

# PRQMF 滤波器组理论与 宽带高速高分辨率ADC

彭安金 著



电子科技大学出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

PRQMF 滤波器组理论与宽带高速高分辨率 ADC / 彭安金著.  
—成都: 电子科技大学出版社, 2012. 3

ISBN 978-7-5647-1114-6

I. ①P… II. ①彭… III. ①滤波器组—理论②高分  
辨率—研究 IV. ①TN713②0435

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 031405 号

PRQMF 滤波器组理论与宽带高速高分辨率 ADC

彭安金 著

---

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦  
邮编: 610051)  
策划编辑: 郭蜀燕  
责任编辑: 周 岚  
主 页: [www.uestcp.com.cn](http://www.uestcp.com.cn)  
电子邮箱: [uestcp@uestcp.com.cn](mailto:uestcp@uestcp.com.cn)  
发 行: 新华书店经销  
印 刷: 郫县犀浦印刷厂  
成品尺寸: 170mm×240 mm 印张 10.25 字数 140 千字  
版 次: 2012 年 3 月第一版  
印 次: 2012 年 3 月第一次印刷  
书 号: ISBN 978-7-5647-1114-6  
定 价: 28.00 元

---

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

# 前 言

模/数转换器（ADC）是连接模拟信号和数字信号的桥梁。无论是软件无线电还是超宽带雷达领域均需要一种宽带高速高分辨率ADC，然而这种ADC难于实现。ADC采样速率与分辨率的关系表明，若ADC采样速率高，则其分辨率就低；若ADC分辨率高，则其采样速率就低。很明显，高速的闪速ADC、子区ADC，高分辨率的逐次逼近ADC、 $\Sigma\Delta$ ADC，均不能同时满足高速、高分辨率的要求。ADC分辨率决定其输入模拟信号的量化级数，采样速率决定其输入模拟信号的最大带宽。由于ADC不能同时满足高速、高分辨率的要求，降低采样速率固然可换得高分辨率，但ADC采样速率降低，其处理的模拟信号带宽也降低，这显然与宽带高速的要求相矛盾。然而倘若将宽带信号分割成多路窄带信号，并选取合适的高分辨率ADC，将各路窄带信号并行数字化，就有可能达到将宽带模拟信号数字化的目的。但问题是怎样将宽带信号分割成多路窄带信号，又怎样将多路窄带信号理想重建成宽带信号？宽带信号的分割及其窄带信号的重建是本书研究的核心问题。尽管现有一种分割方案，但存在“盲区”，能否找到一种完全消除“盲区”的分割方法？答案是用PRQMF滤波器组进行分割。PRQMF滤波器组为具有理想重建特性的正交镜像滤波器组，它不仅能将宽带信号分割成 $M$ 个窄带信号，而且也能将这 $M$ 个窄带信号理想重建成宽带信号，若在PRQMF滤波器组的低速率级将各子频带信号并行数字化，便可得到PRQMF滤波器组ADC系统。

PRQMF滤波器组ADC系统是一种宽带高速高分辨率ADC系统，它在软件无线电、超宽带雷达、高速示波器、高速频谱仪等领域将会有广阔的应用前景。

本书研究工作的特色是将多速率数字信号处理理论、滤波器理论、带通采样定理及ADC原理融为一体而得到 $M$ 通道PRQMF滤波器组ADC系统,并对该ADC系统的原理、结构、特性进行了系统的探讨和研究。

本书出版的目的是总结 $M$ 通道PRQMF滤波器组ADC系统的研究成果,反映当前宽带高速高分辨率ADC研究的主要进展及存在的问题。

本书第1章对PRQMF滤波器组的研究现状、PRQMF滤波器组ADC系统的特点及国内外最新科研动态,进行了概括和总结。

第2章对PRQMF滤波器组ADC系统的原理、结构和性能进行了详尽的分析。此外,还对抽取器、零值内插器、PRQMF滤波器组的理想重建以及窄带信号的带通采样与重建等相关的理论进行了详细讨论。

第3章进一步研究了时域优化法,进而从理论上推导出了线性相位PRQMF滤波器组理想重建的一般规律。在此规律基础上,用逐步二次规划法SQP对线性相位PRQMF滤波器组的非线性优化求解进行了研究。

第4章对PRQMF滤波器组ADC系统的特性进行了研究,其中包括PRQMF滤波器组ADC系统的频响分析、量化噪声研究、重建误差研究以及重建误差对ADC间的失配敏感性研究。

第5章针对混合滤波器组ADC系统因其ADC输入模拟带宽低而不能满足软件无线电直接射频采样的瓶颈,提出了高速混合滤波器组ADC系统,该ADC系统不仅克服了此瓶颈的限制,而且完全消除了采样“盲区”。

第6章提出了高效混合滤波器组ADC系统,它不仅能将软件无线电工作频带( $2\sim 2000\text{ MHz}$ )内的射频信号直接进行模/数转换,而且其输出的数字信号速率比高速混合滤波器组ADC系统降低 $(M-1)$ 倍,有效分辨率比其ADC提高 $0.5\log_2 M$ 比特。

第7章提出了一种基于PRQMF滤波器组多相结构的高速高分辨率时间交织ADC系统,它克服了原时间交织ADC系统采样非均匀及分辨率低的缺点,其有效分辨率比后者提高 $0.5\log_2 M$ 比特。

线性相位PRQMF滤波器组是当今多速率数字信号处理领域的研究热点之一,本书从理论上推导出了其理想重建的一般规律,这对进一步研究线性相位PRQMF滤波器组设计理论有重要意义。此外,本书提出的高速混合滤波器组ADC系统、高效混合滤波器组ADC系统、高速高分辨率时间交织ADC系统,均具有实用价值。

本书是作者在博士学习期间以及后续研究的科研成果基础上写成。本书的出版得到了西南民族大学一体两翼项目基金(26701402)和西南民族大学博士创新基金(234612)的资助。感谢电子科技大学自动化学院自动化测试教研室全体同仁以及西南民族大学电气信息工程学院领导对作者的研究工作提供的大力支持和帮助。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中不足之处在所难免,敬请专家和广大读者批评指正。

## 目 录

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                       | 1  |
| 1.1 引言 .....                         | 1  |
| 1.2 PRQMF 滤波器组的研究现状 .....            | 2  |
| 1.3 PRQMF 滤波器组 ADC 系统的特点及国内外动态 ..... | 3  |
| 1.4 本书的主要内容和创新之处 .....               | 4  |
| 第 2 章 PRQMF 滤波器组 ADC 系统 .....        | 7  |
| 2.1 低通滤波器与 ADC .....                 | 7  |
| 2.1.1 模/数转换过程 .....                  | 7  |
| 2.1.2 ADC 量化噪声分析 .....               | 7  |
| 2.2 PRQMF 滤波器组与宽带高速 ADC 系统 .....     | 13 |
| 2.2.1 抽取器 .....                      | 13 |
| 2.2.2 零值内插器 .....                    | 15 |
| 2.2.3 PRQMF 滤波器组 .....               | 17 |
| 2.2.4 窄带信号的带通采样与重建 .....             | 20 |
| 2.2.5 PRQMF 滤波器组 ADC 系统的结构 .....     | 25 |
| 2.3 PRQMF 滤波器组 ADC 系统的类型 .....       | 26 |
| 2.3.1 时间交织 ADC 系统 .....              | 26 |
| 2.3.2 开关电容滤波器组 ADC 系统 .....          | 28 |
| 2.3.3 PRQMF 混合滤波器组 ADC 系统 .....      | 29 |
| 2.4 本章小结 .....                       | 30 |
| 第 3 章 PRQMF 滤波器组分析及其非线性优化研究 .....    | 31 |
| 3.1 引言 .....                         | 31 |



|       |                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 3.2   | PRQMF 滤波器组的 PR 条件 .....                          | 31 |
| 3.2.1 | 两通道 PRQMF 滤波器组分析 .....                           | 32 |
| 3.2.2 | $M$ 通道滤波器组分析 .....                               | 36 |
| 3.3   | PRQMF 滤波器组的非线性优化研究 .....                         | 57 |
| 3.3.1 | PRQMF 滤波器组目标函数的建立 .....                          | 57 |
| 3.3.2 | PRQMF 滤波器组目标函数 SQP 的求解 .....                     | 61 |
| 3.4   | 本章小结 .....                                       | 74 |
| 第 4 章 | PRQMF 滤波器组 ADC 系统的特性研究 .....                     | 75 |
| 4.1   | 引言 .....                                         | 75 |
| 4.2   | PRQMF 滤波器组 ADC 系统的有效采样速率 .....                   | 75 |
| 4.3   | PRQMF 滤波器组 ADC 系统的频响分析 .....                     | 76 |
| 4.3.1 | PRQMF 数字滤波器组 ADC 系统的频响分析 .....                   | 76 |
| 4.3.2 | PRQMF 混合滤波器组 ADC 系统的频响分析 .....                   | 76 |
| 4.4   | PRQMF 滤波器组 ADC 系统的量化噪声研究 .....                   | 82 |
| 4.4.1 | ADC 系统的量化噪声分析 .....                              | 82 |
| 4.4.2 | PRQMF 数字滤波器组 ADC 系统的量化噪声<br>研究 .....             | 82 |
| 4.4.3 | PRQMF 混合滤波器组 ADC 系统的量化噪声<br>研究 .....             | 87 |
| 4.4.4 | 时间交织 ADC 系统的量化噪声研究 .....                         | 90 |
| 4.5   | PRQMF 滤波器组 ADC 系统的重建误差研究 .....                   | 90 |
| 4.5.1 | PRQMF 数字滤波器组 ADC 系统的重建误差<br>研究 .....             | 91 |
| 4.5.2 | 混合滤波器组 ADC 系统的重建误差研究 .....                       | 95 |
| 4.6   | PRQMF 滤波器组 ADC 系统的重建误差对其 ADC 间的<br>失配敏感性研究 ..... | 98 |
| 4.7   | 本章小结 .....                                       | 99 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第 5 章 高速混合滤波器组 ADC 系统研究 .....    | 101 |
| 5.1 引言 .....                     | 101 |
| 5.2 抽取器数学模型 .....                | 102 |
| 5.3 SHA 抽取器 .....                | 108 |
| 5.4 高速混合滤波器组 ADC 系统 .....        | 108 |
| 5.5 高速混合滤波器组 ADC 系统的模拟仿真 .....   | 109 |
| 5.5.1 混合滤波器组仿真 .....             | 109 |
| 5.5.2 高速混合滤波器组 ADC 系统仿真 .....    | 111 |
| 5.6 本章小结 .....                   | 112 |
| 第 6 章 高效混合滤波器组 ADC 系统研究 .....    | 113 |
| 6.1 引言 .....                     | 113 |
| 6.2 抽取器 .....                    | 113 |
| 6.2.1 抽取器数学模型 .....              | 113 |
| 6.2.2 抽取器的结构 .....               | 117 |
| 6.3 欠采样高速混合滤波器组 ADC 系统 .....     | 118 |
| 6.4 高效混合滤波器组 ADC 系统 .....        | 119 |
| 6.4.1 无线电射频信号频谱特点 .....          | 119 |
| 6.4.2 高效混合滤波器组 ADC 系统的结构 .....   | 119 |
| 6.4.3 高效混合滤波器组 ADC 系统的量化噪声分析 ..  | 121 |
| 6.5 高效混合滤波器组 ADC 系统的模拟仿真 .....   | 123 |
| 6.6 本章小结 .....                   | 124 |
| 第 7 章 高速高分辨率时间交织 ADC 系统研究 .....  | 125 |
| 7.1 引言 .....                     | 125 |
| 7.2 高速高分辨率时间交织 ADC 系统 .....      | 125 |
| 7.2.1 FIR 滤波器的多相分量 .....         | 126 |
| 7.2.2 PRQMF 数字滤波器组的多相结构 .....    | 128 |
| 7.2.3 高速高分辨率时间交织 ADC 系统的结构 ..... | 131 |





|             |                                    |     |
|-------------|------------------------------------|-----|
| 7.2.4       | 余弦调制 PRQMF 数字滤波器的设计 .....          | 133 |
| 7.3         | 高速高分辨率时间交织 ADC 系统的量化噪声研究.....      | 136 |
| 7.3.1       | ADC 的量化噪声分析 .....                  | 136 |
| 7.3.2       | 高速高分辨率时间交织 ADC 系统的量化噪声<br>分析 ..... | 137 |
| 7.4         | 高速高分辨率时间交织 ADC 系统的重建误差研究.....      | 139 |
| 7.5         | 本章小结 .....                         | 142 |
| 主要符号表 ..... |                                    | 143 |
| 参考文献 .....  |                                    | 144 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

信息技术的飞速发展对ADC的要求越来越高,比如在数字频谱仪、软件无线电<sup>[9,13,14,15]</sup>领域。数字频谱仪、动态信号分析仪需16比特的ADC,然而这类ADC产品的采样速率还仅在80MHz以内,远不能满足分析更高频率信号的需求。软件无线电的射频信号工作频带为2MHz~2GHz,它是一种宽带模拟信号,要对该工作频带内的射频信号直接进行模/数转换,需要一片采样速率高达4GSPS以上的ADC,而且因软件无线电的实际需求,其分辨率要求至少12比特。显然,无论是测试信号分析还是软件无线电接收,都需要宽带高速高分辨率的ADC。

然而,ADC采样速率与分辨率<sup>[16~21,23~26]</sup>的关系表明,若ADC采样速率高,则其分辨率就低;若ADC分辨率高,则其采样速率就低。很明显,高速的闪速ADC、子区ADC,高分辨率的逐次逼近ADC、 $\Sigma\Delta$ ADC,均不能同时满足高速、高分辨率的要求。ADC分辨率决定其输入模拟信号的量化级数,采样速率决定其输入模拟信号的最大带宽。由于ADC不能同时满足高速、高分辨率的要求,降低采样速率固然可换得高分辨率,但ADC采样速率降低,其处理的模拟信号带宽也降低,这显然与宽带高速的要求相矛盾。然而倘若将宽带信号分割成多路窄带信号,并选取合适的高分辨率ADC,将各路窄带信号并行数字化,就有可能达到将宽带模拟信号数字化的目的。但问题是怎样将宽带信号分割成多路窄带信号,又怎样将多路窄带信号理想重建成宽带信号?宽带信号的分割及其窄带信号



的重建是本书研究的核心问题。文献[9]中给出了一种分割方案,但存在“盲区”,能否找到一种完全消除“盲区”的分割方法?答案是用PRQMF滤波器组进行分割。PRQMF滤波器组为具有理想重建特性的正交镜像滤波器组,它不仅能将宽带信号分割成 $M$ 个窄带信号,而且也能将这 $M$ 个窄带信号理想重建成宽带信号,若在PRQMF滤波器组的低速率级将各子频带信号并行数字化,便可得到PRQMF滤波器组ADC系统。

PRQMF滤波器组ADC系统是一种宽带高速高分辨率ADC系统,它在软件无线电、高速示波器、高速频谱仪、虚拟仪器等领域将会有广阔的应用前景。

## 1.2 PRQMF 滤波器组的研究现状

对两通道 PRQMF 滤波器组 (Perfect Reconstruction Quadrature Mirror Filter banks) 的研究始于 20 世纪 80 年代初,根据设计方法的不同特点,适合两通道的研究方法主要有:(1) 频谱分解法 (spectral factorization)<sup>[27~30]</sup>; (2) 格形结构法 (lattice structure)<sup>[31~33]</sup>; (3) 时域优化法 (time-domain optimization)<sup>[34]</sup>; (4) 二次约束的最小二乘优化法 (quadratic-constrained least-squares optimization)<sup>[35]</sup>; (5) 拉格朗日乘子法 (Lagrange multiplier)<sup>[36]</sup>。到了 1987 年, P.P. Vaidyanathan 对  $M$  通道 PRQMF 滤波器组的研究取得突破。<sup>[37]</sup> 适合  $M$  通道的研究方法主要有:(1) 格形结构参数法 (lattice structure parameterization)<sup>[33,38,39]</sup>; (2) 时域优化法 (time-domain optimization)<sup>[34,35,40,41]</sup>; (3) 余弦调制法 (cosine modulation)<sup>[42]</sup>。尽管格形结构参数法设计的 PRQMF 滤波器组性能好,其线性相位 (LP) 特性和理想重建 (PR, Perfect Reconstruction) 特性不受格形结构参数的量化误差影响,但求解格形结构参数非常复杂;用余弦调制法设计 PRQMF 滤波器组虽然简单,但其频带分割不均匀;用时域优化法设计 PRQMF 滤波器组,虽然其频带分割均匀,但要用

到非线性优化,然而非线性优化迭代求解还是要比格形结构参数法的格形结构寻找有规律得多。无论采用哪种方法设计线性相位 PRQMF 滤波器组,都必须满足线性相位 PRQMF 滤波器组理想重建的一般规律,即线性相位 PRQMF 滤波器组的分析滤波器组中:

(1) 滤波器的对称性及其长度的奇偶性该满足何种组合? (2) 滤波器的长度又该满足何种条件? (3) 非同一滤波器的系数之间还应满足何种关系? 在 Internet 网上对所有 IEEE 和 IEE 近 14 年的文献搜索后,均未发现有揭示此规律的文献。在文献[41]的基础上,深入研究线性相位 PRQMF 滤波器组理想重建特性后,作者从理论上推导出线性相位 PRQMF 滤波器组理想重建的一般规律。目前已发表的文献[28, 32, 33, 40, 41, 43~57]以及美国 Wisconsin 大学 Trac Duy Tran 的博士论文<sup>[121]</sup>,结果均符合这一规律。

### 1.3 PRQMF 滤波器组 ADC 系统的特点及国内外动态

PRQMF 滤波器组 ADC 系统包括时间交织 ADC 系统、开关电容滤波器组 ADC 系统和混合滤波器组 ADC 系统等。其中,开关电容滤波器组 ADC 系统和混合滤波器组 ADC 系统均为宽带 ADC 系统,而时间交织 ADC 系统则为窄带 ADC 系统,这是由于其滤波器组不对输入信号进行频带分割的缘故。

时间交织 ADC 系统,于 1980 年,由 W.C. Black 与 D.A. Hodges 在文献[64]中提出。它的优点为有效采样速率比其 ADC 提高了  $(M-1)$  倍,它的缺点是由采样非均匀性和 ADC 间的失配(即增益误差)所产生的误差制约了其有效分辨率的提高。

开关电容滤波器组 ADC 系统,于 1992 年,由 A. Petraglia 与 S.K. Mitra 在文献[81]中提出。它的优点为有效采样速率比其 ADC 提高了  $(M-1)$  倍,它的有效分辨率比时间交织 ADC 系统提高了 2



比特左右,这是因为由 ADC 间的失配所致的混迭误差受到了 PRQMF 滤波器组抑制。此外,该 ADC 系统中所有 ADC 对其相应子频带信号的模/数转换也是同步的,因而克服了时间交织 ADC 系统采样非均匀的弱点。它的缺点是由于使用了开关电容电路,其采样速率受到制约,而且由开关电容电路引入的开关噪声限制了该 ADC 系统信噪比进一步提高。

混合滤波器组 ADC 系统,于 1998 年,由 S. R. Velazquez、T. Q. Nguyen 和 S. R. Broadstone 在文献[75]中提出。它的优点为有效采样速率比其 ADC 提高了  $(M-1)$  倍,可达几百兆赫兹,有效分辨率可提高 2~4 比特,可超过 14 比特,这是由于混合滤波器组 ADC 系统的分析滤波器组是用  $RLC$  网络而不是开关电容电路来实现的,所以混合滤波器组 ADC 系统克服了开关电容滤波器组 ADC 系统的速率和开关噪声的限制。它的缺点是分析滤波器组中用  $RLC$  网络实现的模拟滤波器阶数偏高,设计难度大。这是由于该分析滤波器组是由数字原型滤波器组通过  $z^{-1}=G(s)$  变换而来,其阶数为数字原型滤波器组的阶数与变换  $z^{-1}=G(s)$  的阶数之积的缘故。基于此缺点, P. Löwenborg、H. Johansson 和 L. Wanhammar 在文献[77, 84~86]中提出了一类低复杂度的混合滤波器组设计方法。

在国内,作者于 2002 年,在文献[123]中提出了高速混合滤波器组 ADC 系统,在文献[124]中提出了高速高分辨率时间交织 ADC 系统,在文献[125]中提出了高效混合滤波器组 ADC 系统。

## 1.4 本书的主要内容和创新之处

本书研究工作的特色是将多速率数字信号处理理论、滤波器理论、带通采样定理及 ADC 原理融为一体而得到  $M$  通道 PRQMF 滤波器组 ADC 系统,该 ADC 系统的有效采样速率是其 ADC 的  $M$  倍,而且有效分辨率也比其 ADC 高  $0.5\log_2 M$  比特。

全书主要内容及其组织安排如下:

第 2 章对 PRQMF 滤波器组 ADC 系统的原理、结构和性能进行详尽的分析,此外,还对抽取器、零值内插器、PRQMF 滤波器组的理想重建以及窄带信号的带通采样与重建等相关的理论进行详细讨论。

第 3 章在文献[41]的基础上进一步研究时域优化法,进而从理论上推导出线性相位 PRQMF 滤波器组理想重建的一般规律。在此规律基础上,用逐步二次规划法 SQP<sup>[4,57~63]</sup> (Sequential Quadratic Programming) 对线性相位 PRQMF 滤波器组的非线性优化求解进行研究。<sup>[1~3,5,6,8]</sup>

第 4 章对 PRQMF 滤波器组 ADC 系统的特性进行研究,其中包括 PRQMF 滤波器组 ADC 系统的频响分析、量化噪声研究、重建误差研究以及重建误差对 ADC 间的失配敏感性研究。

第 5 章针对混合滤波器组 ADC 系统因其 ADC 输入模拟带宽低而不能满足软件无线电直接射频采样的瓶颈,提出高速混合滤波器组 ADC 系统,该 ADC 系统不仅克服了此瓶颈的限制,而且完全消除了采样“盲区”。

第 6 章提出高效混合滤波器组 ADC 系统,它不仅能将软件无线电工作频带(2~2000MHz)内的射频信号直接进行模/数转换,而且其输出的数字信号速率比高速混合滤波器组 ADC 系统降低  $(M-1)$  倍,有效分辨率比其 ADC 提高  $0.5\log_2 M$  比特。

第 7 章提出一种基于 PRQMF 滤波器组多相结构的高速高分辨率时间交织 ADC 系统,它克服了原时间交织 ADC 系统<sup>[64]</sup>采样不均匀及分辨率低的缺点,其有效分辨率比后者提高  $0.5\log_2 M$  比特。

总结上述研究内容,本书的创新之处为:

1. 从理论上推导出线性相位 PRQMF 滤波器组理想重建的一般规律,以及在此规律基础上对线性相位 PRQMF 滤波器组的逐步二次规划法 SQP 优化求解研究。



2. 对混合滤波器组 ADC 系统的频响特性研究、量化噪声研究、重建误差研究以及重建误差对 ADC 间的失配敏感性研究。
3. 提出高速混合滤波器组 ADC 系统。
4. 提出高效混合滤波器组 ADC 系统。
5. 提出高速高分辨率时间交织 ADC 系统。

## 第 2 章 PRQMF 滤波器组 ADC 系统

PRQMF 滤波器组 ADC 系统是一种宽带 ADC 系统，它由 PRQMF 滤波器组和多片 ADC 构成。

### 2.1 低通滤波器与 ADC

#### 2.1.1 模/数转换过程

模/数转换的结构如图 2-1 所示。图中， $H(s)$  为抗混迭模拟低通滤波器，虚线框部分为 ADC 模/数转换器，它包括采样保持器和量化器两部分，开关表示采样保持器，包含大写字母  $Q$  的这个方框表示量化器。 $H(s)$  滤出带限信号  $x(t)$  后，首先采样保持器在时间上对  $x(t)$  进行量化，量化间隔  $T=1/f_s$ ，量化结果为模拟离散信号  $x(nT)$ ；然后量化器在幅度上对  $x(nT)$  进行量化，量化宽度  $Q=R/2^B$ ，量化结果为数字信号  $y(n)$ 。其中  $R$  为 ADC 的满量程值， $f_s$  为 ADC 的采样速率， $B$  为 ADC 的字长宽度。

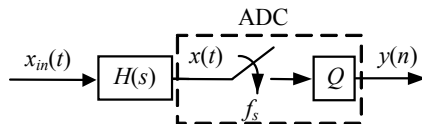


图 2-1 模/数转换结构

#### 2.1.2 ADC 量化噪声分析

由 ADC 的动态参数信噪比 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 决定的有效比特数  $N_{\text{eff}}$  为





$$N_{\text{eff}} = \frac{\text{SNR}(\text{dB}) - 1.76}{6.02} \quad (2-1)$$

式中

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\sigma_s^2}{\sigma_e^2} \quad (2-2)$$

式(2-2)表明在信号功率  $\sigma_s^2$  不变的条件下, 噪声功率  $\sigma_e^2$  越小则 SNR 越高。式(2-1)表明 SNR 越高则  $N_{\text{eff}}$  越大, ADC 模/数转换性能越好。很明显, 若在信号功率  $\sigma_s^2$  保持不变的条件下, 减小噪声功率  $\sigma_e^2$ , 则 ADC 模/数转换性能将会得到提高。ADC 在过采样条件下所得到的数字信号被带宽为  $f_s/2$  的低通滤波器滤波处理后能满足信号功率  $\sigma_s^2$  保持不变, 而噪声功率  $\sigma_e^2$  被减小的要求, 显然, 过采样 ADC 的模/数转换性能将会得到提高。由于不是所有 ADC 量化噪声功率谱密度的分布均相同, 故根据 ADC 量化噪声功率谱密度的分布情况, ADC 按其量化噪声是否被整形, 可分为普通 ADC (Nyquist ADC) 和  $\Sigma\Delta$  ADC 两大类。<sup>[100]</sup>普通 ADC 的量化噪声未被整形, 其量化噪声功率谱密度分布是均匀的, 而  $\Sigma\Delta$  ADC 的量化噪声被整形成所要求的形状, 因而在过采样条件下, 普通 ADC 的量化噪声和  $\Sigma\Delta$  ADC 的量化噪声在区间  $[-f_s/2, f_s/2]$  内是不同的。

### 一、过采样条件下普通 ADC 的量化噪声分析

考虑两个 ADC, 其抽样率分别为  $f_s$  和  $f'_s$ , 字长宽度分别为  $B$  和  $B'$ , 量化噪声功率及量化宽度分别为

$$\sigma_e^2 = \frac{Q^2}{12} \quad (2-3)$$

$$\sigma_e'^2 = \frac{Q'^2}{12} \quad (2-4)$$