

宽带雷达射频分时交替采样增益失配估计方法*

张炜承, 林钱强, 陈曾平

(国防科学技术大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要:针对分时交替采样在宽带条件下存在增益起伏的失配问题,提出了基于最小二乘曲线拟合的增益曲线估计算法。基于实际 ADC 器件增益起伏的情况,分析了通道增益失配对系统输出信号频谱的影响;根据宽带数字阵列雷达回波信号的特点,利用分段估计与最小二乘曲线拟合方法得到增益估计曲线,给出了算法的实现步骤。仿真实验结果表明该算法在宽带分时交替采样中的有效性。

关键词:宽带雷达;分时交替采样;频谱混叠;增益起伏

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)04-0134-06

Gain mismatch estimation method for time-interleaved ADC system in wideband radar RF sampling

ZHANG Weicheng, LIN Qianqiang, CHEN Zengping

(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:In order to resolve the gain mismatch issue for the Time-Interleaved ADC in wideband radar RF sampling, a gain estimation method based on least square curve fitting is proposed. Based on the gain fluctuation of ADC, the negative influence of gain mismatch on the output signal spectrum was analyzed. According to the characters of wideband DAR echo, the gain estimation curve was obtained. The concrete implementation steps of this estimation method were also presented. Experimental results prove the validity of the proposed method in the wideband TIADC system.

Key words:wideband radar; time-interleaved ADC; spectrum aliasing; gain fluctuation

数字阵列雷达因具有大动态范围、多波束、低损耗、低副瓣等显著的优势^[1],正在成为相控阵雷达的一个重要发展方向,广受人们的关注。宽带数字阵列雷达为了实现较高的数字化与软件化,要求 ADC 尽可能靠近天线,从而在高中频甚至射频直接数字化回波信号;同时为了获得高距离分辨率,需要发射宽频带信号,信号带宽可达到数 GHz。然而,对宽带信号直接进行采样要求 ADC 具有很高的采样速率,受当前电路工艺与设计水平的限制,单片 ADC 很难同时满足高采样速率与高采样精度的需求。分时交替 ADC (Time-Interleaved ADC, TIADC) 技术采用多片较低采样速率的 ADC 在同一时钟频率不同时钟相位下对高频信号并行逐次采样再按顺序多路复用,以达到提高采样频率的目的,有效解决了采样速率与采样精度之间的矛盾^[2-3]。但是由于其依赖于各通道间 ADC 偏置、增益等参数的一致性以及采样时序的精确配合,相对于单通道采样,该技术需要考虑更多的系统误差及其精确校正。

针对 TIADC 系统的失配估计与校正方法,大量学者进行了相关方面的研究并取得许多有效的成果^[3-7]。从已有的文献来看,针对增益失配的估计与校正都是基于各通道 ADC 增益为常量的假设前提^[7-11]。这一假设对于输入为点频信号或者窄带信号的系统通常是近似成立的,但对于发射大带宽信号的宽带数字阵列雷达而言,用于信号采样的 ADC 在其输入带宽范围内增益曲线通常并非平坦的,而是随着输入信号频率的改变而存在起伏的^[12],且由于器件差异,各个 ADC 的增益曲线也不一致。因此,将各通道 ADC 增益假设为恒定常量进行估计必然存在较大的误差,从而影响校正的性能,甚至使校正算法完全失效。本文详细分析了 TIADC 系统在增益起伏情况下各通道增益失配对采样结果的影响,并根据宽带数字阵列雷达发射信号的特点,提出了一种估计各通道增益曲线的方法。该算法根据线性调频 (Linear Frequency Modulated, LFM) 信号的特点,将校准信号频谱划分为不同频段以避免各通道

* 收稿日期:2013-06-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61002025)

作者简介:张炜承(1982-),男,湖南长沙人,博士研究生,E-mail:zhangweicheng_iet@163.com;

陈曾平(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:atrchen@163.com

ADC 采样后信号频谱的混叠,计算各 ADC 在不同区域中的增益曲线并进行最小二乘曲线拟合,得到各通道 ADC 的增益曲线估计。仿真实验结合 Koji Asami 提出的频域加权失配校正算法^[2]和脉冲压缩方法对本文算法进行验证,结果表明本文方法能对增益起伏的 TIADC 系统增益失配进行正确的估计,为宽带数字阵列雷达系统采用 TIADC 技术进行射频数字化时增益失配校正提供依据。

1 宽带信号 TIADC 采样的增益失配影响分析

1.1 TIADC 系统增益失配的影响

TIADC 系统的基本原理是利用 M 片 ADC 在同一时钟频率不同时钟相位下并行对模拟输入信号 $x(t)$ 进行采样,最后按顺序将 M 片 ADC 的输出序列合并为一路输出信号 $y(n)$ 。假设系统等效采样时钟为 f_s ,则采样周期为 $T_s = \frac{1}{f_s}$,每通道 ADC 的采样速率为 $\frac{f_s}{M}$ 。理想情况下,假设各通道 ADC 的增益均为 1,偏置为 0,则第 m 通道的采样输出信号序列可表示为

$$\begin{aligned} y_m(n) &= x(nMT_s + mT_s) \\ n &= 1, 2, 3, \dots \\ m &= 0, 1, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (1)$$

以 $X(j\Omega)$ 表示 $x(n)$ 的频谱,可得到理想情况下第 m 通道采样输出信号的频谱为^[13-14]

$$Y_m(j\Omega) = \frac{1}{MT_s} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X\left(j\Omega - jk\frac{2\pi}{MT_s}\right) e^{j(\Omega - k\frac{2\pi}{MT_s})mT_s} \quad (2)$$

实际 ADC 由于加工工艺与工作环境等因素的影响,其增益并非理想,且在一个 TIADC 系统中,各通道 ADC 的增益也存在差异。假设 TIADC 系统中第 m 通道的增益误差恒定且以 Δg_m 表示,ADC 的增益可将其视为时域上的乘性噪声,则当偏置与各通道采样时钟相位为理想情况下,只考虑通道增益失配时,根据式(2)并将 $\Omega = \omega/(MT_s)$ 代入可得第 m 通道的采样输出频谱为

$$Y_m(e^{j\omega}) = \frac{1}{MT_s} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left[(1 + \Delta g_m) X\left(\frac{j\omega}{MT_s} - \frac{jk2\pi}{MT_s}\right) \right]$$

$$Y(e^{j\omega}) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X\left(\frac{j\omega}{T_s} - jk\frac{2\pi}{T_s}\right) + \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j\frac{2\pi}{M}km} \Delta g_m \left(\frac{\omega}{MT_s} - k\frac{2\pi}{MT_s}\right) \right\} X\left(\frac{j\omega}{T_s} - jk\frac{2\pi}{MT_s}\right) \quad (8)$$

对比式(5)与式(8)可以看出,增益恒定情况下,系统输出的误差谱线幅度为各通道增益误差

$$\cdot e^{j(\frac{\omega}{MT_s} - k\frac{2\pi}{MT_s})mT_s} \quad (3)$$

M 通道 TIADC 系统总的输出为各通道输出序列 M 倍内插后再按通道顺序延时一个采样周期 T_s 后相加,则增益失配情况下 TIADC 系统输出时域序列为

$$y(n) = y_{\langle n, m \rangle} \left[\left\lfloor \frac{n}{M} \right\rfloor \right] \quad (4)$$

其中 $\langle n, m \rangle$ 表示取 $\frac{n}{M}$ 的余数, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示舍去小数部分向下取整。其频谱表达式为

$$\begin{aligned} Y(e^{j\omega}) &= \sum_{m=0}^{M-1} Y_m(e^{jM\omega}) e^{-j\omega m} \\ &= \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X\left(\frac{j\omega}{T_s} - jk\frac{2\pi}{T_s}\right) \\ &+ \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \beta(k) X\left(\frac{j\omega}{T_s} - jk\frac{2\pi}{MT_s}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\beta(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \Delta g_m e^{-jk\frac{2\pi m}{M}} \quad (6)$$

式(5)推导过程中利用了恒等式

$$\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j\frac{2\pi}{M}km} = \delta[k - lM] \quad l = 0, \pm 1, \dots \quad (7)$$

式(5)中除了第一个和项为系统输入信号频谱外,第二项即为通道增益失配引起的失真频谱,在失真频谱中, $\beta(k)$ 以 M 为周期,为各通道增益误差序列 Δg_m 的离散傅立叶变换。可见失真频谱成分与输入信号的频谱相互关联,失配谱线出现的位置是对输入信号频谱的周期延拓,频率间隔为 f_s/M ,即 $f = \pm f_{in} + kf_s/M$, ($k = \pm 1, \pm 2, \dots$), f_{in} 为输入信号的频率。

1.2 增益起伏的失配分析

1.1 节中,假设 ADC 的增益在整个全功率输入带宽中相等且为定值。实际的 ADC 受器件内部取样——保持电路、级间放大器,甚至于前端调理电路(如用于模拟信号单端——差分转换的变压器)等因素的影响,其增益是随着输入信号频率的改变而存在起伏的^[12],其相对于理想增益 ($g_m(\omega) \equiv 1$) 的偏差以 $\Delta g_m(\omega)$ 表示。将通道增益曲线加入式(5)中,可得到实际情况下 TIADC 系统输出信号的频谱为

序列 Δg_m 的离散傅立叶变换,与输入信号频率的变化无关,在系统整个模拟输入频带内保持不变;

而增益起伏情况下 TIADC 系统输出的第二个和项包含的增益失配引起的频谱成分与输入信号的频谱相互关联,且频谱幅度增益随输入信号频率变化而变化。这一现象反映了宽带 ADC 工作时的真实情况。显然,在这种情况下,原先以单个频点的正弦波作为测试信号对系统增益失配进行估计并不能得到系统实际的增益失配特性,以此估计值进行校正将无法得到正确的校正结果。

2 增益失配估计方法

对于发射宽频带 LFM 信号的数字阵列雷达,采用 TIADC 的接收机采集模块如果存在上述失配而未得到良好的校正,将给系统的性能带来较大的影响。由式(8)可以看出,雷达发射的 LFM 信号经过未校正的 TIADC 采集后,将出现虚假的 LFM 回波,经过脉冲压缩处理,将产生虚假目标。因此,必须对 TIADC 各通道的增益曲线进行估计并校正。

由于各通道 ADC 增益曲线各不相同,必须逐一进行测量与估计,再进行校正。以雷达发射的 LFM 信号为测试信号,令 $C_{ref}(\omega)$ 为各通道 ADC 理想输出信号频谱, $C_m(\omega)$ 为第 m 通道实际输出信号频谱,在各通道 ADC 满足无混叠采样的条件下,第 m 通道 ADC 的增益曲线可表示为

$$g_m(\omega) = \frac{C_m(\omega)}{C_{ref}(\omega)} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

然而,对于带宽为 B 的 LFM 信号,假设其无混叠的带通采样频率为 f_s ,则 M 通道的 TIADC 系统中,每通道的 ADC 采样频率为 f_s/M ,各个通道的输出信号将会出现频谱混叠的现象。以双通道的 TIADC 系统为例,图 1(a) 表示 TIADC 系统对输入信号的采样,满足无混叠采样要求;而图 1(b) 表示宽带信号经过其中任一通道 ADC 采样后,每一个频点将对应两个不同频谱分量的叠加,即发生了频谱的混叠。这将导致直接通过式(9)无法得到正确的增益曲线。

为了利用式(9)求取 $g_m(\omega)$,必须避免采样后频谱混叠,在 ADC 采样频率 f_s/M 不变的情况下,输入信号的频率应满足^[15]

$$\begin{cases} -f_H + k \frac{f_s}{M} \geq f_H \\ -f_L + (k-1) \frac{f_s}{M} \leq f_L \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots \quad (10)$$

其中 f_L 、 f_H 分别为输入信号的最低频率与最高频率。因此,可根据式(10)将带宽为 B 的 LFM 测试信号在保持线性调频率不变的情况下,按频段

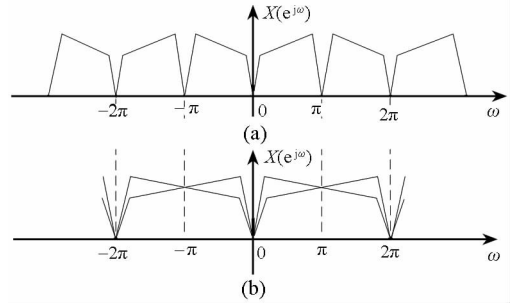


图 1 双通道 TIADC 系统采样频谱混叠示意图

Fig. 1 Spectrum aliasing of 2-channel TIADC system

划分成 M 段,使每一频段测试信号都能使各通道 ADC 采样后信号保证不发生频谱混叠。设雷达发射的 LFM 信号中心频率为 f_0 ,脉冲持续时间为 T_t ,线性调频率为 $\gamma = B/T_t$,则可得划分的 M 个频段为

$$\begin{cases} \left[f_0 - \frac{B}{2}, \frac{f_s}{2M\alpha} \right] \\ \left[\frac{f_s}{2M\alpha}, \frac{f_s}{2M}(\alpha+1) \right] \\ \vdots \\ \left[\frac{f_s}{2M}(\alpha+i), \frac{f_s}{2M}(\alpha+i+1) \right] \\ \left[\frac{f_s}{2M}(\alpha+M-2), f_0 + \frac{B}{2} \right] \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots, M-3 \quad (11)$$

其中 $\alpha = \left\lfloor \frac{(2f_0 - B)M}{f_s} \right\rfloor + 1$,再通过式(9)求得分段增益曲线 $g_{mn}(\omega)$ ($n = 1, 2, \dots, M$)。

最小二乘多项式曲线拟合法^[16]是一种数学上的近似和优化,利用已知的数据得出一条直线或曲线,使之在坐标系上与已知数据之间的距离平方和最小,是离散情形下的最佳平方逼近。在求得分段增益曲线 $g_{mn}(\omega)$ 后,将各段增益曲线按频段重排后再用最小二乘法进行多项式曲线拟合,即可得到各通道 ADC 增益曲线的估计值。

下面给出本文增益失配估计算法的实现步骤:

- (1) 根据式(11)将雷达发射的 LFM 信号划分为 M 个频段作为测试信号依次注入 TIADC 采集系统,保证各通道 ADC 采样后不发生频谱混叠。获得各通道采集的测试信号序列;
- (2) 分别求各通道采样序列的频谱,并由式(9)求得分段增益曲线 $g_{mn}(\omega)$;
- (3) 将 $g_{mn}(\omega)$ 按频段顺序重排,得到完整的 $g_m(\omega)$ 离散序列;
- (4) 利用最小二乘法对 $g_m(\omega)$ 的离散序列进行曲线拟合,求得 $g_m(\omega)$ 的估计值 $\bar{g}_m(\omega)$,完成

通道增益曲线估计。

3 算法验证与分析

为了验证本文提出的增益起伏条件下的增益失配估计算法,本节利用某数字阵列雷达样机的参数,通过仿真数据来验证算法的有效性。仿真的数据参数见表1所示。

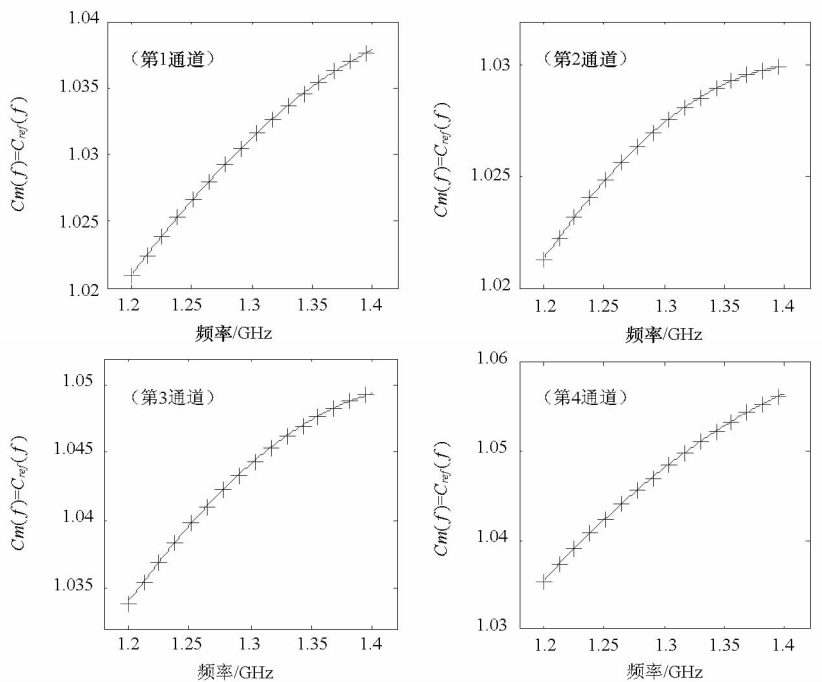
表1 用于本文算法验证的数据参数

Tab.1 The parameters for the verify experiment

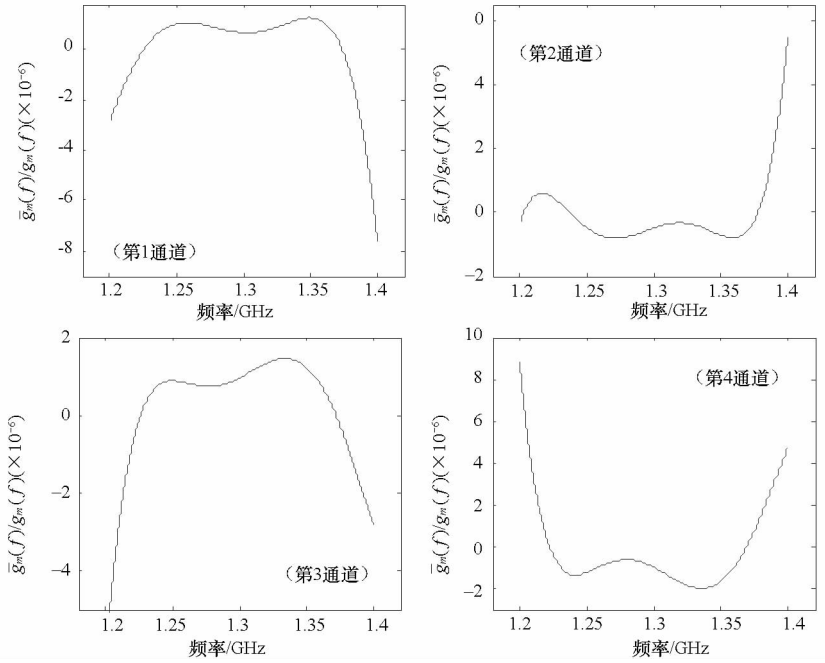
通道数量	4
总采样频率	1040MHz
每通道采样频率	260MHz
测试信号模型	LFM
中心频率	1.3GHz
带宽(B)	200MHz
脉冲宽度	75μs

仿真数据为一个点目标的雷达回波。图2(a)所示为仿真的四个通道增益曲线与估计得到的增益曲线对比,图2(b)为各通道实际增益曲线与估计值的差值曲线。从图中可以看出,本文方法估计得到的增益曲线与实际增益曲线很好地吻合,说明本文方法的正确性。

为了进一步验证算法,本文用估计得到的增益曲线通过文献[2]的频域加权失配校正方法对点目标回波数据进行校正,并对校正后的数据进行脉冲压缩来观察估计的增益曲线的正确性。图3(a)所示为目标回波校正前脉冲压缩得到的一维距离像结果,结果显示除了目标本身的一维像外,还出现了两个虚假的目标一维像。图3(b)所示为默认各通道ADC增益为常量的前提下,随机抽取回波带宽内某一频点(不失一般性,图中所示结果为选取1.3GHz时各通道的增益失配进行校正)的增益作为系统的增益失配,利用频域加权失配校正方法处理后脉冲压缩得到的一维距离像。对比图3(a)与图3(b)可看出,对于大带宽的ADC器件,默认各通道ADC增益为常量的假设将导致失配校正方法在实际TIADC系统中几乎完全失效。图3(c)所示为利用本文估计方法进行校正后经过脉冲压缩得到的一维距离像结果,可以看出,经过校正后保留了正确的目标一维距离像,而虚假目标一维距离像归一化幅度小于-73dB,与校正前相比降低了约30dB,校正后虚假目标相对于真实目标可以忽略不计,进一步说明了本文估计算法的正确性与有效性。



(a)增益估计曲线与理论值对比图(实线为理论值,×为估计值)



(b) 增益估计误差曲线

图 2 四通道 TIADC 增益估计值与理论值对比

Fig. 2 Compare of the gain estimate value and the theoretical value in 4-channel TIADC system

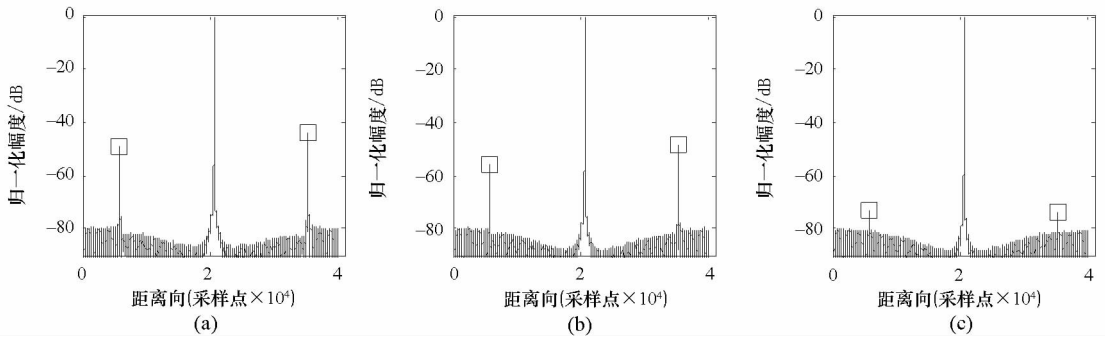


图 3 增益失配校正前后脉冲压缩结果对比图

(a) 校正前;(b) 假设增益为常量时校正后脉冲压缩结果;(c) 采用本文方法估计并校正后脉冲压缩结果

Fig. 3 Compare of the pulse compression results before and after gain calibration

4 结束语

本文根据实际 ADC 增益存在带内起伏的情况,首先分析了 TIADC 系统在各通道增益起伏情况下增益失配带来的影响,表明以单个频点的正弦波作为测试信号对系统增益失配进行估计无法得到系统实际的增益失配特性,以此估计值进行校正将无法得到正确的结果;再根据宽带数字阵列雷达回波信号的特点,提出了一种增益起伏下的失配估计算法,并给出算法的实现步骤;最后通过仿真对比验证了本文方法的正确性与有效性。结论表明,本文方法可以正确估计 TIADC 系统各通道增益起伏曲线,利用估计得到的增益曲线采用频域加权失配校正方法,可使得目标回波中虚假目标得到良好的抑制。现有公开报道的文献

中,对 TIADC 增益失配的估计都是基于增益为常量的假设导致估计存在较大误差,而本文提出的增益估计算法基于宽带 ADC 带内增益起伏的实际情况,避免了与实际情况不符的假设,使增益失配的估计更准确。该算法对 TIADC 通道数量无限制,可有助于 TIADC 技术在宽带雷达、高速大带宽测试仪器等领域的实际应用。

参考文献 (References)

[1] 吴曼青,王炎,靳学明. 收发全数字波束形成相控阵雷达关键技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(4): 45-47, 60.
WU Manqing, WANG Yan and JIN Xueming. Research on key technology of DBF phased array radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(4): 45-47, 60. (in Chinese)

- [2] Koji A. Technique to improve the performance of time-interleaved A-D converters [C]//Proceedings of the IEEE International Test Conference (ITC2005), Austin, Nov. 2005: 851–857.
- [3] 徐祥俊, 邹月娴. 基于频域稀疏性的时间交替模数转换器时间相位失配盲测量算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2241–2246.
XU Xiangjun, ZOU Yuexian. A blind timing skew estimation algorithm of time-interleaved analog-to-digital converters based on spectra sparsity [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(9): 2241–2246. (in Chinese)
- [4] Xia L L, Wang J G, Will B, et al. Sub-2-ps, static phase error calibration technique incorporating measurement uncertainty cancellation for multi-gigahertz time-interleaved T/H circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2012, 59(2): 276–284.
- [5] Zou Y X, Zhang S L, Yong C L, et al. Timing mismatch compensation in time-interleaved ADCs based on multichannel lagrange polynomial interpolation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1123–1131.
- [6] Zou Y X, Xu X J. Blind timing skew estimation using source spectrum sparsity in time-interleaved ADCs [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(9): 2401–2412.
- [7] Sandeep P, Munkyo S, Upamanyu M, et al. Joint mismatch and channel compensation for high-speed OFDM receivers with time-interleaved ADCs [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(8): 2391–2401.
- [8] Dias P J M, Silva G P M B, Cruz S A M. An FFT-based method to evaluate and compensate gain and offset errors of interleaved ADC systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(2): 423–430.
- [9] Fred H, Chen X F, Elettra V. A novel PR channelizer-based architecture for estimation and correction of timing and gain mismatches in two channel TI-ADCs [C]//Proceedings of IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems, Boise, Idaho, Aug. 2012: 1140–1143.
- [10] Shi W J, Yan B. Calibration of gain and time mismatches for time-interleaved ADCs based on digital filter bank [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, Jilin, China, Aug. 2011: 1836–1839.
- [11] Behnaz P, Davud A, Ali K. Adaptive blind gain correction of time-interleaved ADCs for wide-band communication applications [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2012, 3(2): 157–162.
- [12] 薛天宇, 孟庆昌, 华正权. 模数转换器应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001, 33–72.
XUE Tianyu, MENG Qingchang, HUA Zhengquan. Application technique for analog-to-digital converters [M]. Beijing: Science Press, 2001, 33–72. (in Chinese)
- [13] 叶芑, 曾浩, 田书林, 等. 一种高速并行采样实时校正方法研究[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 1–5.
YE Peng, ZENG Hao, TIAN Shulin, et al. Research on the real-time calibration technology for high-speed parallel sampling [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 1–5. (in Chinese)
- [14] 田书林, 潘丹青, 王志刚. 一种并行采样中的自适应非均匀综合校准方法[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2298–2301.
TIAN Shulin, PAN Huiqing, WANG Zhigang. An adaptive synthesis calibration method for time delay of sampling systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2298–2301. (in Chinese)
- [15] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001, 11–27.
YANG Xiaoniu, LOU Caiyi, XU Jianliang. Software radio theory and application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001, 11–27. (in Chinese)
- [16] 李颖, 林洪生. 基于相对误差的曲线最小二乘拟合[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 338–342.
LI Yin, LIN Hongsheng. Relative error based curve fitting for least square method [J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science), 2012, 30(3): 338–342. (in Chinese)