

# 孔径抖动对中频采样系统信噪比影响的研究

曹 鹏, 费元春

(北京理工大学信息科学技术学院电子工程系, 北京 100081)

**摘 要:** 孔径抖动对中频(或射频)带通采样系统信噪比的影响非常严重. 理论上, 尽管相同带宽的中频信号和基带信号可以用相同的频率进行采样, 但中频采样受孔径抖动等因素的影响更大, 其采样技术要求也更高. 如果在中频采样系统中解决不好孔径抖动问题, 很可能根本采集不到正确的信号. 本文通过分析孔径抖动产生的原因, 孔径抖动与 ADC (模数转换器) 的信噪比以及与被采样信号上限频率之间的关系, 找出了由孔径抖动决定的被采样信号的上限频率与 ADC 模拟带宽之间存在差距的原因, 并发现了过采样率与处理增益及孔径抖动之间的关系. 最后, 介绍了几项减小孔径抖动的具体措施.

**关键词:** 孔径抖动; 带通采样; 基带采样; 信噪比; 高速 ADC; 数字中频采样

**中图分类号:** TN801, TN79<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 03-0381-03

## A Research for the Effect on the SNR of IF Sampling System Due to Aperture Jitter

CAO Peng, FEI Yuan-chun

(Dept of Electronic Engineering, School of Information Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aperture jitter heavily affects the performance of an intermediate frequency or radio frequency bandpass sampling system. In theory, although the IF signal and baseband signal with the same bandwidth can be sampled using the same frequency, sampling an IF signal is effected by jitter more badly, and its sampling techniques are more difficult. If the aperture jitter issues of IF sampling system can not be well solved, it will be very possible to miss the right digital signal. The paper analyzes the causation of inducing aperture jitter, and the relationships between aperture jitter, SNR of ADC and the highest frequency of sampled signal. It presents the reasons of introducing the error between the highest frequency of sampled signal and analog bandwidth of ADC, and finds out the relationship of over-sampling ratio and gain processing and aperture jitter among IF sampling system. At last, it introduces several actual methods to reduce the aperture jitter.

**Key words:** aperture jitter; bandpass sampling; baseband sampling; signal-to-noise ratio; high speed ADC; digital intermediate frequency sampling

### 1 引言

中频(或射频)带通采样技术已被广泛应用于现代军用或商用无线通信领域,如软件无线电、数字化基站、数字射频存储、数字中频接收机等.理论上,根据耐奎斯特定理和香农定理,可以用两倍以上信号带宽的采样速率对中频带通信号实现无失真的采样,也就是说可以用较低频率的采样信号去采样频率很高的中频信号.另外,有些文献中也介绍了中频过采样和欠采样技术的种种好处,如欠采样有下变频功能,过采样可以提高 ADC 的信噪比,可以用过采样率换取相应的 ADC “处理增益”等<sup>[1-4]</sup>.但与基带采样技术相比,中频采样受孔径抖动等因素的影响更严重,其采样难度更大,要实现中频采样并能充分发挥其优点,还有很多技术和理论上的问题都需要考虑和解决,其中之一就是孔径抖动问题.如果解决不好孔径抖动问题,很可能就根本采集不到正确的信号.目前,国内外

对高速信号采集系统中的孔径抖动问题越来越重视,这方面的研究也越来越多,但从理论上尚没有对由孔径抖动决定的被采样信号的最高频率与 ADC 模拟带宽之间的关系,以及中频带通采样系统中的过采样率与 ADC 的“处理增益”和孔径抖动之间的关系进行过专门研究.本文通过分析孔径抖动产生的原因及其与 ADC 的信噪比、被采样信号的上限频率之间的关系,找出了由孔径抖动决定的被采样信号的上限频率与 ADC 模拟带宽之间存在差距的原因,发现了中频采样系统的过采样率与“处理增益”和孔径抖动之间的关系,并介绍了几项减小孔径抖动的具体措施.

### 2 产生孔径抖动的原因

由于采样电路工作时存在充放电时间,造成实际被采样点与理想采样点之间存在着时间延迟,即孔径时间.固定的孔

径时间对 A/D 变换的影响可以通过软件或硬件修正,对 A/D 变换的精度并没有影响。但孔径时间的不确定性,即孔径抖动,会导致 A/D 变换精度和信噪比下降,且当被采样信号的频率越来越高时,这种影响也变得越来越严重。特别是采样中频或射频信号(如图 1 所示),由于被采样信号的频率往往从几十到几百 MHz,这时孔径抖动将严重地影响 A/D 变换的精度和信噪比,甚至根本采集不到正确信号。

导致孔径抖动的主要原因是采保电路开关时间不恒定性,还有采样时钟的相位噪声以及系统热噪声。把这三种因素综合起来,则采样系统的孔径抖动  $t_{jitter}$  可表示为

$$t_{jitter} = \sqrt{t_{T\_jitter}^2 + t_{T/H\_jitter}^2 + t_{jitter}^2} \quad (1)$$

其中,  $t_{T\_jitter}$  表示采样时钟相位抖动,用  $t_{T/H\_jitter}$  表示采保电路的开关时间的抖动,用  $t_{jitter}$  表示系统热噪声带来的等效抖动时间,以上各变量都是均方根值。

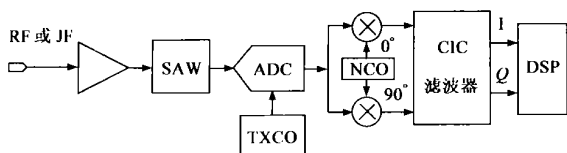


图 1 RF 或 IF 带通采样系统

### 3 孔径抖动引起的误差分析<sup>[5,6]</sup>

假设被采样的满度信号为  $v(t) = A \sin(2ft)$ , 斜率为  $dv/dt = A \cdot 2f \cos(2ft)$ 。显然其最大斜率点在正弦信号的过零点,即

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{\max} = \left(\frac{dv}{dt}\right) \Big|_{t=0} = A \cdot 2f \quad (2)$$

对一个已知的采样系统而言,由于 ADC 芯片、时钟及其布线和系统的热噪声的均方根值都可以近似的看成已知量,所以孔径抖动  $t_{jitter}$  可以被看成定值,由此带来的最大误差电压值  $v_{\max}$  (均方根值)为

$$v_{\max} = \left(\frac{dv}{dt}\right)_{\max} \times t_{jitter} = 2fAt_{jitter} \quad (3)$$

式(3)表明对于一个已知的采样系统,误差电压与输入信号频率  $f$  成正比例关系。在设计采样系统时,为了保证 A/D 变换的精度,此误差电压必须在  $\pm \frac{1}{2} \text{LSB}$  范围内(LSB 是 A/D 变换的最低有效位),即

$$v = \left(\frac{dv}{dt}\right)_{\max} \times t_{jitter} = 2fA \quad (4)$$

所以当系统的孔径抖动  $t_{jitter}$  一定时,在保证 A/D 变换的  $N$  位有效位的条件下,系统能精确采样的模拟信号的最高频率为

$$f_{\max} = \frac{1}{2 t_{jitter} \times 2^N} \quad (5)$$

式(5)表明了采样系统的孔径抖动和 ADC 的分辨率  $N$  决定着能被精确采样的正弦信号的上限频率。如 14 位的 ADC, 当其采样系统的孔径抖动为 0.7ps 时,为了保证 14 位精度,则被采样模拟信号的最高频率不能超过 13.4MHz。

反之,当输入信号的频率为  $f$  时,在保证 A/D 变换的  $N$  位有效位的条件下,则采样系统允许的孔径抖动必须满足下式

$$t_{jitter} = \frac{1}{2f \times 2^N} \quad (6)$$

上述推导结果与有些 ADC 的技术参数之间存在着较大差别。如 14 位的 A/D 变换器 AD6644 和 AD6645,其采样率分别可以达到 65Mps,80Mps,模拟输入带宽(3dB 功率压缩点)都为 250MHz,孔径抖动分别小于 0.3ps 和 0.2ps。把这些参数分别代入式(5),并假设孔径抖动分别为 0.4ps 和 0.3ps,则可推出 AD6644,AD6645 能够精确采样的模拟信号的最高频率分别为 24.3MHz 和 32.4MHz,远远低于其模拟带宽 250MHz。为什么会有这么大的差别?分析其原因,主要是因为后者计算(或测试)时,使用的是 ADC 的有效位(ENOB)而不是分辨率  $N$ ,且孔径抖动只考虑了 ADC 采保电路自身的孔径抖动。如果把式(5)中的分辨率  $N$  分别代入 AD6644,AD6645 的有效位 11.8 和 12.0,并把孔径抖动分别代入 0.3ps 和 0.2ps,则可推出 AD6644,AD6645 能够精确采样的模拟信号的最高频率分别为 149MHz 和 194MHz,如果再考虑 3dB 压缩点等,则可证明推导结果与 AD6644 和 AD6645 的模拟带宽 250MHz 就非常接近。

### 4 孔径抖动对采样系统信噪比的影响

仍然假设被采样的满度正弦信号为  $v(t) = A \sin(2ft)$ ,  $dv/dt = A \cdot 2f \cos(2ft)$ ,则电压变化率的均方根值为

$$\frac{dv}{dt} \Big|_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dv}{dt}\right)^2 dt} = \frac{2fA}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

由采样系统的孔径抖动  $t_{jitter}$  引起的误差电压(均方值)为

$$v_{RMS} = \frac{2fA}{\sqrt{2}} \times t_{jitter} = \frac{2fA}{\sqrt{2}} \times t_{jitter} \quad (8)$$

则 ADC 的信噪比为

$$\begin{aligned} SNR &= 10 \lg \left( \frac{V_{signal-RMS}}{V_{noise-RMS}} \right)^2 = 20 \lg \left( \frac{A/\sqrt{2}}{V_{noise-RMS}} \right) \\ &= 20 \lg \left( \frac{1}{2f \times t_{jitter}} \right) \\ V_{noise-RMS} &= v_{RMS} \end{aligned} \quad (9)$$

$V_{noise-RMS}$  表示宽带噪声电压均方根值,其频谱分布在整个奈奎斯特带宽内,即  $0 \sim f_a/2$  内,  $f_a$  是采样频率。对于 IF(或 RF)带通采样系统而言,一般情况下,信号带宽  $f_{BW}$  远远小于奈奎斯特带宽  $f_a/2$ 。因此,带通采样系统的等效噪声电压均方值应为  $\left(V_{noise-RMS}\right)^2 \times \left(\frac{2f_{BW}}{f_a}\right)$ ,  $\frac{f_a}{2f_{BW}}$  被称为过采样率。所以,更贴近的带通采样系统的  $SNR_{BP}$  应为

$$\begin{aligned} SNR_{BP} &= 10 \lg \left[ \left( \frac{V_{signal-RMS}}{V_{noise-RMS}} \right)^2 \times \frac{f_a}{f_{BW}} \right] \\ &= 20 \lg \left( \frac{V_{signal-RMS}}{V_{noise-RMS}} \right) + 10 \lg \left( \frac{f_a}{f_{BW}} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

比较式(9)和式(11)可知,带通采样系统与基带采样系统相比,  $SNR_{BP}$  提高了  $10 \lg \left(\frac{f_a}{2f_{BW}}\right)$ , 这也就是过采样换来的处理增益,即采样频率与 2 倍的信号带宽相比,每提高一倍时采样

系统的 SNR 就增加 3dB.

假设带通采样系统的孔径抖动为  $t_{jitter\_BP}$ , 则由式(8)和式(11)可得出

$$20 \lg \left[ \frac{1}{2 f \times t_{jitter\_BP}} \right]^2 = 10 \lg \left[ \left( \frac{V_{signal\_RMS}}{V_{noise\_RMS}} \right)^2 \times \left( \frac{f_a}{2f_{BW}} \right) \right] \\ = 20 \lg \left[ \frac{1}{2 f \times t_{jitter}} \right] + 10 \lg \frac{f_a}{2f_{BW}} \quad (12)$$

$$\frac{t_{jitter}}{t_{jitter\_BP}} = \left( \frac{f_a}{2f_{BW}} \right)^{1/2} \quad (13)$$

通过比较式(9)与式(11), 尽管说明了带通采样系统与基带采样系统相比, 信噪比提高了  $10 \lg \frac{f_a}{2f_{BW}}$ , 但式(13)说明了基带采样的孔径抖动  $t_{jitter}$  和带通采样的孔径抖动  $t_{jitter\_BP}$  的比值与过采样率  $\left( \frac{f_a}{f_{BW}} \right)^{1/2}$  成正比. 显然, 相比之下, 带通采样系统对孔径抖动的要求更为严格. 由此可见, 任何事物都具有两面性, 对于带通采样和基带采样也一样.

## 5 减小孔径抖动的措施

通过上述讨论, 清楚了带通采样与基带采样相比, 在提高信噪比的同时, 对采样系统孔径抖动的要求更为严格. 也就是说, 如果采用带通采样技术来提高采样系统的信噪比, 必须相应地减小孔径抖动. 对于如何减小孔径抖动, 可以根据前面提出的引起孔径抖动的原因主要是采保电路充放电时间抖动不恒定性、采样时钟的抖动和采样系统的热噪声的影响, 所以减小孔径抖动的措施也是针对这三个因素而言的<sup>[5-8]</sup>.

第一、减小采样脉冲的相位抖动. 普通 TTL/COMS 时钟源大约就有 0.7ps 的相位抖动, 显然不能满足对中频(或射频)信号的采样要求. 高速带通采样系统必须使用相位噪声更低的时钟信号源. 另外, 时钟信号的布线也非常讲究, 除了要求尽量短之外, 一般应加屏蔽, 并最好采用差分线传输, 晶振的外壳一般要接地, 且应该在晶振的地线附近设计一个通孔用螺丝与机壳相连.

第二、尽量采用高品质的 ADC, 如果需要也可采用高性能采保专用电路来减小孔径抖动. 如果是集成了采保电路的单片 ADC, 其采保电路的孔径抖动将直接影响 ADC 用于高速带通采样时的性能. 因此, 在同样指标下应选用孔径抖动小的 ADC. 如 AD6645 和 AD6644, 尽管都是 14 位高速 ADC, 但由于 AD6645 的孔径抖动小于 0.2ps, 而 AD6644 的孔径抖动小于 0.3ps. 所以, 在中频采样系统中, 使用 AD6645 的效果更好.

第三、采样部分要用线性电源供电, 并最好在电源滤波和退耦电路中用高频特性、漏电流小的钽电容和陶瓷电容, 模拟地和数字地要利用高频磁珠单点接地.

第四、解决好 A/D 采样系统的散热问题. ADC 和晶振的工作稳定性都与温度有很大的关系. 温度升高时, 其稳定性变差, 孔径抖动增大. 并且 ADC 的功耗与其工作频率基本成正比比例关系, 采样频率越高时, ADC 的功耗越大. 所以对中频带

通采样系统, 应该注意解决好散热问题.

## 6 结束语

现代通信系统, 如数字中频接收机、无线局域网、GSM 和 WCDMA 基站等, 已广泛采用带通技术对中频或射频信号直接采样. 在这些系统中, 由于被采样信号和采样频率都很高, 孔径抖动对其性能的影响非常严重. 所以通过本文介绍, 可以帮助正确理解孔径抖动产生的原因, 孔径抖动引起的误差计算, 孔径抖动与 ADC 信噪比之间的关系, 孔径抖动对输入信号上限频率的限制等. 尤为重要是本文找出了高速基带采样和带通采样的信噪比和孔径抖动之间的关系, 其有助于正确理解和利用带通采样技术.

## 参考文献:

- [1] Walt Kester. High Speed Design Techniques [M]. California: Analog Devices Inc, 1996. 10 - 42.
- [2] P B Kenington, L Astier. Power consumption of A/D converters for software radio applications [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2000, 49(2): 643 - 650.
- [3] 雷文, 龙腾, 曾涛, 毛二可. 脉冲雷达中频采样系统的镜频抑制性能分析与参数设计 [J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1585 - 1587.
- [4] 崔崑, 张德田, 韩月秋. 基于中频采样的脉冲调频雷达波形发生器 [J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(6): 757 - 759.
- [5] Mark S. Effects of Aperture Time and Jitter in a Sampled Data System [EB/OL]. <http://www.national.com>, 2002-09-18.
- [6] Brad B. Aperture Uncertainty and ADC System Performan [EB/OL]. <http://www.national.com>, 2002-10-02.

## 作者简介:



曹 鹏 男, 1969 年生于宁夏彭阳县, 宁夏大学副教授, 北京理工大学博士研究生, 1992 年毕业于宁夏大学电子信息工程专业, 2001 年获西安交通大学电气工程专业硕士学位, 已发表论文 10 余篇, 获得国家级二等奖一项, 省部级一等奖一项, 主要从事软件无线电、数字中频和直接变频宽带接收与发射机的研究.



费元春 女, 1938 年生于四川泸州市, 1960 年 7 月毕业于北京工业学院无线电系雷达专业, 现任北京理工大学电子工程系电磁场与微波专业首席教授, 博士生导师, 中国发明协会创造学会研究委员会委员, 兵工学报常务编委, 中国电子学会会士, 历任 (1989 ~ 1996) 机电部、电子部雷达测控专业科技进步奖评委, (1991 ~ 1999) 兵总火控指控专业专家组成员等, 1988 年被授予国家级有突出贡献的专家称号, 1993 年被授予北京市三八劳动能手称号, 1994 年被授予全国教育系统巾帼建功标兵称号.