鑫 男,(1988—),硕士。主要研究方向:嵌入式、计算机应用。

邓宏彬 男,(1975—),教授。主要研究方向:武器系统设计、机器人技术、系统建模。