

高频信号直接采样系统中的抗混叠滤波器设计

文智江, 朱名日

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对实时控制系统中, 高频信号直接采样时易出现带内混叠的现象, 而影响系统的采样结果和动态性能, 采用三阶巴特沃斯滤波器和低噪声超宽带宽差分放大器 ADL5562 设计出用于高频信号直接采样系统中的抗混叠滤波器。经测试, 该电路可有效消除信号混叠现象, 系统运行稳定、可靠。

关键词: 高频信号; 直接采样; 抗混叠滤波器

中图分类号: TP274+.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)02-0027-03

Design of anti-aliasing filter in direct sampling system of high-frequency signal

Wen Zhijiang, Zhu Mingri

(Department of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at signal aliasing phenomenon while high-frequency signal sampling in a real-time control system, which would affect the results of sampling and dynamic performance of system, this paper uses third-order Butterworth filter and the low noise, ultra-wide bandwidth differential amplifier ADL5562 to constitute the anti-aliasing filter for direct sampling system of the high-frequency signal. The test results show that the anti-aliasing filter can effectively eliminate signal aliasing, and the system is stable and reliable.

Key words: high-frequency signal; direct sampling; anti-aliasing filter

随着自动控制技术的快速发展, 自控系统运行时的信号频率越来越高。在对一实时控制系统的高频信号进行采样时, 要求能够很快地对其进行实时、高速采样。对于高频信号的采集, 通常采用的方法是下变频后采样, 即对输入信号进行模拟下变频并检波后, 将信号从高频降至基带, 然后经模/数转换后再进一步处理。在进行模/数转换时, 输入信号的频率通常都是在采样基带, ADC 可以很方便地进行采样。然而, 模拟下变频技术通常存在因使用模拟器件带来的稳定性差、灵活性低、容易引入噪声信号、系统动态范围小, 以及模拟正交解调时出现零漂并可能存在本振泄漏等问题^[1]。对高频信号采集还可采用直接采样方法, 该方法可以解决模拟下变频转换时出现的问题, 同时还能将输入信号中的信息更好还原。因此, 在对该实时控制系统采集时选用直接采样。但在高频直接采样过程中会出现信号带内混叠现象, 影响系统采样结果和动态性能, 所以在高频信号直接采样系统中必须消除该现象。

1 奈奎斯特准则的应用

根据奈奎斯特准则^[2]: 必须以等于或者大于信号带宽两倍的速率对信号进行采样, 方可保留信号中的全部

《微型机与应用》2013年 第32卷 第2期

信息。其转换为公式可以表示为:

$$F_s > 2 \times F_{BW} \quad (1)$$

其中, F_s 为采样频率, F_{BW} 为可采集到的最大信号频率。

当被采样信号的频率处于第一奈奎斯特区域内时, 采用基带采样。而当信号频率高于第一奈奎斯特区域时, 可在较高的奈奎斯特区域内进行采样, 即进行欠采样。

如图 1 所示, 当以 80 MHz 采样频率 ($F_s=80$ MHz) 进行采样时, 若被采样信号频率为 140 MHz, 其将位于奈奎斯特区 4。可以理解为每个奈奎斯特区宽度为 0.5 倍采样频率, 即奈奎斯特区 1 为 $0 \sim 0.5 F_s$, 这里通常被称为基带; 其他奈奎斯特区如图 1 所示, 螺旋上升排列。不同的是, 当被采样信号位于较高的奈奎斯特区时, 其镜像会混叠折叠回到奈奎斯特区 1。因此, 当被采样信号位于同一个奈奎斯特区内, 其就满足奈奎斯特准则, 可通过欠采样实现模/数转换。图 1 中, 140 MHz 被采信号的镜像映射回到了基带, 像是在奈奎斯特区 1 内有 20 MHz 信号。

欠采样技术作为高频直接采样的理论基础, 给出了以低采样速率的 ADC 对较高频率信号进行采集的可能, 但也解释了在欠采样时需解决信号混叠现象的必要

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 29

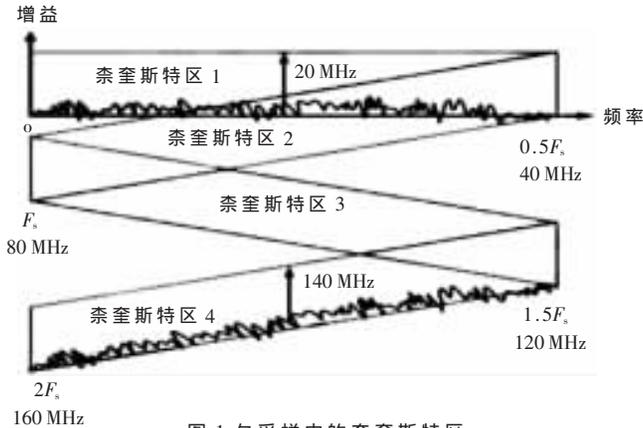


图1 欠采样中的奈奎斯特区

性。解决信号混叠的办法通常有两种：一是提高采样频率；二是使用抗混叠滤波器。前者提高了采样频率，使高频信号位于其采样基带内，但是存在 ADC 价格高、转换输出数据量大、处理难度增加等问题；此外，制造工艺的限制也会存在采样分辨率的上限^[3]。针对高频信号带宽不宽的特点，使用抗混叠滤波器解决信号带内混叠问题，既可用较低采样速率的 ADC 采集高频信号，又可以大大减少 ADC 输出数据量，便于处理同时成本也较低。因此在进行高频直接采样时，使用抗混叠滤波器克服带内混叠的问题性价比更优。

2 欠采样技术中采样频率的选取

在进行欠采样时，首先考虑采样频率 f_s 的选取，带通信号采样定理决定 f_s 的选取范围^[1]。根据带通信号采样定理：对中心频率 f_0 、带宽为 B 的带通信号，记其上下截止频率分别为 $f_{H1}=f_0+B/2$ 和 $f_{L1}=f_0-B/2$ ，而采样值不失真的重建信号的充要条件要求采样频率满足：

$$\frac{2f_{H1}}{m} \leq f_s \leq \frac{2f_{L1}}{(m-1)} \quad (2)$$

其中， $m=1 \cdots m_{\max}$ ， $m_{\max}=[f_{H1}/B]$ ， $[x]$ 为不大于 x 的最大整数。

带通信号采样定理表明^[1]，针对带通信号的采样频率取值范围由 m_{\max} 个互不重合的区间 $S_m=[2f_{H1}/m, 2f_{L1}/(m-1)]$

组成，即 $f_s \in \bigcup_{m=1}^{m_{\max}} S_m$ 。当 $m>1$ 时，采样频率低于 $2f_{H1}$ 的奈奎斯特采样频率， S_m 即为对应的不失真欠采样频率范围。不失真欠采样存在的充要条件是 $m_{\max}>1$ ，即 $f_{H1} \geq B$ 。对于带通信号， f_{H1} 的最小值为 B （即当 $m=1$ 时，要求 $f_s \geq 2B$ ），因此带通信号最低不失真采样频率为 $2B$ 。

在对高频信号进行欠采样时，需要选择合适的采样频率 f_s ，使被采样信号的带宽落在同一奈奎斯特区内。然后设计一个抗混叠滤波器，将被采样高频信号带宽或高频信号所处奈奎斯特区作为其通带，再将滤波后信号送入高速

ADC 进行采样。

3 抗混叠滤波器

3.1 抗混叠滤波器的使用

对高频信号进行直接采样时，必须考虑减少奈奎斯特区内无用的信号量，避免出现带内混叠；同时，当各个奈奎斯特区内的噪声信号都映射回到基带时，会提高信号的噪底，降低系统的动态性能。使用抗混叠滤波器可很好解决以上问题，其通常是由 LC 网络构成。

在滤波器选型时，根据对截止特性的要求，从巴特沃斯和切比雪夫两种常见的滤波器模型中进行对比选择：

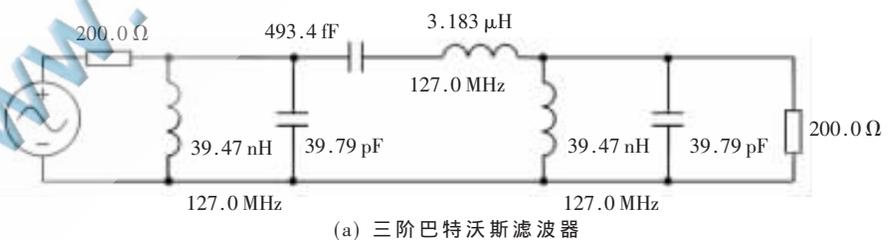
(1) 巴特沃斯滤波器：通带内没有任何的波纹，幅度响应曲线在截止频率处也较为平缓；其截止特性和相位特性都不错，对构成器件要求不严格，易于得到符合设计值的特性。

(2) 切比雪夫滤波器：其在通带外拥有陡峭的衰减曲线，截止特性特别好；但是通带内有波纹，相位特性和群延时特性不太好，而且通带内波纹越大，通带到阻带的过渡就越陡峭。

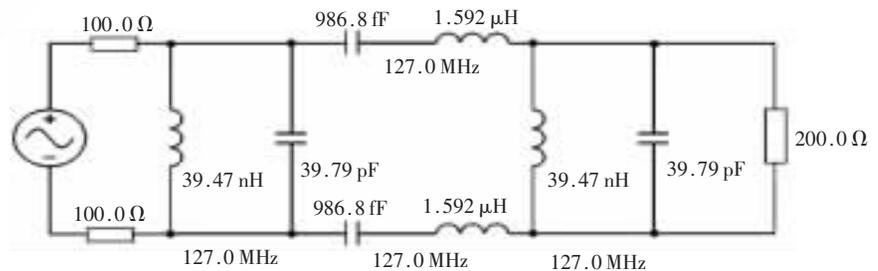
对于高频信号直接采样系统，线性相位响应要比陡峭的衰减重要得多，且线性相移和陡峭的幅度变化是相互冲突的；同时要考虑滤波器元件设计值与实际值的匹配问题。综合以上因素，选择使用巴特沃斯滤波器。

3.2 抗混叠滤波器的设计

输入信号中心频率为 127 MHz，所需带宽为 15 MHz。根据输入信号参数，由滤波器设计软件 Filter Free 设计的三阶巴特沃斯滤波器如图 2(a) 所示，其中心频率为 127 MHz，带宽为 20 MHz。图 2(a) 中所示的单端巴特沃斯滤波器转换为差分后如图 2(b) 所示。在实际使用时，各无源元件参数要结合实际值和理论值进行选择，以达到最佳效果。



(a) 三阶巴特沃斯滤波器



(b) 差分滤波器

图2 抗混叠滤波器的设计

硬件纵横

Hardware Technique

无源元件系统会存在插入损耗。使用 NI 公司的 Multisim 进行仿真, 测试在滤波器插入前后负载上接收到的功率的分贝比值。在仿真时使用了优化后元件, 如图 3 所示。仿真结果显示, 滤波器插入电路前接收到功率为 2.6 dBm, 滤波器插入电路后接收到功率为 -3 dBm。因此, 得到其插入损耗为 5.6 dB。

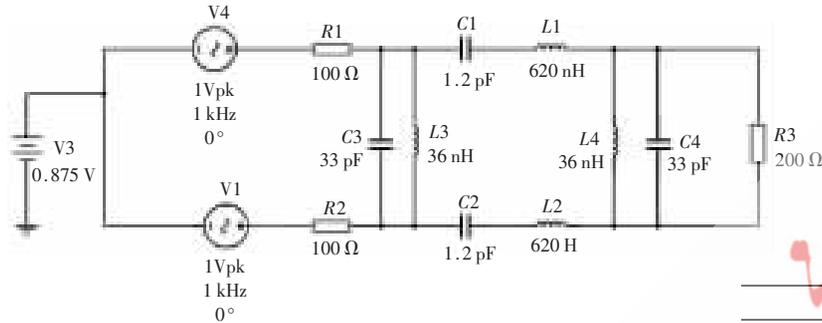


图 3 滤波器插入损耗仿真电路图

为了抵消三阶巴特沃斯滤波器插入损耗, 需对流过滤波器信号放大。在本系统中使用与 ADC 相匹配的差分放大器 ADL5562 对高频信号进行放大, 如图 4 所示。

图 4 电路中高速 ADC 可实现对高频信号进行高速、实时采样。在其输入端设计了由超低噪声的差分放大器 ADL5562 和三阶巴特沃斯滤波器构成的有源带通滤波器, 作为高频信号采样系统中的抗混叠滤波器使用^[4]。

该抗混叠滤波器电路的结构是: 在信号输入端设置一个高频变压器将单端信号转换为差分信号; 其输出信号将流入差分放大器 ADL5562 (其增益为 6 dB、12 dB、15.5 dB 可选, 根据用以抵消滤波器网络和其他元件所产生的插入损耗所需增益进行增益选择, 本电路所选增益为 12 dB)。经过差分放大器放大后的信号将会流入设计好的三阶巴特沃斯滤波器。此外, 为了在抗混叠滤波器设计中获得最优的系统性能, 在放大器、滤波器和 ADC 之间进行了隔离。

3.3 电路测试

对图 4 中的电路进行测试, 给滤波器输入一个 1.5 dBm (751 mV)、127 MHz 的正弦信号, 使高速 ADC 采样频率工作在 205 MS/s, 测得的输出参数如图 5 和表 1 所示。

从表 1 中数据可以看出, 在 1.5 dBm (751 mV)、127 MHz

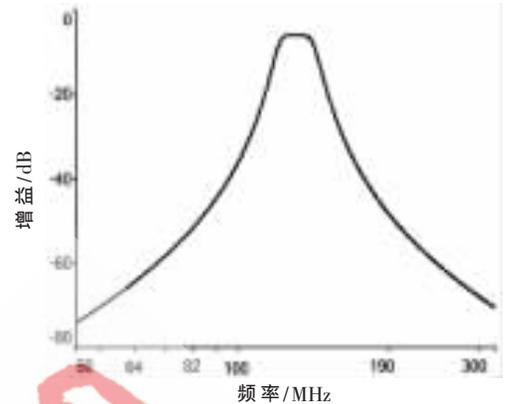


图 5 滤波器幅频响应

表 1 电路测试结果

测试参数	测试结果
中心频率/MHz	127
输出电平(输入 1.5 dBm(751 mV))	7.1 dBm(1.431 V)
系统总增益/dB	5.6
通带平坦度/dB	3(118 MHz~136 MHz)
信噪比(SNR)/dBc	73.7
无杂散动态范围(SFDR)/dBc	92

信号输入下, 整个系统在中心频率位置为 127 MHz, 在中心位置测得输出信号的电平为 7.1 dBm(1.431 V), 即放大器增益抵消插入损耗后, 对输入信号增益 5.6 dB。图 5 为该滤波器幅频响应, 可见其通带平坦度很好, 3 dB 带宽为 18 MHz, 且截止特性良好。该测试结果显示, 抗混叠滤波器工作性能达到设计要求, 可以有效消除信号混叠现象, 使采样系统能正确采样, 并在提供额外增益的同时保持较好的系统动态性能。

在进行 PCB 板布线时, 需考虑 PCB 板存在的寄生现象、电源的旁路、线路阻抗的控制、元件的布局、信号的走向、电源与地的位置等问题。使用低寄生效应的贴片电阻、电容和电感可有效降低 PCB 板存在的寄生现象, 也可减少信号走线长度, 有效控制线路阻抗。在多层板布线时, 可通过将地层放置在信号层下方 40 mil~60 mil (1.016 mm~1.524 mm) 处, 形成高频滤波电容, 以提高电路抗干扰能力。

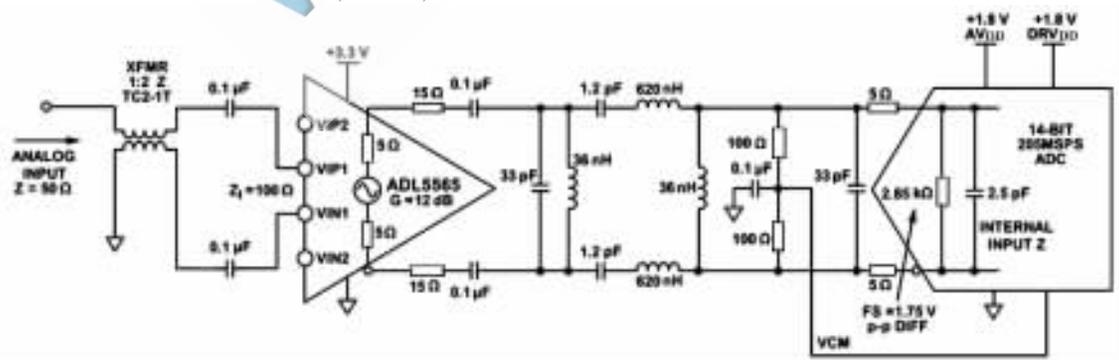


图 4 高频信号直接采样系统中抗混叠滤波器电路

在进行高频信号直接采样时,使用抗混叠滤波器消除信号混叠现象性价比更高。本文使用由三阶巴特沃斯滤波器和低噪声超宽带宽差分放大器 ADL5562 设计出高频信号直接采样系统中的抗混叠滤波器。通过测试证明,该滤波器可以有效地消除信号混叠现象,使系统能稳定、可靠地对特定输入信号进行高速直接采样。

参考文献

- [1] 于雷.中频直接采样技术研究[D].南京:南京理工大学,2001.
- [2] Analog Device. Amplifier with switched capacitor ADC interface matching method [EB/OL].(2006-01-06)[2012-11-24].http://www.analog.com/static/imported-files/zh/application_notes/AN_827_cn.pdf.
- [3] 张乐,张新军,施聪,等.中频采样的原理及其应用[J].通

信技术,2001(9):8-11.

- [4] Analog Device. High IF sampling receiver front end with band-pass filter[EB/OL].(2012-07-12)[2012-11-24].
http://www.analog.com/static/imported-files/circuit_notes/CN0279.pdf.

(收稿日期:2012-11-28)

作者简介:

文智江,男,1987年生,硕士研究生,主要研究方向:智能传感器与传感器网络。

朱名日,男,1954年生,博士,硕士生导师,主要研究方向:嵌入式系统、自动化装置等。

