

模拟集成滤波器发展综述

蔡理

(西安交通大学 电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 简要地回顾了模拟集成滤波器的发展历程,综述了其种类、设计方法和实现技术,最后,对未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 模拟集成滤波器;连续时间;电流模式;低电压;高频率

中图分类号: TN713 **文献标识码:**A **文章编号:** 1009-3516(2000)02-0091-04

随着微电子技术的发展,有源滤波器在电子设备中获得越来越广泛地应用(如电视、计算机硬盘驱动器、电话和无线通讯等)。特别是近几年电子设备和装置趋近于小型化、微型化,所以,要求高集成度且低电压、低功耗的滤波器。因而,研制低功耗、高频率的模拟集成滤波器是模拟信号处理领域的一个重要课题。模拟集成滤波器发展趋势是低电压、低功耗及高工作频率和大动态范围,它是现代有源滤波器发展的方向。

1 历史的回顾

滤波器作为一门学科发展至今已有八十多年的历史,早在1915年美国的Campbell(坎贝尔)和德国的Wagner(瓦格纳)各自独立地发展了无源滤波器。有源RC滤波器的研制很早就开始了。1945年Bode(波特)就提出了用高增益反相放大器作为有源元件与无源回路组成反馈放大器理论的基本思想。1954年Linville(李闻)用负阻抗变换器的转移阻抗综合实现了第一个有源滤波器。1955年Sallen-Key应用单放大器实现了有源RC滤波器,为实用设计开辟了新途径。1965年单片集成运放问世,为有源滤波器的迅速发展和普及提供了物质基础。

70年代,由于线性集成电路工艺的发展,研制出了用于数字通讯设备系统的混合集成有源RC滤波器。1970年后,人们开始注意到运放模型的非理想特性,出现了许多有源补偿和无源补偿方法。同时,还出现了有源R滤波器和有源C滤波器。有源滤波器均已进入实用阶段,在低频领域中获得广泛应用。

由于有源RC滤波器中的电阻集成需要占用较大的芯片面积,70年代末,开始研究取代电阻的方法。1977年成功地研制成采用MOS管和MOS电容组成的开关来模拟“电阻”,进而完全取代有源RC滤波器中的电阻,构成单片全集成开关电容滤波器。开关电容滤波器是由MOS开关、MOS电容和MOS运算放大器构成的一种大规模集成电路滤波器。早在1966年,就有人指出开关电容滤波网络的特性仅取决于网络中的电容比,这一点是很重要的。人们在探索处理有源RC滤波器的单片实现时发现,许多有源RC滤波器的特性取决于RC乘积,而在MOS单片处理中,很难得到精确且稳定的RC乘积。然而,在同一块硅片上实现精确且稳定的电容比是不难的。而且与有源RC滤波器相比,开关电容滤波器更易于实现单片集成,适合成批生产,这是滤波器从分立走向全集成的重大突破。

然而,开关电容电路也存在很多问题。由于它具有采样数据系统性质,因而信号频率受时钟频率制约,限制了它的应用频域。80年代,当开关电容电路技术应用于高频遇到挑战后,人们又开始把注意力转向全集成连续时间电路技术。全集成连续时间滤波器的理论和设计是近代电路理论的一个重要领域。近年来,国外非常重视高频率(现可达上百MHz)集成滤波器的研究,因为这类滤波器在视频信号处理、硬盘驱动器、电话和

无线通信等方面有着广泛的应用。连续时间滤波器的最大优点是不受采样频率的制约。但能适应 10MHz 以上频率的,只有 g_m-C (跨导-C)或 OTA-C 和电流模式滤波器。电流模式集成连续时间滤波器,由于其电路具有许多优点,已成为国际上一个广泛研究的前沿课题。

目前,“瞬时伸展”技术已成为模拟集成电路设计中的新的研究领域。它是当今模拟信号处理中广泛关注的一个研究热点。当前这个技术应用的主要范围是实现具有宽动态范围(可达 60 分贝以上)、高频率潜能(最高可达几百 MHz)和大调谐能力的连续时间全集成滤波器。在这个方法中,最突出的例子是对数域技术,它直接利用了晶体管的电流与电压的指数特性来实现输入—输出线性滤波器。

2 模拟集成滤波器的种类

模拟集成滤波器有两种分类方式:其一是按电路的电压和电流连续性分为两种:连续时间(如 MOSFET-C, g_m-C (或 OTA-C)等)和采样数据(如开关电容 SC, 开关电流 SI)。后者在低频、高精度场合,采样数据滤波器,特别是 SC 获得了广泛应用。1989 年,SI 作为另一种技术被提出,接着出现了第二代 SI,1994 年又提出了低电压全差分 SI 滤波器,近年来,受数字电路发展的限制和市场上便携电器(如移动电话)的大量需求,低电压已成为集成电路一个必须遵守的条件,然而,低电压给 SI 电路中 MOS 开关的导通造成一定困难,到目前为止,还没有相应的解决方法,因此,SI 滤波器并不比 SC 滤波器占多大的优势。在采样数据滤波器的实际应用中,最严重问题是时钟馈通和电荷注入,它很难预测也很难消除。随着采样频率的提高,这种影响愈加显著。通常,采样数据(SC 和 SI)滤波器仅限于低频应用。此外,采样数据滤波器在实际工作时还需要有相应的接口电路,抗混叠滤波器和平滑滤波器,它们将会降低电路的动态范围。

连续时间(CT)滤波器在频率上比采样数据电路具有较大的优势,由于它不需要远高于通带的时钟信号,因而也就避免了时钟馈通影响。近年来,CT 滤波器已经取得了令人瞩目的进展,在模拟信号处理中获得了广泛应用,如视频信号处理、硬盘驱动器、电话和无线通信等。此外,CT 滤波器还大量用于 A/D 和 D/A 所必须的抗混叠和平滑(应用例子如数字电视和高分辨率电视)。MOSFET-C 滤波器从原理上解决了有源 RC 滤波器难以集成的问题,是继 SC 滤波器后的第二种全集成电路,MOSFET-C 滤波器对寄生参数不很敏感,但受运算放大器频率限制,工作频率较低。而 g_m-C (或 OTA-C)滤波器,它具有明显的优点:电路简单,工作频率高;跨导放大器具有外部可调的 G_m ,可以用外部电流(电压)控制特性,调整方便;跨导和电容均与 MOS 工艺相容,便于单片集成。

其二的分类方式是按信号处理方式又分为电压模式(如有源 RC, 开关电容 SC)和电流模式(如电流传输器 CC I, 开关电流 SI, 电流镜)。以往的电路均是按电压方式处理信号的。当前,电流模式电路受到人们的重视,电流模式电路主要由于电源电压降低后,为克服信号电压幅值的失真,所以,要采用电流模式。电流模式电路主要有以下一些特点:结构简单,易于实现信号处理中的一些基本运算;频带宽;电路精度高;动态范围大,适合于低电压、低功耗滤波;工艺简单,易于集成。

3 设计方法

滤波器设计方法是实现滤波器的重要手段。从 50 年代以来,滤波器设计日趋完善,60 年代中期到 70 年代初,涌现了许多有源网络设计理论和多种设计方法,如直接法、模拟电感法、频率相关负电阻法、级联法和多重回路反馈法(包括 FLF、PRB、LF 和 MLF 等)等。这阶段是有源网络发展的最活跃时期。滤波器设计方法主要有两大类:

3.1 级联法

级联设计因设计简单、方法灵活、调整方便等优点,成为滤波器设计流行的方法之一。70 年代发展起来的有源 RC 双二次节对这一方法起了推动作用。级联设计的关键是二阶基本节的设计,它的结构很多,因涉及到的实现技术不同而有所不同(如:有源 RC, SC 滤波器, MOSFET-C 和 g_m-C 滤波器,以及现流行的 Log-Domain 滤波器)。

3.2 直接法

亦称无源 LC 网络模拟法,是以无源 LC 梯型网络为原型,采用有源网络模拟该结构的方法。依此法设计

出的有源网络继承了原型网络低灵敏度的性能。直接法又分为元件模拟和反馈设计。

(1)元件模拟:有电感 L 模拟和频变负阻FDNR模拟。实现有源模拟电感和频变负阻的技术很多,如:GIC技术、NIC技术、有源RC、开关电容SC技术、OTA技术和MOSFET技术等,其中OTA技术和MOSFET技术可实现电调节的模拟电感和频变负阻。

(2)反馈设计:主要有随从反馈FLF,逆随从反馈IFLF,主谐振器PRB,跳偶LF和改进跳偶MLF等。

4 实现技术

滤波器实现是滤波器设计的最终目的,它与电路技术和工艺的发展水平密切相关。现代全集成滤波器技术分为两大分支:连续时间技术和采样数据技术。

4.1 连续时间技术

连续时间滤波器几十年来一直是滤波的主要实现手段,这是因为:连续时间滤波器是一种直接信号处理方式,不需要采样保持、防混叠和平滑辅助装置,也没有采样数据滤波器的时钟馈通等问题,近年来,发展特别迅速。①早期有:无源RC、RLC滤波器,特点是稳定、灵敏度低,但体积大,无法集成。②后期有:有源RC滤波器和有源R滤波器,特点是可集成,但频率低,占用芯片面积大。③现代有:MOSFET-C滤波器和 g_m -C(或OTA-C)滤波器,特点是集成度高、功耗低、工作频率高,特别是 g_m -C滤波器,以电路简单、工作频率高、调节方便等特点著称。还有电流传输器(CC I)和电流镜构成的滤波器也是现代滤波器的潮流。④新近发展起来的有:“瞬时缩展”技术型滤波器,特点是低电压、低功耗、宽动态范围、高频率潜能和大调谐能力,是很具有应用前途的滤波技术。

4.2 采样数据技术

采样数据滤波器是一种介于连续时间滤波器和数字滤波器之间的系统,它兼有模数系统的一些特点。特别是它适合于VLSI技术,可作模数系统的接口,成为当前模拟混合系统中的一种非常重要的单片集成滤波器。开关电容(SC)和开关电流(SI)是两种典型的采样数据滤波器,SC是电压型滤波器,SI是电流型滤波器。①SC滤波器:是1977年研制成功的单片集成滤波器,它由MOS运放、MOS电容和MOS开关组成的有源开关电容网络。特点是:电路的极点和时间常数由电容的比值确定,其比值可精确地控制,因此,SC技术可获得高精度滤波器。②SI滤波器:是1989年提出的新技术,它是由MOS晶体管(包括MOS开关)组成,以电流镜为基本块的全MOS型集成滤波器。特点是:不需要运算放大器,适合于CMOS集成工艺,且电路以集成模式工作,可以采用低电源标准等,特别适合于混合模数系统及高频应用。采样数据滤波器的共同缺点是系统工作频率受采样频率限制及存在防混叠效应和时钟馈通等问题,这些制约了采样数据滤波器的性能。

5 模拟集成滤波器发展现状及趋势

模拟集成滤波器包括连续时间和采样数据滤波器,已被证明是近十几年来集成电路技术最成功的应用领域。集成连续时间滤波器,尤其是连续时间电流模式滤波器,适合于高频率、低电压、低功耗、大动态范围的直接信号处理应用领域;采样数据滤波器,其传输特性仅取决于时钟频率和元件参数的比值(如电容比和跨导比等),具有良好的精度和稳定性,此外,采样数据滤波器可采用分时电路技术,可获得高效率的信号通道系统,并与数字滤波器兼容,在同一单片上获得混合模数系统。连续时间滤波器和采样数据滤波器相互补充,形成当今集成滤波器技术两大研究方向。未来集成滤波器的发展取决于集成电路技术的水平,并向集成电路技术提出了更高的要求。因此,对未来模拟集成滤波器的发展进行展望,它的发展趋势应具有如下一些特征:微工艺、高集成度;低成本、高质量系统;单片单一工艺、标准化数字工艺系统;低电源电压、低功耗;宽动态范围和更高工作频率的应用等。

由于应用的需要,目前模拟集成滤波器的发展趋势朝着低电压、低功耗和更高的工作频率上发展,因此,传统的模拟集成电路设计方法已很难适应这一需求。常规技术中,为了得到所要求的线性传递函数,需将原有的非线性器件线性化,就不可避免地需要一额外条件,即:或是增加功耗,或是降低工作速度。近来,在模拟集成电路设计中出现的瞬时缩展技术,可以很好地解决在低电源电压下,保持动态范围和高频率工作的问题。在这个方法中,由于可利用大信号器件方程,所以,根本不需要小信号工作或是局部线性化技术。既然不

需要任何线性化,就避免了相应间接的功率损耗。而且,在低功率电源电压下,这样的电路对动态范围和高频率工作仍具有潜能,所以,这种滤波器具有广泛应用前途。这种电路的最大特点是“外部线性,内部非线性”(ELIN),尽管整个系统输入—输出线性,但对系统内部信号而言仍是非线性的,它与常规实现技术不同。

6 结束语

20世纪80年代后,由于应用的需要和VLSI技术的发展,模拟集成滤波器得到了高速发展,涌现出许多滤波技术。未来的滤波器也必将顺应VLSI技术的潮流,朝微型化、低功耗、高工作频率和大动态范围的方向发展。进一步降低电源电压、减少电路功耗和提高工作频率是电路设计者的重要任务。

参 考 文 献

- [1] Y. P. Tsividis. Circuits Syst[J]. IEEE Trans, 1998, 45(9): 1181~1187.
- [2] B. Gilbert. Solid—State Circuits[J]. IEEE J, 1998, 33(1): 2~17.
- [3] L. P. Huelsman, P. E. Allen. Introduction to the theory and design of active filters[M]. McGraw—Hill Book Company, 1980.

An Overview for Development of the Analog Integrated Filters

CAI Li

(The Institute of Electrical of Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper briefly reviews the development course of the analog integrated filters. The class, design methods and implementing techniques of the analog integrated filters are given, and then the intended development tendency is proposed.

Key words: analog integrated filters; continuous-time; current mode; low voltage; high frequency

声 明

为适应我国信息化建设的需要,扩大作者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和《中国期刊网》全文数据库,其作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。免费提供作者文章引用统计分析资料。如作者不同意将文章编入该数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

空军工程大学学报编辑部

2000年6月20日