

文章编号 1004-924X(2015)增-0638-07

模拟信息转换处理高带宽稀疏信号的噪声分析

贺继渊*, 田松, 王星, 田元荣

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:以现代雷达信号处理为背景,研究了模拟信息转换(AIC)处理高频段大带宽稀疏信号的可行性,并对 AIC 在实际应用中产生的噪声进行了分析。通过目前雷达信息带宽低的特点以及数模转换(ADC)的局限性,说明了 AIC 替代方案的优势和前景。评估了信号在各个信号处理环节由于抖动和孔径噪声对整个 AIC 造成的影响,并和高速 ADC 进行了对比。最后,在噪声的影响比较大的情况下,对 AIC 信号处理修正进行了分析验证。实验结果表明,在高速 ADC 的量化范围内,当孔径参数一定且稀疏度(S)小于 0.35 时,AIC 比 ADC 具有明显的优势;而在 S 大于 0.35 时,AIC 受孔径影响较为严重,但经过修正,AIC 仍然表现良好。文中的结果显示 AIC 极大地降低了系统对 ADC 的限制,具有更好的应用前景。

关键词:信号处理;抖动噪声;孔径噪声;模拟信息转换;高速模数转换(ADC);压缩感知

中图分类号:TP391;TN97 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0638

Noise analysis of high bandwidth sparse signals processed by AIC

HE Ji-yuan*, TIAN Song, WANG Xing, TIAN Yuan-rong

(College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

* Corresponding author, E-mail:18591888656@163.com

Abstract: On the basis of modern radar signal processing, this paper explores the feasibility of high frequency and large bandwidth sparse signals processed by Analog-to-Information Converter (AIC) and analyzes the noise effects of the AIC in practical applications. It explains the low bandwidth characteristics of the radar signals and the resolution and performance limitation of Analog-to-Digital Converter (ADC). Then, this paper evaluates the impact of signals with jitters and aperture noise on the AIC in signal processing, and compares the performance between the AIC and the ADC. It points out that the jitter and aperture noise limit the achievable ADC resolution. Finally, a system evaluation framework for examining these limitations is proposed. The evaluation shows that the performance of AIC is better than that of the ADC obviously when the aperture parameter T is fixed and the sparsity S is less than 0.35. However, when S is larger than 0.35, the influence of aperture will be serious. But the AIC is still implementation well through cross validation. It concludes that the currently proposed AIC benefits over high-speed ADC in near future.

Key words: signal processing; jitter noise; aperture noise; high-speed Analog-to Digital Converter (ADC); compressed sensing

收稿日期:2015-06-01;修订日期:2015-06-12.

基金项目:国家自然科学基金青年项目(No. 61203268);陕西省自然科学基金资助项目(No. 2012JQ8019);航空科学基金资助项目(No. 20152096019)

1 引言

现代电子系统中,简单直接的高效高速采样方法就是应用多频段 Nyquist 频率进行高速数模转换(ADC)采样。便宜、稳定、低功耗的数字信号处理(DSP)芯片使得 ADC 在电子领域得到了广泛的应用^[1]。然而,当 ADC 以 GS/s 的速率采样时对硬件性能要求很高,这限制了比特分辨率 ADC 的发展^[2-3]。即使经过若干年后 ADC 满足需要时,电磁频谱已经又达到了一个新的高度。就目前而言在电磁频谱领域,雷达的形式更加多样,信号更加多变,为此,必须找到一种解决大带宽,大动态范围信号的高效高速处理方法。

为了降低数据复杂度,提高运算效率,数据压缩一直是信号处理领域的研究热点。经典的数据压缩都是从数据本身的特性出发,寻找并剔除数据中隐含的冗余度,从而达到压缩有用信号的目的。这样的压缩编码必须是在完整采集到数据之后,而且它本身需要复杂度算法来辅助完成。相较而言,后续的解码过程反而在计算上比较简单。这种压缩和解压缩的不对称性正好同人们的需求相反。因为在大多数情况下,需要采集设备结构简单、便携,而后续处理信息(即解压缩)的过程却要在具有匹配计算能力的计算机上进行,没有便携的要求。现在,人们用简单快捷的设备来处理复杂的编码任务,而用大型高效的设备处理相对简单的解码任务^[4-6]。这一矛盾在某些情况下更为突出,例如在军事作业中采集数据的设备往往暴露在复杂电磁环境中,信号的预处理时间有限,而且随时可能中断信号频谱的捕获,在这种情况下,传统的数据采集-压缩-传输-解压缩模式就很难用于所面临的电磁环境了。

Candes, Donoho 和 Tao 于 2006 年提出一种新的信号采集理论-2 倍压缩感知(CS)理论^[6-7]。该理论框架中,采样速率不再由信号的最高频率决定,而是由信号的有效信息决定。这意味着如果信号是稀疏的,就能够以较低的采样速率进行获取,从而降低了采集信号的采样速率。这种数据采集方案能够实现宽频带范围内多个高速非合作窄带信号的采集,其最大优点是能够提高宽带数字侦察接收机的瞬时带宽,使其不再受 ADC 固有模拟带宽限制,缩短了电子侦察系统覆盖工

作频率范围的时间,更快地完成全频段范围内的辐射源截获。基于 CS 构建的 AIC 可用于任意类型的信号,只要信号在一些域内稀疏或近似稀疏即可,从而可以降低 ADC 的采样频率。其已成为有效解决高分辨率低消耗这一矛盾的有效手段,具有广阔的应用前景。

而在实际的应用中,信号要达到理论中的理想情况十分困难,也不现实。因此需要对 AIC 在实际情况中的应用进行分析和验证。本文的工作就是研究信号处理中抖动和孔径噪声如何影响信号处理过程及 AIC 的性能的。本文凭借输入信号的稀疏性以及接收机增益等其他因素,比较了 AIC 和高速 ADC 在相同采样脉冲信号作用下性能方面的差异。这个评估方法也可以直接应用于其他稀疏信号。

2 高速采样的局限性

目前,高速采样器在绝大部分现代电子系统中得到普遍应用。这些系统在高频(几十倍 GS/s)情况下,在不同的信号如语音、医学成像、雷达和电子通信中,都需要高速采样器(如 ADC)获得高带宽和高分辨率。就目前的技术,在这么高的频率上设计一个高分辨率的 ADC 是十分困难的。这主要是因为这些采样器需要在 Nyquist 采样率下采样(即至少两倍的信号频率)才能使得恢复的原始信号没有损失。

理想情况下,每个采样过程在特定的采样时间内都应该产生信号值。而实际上,以下两个主要因素限制了 ADC 的性能:1)采样信号的不确定,即抖动;2)有限的采样带宽,就是在采样信号之间的时间间隔,即孔径^[8]。

采样过程包括采样信号与输入信号的乘积以及之后的低通滤波。采样信号应该是一个以 T_s 为采样间隔均匀隔开的 δ 脉冲。实际的采样信号中,如抖动等原因会造成从始至终的不均匀采样间隔。两个 nT_s 和 $nT_s + \epsilon_n$ 的不同采样信号造成第 n 个采样误差, ϵ_n 表示第 n 个抖动量的随机变量。因为信号的转换速度与信号的频率对应,所以抖动对高频输入信号的影响更严重,即在高速采样中一个小的抖动可以造成较大的误差。实际采样还受孔径效应的影响,如图 1 所示。本文通过将 δ 脉冲换成同宽度的三角脉冲来构建孔径

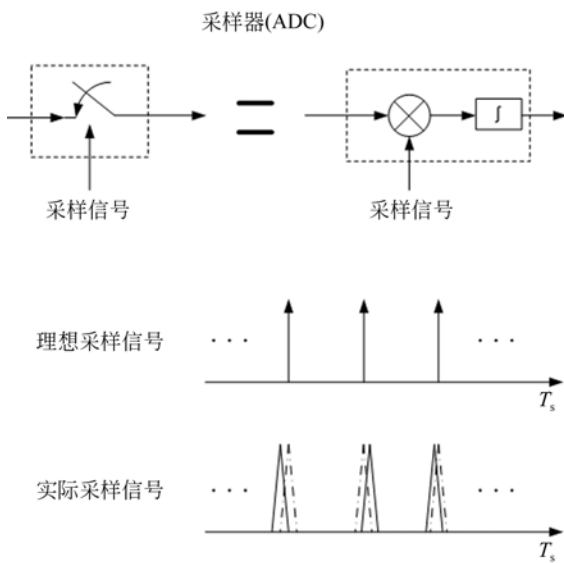


图 1 高速 ADC 采样的理想与现实情况
Fig. 1 Ideal and real high speed ADC samplers

模型的影响因素。实际中,采样器中的噪声主要由两方面造成:(1)低通滤波器(在信号路径上限制了采样器的带宽);(2)采样信号上升/下降沿的延迟。采样器中的噪声会限制采样器的带宽,而且还会在高频造成较大的误差。

基于 CS 的 AIC 为高速 ADC 提供了解决方案。AIC 通过低频,欠 Nyquist 采样解决高频 ADC 的采样问题。本文通过检测在这种情况下 AIC 的性能,来探究该系统是否能解决高频采样器中的抖动和孔径问题。

3 AIC 系统基本原理及框架

3.1 AIC 系统的基本组成

虽然有许多文章讨论过 AIC 系统,而对宽信号带宽(GHz 量级)中 AIC 系统的运行情况的研究有限。故若要与实际中应用的高速 ADC 进行对比比较困难。考虑这种情况,本文用一般的 AIC 构架和基本的高速 ADC 进行比较。AIC 构架^[11]如图 2 所示。

在这个基本构架中,输入信号 $f(t)$ 经 M 个放大器放大,每个信号分支分别与不同的伪随机数字(PN)波形 $\varphi_i(t)$ 相乘进行 CS 随机采样。为了避免信号的衰减,用于在混频阶段相乘的 PN 波形必须在 Nyquist 采样率下获得。在每一个分支中,混频器的输出以 N 个采样周期 T_s 为窗口进

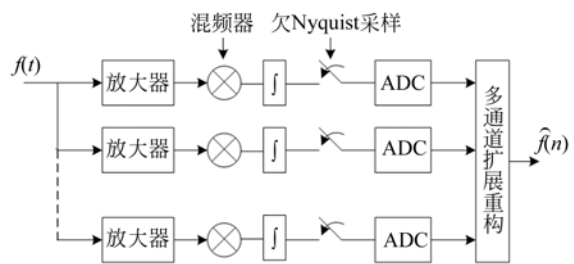


图 2 AIC 系统的工作流程图
Fig. 2 Processing diagram of AIC system

行积分。最后,积分器的输出被采样量化形成观测量 y_i ,用以进行恢复原始输入信号 $f(t)$ 。因为采样频率为 f_s/N ,即 AIC 采用的 ADC 的采样率为欠 Nyquist,这样抖动和孔径的影响相对减少。而实际上,在没有通过实验证实的情况下,标准 ADC 的优势是不清楚的。重要的是混频器仍然工作在 Nyquist 的频率下,信号的抖动和孔径问题相对高速 ADC 来说仍然有潜在的影响。

3.2 AIC 系统噪声的影响

图 3(a)给出了 AIC 系统的模块图,该图说明了抖动和孔径所造成噪声的具体位置。图 3(b)为与 AIC 系统具有相同功能的采样过程。该过程仅使用了一个放大器和一个 Nyquist 采样率的 ADC(采样率为图 3(a)所示 ADC 的 N 倍)。这个系统被认为是受抖动和孔径影响的高速 ADC 系统。应用 AIC 的潜在优势源于其对系统中不同的控制信号所造成的抖动和孔径源具有不同的敏感度。在 AIC 系统中,低速 ADC 采样时钟的抖动误差记为 $n_i'(t)$,可以忽略,而主要的误差 $n_i(t)$ 来自混频器中 PN 波形与输入信号在混频时的孔径和抖动的的影响。在高速 ADC 系统中,主要的误差是高速采样时的信号抖动^[9-10]。

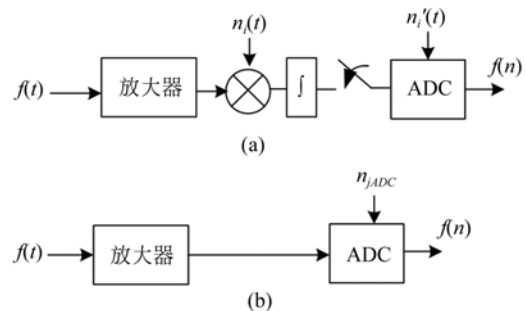


图 3 噪声影响主要节点
Fig. 3 Main points of noise

3.2.1 抖动噪声模型

图 4 为抖动噪声模型,其中的噪声由输入信号和积分模块过滤产生的。第 i 个 PN 波形 $\Phi_i(t)$ 满足:

$$\Phi_i(t) = \sum_{j=1}^N \phi_{ij} p(t - jT_s), \quad (1)$$

其中: ϕ_{ij} 是第 (i, j) 个 PN 元素, $p(t)$ 是 $(-T_s, T_s)$ 的单位幅度脉冲。用 $\hat{\Phi}_i(t)$ 表示抖动 PN 波形, 则 $\hat{\Phi}_i(t) = \Phi_i(t) + N_i(t)$ 。这里 $N_i(t)$ 是影响 $\hat{\Phi}_i(t)$ 的抖动噪声, 表示为

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^{N+1} (\phi_{ij-1} - \phi_{ij}) \text{sgn}(\epsilon_j) \hat{p}_j \left(t - jT_s + \frac{T_s}{2}, \epsilon_j \right), \quad (2)$$

第 j 个抖动宽度是 $\epsilon_j \sim N(0, \sigma)$, 其中 σ 为抖动量的均方根, $\hat{p}_j(t, \epsilon_j)$ 是单位幅度脉冲产生于 $[\min(0, \epsilon), \max(0, \epsilon)]$ 的间隔。为了检验式 (2), 考虑在第 i 个 PN 波形 $\Phi_i(t)$ 中, ϕ_{i0} 和 ϕ_{iN} 分别为 -1 和 1 。如图 4 所示, 在转换中形成的抖动误差值 ϵ_1 是正数, 即 PN 波形由于抖动右移。则通过公式, 抖动误差 $N_i(t)$ 发生在 $\frac{T_s}{2}$ 处, 其脉宽为 ϵ_1 、幅度为 -2 。

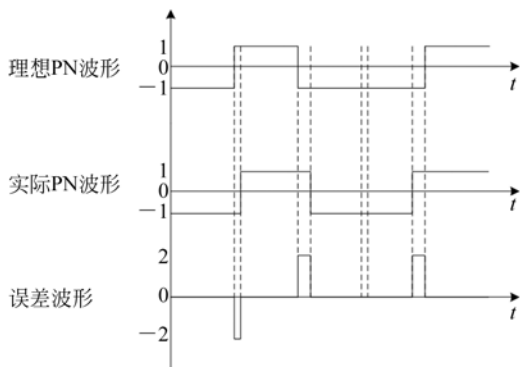


图 4 时钟抖动的影响
Fig. 4 Influence of jitter

在 $N_i(t)$ 模型中, 假设相位锁定环路 (PLL) 贯穿信号路径, 致使所有的抖动 PN 波形为 $\hat{\Phi}_i(t)$, $1 \leq i \leq M$ 有相同的抖动序列 ϵ_j 。这个模型可通过在每个分支增加非相干 (部分相干) 成分, 拓展到更长时钟分布, 即将在每个 PN 波形 $\hat{\Phi}_i(t)$ 中有一个不同的抖动序列。

3.2.2 孔径误差模型

在 AIC 系统中, 孔径误差产生于混频器不同时运作和 PN 波形不是理想波形。如图 5 所示。

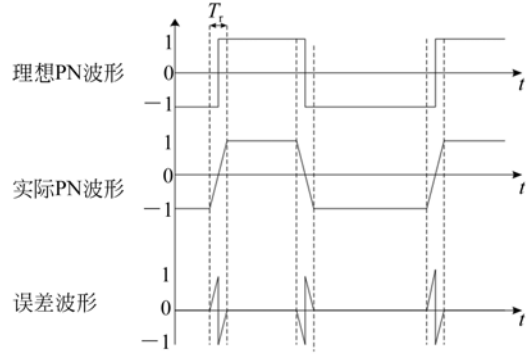


图 5 孔径噪声的影响

Fig. 5 Influence of aperture noise

由图 5 可知, 孔径的影响程度受 PN 波形上升和下降时间的局限。孔径误差 $D_i(t)$ 对应产生自第 i 个抖动 PN 波形 $\hat{\Phi}_i(t)$ 第 i 个实际 PN 波形 $\tilde{\Phi}_i(t)$, 即 $\tilde{\Phi}_i(t) = \hat{\Phi}_i(t) + D_i(t)$ 。本文强调涉及的孔径误差是针对抖动 PN 波形而言的, 而实际波形却难以达到。则第 i 个孔径误差 $D_i(t)$ 的公式为:

$$D_i(t) = \sum_{j=1}^{N+1} \left[\frac{\phi_{ij} - \phi_{ij-1}}{2} \right] q(t - jT_s + \epsilon_j), \quad (3)$$

其中: Φ_{ij} 是第 (i, j) 个 PN 波形, $q(t)$ 可以表示为:

$$q(t) = \begin{cases} \left\lfloor \frac{2t}{T_r} + 1 \right\rfloor, & -\frac{T_r}{2} < t < 0; \\ \left\lfloor \frac{2t}{T_r} - 1 \right\rfloor, & -\frac{T_r}{2} < t < 0; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

T_r 是规定 PN 波形上升/下降时间的参数。与抖动误差相似, 孔径误差 $D_i(t)$ 是由输入信号与积分滤波乘积产生的。

3.3 噪声对处理信号的影响

3.3.1 CS 框架

根据 CS 的基本知识, 信号在不同域内有不同的稀疏度, 如正弦音频波形可以通过信号频率系数或一个时域有限采样数表示。假设信号 f 为:

$$f = \Psi x, \quad (5)$$

\mathbf{x} 是以 $\Psi \in R^{N \times N}$ 为基的信号 f 的系数向量。信号 f 稀疏是因为 x_i 中大部分趋于零, 或者小到可以忽略的程度。如果信号 f 中只有 S 个系数是有意义的系数, 则称 f 为 S -稀疏。

如图 2 所示,CS 框架可以通过 M 个线性随机映射将 N 维输入信号 f 压缩为 M 个观测量 y , 即:

$$y = \Phi f + n^0, \quad (6)$$

其中 $\Phi \in R^{M \times N}$, $f \in R^{N \times 1}$, n^0 是噪声向量。 M 和 N 分别表示信号分支的数量和累积长度。当 $M < N$, 系统是欠定的,意味着 f 的解受方程个数限制。然而如果信号是稀疏的,则满足公式的最稀疏的信号可以唯一。

通过公式:

$$\min_{x \in R^N} \|x\|_{l_1} \quad \text{subject to } |y - \Phi \Psi x|_{l_2} \leq \epsilon. \quad (7)$$

可以得到一个趋近原始信号的值, ϵ 是噪声 n^0 对应参量。

3.3.2 AIC 的恢复模型

如图 3(a) 所示,每个观测量 y_i 都有噪声, $n_i(t) = f(t)(N_i(t) + D_i(t))$, 信号 $f(t)$ 和 PN 波形 $\Phi_i(t)$ 表示为:

$$y_i = \int_{T_s/2}^{NT_s+T_s/2} f(t)\Phi_i(t)dt + \int_{T_s/2}^{NT_s+T_s/2} n_i(t)dt. \quad (8)$$

其中 PN 波形有:

$$\Psi_{ij} = \int_{(i-1)T_s+T_s/2}^{iT_s+T_s/2} \sin(\omega_j t) dt, \quad (9)$$

$$n_i^0 = \int_{T_s/2}^{NT_s+T_s/2} n_i(t) dt = \int_{T_s/2}^{N \cdot T_s+T_s/2} f(t)(N_i(t) + D_i(t)) dt, \quad (10)$$

其中 $n^0 = (n_1^0, n_2^0, \dots, n_M^0)^T$, 这里 n_i^0 是 $f(t)$ 被第 i 个抖动噪声脉冲 $N_i(t)$ 和第 i 个抖动噪声脉冲 $D_i(t)$ 作用的结果(见图 4 和 5)。抖动噪声和孔径噪声 n^0 的独立性和概率性远非高斯变化可以表示,所以在重构中^[11],以 l_2 -范数基准限制作为简化条件。使用 LASSO 修正的 LARS 运算法则解决重构问题。

从文献[12]可以看出,信号噪声和测量噪声在量化后对原信号的影响是信号测量矩阵的一个相对的折叠,满足一定的比例,而文献[13]也说明任意信号通过压缩感知的量化后,始终是与输入无关的白噪声,量化噪声谱始终是白噪声。文献[14]表明应用交叉验证框架可以极大提高 AIC 的恢复精度,抑制噪声的影响。

4 实验与结果

对信号采集模型(式(6)),用一个随机产生的信号对 AIC 和 ADC 进行测试。赋予信号的有用信息用稀疏度来衡量。从一个介于 $[0, 1]$ 的相同随机分布中提取有用信息,即信号非零权值的赋值。为了比较高速 ADC 和 AIC 系统之间的性能差别,本文以文献[15]的相关信纳比(SINAD)及有效位数(ENOB)为标准,有

$$\text{SINAD} = \text{ENOB} \cdot K + 1.76 - 20 \log \left(\frac{\text{fullscale } A}{\text{input } A} \right), \quad (11)$$

$$\text{ENOB} = \log_2 \left(\frac{V_{\text{swing}}}{|f - \hat{f}|_2 \cdot \sqrt{12}} \right). \quad (12)$$

其中: A 表示幅度值, K 为常量,这里 $K = 6.02$ 。 V_{swing} 表示 ADC 的量化范围,因为 AIC 中的并联低速 ADC 采样,它在 AIC 中代表总的量化范围。 $|f - \hat{f}|_2$ 表示信号失真的均方根, \hat{f} 在 AIC 是恢复信号的输出,在高速 ADC 中表示量化输出。

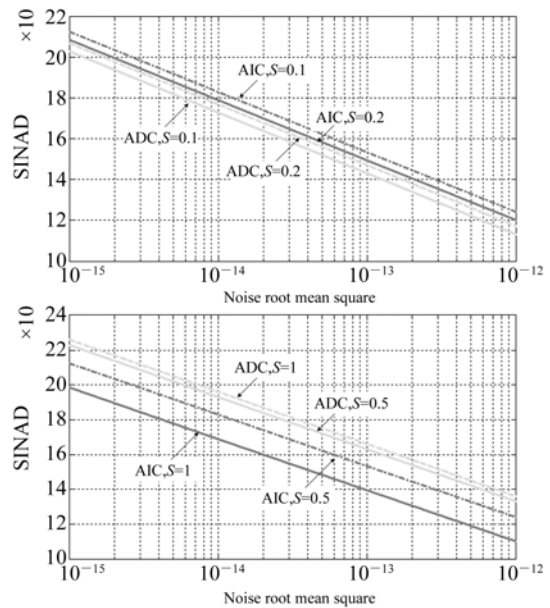


图 6 噪声对信纳比的影响
Fig. 6 Impact of noise on SINAD

从图 6 中可以看出,在稀疏度 $S=0.1$ 和 $S=0.2$ 时,AIC 的信纳都比 ADC 要高,而 S 增加后,AIC 的信纳比有所减弱,ADC 的信纳比有所增强。

表 1 不同稀疏度和孔径下 AIC 和 ADC 的信纳比

Tab. 1 SINADs of AIC and ADC in different sparsities and apertures

	T	S	SINAD				
			10^{-15}	10^{-14}	10^{-13}	10^{-12}	10^{-11}
AIC	1	0.1	21.2	18.4	15.2	12.4	10.1
	1	0.2	20.8	17.9	14.8	11.9	9.7
	5	0.2	14.4	14.3	14.1	12.2	8.6
	10	0.2	12.3	12.3	12.2	12	7.8
	5	1	12.4	12.3	12.3	9.3	5.8
	10	1	10.5	10.4	10.4	9.1	4.6
ADC	1	0.1	20.6	17.1	13	10.2	8.5
	1	0.2	20.2	16.9	12.9	9.9	8.3
	5	0.2	14.8	14.4	12.4	9.1	6.1
	10	0.2	12.9	12.7	12.3	8.8	5.9
	5	1	13.1	12.7	12.5	9.5	8.2
	10	1	11.4	10.8	10.6	7.9	6.3

通过表 1 发现,在相同的噪声影响下,在量化范围内,随着稀疏度的增加,AIC 的性能逐渐降低,而 ADC 的性能基本平稳。二者的性能总体上比较接近,但是 ADC 在抗孔径影响方面比 AIC 突出。

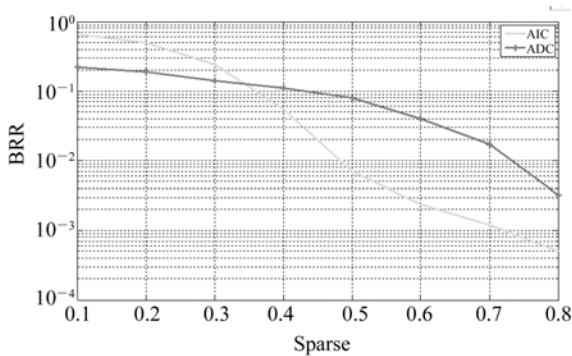


图 7 不同稀疏度对比特正确率的影响

Fig. 7 Performance of BRR varies with sparse (within the limited of ADC)

图 7 为表示 AIC 没有进行算法修正时,在信噪比 $SNR=10$ 的情况下,不同的稀疏度下,信号的恢复比特正确率。由图 7 可以看出,在稀疏度

参考文献:

[1] MURMANN B. A/D converter trends; Power dissipation, scaling and digitally assisted architectures [J]. *Processing CICC*, 2008,1(8):105-112.

$S < 0.35$ 时,AIC 的比特正确率较高; $S > 0.35$ 时 ADC 较高,由于 ADC 主要是对数据而非信息进行处理,所以整体上 ADC 性能受稀疏度的影响相对较小。

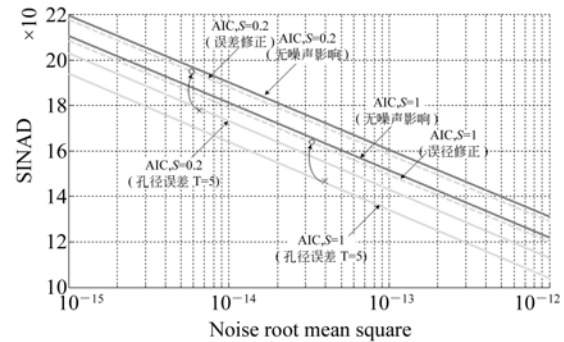


图 8 对 AIC 修正后的对比图

Fig. 8 Performance improvement of the AIC system by using calibration algorithms

图 8 是经过交叉验证算法修正前后信号信纳比对比图。从图可以看出,经过修正后,AIC 表现出良好的抗噪性。

5 结 论

本文以现代雷达高带宽稀疏信号处理为背景,根据现阶段电磁频谱日益复杂而 ADC 的应用由于自身硬件的发展遇到瓶颈必须由其他方法来替代的现状,对当前的研究热点 AIC 的基本框架和工作原理进行了介绍,并对 ADC 和 AIC 处理信号时的噪声产生机理进行了定性分析。最后,根据仿真实验,以 SINAD 为衡量标准,定量验证了 AIC 的抗噪性。在与 ADC 进行对比后发现,在系数度小于 0.35 的情况下,AIC 比 ADC 有更好的抗噪性,而在稀疏度大于 0.35 的情况下,经修正算法修正后,AIC 具有良好的信纳比,在超出高速 ADC 量化范围,应用前景良好。而寻找 AIC 的优化算法及其在实际中的应用有待进一步研究。

[2] WALDEN R H. Analog-to-digital converter survey and analysis [J]. *IEEE Journal Selection Areas in Community*, 1999,17(4):539-548.

[3] MISHALI M, ELDAR Y C. From theory to practice: Sub-Nyquist sampling of sparse wideband ana-

- log signals [J]. *IEEE Journal Selection Topics Signal Process*, 2010, 4(2):375-391.
- [4] TROPP, LASKA, DUARTE, *et al.*. Beyond Nyquist: Efficient sampling of sparse band limited signals [J]. *IEEE Transaction Information Theory*, 2010, 56(1):520-544.
- [5] CHEN X, YU Z, MARTINEZ S, *et al.*. A sub-Nyquist rate sampling receiver exploiting compressive sensing signals [J]. *IEEE Transaction Circuits System*, 2011, 58(3):507-520.
- [6] TAO C. Decoding by linear programming [J] *IEEE Transaction Information Theory*, 2005, 51(2):4203-4215.
- [7] DONOHO. Compressed sensing [J]. *IEEE Transaction Information Theory*, 2006, 52(4):1289-1306.
- [8] JEERADIT, KIM J, LEIBOWITZ, *et al.*. Characterizing sampling aperture of clocked comparators [J]. *Processing IEEE Symptoms VLSI Circuits*, 2008, 4(12):68-69.
- [9] SHINAGAWA, Y A, WAKIMOTO T. Jitter analysis of high speed sampling systems [J] *IEEE Journal Solid-State Circuits*, 1990, 25(2):220-224.
- [10] TAHERI O, VOROBYOV S A. Segmented compressed sampling for analog-to-information conversion: Method and performance analysis [J]. *IEEE Transaction Signal Processing*, 2011, 59(3):554-572.
- [11] GILBERT A, INDYK P. Sparse recovery using sparse matrices [J]. *Processing IEEE*, 2010, 98(6):937-947.
- [12] ELDAR. Noise folding in compressed sensing [J]. *Signal Processing Letters*, 2011, 18(8):478-481.
- [13] 田鹏武. 基于压缩感知的大动态混合信号采集研究[D]. 河南:解放军信息工程大学,2012.
TIAN P W. *Research on the Sampling Technology of Large Dynamic Range Signals Based on Compressive Sensing* [D]. Henan: PLA Information Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [14] ZHANG J Y, CHEN L M, BOUFOUNOS, *et al.*. On the theoretical analysis of cross validation in compressive sensing [C]. *Speech and Signal Processing, ICASSP*, 2014, 3370-3374.
- [15] IEEE Standard for terminology and test methods for Analog-to-Digital converters [R]. *IEEE Standards*, 1241-2000.

作者简介:



贺继渊(1988—),男,陕西榆林人,硕士研究生,2010年于海军航空工程学院获得学士学位,目前研究方向为信号处理,压缩感知。E-mail: 18591888656@163.com

导师简介:



田松(1978—),男,河南郑州人,副教授,2000年于空军工程大学获得硕士学位,2003年在航空航天大学获得博士学位,主要从事信号识别和系统规划。E-mail: expert_tian321@163.com