

一种新的模拟到信息转换系统

董子刚^{1,2}, 李 严^{1,2}, 张元亭^{1,2,3}

(1. 中国科学院健康信息学重点实验室, 广东深圳 518055;
2. 中国科学院深圳先进技术研究院生物医学与健康工程研究所, 广东深圳 518055;
3. 香港中文大学生物医学工程联合研究中心, 香港)

摘 要: 目前, 模拟到信息转换系统主要通过随机矩阵进行采样的, 而用硬件实现随机矩阵是繁杂的, 甚至是不可能的. 受到压缩传感(Compressive Sensing, CS)和积分点火(Integrate-and-Fire, IF)电路的启发, 本文提出了一种无需随机矩阵且对时域编码的积分式采样还原系统. 在稀疏信号足够长的条件下, 可以通过参数自由控制采样频率, 理论上可以无限降低, 大大减少数据量, 降低系统功耗. 此外它易于实现, 无量化误差等优点, 在雷达探测、生物传感等宽带信号领域, 具有很好的应用前景.

关键词: 压缩传感; 模拟到信息的转换; 积分点火电路; 稀疏信号

中图分类号: TN432 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 09-1842-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.028

A Novel System for Analog-to-Information Conversion

DONG Zi-gang^{1,2}, LI Yan^{1,2}, ZHANG Yuan-ting^{1,2,3}

(1. Key Lab for Health Informatics of Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China;
2. Institute of Biomedical and Health Engineering, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China;
3. Joint Research Centre for Biomedical Engineering, Dept. of EE, the Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: Currently, analog-to-information conversion system (AIC) is mainly achieved by random matrix. However, the hardware implementation of the random matrix is complicated and difficult if not impossible. Inspired by the recent theory of compressive sensing (CS) and integrate-and-fire (IF) sampler, we propose a new sampling system which does not contain any random matrix and encodes in the time domain. The output signal sampled by this system can be accurately restored to the original signal. The sampling frequency of the system can be freely controlled if the signal is sparse and the sampling period is sufficiently long. Theoretically, the sampling frequency can be infinitesimal under those two conditions specified. As a result, the amount of data and the power consumption of the system can be significantly reduced. In addition, it is easy to be implemented in practice and has the advantage of no quantization error and so on. The proposed sampling system should have a great potential in applications in the field of broadband signals such as radar signal detection and biological signal measurement.

Key words: compressive sensing; analog-to-information converter; integrate-and-fire circuit; sparse signal

1 引言

模数变换器是数字信号处理中必不可少的一部分, 然而, 它是基于 Nyquist 抽样理论的, 为了保证精确还原信号, 采样率必须在 Nyquist 率以上, 这导致了海量数据的产生, 大大增加了存储、传输、处理等的代价. 尤其在雷达探测、生物传感等宽带信号领域, 由于其信息率小于带宽, 用模数变换器进行采样会产生大量的无用数据, 造成严重的资源浪费和额外功耗.

压缩传感(Compressive Sensing, CS)是 Candes^[1] 和

Donoho^[2]在 2006 年提出的对离散信号采样的新理论: 它把传统信号获取处理中的采样和压缩合并成一个过程, 先对信号进行非自适应线性抽样, 然后通过特殊的还原算法还原信号. 其优点是低 Nyquist 率采样, 数据量非常小. 模拟到信息的转换(Analog-to-Information Converter, AIC)系统是压缩传感针对连续时域信号的发展. 这种系统都需要随机矩阵产生抽样, 如 Sami Kirolos 提出的一种随机解调(Random Demodulation, RD) AIC 系统^[3]. 然而, 硬件实现随机矩阵是繁杂的, 甚至是不可能的.

本文提出了一种新的 AIC 采样系统, 它不需要随机

矩阵抽样而且易于硬件实现.受到压缩传感和 IF 电路(Integrate-and-Fire circuit)^[4]启发,系统采用对时域编码的积分式采样机制,充分利用信号自身的随机性和采样起始点的随机性,代替随机矩阵产生,以满足压缩传感理论中的约束等距原理^[2].而且具有可控的采样频率,理论上甚至无限降低.

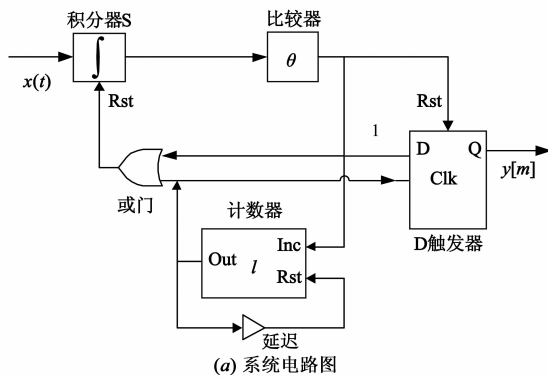
第二部分将介绍了压缩传感和 IF 电路的背景,第三部分和第四部分分别阐述了本论文提出的抽样理论和还原方法.第五部分是 RD 系统、IF 电路与本文采样架构的比较和仿真.

2 压缩传感和 IF 电路的背景

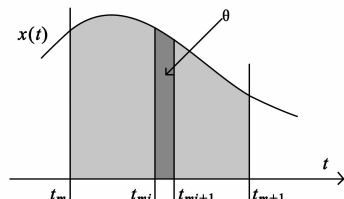
稀疏信号是指一个时域离散信号中只有少数个元素是非零的信号.虽然自然信号多是非稀疏信号,但是可以通过某些变换转化成稀疏信号^[5].如果一个 N 维离散信号向量 \mathbf{x} 可以表示为:

$$\mathbf{x} = \Psi\boldsymbol{\alpha} \quad (1)$$

其中, Ψ 为 $N \times K$ 维变换矩阵, $\boldsymbol{\alpha}$ 是 K 个非零元素向量.这时称信号是 K 稀疏的或可压缩的. CS 理论表明一个 K 稀疏信号可以通过最多 $M = O\{N^{1/4}(\log N)^{5/2}\}$ 维^[3]的输出信号向量 \mathbf{y} 得到精确还原,其中 \mathbf{y} 是输入



(a) 系统电路图



(b) 采样原理图

图1 本文提出的积分式无随机矩阵采样系统

值每达到比较器阈值 θ 时(设为 t_{mi} 时刻),经或门重置积分器进行重新积分,计数器加 1.当计数器记数达到 l 时(设为 t_{m+1} 时刻),计数器会输出一个高电平,通过 D 触发器把下一个积分器的积分时间段 $[t_{m+1}, t_{(m+1)1}]$ 作为离散脉冲 $y[m+1]$ 输出.于是有:

$$\int_{t_m}^{t_{m+1}} x(t)dt = l\theta, \quad t_m, t_{m+1} \in [0, T] \quad (4)$$

其中 $m \in \mathbf{R}$. 等式(4)确定了什么时候选取采样数据,代替了随机矩阵的产生.

4 信号的重构

4.1 信号模型

假设模拟信号具有有限的信息率而且是正的,并可以表示成一系列的连续基元和的形式.这种假设是

信号 \mathbf{x} 通过测量矩阵 Φ 采集的抽样信号,即:

$$\mathbf{y} = \Phi\mathbf{x} = \Phi\Psi\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{V}\boldsymbol{\alpha} \quad (2)$$

其中,矩阵 Φ 和 Ψ 线性无关^[6],以满足约束等距性^[2];矩阵 \mathbf{V} 称为传感矩阵.

由于 $M \ll N$ 可知方程(2)有无穷多个解.但是,由于信号 \mathbf{x} 的稀疏性,可以用 l_0 范数法求解:

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = \arg \min \|\boldsymbol{\alpha}\|_0, \text{ s. t. } \mathbf{y} = \mathbf{V}\boldsymbol{\alpha} \quad (3)$$

其他的求解方法有贪婪算法、凸优化方法、MBOOMP 算法等^[7].

IF 电路也是一种针对模拟信号的低 Nyquist 率采样系统^[4].它首先对信号加权积分,再与双阈值 $\pm \theta$ 比较,输出一系列连续的正负脉冲序列,并采用自己特有的还原方法进行还原.

3 抽样理论的建立

图 1 是本文受到压缩传感和 IF 电路启发提出的一种模拟到信息转换系统.其中,输入信号 $x(t)$ 是模拟信号且为正值,如果有负值可以通过加上一个正常量来满足条件. $y[m]$ 是系统的输出信号,它是一个离散脉冲序列.

在时间周期 $[0, T]$ 内积分器从 t_m 开始积分,积分

合理的^[8],即:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N a_n \varphi_n(t), t \in [0, T], \quad x(t) \geq 0, \varphi_n(t) \geq 0 \quad (5)$$

其中, $t \in \mathbf{R}$, $a_n \in \mathbf{R}$, $\varphi_n(t)$ 为连续正交基元. a_n 系数中有 $K (K \ll N)$ 个非零元素,此时也称信号 $x(t)$ 为 K 稀疏的.

当整个系统采用单电源供电时,信号总是正的.其它系统中,如果信号有小于零的部分,可以把它加上一个正常数,使整个信号大于零即可.此时,基元中必须含有一个常量如 1.

4.2 信号的重构

如图 1 所示,对于积分器 S ,假设两个连续采样时间点是 t_{mi} 和 t_{mi+1} ,由于受到比较器的控制,有:

$$\int_{t_m}^{t_{m+1}} x(t) dt = \theta \quad (6)$$

其中, $0 \leq t_m \leq t_{mi} \leq t_{m+1} \leq T$, $t_{m0} = t_m$, $0 \leq i \leq l$, $m = 1, 2, 3, \dots, M$. 参数 θ 为一个正常数. 可以看出, 输入信号的时间长度必需满足条件 $T \geq t_M$. 由式(4)容易推得 $t_M \leq M\theta / |x_{\max}|$, 其中 $|x_{\max}|$ 为输入信号的最大幅值.

由式(5)和式(6)得:

$$1 = \frac{1}{\theta} \int_{t_m}^{t_{m+1}} x(t) dt = \sum_{n=1}^N a_n \frac{1}{\theta} \int_{t_m}^{t_{m+1}} \varphi_n(t) dt \quad (7)$$

在系统中, 积分器 S 采样点 t_{mi} 具有根据信号变化的随机性和采样起始点的随机性, 满足了 CS 理论的约束等距性条件. 此外, 它也体现了时域采样的自适应性.

然而, 在系统中, 仅仅选取了时间间隔 t_m 和 t_{m+1} 中的第一个信号采样脉冲作为输出信号, 即:

$$1 = y[m] = \sum_{n=1}^N a_n \frac{1}{\theta} \int_{t_m}^{t_{m+1}} \varphi_n(t) dt, \quad k = 1, 2, 3, \dots, M \quad (8)$$

其中, M 是还原信号所需要的最少样本数. 注意, 输出信号仅仅是幅值是 1 的离散脉冲信号, 即它不需要再量化编码. 信号的信息只在时域被编码.

于是, 可以得到 CS 理论中的传感矩阵:

$$\mathbf{V} = [v_{m,n}] \quad (9)$$

$$v_{m,n} = \frac{1}{\theta} \int_{t_m}^{t_{m+1}} \varphi_n(t) dt \quad (10)$$

其中 $v_{m,n}$ 是矩阵 \mathbf{V} 中第 m 行, 第 n 列的元素. 假设, 向量 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N]^{-1}$, \mathbf{E} 为 $N \times 1$ 单位矩阵. 于是式(8)可以写成:

$$\mathbf{E} = \mathbf{V}\mathbf{a}, \quad \mathbf{a} = \mathbf{V}^{-1} \quad (11)$$

其中 \mathbf{V}^{-1} 为广义逆矩阵. 现在, 当然可以通过 CS 的还原理论得到还原信号, 然而, 由于式(11)的存在, 相信可以通过广义矩阵的一些知识得到新的还原方法.

5 仿真与分析

5.1 RD 解调器、IF 电路和本系统的比较

图 2 是 RD、IF 和本文采样系统分别对正弦波采样的得到的输出信号. IF 系统和本文系统中的阈值 θ 在这里是相等的. 比较各结构的采样结果可以得到:

与 RD 采样系统相比, 本文提出的系统的主要优点有:

(1) 它是对时域编码的, 不仅继承压缩传感理论中的低奈奎斯特率采样的优点, 而且对时域框架更加的敏感, 更适合于宽带稀疏信号.

(2) 输出的是单位脉冲序列, 无需量化, 消除了量化误差. 本文中的量化误差是指模拟量到数字量转化

过程中, 数字量化结果和被量化模拟量的差值. 这个差值是人为造成的. 很明显, 提出的 AIC 系统在幅值域是没有量化误差的. 在时域中, 没有进行量化, 是直接被采样保存或传输的.

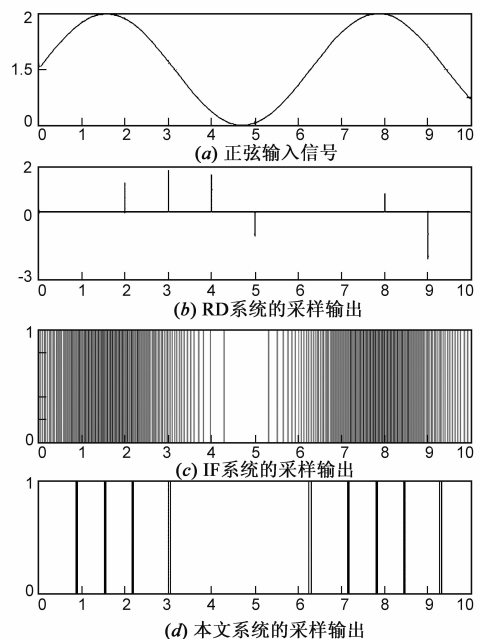


图 2 正弦波采样输出比较

(3) 无需随机矩阵的产生.

(4) 更少的数据量. 由于输出为脉冲序列, 不需要再编码.

(5) 还原算法中积分为有限积分, 减少了截断误差, 更适合软硬件实现. RD 系统中传感矩阵元素是一个无限积分式^[9].

(6) 自适应采样. 随着信号幅值的大小调节采样间隔. RD 是等间距采样的.

(7) 可自由控制采样频率(见 5.3 参数 l 和 θ 的可控频性). RD 中的伪随机 PN 序列, 要求过采样即采样频率大于 Nyquist 率, 这对后面的 ADC 部分采样频率有牵制.

与 IF 采样系统相比, 本文提出的系统的主要优点有:

(1) 更少的输出数据. 本系统是 IF 系统输出脉冲序列的参数 l 分之一.

(2) 还原的所需的采样数据量为有限的即 M ($M \ll N$) 个. IF 系统的还原算法是无限的^[9].

(3) 可自由控制采样频率. IF 系统只能由阈值 θ 来控制, 而本系统不仅可以通过阈值 θ 来控制, 而且可以调整参数 l 来大幅度调节采样频率(见下文表 2). 理论上可以无限降低, 但是采样时间会无限的长.

5.2 还原仿真

假设一个光滑的可压缩信号可分解为 20 个正弦波和一个常量的加权和,即 $N = 21$,而这些加权系数中只有少数个是非零的.仿真中选取了 $K = 7$ 个非零系数.

图 3 为采样率为 Nyquist 率的 72.93% 时的系统仿真结果,仿真参数为 $l = 46, \theta = 0.01, K = 7, M = 13, S = 18, N = 21$.其中, l 为公式(4)的常量, θ 为比较器的阈值, K 为稀疏信号分解为基元时的非零个数, M 为重构信号时所需数据个数, t 为仿真时间, S 为 t 时间内采样样本数, N 为原始信号分解的基元个数.表 1 为还原系数与原始系数的比较.

从图 3 和表 1 中可以看出,本文提出的系统进行采样后可以非常精确的还原,还原前后系数之间的误差在 5 个数量级以下.其还原精确度是由采样产生的误差(由实际器件采样产生的)、还原算法本身产生的误差、输入稀疏信号中某些近零参数的忽略、采样数据的多

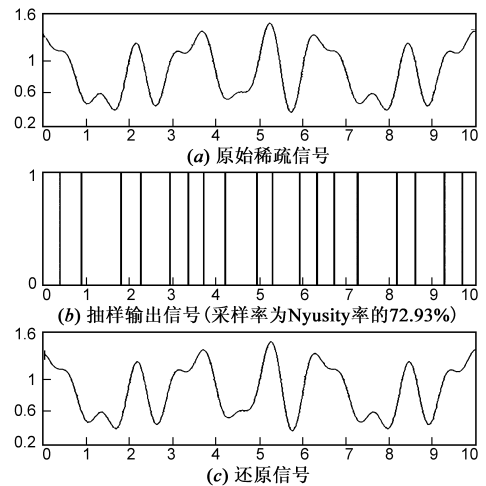


图3 系统仿真 ($l=46, \theta=0.01, K=7, M=13, S=18, N=21$)

少等因素影响的.

表 1 还原前后系数比较

序号	1	2	3	4	5	6	7
还原系数	-1.0000	-6.2675e-06	-8.3798e-07	3.0000	2.0226e-05	-1.3009e-06	2.0000
原始系数	-1	0	0	3	0	0	2
序号	8	9	10	11	12	13	14
还原系数	-1.5671e-05	1.1551e-05	1.0000	4.1906e-05	-1.3425e-06	-1.8000	-3.3187e-06
原始系数	0	0	1	0	0	-1.8	0
序号	15	16	17	18	19	20	21
还原系数	2.1141e-05	1.5000	5.4239e-06	3.7587e-06	1.4015e-05	5.5132e-06	2.0000
原始系数	0	1.5	0	0	0	0	2

5.3 参数 l 和 θ 的可控频性

本文提出的采样系统是变频采样系统,是根据输入信号幅值的大小来决定局部采样频率的,而且参数 l 和 θ 的大小直接影响着总体采样频率的高低.

在 M 值一定时,本系统的采样频率可以通过改变参数 l 和 θ 的大小来改变采样频率,特别是参数 l .采样频率与采样时间是一对相互制约的矛盾.采样频率越低,所需要的采样时间就越长.然而,采样频率与能否精确还原无关.参数 M 与采样频率无关,只影响着采样时间的长短和后端还原的繁杂度.

表 2 为同一输入信号下,参数 l 和 θ 与采样频率关系表.其中, M 为还原所用样本数, t 为仿真时间, S 为采样样本总数, f/f_N 为采样频率与 Nyquist 率的比.容易看到,随着参数 l 和 θ 增大,采样频率可以下降到 Nyquist 率的 14.73%,然而,采样时间 t 从 6s 增加至 40s.

由以上分析可以看到,选取合适的 l 及 θ ,可以将采样频率控制在很低的水平.因此,在进行系统及电路

设计时,可以根据应用进行折中考虑采样频率,甚至进行可控频采样,以降低数据量,减少数据的存储、传输、处理过程中占用的资源,降低功耗等.

表 2 参数 l 和 θ 与采样频率关系

l	θ	M	S	t	f/f_N
35	0.01	13	14	6s	91.63%
46	0.01	13	13	7s	72.93%
75	0.01	13	17	15s	44.51%
110	0.01	13	15	20s	29.45%
110	0.02	13	15	40s	14.73%

6 结论

本文提出了提出一种新的 AIC 转换系统,它不需要随机矩阵产生器,由积分器,比较器,计数器和 D 触发器等简单模块构成.新系统采用对时域编码的积分式采样机制,在稀疏信号足够长的条件下,可以通过参数控制采样频率,理论上可以无限降低.可以极大地减

少数据量,降低系统功耗;另外,新系统具有无量化误差、一定自适应性、对时域敏感性等优点,具有非常好的应用前景。

参考文献

- [1] E J CAND S, et al. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489 – 509.
- [2] D L DONOHO. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289 – 1306.
- [3] K SAMI, et al. Analog-to-information conversion via random demodulation[A]. 2006 IEEE Dallas/CAS Workshop on Design, Applications, Integration and Software [C]. Richardson, TX: IEEE, 2006. 71 – 74.
- [4] ALEXANDER SINGH ALVARADO, et al. The integrate-and-fire sampler: a special type of asynchronous σ - δ modulator [A]. Circuits and Systems (ISCAS) [C]. Rio de Janeiro: IEEE, 2011. 2031 – 2034.
- [5] 石光明, 刘丹华, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070 – 1081.
SHI Guang-ming, LIU Dan-hua, et al. Advances in theory and application of compressed sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 1070 – 1081. (in Chinese)
- [6] R BARANIUK. Compressive sensing [J]. Lecture Notes in IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118 – 120.
- [7] 杨海蓉, 张成, 等. 压缩传感理论与重构算法[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 142 – 148.

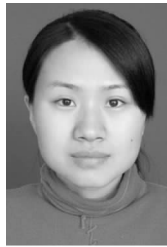
YANG Hai-rong, ZHANG Cheng, et al. The theory of compressed sensing and reconstruction algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 142 – 148. (in Chinese)

- [8] J A TROPP, et al. Beyond nyquist: efficient sampling of sparse bandlimited signals[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(1): 520 – 544.
- [9] D CHEN, et al. Asynchronous biphasic pulse signal coding and its CMOS realization[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. Island of Kos: IEEE, 2006. 2293 – 2296.

作者简介



董子刚 男, 1985 年 12 月生于山东省日照市, 硕士, 研究方向为集成电路设计与系统应用。
E-mail: zg.dong@siat.ac.cn



李 严 女, 1982 年 5 月生于黑龙江省阿城市, 博士, 研究方向为医学应用集成电路设计。
E-mail: y_5100@126.com