

软件无线电系统建模与仿真分析

田永毅

(陕西工业职业技术学院 电气工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要:针对传统软件无线电系统无法兼顾系统性能与设计复杂度的问题,采用级联滤波的方法建立了一种新的系统模型,并以该模型为平台,在 Matlab 环境下仿真分析系统传输的有效性和可靠性. 仿真结果表明,该模型在保证系统性能的前提下能有效降低计算的复杂度.

关键词:软件无线电系统;数字下变频;积分梳状滤波器;半带滤波器;级联滤波

中图分类号:TN924 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2012.05.020

Modeling and simulating analysis for software radio system

TIAN Yong-yi

(College of Electr. Eng., Shaanxi Polytechnic Inst., Xianyang 712000, China)

Abstract: Aiming at the problem between system performance and design complexity in the traditional software radio system, a new model was made by cascade filtering method. Based on this model, the validity of transmission and system reliability were analysed by computer simulation on Matlab. The simulation results showed that the model could reduce design complexity on the premise of specified performance.

Key words: software radio system; digital down-conversion; cascaded integrator-comb filter; half-band filter; cascade filtering

0 引言

目前,由于各种无线通信系统的工作频段、调制方式、波形结构、通信协议等在原理或结构上普遍存在差异,极大地限制了不同系统间的互通,这种不兼容性给硬件为主的无线通信带来了不便.而软件无线电的出现为这些问题的解决提供了可能.文献[1-2]提出了几种软件无线电系统模型,虽然都实现了系统性能的提高,但存在计算复杂度较高的缺点,很难满足实际要求.鉴于此,本文拟建立一种软件无线电系统模型,以期在保证系统性能的前提下有效降低计算复杂度.

1 系统描述

软件无线电的中心思想是^[3-4]:构造一个具有开放性、标准性的模块化通用硬件平台,将各种功

能(如工作频段、调制解调类型、数据格式、加密模式、通信协议等)用软件来实现,并使宽带 D/A 和 A/D 转换器尽可能靠近天线,即由基带移到中频甚至射频,以研制出具有高度灵活性和开放性的新一代无线通信系统.

软件无线电系统由软件无线电发射机和接收机组成,其基本结构如图 1 所示.

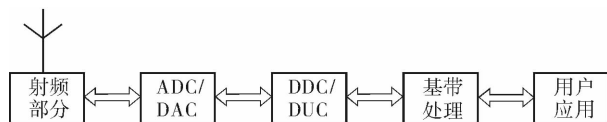


图 1 软件无线电系统结构

软件无线电发射机的主要功能是把需发射或传输的用户信息(语音、数据或图像)经基带处理(完成诸如 FM, AM, FSK, PSK, MSK, QAM 等调制)后上变频和 D/A,再调制到规定的载频(中心频率)

上,通过功率放大后送至天线,把电信号转换为电磁波.

软件无线电接收机的主要功能是:接收天线将电磁波信号转换为电信号,再通过射频前端模块完成信号滤波和放大,然后通过 A/D 进行数字化处理(A/D 和 D/A 尽可能靠近天线是为了减少模拟环节,尽可能使所有的信号处理都在数字域内完成),数字化后输出的高速数字中频信号再经数字下变频器、抽取和低通滤波处理之后变为低速的基带信号,最后对基带信号进行解调、解码、抗干扰、抗衰落、自适应均衡等基带处理.

2 软件无线电系统数学模型

2.1 软件无线电发射机数学模型

任何一个无线电信号均可表示为

$$S(t) = a(t) \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中, $a(t)$, $\varphi(t)$ 分别表示该信号的幅度调制信息和相位调制信息; f_0 为信号载波频率.

对式 (1) 进行数字化,可得

$$S(nT_s) = a(nT_s) \cos[2\pi f_0 nT_s + \varphi(nT_s)] \quad (2)$$

式中,采样间隔 $T_s = 1/f_s$, 式 (2) 可简写为

$$S(n) = a(n) \cos[\omega_0 n + \varphi(n)] \quad (3)$$

式中,数字角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0 T_s$. 为了便于信息调制,通常将式 (3) 进行如下正交分解:

$$S(n) = I(n) \cos(\omega_0 n) + Q(n) \sin(\omega_0 n)$$

式中

$$I(n) = a(n) \cos\varphi(n), Q(n) = -a(n) \sin\varphi(n).$$

正交基带信号 $I(n)$, $Q(n)$ 的采样率与输出信号的采样率是一致的,应比最高载频高 2 倍以上. 而 $I(n)$, $Q(n)$ 的带宽仅为信号带宽,与载频相比要小很多,也就是说 $I(n)$, $Q(n)$ 并不需要产生高速的数据流,只需要输出大于 2 倍信号带宽的数据流即可. 但为了使产生的基带信号与后面的采样速率相匹配,在进行正交调制(与 2 个正交本振混频)之前必须通过内插把低数据率的基带信号提升到采样频率上.

考虑到器件处理速度的限制,软件无线电发射机很难获得较高的工作频率. 因此,可以采用内插技术实现数字上变频,使中低速采样率的发射机能够产生更高频率的信号,其实现原理如下:对 $S(n)$ 进行 I 倍内插,即对 $S(n)$ 每隔 1 个采样点插入 $(I-1)$ 个零点,得到的内插信号为 $S_i(n)$. 内插后的数字谱不仅包含了原信号的基带谱,同时还有处于 $[(m-1)f_s/2, mf_s/2]$ ($m = 1, 2, \dots, I$) 各频带内的各次镜频分量. 这些镜频分量的频谱与基带信号的

谱结构完全一样,只是中心频率不同^[3]. 这样只要一个带通滤波器滤出第 m 次镜频,就得到了载频为基带载频 m 倍的高频信号,这也就相当于把图 2 所示的发射机最高工作频率扩大了 I 倍. 图 2 中的第 2 个内插器只插入零点,不含滤波,而 FIR 滤波器即为用于镜频滤波的数字带通滤波器.

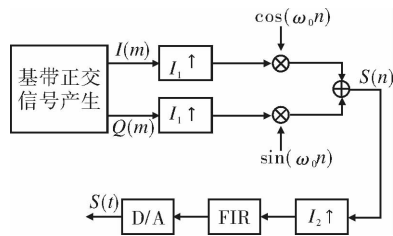


图 2 基于内插的无线电发射机数学模型

2.2 软件无线电接收机数学模型

图 3 是一个典型的基于正交混频的数字下变频(DDC)结构^[5]. 将 A/D 变换后的信号分成 2 路,1 路信号乘以正弦序列(称为同相分量),下变频至零中心频率上,通过低通滤波器、 D 倍抽取滤波形成与原信号相位相同的信号;另 1 路信号乘以经过 90° 相移的正弦序列(称为正交分量),同样是下变频至零中心频率上,再通过相同的低通滤波器、 D 倍抽取滤波,形成与原信号正交的信号. 最后,对 DDC 输出的低速率、零中频的正交的 2 路信号进行信号识别、解调等基带信号处理.

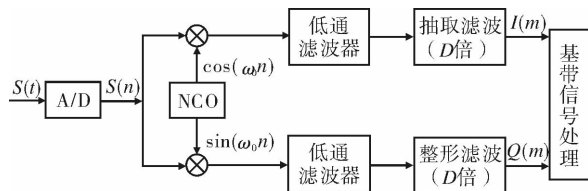


图 3 基于正交混频的数字下变频(DDC)结构

根据多速率信号处理理论,抽取后的信号 $I(m)$, $Q(m)$ 不会改变原有信号的谱结构,而其数据率(采样率)却降低了 D 倍,对减轻后续信号处理的负担是非常有利的.

3 高效数字滤波器设计

软件无线电系统的关键是数字变频,而数字变频是通过采样率的变换实现的. 一般意义上,采样率越大,混叠误差越小,但系统运算量越大^[6]. 因此,设计一种既满足抽取(降低采样率的变换)和内插(提高采样率的变换)要求,而且抗混叠性能好、计算效率高的数字滤波器,是软件无线电系统设计

的关键。

3.1 半带滤波器

半带滤波器在多速率信号处理中非常重要,因为这种滤波器特别适合于实现 $D = 2^M$ 倍的抽取,而且计算效率高,实时性强。

半带滤波器是指其频率响应 $H(e^{j\omega})$ 满足以下关系的 FIR 滤波器:

$$\omega_A = \pi - \omega_C \quad \delta_p = \delta_s$$

式中, ω_C 为通带截至频率, ω_A 为阻带起始频率, $\delta_p = \delta_s$ 为通带波动, δ_s 为阻带衰减。也就是说半带滤波器的阻带宽度 $\pi - \omega_C$ 与通带宽度 ω_C 相等,且通带波纹与阻带波纹也相等。

这种滤波器的冲激响应除了零点外,在其余偶数点均为 0,因此用半带滤波器实现取样率变换时,只需一半计算量,尤其适宜实时性处理。

下面讨论用半带滤波器实现 2 倍抽取所需的阶数。

半带滤波器的过渡带宽

$$\Delta F = \frac{\omega_A - \omega_C}{\pi} = \frac{\pi - \omega_C - \omega_C}{2\pi} = \frac{\pi - 2\omega_C}{2\pi} \quad (4)$$

若设 $\omega_C = a \cdot 2\pi$, 代入式(4)有

$$\Delta F = \frac{\pi - 4a\pi}{2\pi} = \frac{1 - 4a}{2}$$

所以半带滤波器所需的阶数

$$N = \frac{-20\lg\delta - 7.95}{14.36\Delta F} = \frac{-20\lg\delta - 7.95}{14.36(1 - 4a)} \times 2$$

式中, a 为半带滤波器通带宽度 ω_C 确定的一个比例系数, δ 为阻带衰减,取 $\delta = 0.001$, 代入可得

$$N = \frac{7.25}{1 - 4a}$$

当 $a \ll 1$ 时, $N \approx 7$, 即用一个 7 阶半带滤波器就可实现 2 倍抽取。

考虑到设计的复杂度和计算效率,对于 $D = 2^M$ 的抽取,可以用 M 个半带滤波器级联来实现(见图 4)。

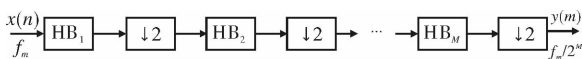


图 4 多级半带滤波器级联

3.2 积分梳状滤波器

当抽取因子为 2 的幂次方时,用若干个半带滤波器就可以解决滤波问题。但是,一般实际的抽取系统中,抽取因子 D 往往不会恰好是 2 的幂次方,而是表现为 $D = m \cdot 2^M$ 的形式($m \neq 2$),这时可以先进行第 1 级的整数抽取,然后再用半带滤波器进行

2^M 抽取。第 1 级的整数抽取可以用积分梳状滤波器来实现。

积分梳状滤波器的冲击响应应具有以下形式^[7]:

$$h(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq M - 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, M 既是 FIR 滤波器的长度,也是抽取器的抽取倍数。由式(5)可求出幅频响应

$$|H(e^{j\omega})| = \left| \frac{\sin\left(\frac{\omega M}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)} \right|$$

其误差容限要求为

$$\delta_s \geq Df_s/F_0 \quad \delta_p \geq \frac{1}{6}(D\pi f_p/F_0)^2$$

其中, δ_p 为通带误差容限, δ_s 为阻带误差容限, f_p 为通带上限边缘频率, f_s 为阻带边缘频率, F_0 为输入信号的样点速率。

该滤波器的阻带衰减较小(约为 13.46 dB),常常无法满足抗混叠的要求。为了获得足够的阻带衰减,可采用多级级联结构。此时对应的传递函数为

$$H(z) = \left[\frac{1 - z^{-M}}{1 - z^{-1}} \right]^L \quad (6)$$

其中, L 为级联的数目。当 $L = 5$ 时,滤波器具有 67 dB 左右的阻带衰减,基本能满足实际要求。在具体实现时,可以将式(6)分解为独立的 L 阶高速积分和低速微分的过程。多级级联积分梳状抽头滤波器如图 5 所示。该结构不但具有很强的抗混叠作用,而且只需要加减运算,能极大地减小计算量,从而有效地降低硬件实现难度。

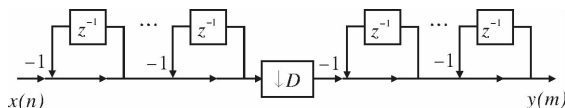


图 5 多级级联积分梳状抽头滤波器

4 系统仿真

4.1 信号传输与系统可靠性估计模型

根据软件无线电系统数学模型,结合级联积分梳状滤波器和半带滤波器,建立了一个可实现的软件无线电系统数学模型,如图 6 所示。

4.2 仿真参数

多级级联积分梳状滤波器抽取/内插倍数 $D_1 = 25$;半带滤波器抽取/内插倍数 $D_2 = 2$,阶数为 7。系统总的抽取/内插倍数等于各级滤波器抽取/内插倍数的乘积。

7 阶半带滤波器系数为: $h(0) = -0.031303$, $h(1) = 0$, $h(2) = 0.281280$, $h(3) = 0.499954$,

$h(4) = 0.281\ 280, h(5) = 0, h(6) = -0.031\ 303.$

4.3 仿真结果与分析

系统信号传输波形如图7和图8所示.可见,判决后的I路、Q路信号与原基带码元基本保持一致,从而证明该系统能保证传输的有效性.

采用 QPSK 差分相干解调算法实现调制与解

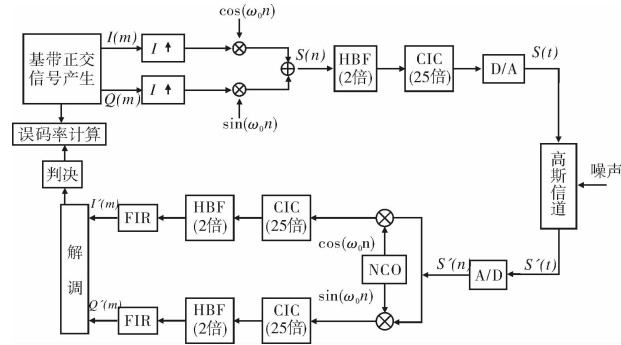


图6 可实现的软件无线电系统模型

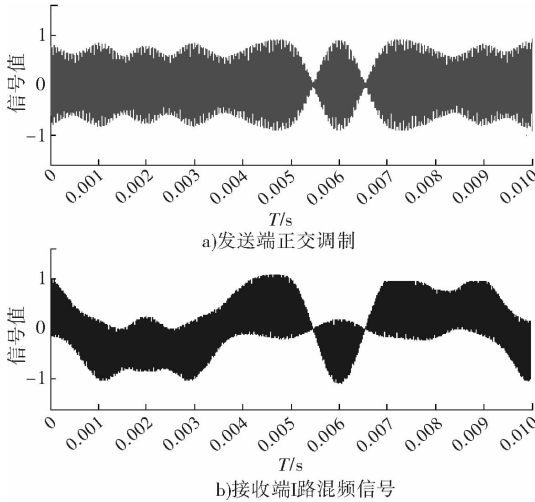


图7 系统调制后波形与接收端I路混频信号波形

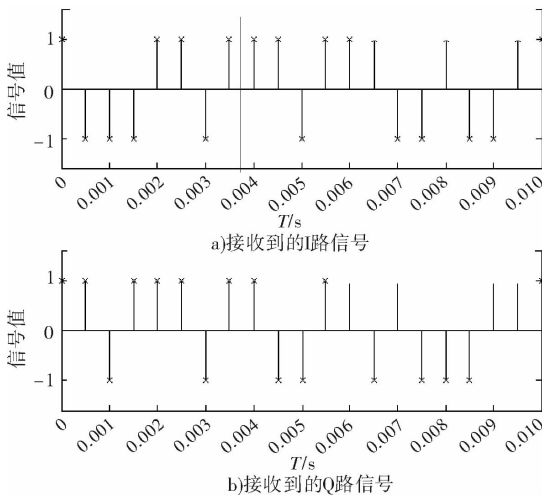


图8 判决后的I路、Q路信号

调时,系统误码率曲线如图9所示.由图9可见,系统在输入信噪比较高的情况下,能够获取较好的误码性能.

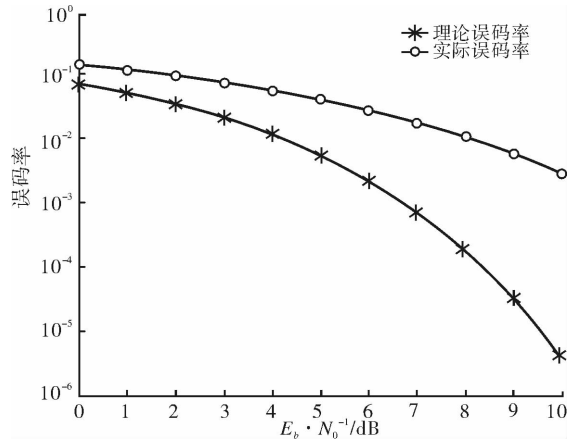


图9 系统误码率曲线

5 结语

本文研究并建立了一种软件无线电系统模型,并在 Matlab 环境下从基带信号的产生到上变频、D/A、A/D、抽取、滤波、解调过程进行了系统仿真.仿真结果表明,该模型在保证系统性能的前提下能有效降低计算的复杂度,为设计软件无线电的软硬件平台打下了基础.

参考文献:

- [1] Schwingshackl D, Kubin G. Polyphase representation of multirate nonlinear filters and its applications[J]. Signal Proc IEEE Trans, 2007, 55(5): 2145.
- [2] 江春燕, 周胜源, 陈星. 基于软件无线电多相滤波的数字正交变换技术[J]. 电子设计工程, 2010(6): 89.
- [3] Ulversoy T. Software defined radio: challenges and opportunities[J]. Com Surveys & Tutorials IEEE, 2010, 12(4): 531.
- [4] Cruz P, Carvalhon B, Remley K. Designing and testing software-defined radios[J]. Microwave Magazine IEEE, 2010, 11(4): 83.
- [5] Buracchini E. The software radio concept[J]. IEEE Com Magazine, 2008, 38(9): 138.
- [6] 肖明波, 杨光松. 通信系统仿真原理与无线应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [7] Abu-Al-Saud W A, Stuber G L. Modified CIC filter for sample rate conversion in software radio systems[J]. IEEE Signal Proc Letters, 2003, 10(5): 152.