

文章编号:1004-9037(2014)06-0930-10

光子学压缩感知技术研究进展

陈莹池 灏章献民 金晓峰 郑史烈

(浙江大学信息与电子工程学系,杭州,310027)

摘要:压缩感知是近来发展的一种新型的信号获取方法。根据压缩感知理论,频域稀疏信号可以以远低于奈奎斯特定律所规定的采样率进行采样和高精度的恢复。压缩感知在宽带信号获取中的应用将有利于降低对模数转换器的要求。最近,利用光子学技术实现基于压缩感知的稀疏信号获取引起了相关领域的广泛兴趣。光子学技术及其相关器件的应用可以大大提高系统的带宽,使得光子学压缩感知成为超宽带稀疏信号获取的一种很有前景的方法。本文综述了光子学压缩感知技术在稀疏信号获取中应用的研究进展,并给出一些研究成果。

关键词:压缩感知;光子学技术;稀疏信号获取

中图分类号:TN91 文献标志码:A

Research Progress of Photonics-Assisted Compressive Sensing

Chen Ying, Chi Hao, Zhang Xianmin, Jin Xiaofeng, Zheng Shilie

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China)

Abstract: Compress sensing (CS) is a recently developed approach for the acquisition of sparse signals. According to the CS theory, a spectrally sparse signal can be sampled with a sampling rate far lower than that required by the Nyquist theorem and recovered with a high resolution. Application of CS in the field of wideband signals acquisition is highly desirable as the sampling rate of analog-to-digital converters (ADCs) can be greatly lowered. More recently, CS for sparse signal acquisition based on photonic techniques has attracted much interest. The photonic techniques and components help to enlarge bandwidth. It makes the photonics-assisted CS a promising method for the ultra-wideband sparse signals acquisition. The recent developments of the photonics-assisted CS in the application of sparse signal acquisition are reviewed. Research achievements by our group are also presented.

Key words: compressive sensing (CS); photonic technique; sparse signal acquisition

引 言

随着现代通信系统的发展以及人们对通信速率要求的不断提高,高速信号采集以及处理技术一直是通信及信号处理领域里面的一个研究热点。传统的信号获取和恢复技术依赖于著名的奈奎斯特定理,即:在进行模数转换的过程中,当采样频率大于信号最高频率的两倍时候,才能从采样后的信

号中无失真的恢复原始信号^[1]。虽然模数转换技术目前已得到了很大的发展,采样速率也在不断地提高,但是现有的技术仍然不能满足一些系统中的应用,比如超宽带通信以及雷达系统。在很多实际的应用当中,系统所需获取、处理、存储及传输的信号往往是稀疏的。所谓稀疏信号是指信号在某些变换域只有少数元素是非零的,比如频域稀疏信号,该类信号在时域内是非稀疏的,但是在傅里叶变换基上是稀疏的。如果按照奈奎斯特定理对宽

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2012CB315703)资助项目;国家自然科学基金(61177003, 61275027)资助项目。

收稿日期:2014-06-12;**修订日期:**2014-10-08

带稀疏信号进行采样恢复,一方面会大大增加硬件系统中采样速率的压力提高硬件成本,另一方面为了提高信号存储和传输效率,采集到的信号中会有大量无效数据被丢弃,这样就造成了数据计算和存储资源的浪费。压缩感知就是针对稀疏信号的一种信号获取方法,能突破奈奎斯特采样定律的限制^[2-5]。基于压缩感知的稀疏信号获取,可以在不降低信号恢复精度的情况下,通过适当次数的观测,直接获取信号的有用信息,从而大大降低系统的采样频率。因此,压缩感知技术在信号处理领域里有着广泛的应用前景,包括稀疏信道估计^[6-8]、信号检测与参数估计^[9-14]、图像处理^[15-18]等。近年来,光子学技术在压缩感知系统中的应用引起了国内外研究人员的关注。光子学压缩感知结合了光子学技术和压缩感知技术的优点,在降低系统硬件采样速率的同时充分利用光子学器件带宽大损耗小的特点进一步增加系统的带宽,提高系统的性能。因此,光子学压缩感知技术具有重要的学术价值和实际意义。

1 压缩感知基本概念

压缩感知也被称为压缩传感和压缩采样,其概念由 Candes 和 Donoho 提出^[2-3]。其目的在于充分利用信号的稀疏性和可压缩性提高数字信号处理的效率。压缩感知的基本过程包括线性映射和非线性重构。其中,线性映射是为了降低信号维数获得少量的观测值,每个观测值都包含原信号的部分有效信息。非线性重构是根据系统的观测矩阵通过基于优化求解的恢复算法,从观测值中精确地恢复原信号。

压缩感知的前提是信号的稀疏性或可压缩性,即找到适当的正交基,使其在该基上的表示是稀疏的。假设 x 是长度为 N 的实值离散信号, W 是选取的 $N \times N$ 规范正交基,则 x 在 W 上的稀疏表达式为

$$x = W\theta \quad (1)$$

式中: θ 是 $N \times 1$ 向量,表示 x 在 W 上的稀疏系数,因此, θ 在 W 域上和 x 在时域上是等价的。如果 θ 中只有 K ($K \ll N$) 个非零值,则称 x 为 W 域上的 K 稀疏信号。

压缩感知的测量过程,也是压缩和降采样的过程。假定 Φ 代表维数为 $M \times N$ 的观测矩阵,则压缩感知的测量过程可表示为

$$y = \Phi x = \Phi W\theta \quad (2)$$

式中: y 是维数为 $M \times 1$ 的观测值矩阵。根据压缩感知理论,如果正交基 W 和观测矩阵 Φ 具有非相干性,同时乘积矩阵 ΦW 满足约束等距性(Restricted isometry property, RIP)^[19-20],则系统测量得到的观测值能通过恢复算法精确求出 θ 的唯一解。均值为零的随机高斯矩阵是常用的观测矩阵,研究表明该类矩阵与大部分的正交基都不相干,同时乘积矩阵 ΦW 能以较大的概率满足 RIP 条件^[21]。压缩感知的恢复过程就是优化求解公式(2)的过程,该过程可以通过多种恢复算法实现,其中 l_1 范数法是比较有效的恢复算法,其优化模型可表示为

$$\hat{\theta} = \arg \min \theta'_1, \text{ s. t. } \Phi W\theta' = y \quad (3)$$

关于压缩感知的原理和恢复算法,可参阅文献^[2-5,19-25]。

随机解调器(Random demodulator, RD)^[26-27]和调制宽带转换器(Modulated wideband converter, MWC)^[28]是两种典型的时域信号压缩感知实现方式。RD 的结构如图 1(a)所示,主要过程包括随机信号的相乘、积分和较低速的模数转换,其中积分器可以用低通滤波器代替,不过为了准确构造系统的观测矩阵,需要精确测量滤波器的冲激响应函数。MWC 则是多路并行结构,如图 1(b)所示,每一路的基本构成和 RD 相同,不同之处在于随机信号速率以及模数转换器的采样速率比 RD 低。

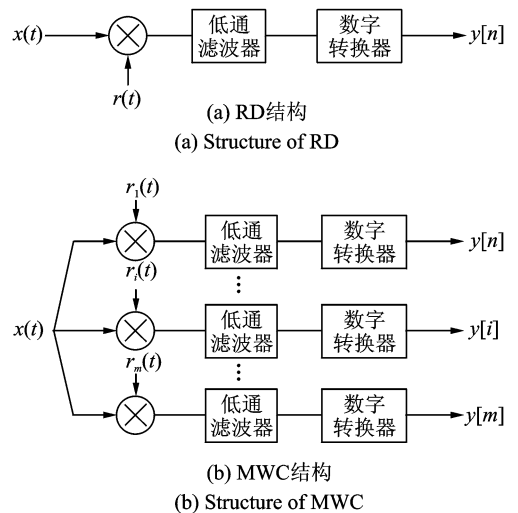


图 1 压缩感知的基本结构

Fig. 1 Structure of CS

2 光子学压缩感知技术

光子学压缩感知主要是用光子学技术来实现压缩中信号的观测过程^[29-45]。基于 RD 结构的压缩感知系统的一个要求是随机调制过程中随机信

号的速率必须大于或等于待获取稀疏信号的奈奎斯特率,因此基于 RD 结构的压缩感知系统,其可恢复的信号带宽受到了电混频器带宽的限制。为了提高系统的带宽,Valley 等首次提出了一种基于空间光调制器(Spatial light modulator, SLM)的压缩感知技术^[29-30],如图 2 所示。在该方案中光载波是经历色散后的啁啾光脉冲(具有载波频率和时间的对应关系)。待测稀疏信号通过马赫-泽德调制器(Mach-zehnder modulator, MZM)调制在啁啾光脉冲上并输入到基于 SLM 的光谱整形器。其中,SLM 可由程序控制写上伪随机二进制序列(Pseudorandom binary sequence, PRBS)。由于光脉冲的啁啾特性,在频域上跟信号相乘,等效于在时域上跟信号乘上 PRBS。

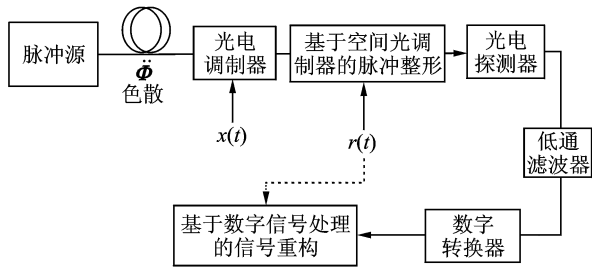


图 2 基于 SLM 的压缩感知系统

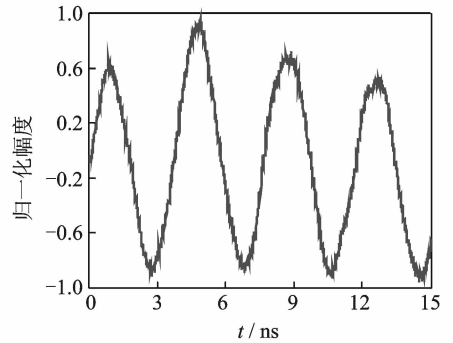
Fig. 2 CS based on SLM

对基于 SLM 的压缩感知系统进行了理论和实验研究^[31],通过理论推导,可得知空间光调制能实现的频谱分辨率为^[46]

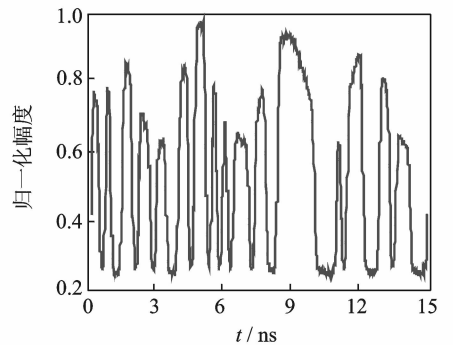
$$\Delta f > \Delta f_M = (1/2\pi\Phi)^{1/2} \quad (4)$$

式中 Φ 代表色散介质的色散量,式(4)表明记录在 SLM 上的 PRBS 的比特周期必须大于 $(1/2\pi\Phi)^{1/2}$,这实际上会限制 PRBS 序列的长度 N 。实验参数如下,输入单频信号的频率为 250 MHz,所用色散光纤的色散量为 $1\ 360\ \text{ps}^2$,对应于比特周期的下限为 $\Delta f_M \approx 10\ \text{GHz}$, $N = 64$, $M = 16$ (即压缩率为 4),记录在 SLM 上的实际比特周期为 25 GHz,即能较好地满足式(4)。实验结果如图 3 所示,结果表明能够很好地恢复原输入信号。如果提高 PRBS 序列长度,比如 $N = 128$,此时记录在 SLM 上的实际比特周期为 12.5 GHz,说明在理论上不能很好地满足式(4),实验所得的经 SLM 频谱整形后的时域信号如图 4 所示,可发现混频信号有所失真(在多处无法归零),如果用该信号进行采样恢复,不能正确恢复出原输入信号。实验结果表明,在基于 SLM 中的压缩感知实现中,必须满足

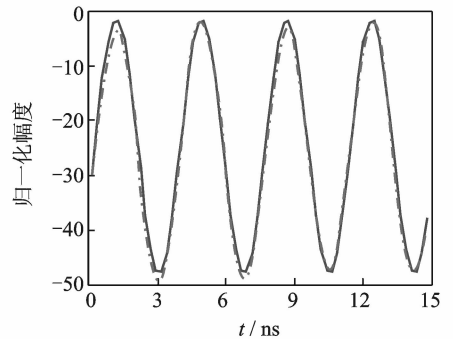
SLM 频谱分辨率的要求,这一点实际上限制了 PRBS 序列的长度,进而影响信号恢复的质量。



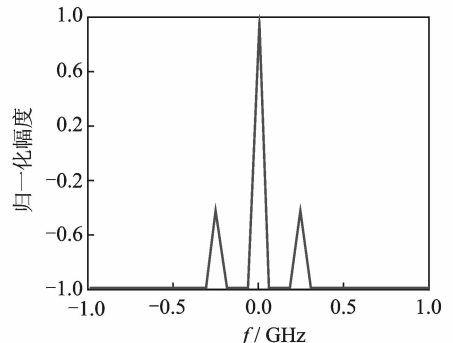
(a) 输入的时域信号
(a) Input time domain signal



(b) 经 SLM 整形后的时域信号
(b) Time domain signal after SLM



(c) 时域信号恢复结果
(c) Recovered time domain signal



(d) 频域恢复结果
(d) Recovered spectrum domain signal

图 3 基于 SLM 压缩感知系统实验结果($N = 64$)

Fig. 3 Experimental results of SLM based CS system ($N = 64$)

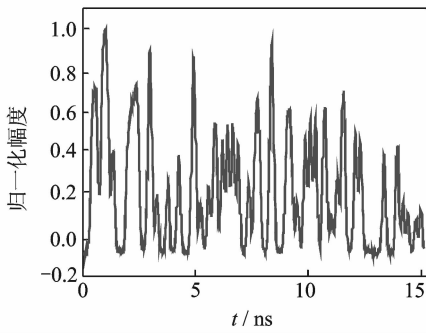


图 4 当 $N=128$ 时,经 SLM 频谱整形后的时域信号
Fig. 4 Time domain signal after SLM ($N=128$)

Nichols 等提出基于微波光子链路实现了压缩感知^[32-33]。该方案如图 5 所示,稀疏信号通过 MZM 调制在连续光载波上,调制后的光信号和 PRBS 序列分别输入到另一个 MZM 的光输入和电输入实现稀疏信号的随机混频。最后,经光电转换后的信号在电域里实现低通滤波和降采样。文献[32-33]中通过实验成功地实现了压缩比为 4 的信号恢复。该方案的最大优点是利用光电调制器和光电探测器代替了传统的电乘法器,大大提高了系统可恢复的信号带宽。

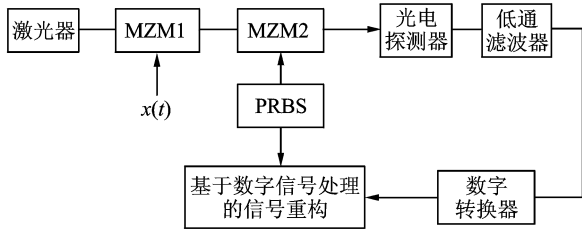


图 5 基于 RD 结构的光子学压缩感知系统
Fig. 5 Photonic CS based on RD

上述基于光强度调制和直接探测的系统在实现稀疏信号随机调制的过程中引入了直流分量,其探测得到的随机调制信号为

$$y = [1 + \alpha r(t)][1 + \beta x(t)] \quad (5)$$

式中 $x(t)$ 和 $r(t)$ 分别是稀疏信号和 PRBS, α 和 β 是调制系数,从式(2)可以看出与信号相乘的是均值不为 0 的随机信号 $1 + \alpha r(t)$,相应系统所实现的观测矩阵是均值不为 0 的随机高斯矩阵。为实现均值为 0 的随机高斯观测矩阵,提高信号精确恢复的概率,提出了一种基于平衡 MZMs 结构的随机调制过程,如图 6 所示^[34]。随机信号 $r(t)$ 首先通过 MZM1 调制在光载波上产生了两个互补的光信号,即 $[1 + \alpha r(t)]/2$ 和 $[1 - \alpha r(t)]/2$ 。未知稀疏信号 $x(t)$ 通过两个偏置在正向正交点和反向正交点

的调制器(MZM2 和 MZM3)分别调制在互补的光信号上,在光域里实现随机混频。混频后的信号经过光电转换产生的电信号在电域里相加,最后输出的信号 $y = 1 + \alpha\beta r(t)x(t)$ 经过隔直流后可得 $y = \alpha\beta r(t)x(t)$,与式(5)相比,消去了随机序列项中的直流成分。该过程利用了光电平衡检测的原理,消去了式(5)中的部分无用项,实现了均值为 0 的随机观测矩阵,同时也去除了信号中的直流项。图 7 是基于图 6 结构的信号恢复。其中是输入信号带宽为 5 GHz 的稀疏信号,包含频率成分 1.25, 2.32, 3.75, 4.56, 和 4.87 GHz,如图 7(a)所示。图 7(b, c)分别为恢复的频域和时域结果,其中 PRBS 的速率为 10 GHz,信号长度 $N=4\ 096$,压缩比为 16,即系统的采样率为 $10\ \text{GHz}/16 = 625\ \text{MHz}$ 。从恢复结果看出,信号的时频信息都得到了较准确的恢复。为了进一步测试系统恢复性能与压缩系数的关系,图 7(d)给出了信号长度为 2 048,其他参数不变的恢复结果,从图中可以看出,恢复后的信号质量随着信号长度的减少而有所下降。

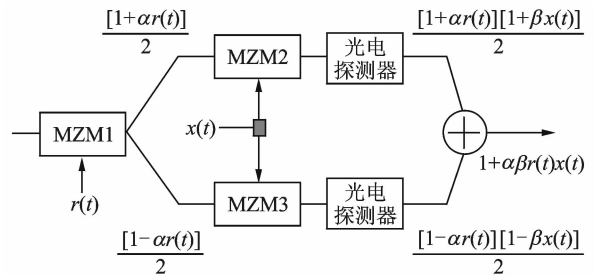
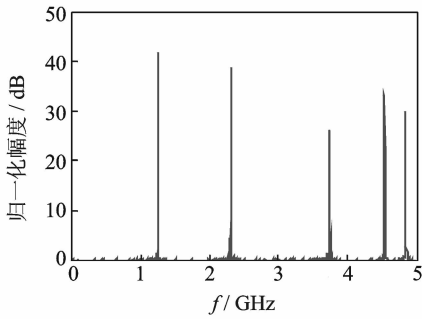


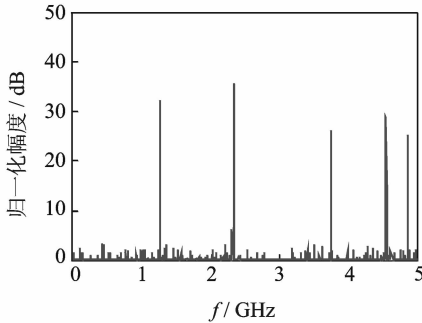
图 6 基于 MZM 平衡结构的随机调制
Fig. 6 Random mixing based on balanced MZM structure

为了进一步增加压缩感知系统的带宽,同时不降低信号恢复的精度,提出将光时域拉伸技术应用于压缩感知系统中^[35-37]。光时域拉伸技术是 Jalali 等人在 1998 年提出的一种光子信号处理技术^[47],该技术在微波光子模数转换中得到了应用^[48-50],其主要思想是利用光子学方法,降低输入信号的速率,从而用较低采样率的 ADC 来获取高速信号,其基本结构如图 8(a)所示。在该结构中,未知高速信号 $x(t)$ 通过光电调制器调制在啁啾光脉冲序列上,其中啁啾光脉冲由超短光脉冲通过一段色散介质获得。调制后的光信号通过另一段色散介质得到进一步展宽,相应通过光电转换后的电信号在时域上也得到了展宽,从而降低了系统中模数转换



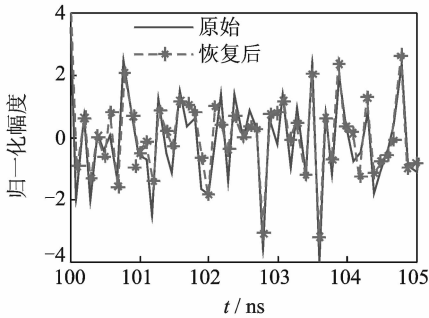
(a) 输入信号的频谱

(a) Spectrum domain of input signal



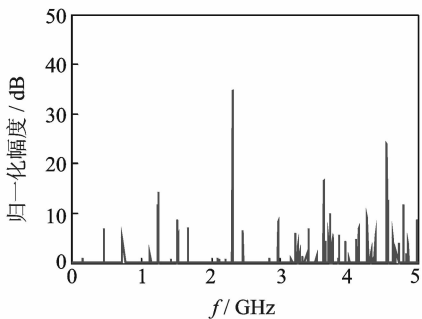
(b) 信号的频谱恢复(N=4 096)

(b) Recovered spectrum domain signal (N=4 096)



(c) 信号的时域恢复结果(N=4 096)

(c) Recovered time domain signal (N=4 096)



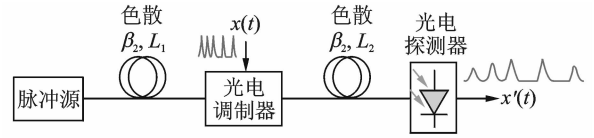
(d) 信号的频谱恢复(N=2 048)

(d) Recovered spectrum domain signal (N=2 048)

图 7 基于 MZM 平衡结构的信号恢复结果

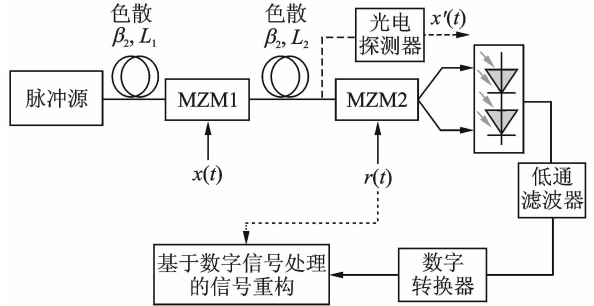
Fig. 7 Recovery results based on balanced MZM structure

器的速率。假定系统中的两段色散介质的色散系数相同,长度分别为 L_1 和 L_2 ,则系统的展宽系数为 $R_s = 1 + L_1/L_2$,即相应的信号恢复所需要的采



(a) 光时域拉伸技术原理

(a) Schematic illustration of photonic time stretch



(b) 光时域拉伸压缩感知系统

(b) CS based on photonic time stretch

图 8 光时域拉伸技术在压缩感知中的应用

Fig. 8 Photonic time stretch in the application of CS

样频率也降低了 R_s 倍。

图 8(b)给出了光时域拉伸压缩感知系统的结构,其前面部分是光时域拉伸系统,后面部分(MZM2 之后)是光子压缩感知系统。假定输入的信号为 K -稀疏信号,即

$$x(t) = \sum_{k=0}^{K-1} a_k \cos(2\pi f_k t), f_k \in [0, B] \quad (6)$$

式中: a_k 表示各个频率成分的系数, B 为信号的带宽。在小信号调制下,经过展宽后的信号可表示为

$$I(t) \propto x'(t) \approx (1/2R_s) \exp(-t^2/\tau_2^2) \times \left[1 + (1/V_\pi) \sum_{k=0}^{K-1} a_k \cos(2\pi^2 \beta_2 L_2 f_k^2 / R_s) \cos(2\pi f_k t / R_s) \right] \quad (7)$$

式中 $\tau_2 = \sqrt{2} \beta_2 (L_1 + L_2) / \tau_0$ 为展宽后脉冲的宽度,决定了时间展宽系统的时间窗, V_π 为 MZM1 的半波电压, $\cos\left(\frac{2\pi f_k t}{R_s}\right)$ 代表展宽后的各个频率成分, $\cos(2\pi^2 \beta_2 L_2 f_k^2 / R_s)$ 为双边带调制的光链路中色散引起的衰减系数。光时域拉伸技术的应用可以预先降低信号的速率,从而降低压缩感知系统所需随机信号的速率。同时,压缩感知高效的信号获取和处理方式使得基于光时域拉伸的压缩感知系统可以进一步降低系统采样率。为了实现均值为 0 的随机观测矩阵,该系统在光子压缩感知部分还应用了平衡检测技术,消除了直接检测中产生的直流信号,从而提高信号恢复的精度。图 9 为信号

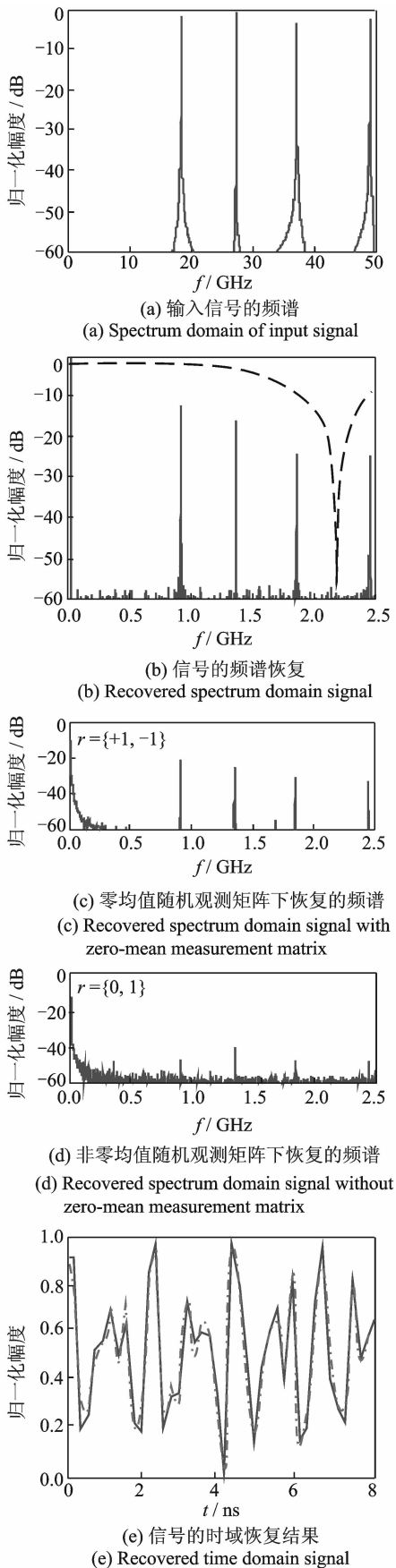


图 9 光时域拉伸压缩感知系统的信号恢复结果

Fig. 9 Recovery results with photonic time stretch based CS

恢复的仿真结果。仿真中,输入信号的带宽为 50 GHz,包含的频率成分为 18,27,37 和 49 GHz,如图 9(a)所示。图 9(b,e)分别为系统恢复的展宽信号的频域和时域信息,其中光时域拉伸过程中信号的展宽比为 20,压缩感知过程中,信号长度 $N=2\ 048$,压缩比为 4,即 $M=N/4=512$ 。信号恢复过程中应用了 Figueiredo 在文献[19]中提出的稀疏恢复算法,从结果可以看出,输入信号的时域和频域信息得到了正确的恢复。图 9(c,d)给出了平衡检测和非平衡检测情况下信号的频谱恢复结果,从结果可以看出平衡检测的情况下,即系统观测矩阵的均值为零的情况下,系统恢复结果的信噪比较高。

压缩感知中的积分器也可以在光域上实现^[38-39]。在文献[38]提出的方案中,随机序列 PRBS 和待测信号 $x(t)$ 通过 MZM 调制在啁啾光脉冲上,其啁啾光脉冲由飞秒脉冲通过一段色散介质获得,这个过程实际上也实现了 PRBS 和 $x(t)$ 的相乘。然后该混频信号经历一段色散相反的色散介质,使得啁啾光脉冲得到适当的压缩,其过程等效于对每个脉冲上加载的信号进行强度累加,从而实现随机调制信号的累加过程。该方法充分利用了光子学信号处理的方法提高了系统的带宽和性能。同时,与光子学压缩感知系统相比,用光域上的累加方法代替电域积分器,可以进一步提高系统的带宽。

最近提出基于多波长连续光源和色散介质来实现压缩感知系统中的积分器功能^[39],如图 10 所示。在该方案中,稀疏信号和随机序列通过 MZM 先后调制在非相干的多波长连续光源上。随机调制后的光信号通过一段色散介质,在色散的作用下,不同波长信道之间的随机调制信号会产生延时。由于系统的多波长光源是非相干的,经过群延时后探测到的信号是每个波长信道中信号的线性叠加。为了实现随机调制信号中相邻比特信号的累加,多波长光源的波长间隔和色散介质的色散量应该满足相邻波长信道之间的延迟差等于随机序列的比特间隔。对于波长信道数为 S 的系统,可以实现压缩比为 S 的稀疏信号获取。图 11 给出了压缩比为 4 的实验结果,其中图 11(a)为输入的时域信号,其频率为 200 MHz,图 11(b)为模数转换器降采样后获得的信号,图 11(c,d)分别是恢复的频域和时域信号。实验中随机序列的速率为 500

Mb/s, 相应系统实现的波长信道间的群延迟是 2 ns, 系统的采样速率是 $500/4 = 125$ Mb/s, 恢复算法仍采用文献[19]中的算法。可以看出, 信号的时频信息都得到了较高精度的恢复。

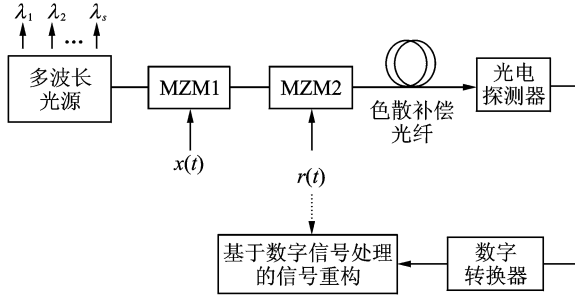


图 10 采用光学积分器的光子学压缩感知系统

Fig. 10 Photonic CS with optical integrator

上述光子学压缩感知技术都基于 RD 结构, 由于 MWC 结构的组成类似于并联的 RD 结构, 只是每路调制的随机序列的速率和后续的恢复算法有所不同, 所以相应基于 RD 结构的光子学技术也可以应用到 MWC 结构中。文献[40]中的方案利用了波分复用技术和基于 MZM 的随机调制技术实现了基于 MWC 结构的光子学压缩感知。由于基于 MWC 结构的压缩感知系统中, 输入的随机比特序列组可以是经过移位的比特序列, 因此文献[41]中提出的方案中利用多波长光源通过色散介质产生的群延迟实现输入随机序列在不同波长信道间的比特移位作用, 等效于多路移位随机序列组, 从而减少输入到系统中的随机比特序列数。

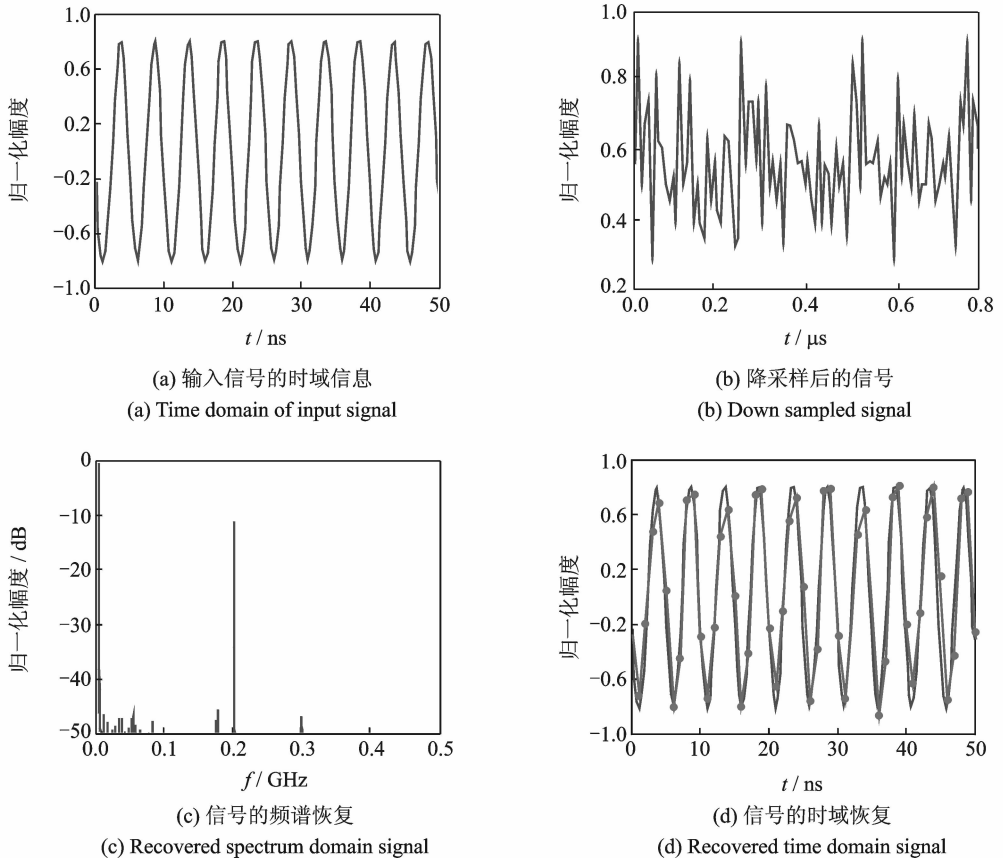


图 11 实验结果

Fig. 11 Experimental results

3 结束语

压缩感知是针对稀疏信号的新型信号获取方法。压缩感知技术突破了奈奎斯特采样定理的限制, 根据信号的稀疏特性和可压缩性, 通过适当次数的测量直接获取信号的有用信息。基于压缩感

知技术的信号获取可以降低采样率降低对 ADC 的要求。光子学压缩感知利用光信号处理技术实现信号信息的压缩和观测, 从而提高了系统的带宽和性能。本文介绍了压缩感知的基本原理以及光子学压缩感知技术的研究进展, 同时给出了本研究小组近来的研究结果。

光子学技术会给压缩感知带来带宽优势的同

时,也会产生一些新的问题。比如用电光调制来实现随机混频,可以实现的混频速度很高,但是光链路的强度调制/直接检测的特点,也会使输入的双极性伪随机码转变为单极性伪随机码,从而降低信号恢复的质量。这一特点,也会使恢复出来的信号包含很强的直流成分。另外,基于空间光调制器的压缩感知技术,能够实现的伪随机序列的长度会受到时频映射的频谱分辨率的限制,这也会影响信号恢复质量。如何充分发挥光子学的技术优势,同时又避免其带来的一些负面影响将是今后光子学压缩感知技术的研究重点。

参考文献:

- [1] Shannon C E. Communication in the presence of noise[J]. Proceedings of the IRE, 1949, 37(1):10-21.
- [2] Candes E J. Compressive sampling[C]//International Congress of Mathematics. Madrid, Spain: [s. n.], 2006:1433-1452.
- [3] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(4):1289-1306.
- [4] Candes E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Process Mag, 2008, 25(2):21-30.
- [5] Duarte M, Eldar Y C. Structured compressed sensing: Theory and applications[J]. IEEE Trans Signal Process, 2011, 58(9):4053-4085.
- [6] Paredes J L, Arce G R, Wang Z. Ultra-wideband compressed sensing: channel estimation[J]. IEEE J Selected Topics Signal Process, 2007, 1(3):383-95.
- [7] Berger C R, Wang Z, Huang J, et al. Application of compressive sensing to sparse channel estimation[J]. IEEE Commun Mag, 2010, 48(11):164-174.
- [8] 王蔚东,杨俊安.基于梯度追踪的压缩感知超宽带通信信道估计[J].数据采集与处理,2013,28(3):301-306.
Wang Weidong, Yang Junan. Ultra wideband channel estimation through compressed sensing based on gradient pursuits[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(3):301-306.
- [9] Mishali M, Eldar Y C. Blind multi-band signal reconstruction: Compressed sensing for analog signals[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2009, 57(3):993-1009.
- [10] Eldar Y C, Mishali M. Robust recovery of signals from a structured union of subspaces [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2009, 55(11):5302-5316.
- [11] Gedalyahu K, Eldar Y C. Time delay estimation from low rate samples: A union of subspaces approach[J]. IEEE Trans Signal Process, 2010, 58(6):3017-3031.
- [12] Mishali M, Eldar Y C, Elron A J. Xampling: Signal acquisition and processing in union of subspaces[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(10):4719-4734.
- [13] 张弓,杨萌,张劲东,等.压缩感知在雷达目标探测与识别中的研究进展[J].数据采集与处理,2012,27(1):1-12.
Zhang Gong, Yang Meng, Zhang Jindong, et al. Advances in theory and application of compressed sensing in radar target detection and recognition[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(1):1-12.
- [14] 顾福飞,朱丰,池龙,等.基于压缩感知的含旋转部件目标 ISAR 成像方法[J].数据采集与处理,2012,27(1):45-50.
Gu Fufei, Zhu Feng, Chi Long, et al. ISAR imaging algorithm for targets with rotating parts based on compressed sensing[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(1):45-50.
- [15] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2):83-91.
- [16] Baraniuk R, Steeghs P. Compressive radar imaging [C]//2007 IEEE Radar Conference. [S. l.]: IEEE, 2007:128-133.
- [17] Romberg J. Imaging via compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2):14-20.
- [18] 常侃,覃团发,唐振华.基于多重假设的视频压缩感知分层重建[J].数据采集与处理,2013,28(6):730-738.
Chang Kan, Qin Tuanfa, Tang Zhenhua. Multi-hypothesis-based hierarchical reconstruction for compressed video sensing[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(6):730-738.
- [19] Candes E J, Tao T. Decoding by linear programming [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2005, 51(12):4203-4215.
- [20] Candes E J, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(12):5406-5425.
- [21] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty

- principles; Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2006,52(2):489-509.
- [22] Figueiredo M A T, Nowak R D, Wright S J. Gradient projection for sparse reconstruction: Application to compressed sensing and other inverse problems[J]. *IEEE J Sel Top Signal Process*, 2007,1(4):586-597.
- [23] Baraniuk R, Davenport M, DeVore R, et al. A simple proof of the restricted isometry property for random matrices[J]. *M Constructive Approximation*, 2008,28(3):253-263.
- [24] Elad M. Optimized projections for compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007,55(12):5695-5702.
- [25] 郑红,李振. 压缩感知理论投影矩阵优化方法综述[J]. *数据采集与处理*, 2014,29(1):43-53.
Zheng Hong, Li Zhen. Survey on optimization methods for projection matrix in compress sensing theory[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014,29(1):43-53.
- [26] Kirolos S, Laska J, Wakin M, et al. Analog-to-information conversion via random demodulation[C]//Proc 2006 IEEE Dallas/CAS Workshop on Design, Applications, Integration and Software. Dallas, TX: IEEE, 2006:71-74.
- [27] Laska J N, Kirolos S, Duarte M F, et al. Theory and implementation of an analog-to-information converter using random demodulation[C]//Proc IEEE ISCAS. [S. l.]: IEEE, 2007:1959-1962.
- [28] Mishali M, Eldar Y C. From theory to practice; Sub-Nyquist sampling of sparse wideband analog signals[J]. *IEEE J Sel Top Signal Process*, 2010,4(2):375-391.
- [29] Valley G C, Seffler G A, Shaw T J. Compressive sensing of sparse radio frequency signals using optical mixing[J]. *Opt Lett*, 2012,37(22):4675-4677.
- [30] Valley G C, Seffler G A. Optical time-domain mixer [C]//Proc SPIE. [S. l.]: SPIE, 2010: 7797-77970F.
- [31] Chi Hao, Chen Ying, Jin Xiaofeng, et al. Compressive sensing in a photonic link for acquisition of spectrally-sparse wideband signals: potentials and limitations[C]//International Conference on Optical Communication and Networks (ICOCN). Chengdu, China: [s. n.], 2013.
- [32] Nichols J M, Bucholtz F. Beating Nyquist with light: A compressively sampled photonic link[J]. *Opt Express*, 2011,19(8):7339-7348.
- [33] Nichols J M, McLaughlin C V, Bucholtz F, et al. Characterization of a compressively sampled photonic link[J]. *Appl Opt*, 2012,51(27):6448-6456.
- [34] Chi Hao, Mei Yuan, Chen Ying, et al. Microwave spectral analysis based on photonic compressive sampling with random demodulation [J]. *Opt Lett*, 2012,37(22):4636-4638.
- [35] Chi Hao, Chen Ying, Mei Yuan, et al. Microwave spectrum sensing based on photonic time stretch and compressive sampling[J]. *Opt Lett*, 2013,38(2):136-138.
- [36] Chen Ying, Chi Hao, Jin Xiaofeng, et al. Photonic analog-to-digital conversion based on photonic time stretch and compressive sensing with optical random mixing [C]//International Conference on Optical Communication and Networks (ICOCN). Chengdu, China: [s. n.], 2013.
- [37] Chen Ying, Chi Hao, Jin T, et al. Sub-Nyquist sampled analog-to-digital conversion based on photonic time stretch and compressive sensing with optical random mixing[J]. *J Lightwave Technol*, 2013,31(21):3395-3401.
- [38] Bosworth B T, Foster M A. High-speed ultra-wideband photonically enabled compressed sensing of sparse radio frequency signals[J]. *Opt Lett*, 2013,38(22):4892-4895.
- [39] Chen Y, Yu X B, Chi H, et al. Compressive sensing in a photonic link with optical integration[J]. *Opt Lett*, 2014,39(8):2222-2224.
- [40] Nan H, Gu Y T, Zhang H M. Optical analog-to-digital conversion system based on compressive sampling [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011,23(2):67-69.
- [41] Liang Y, Chen M, Chen H, et al. Photonic-assisted multi-channel compressive sampling based on effective time delay pattern[J]. *Opt Express*, 2013,21(22):25700-25707.
- [42] Yin F, Gao Y, Dai Y, et al. Multi-frequency radio frequency sensing with photonics-assisted spectrum compression[J]. *Opt Lett*, 2013,38(21):4386-4388.
- [43] Yan L, Dai Y, Xu K, et al. Integrated multi-frequency recognition and down-conversion based on photonics-assisted compressive sampling [J]. *IEEE Photon J*, 2012,4(3):664-670.
- [44] McKenna T P, Sharp M D, Lucarelli D G, et al. Wideband photonic compressive sampling analog-to-

- digital converter for RF spectrum estimation[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC). Anaheim, CA: IEEE, 2013: 1-3.
- [45] McLaughlin C V, Nichols J M, Bucholtz F. Basis mismatch in a compressively sampled photonic link [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25 (23):2297-2300.
- [46] Muriel M A, Azana J, Carballar A. Real-time Fourier transformer based on fiber grating [J]. Opt Lett, 1999, 24(1):1-3.
- [47] Coppinger F, Bhushan A S, Jalali B. Time magnification of electrical signals using chirped optical pulses [J]. Electron Lett, 1998, 34(4):399-400.
- [48] Coppinger F, Bhushan A S, Jalali B. Photonic time stretch and its application to analog-to-digital conversion[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1999, 47 (7):1309-1314.
- [49] Han Y, Jalali B. Photonic time-stretched analog-to-digital converter: Fundamental concepts and practical considerations[J]. J Lightwave Technol, 2003, 21 (12):3085-3103.
- [50] Han Y, Jalali B. Continuous-time time-stretched analog-to-digital converter array implemented using virtual time gating[J]. IEEE Trans Circ Syst, 2005, 52 (8):1502-1507.

作者简介:陈莹(1987-),女,博士研究生,研究方向:光子模数转换技术, E-mail: chenying1987@zju.edu.cn; 池灏(1972-),男,博士,教授,研究方向:光网络与光通信、微波光子学、光子信号处理、光纤电子学; 章献民(1965-),男,博士,教授,研究方向:射频 OAM 通信、微波光子系统; 金晓峰(1968-),男,博士,教授,研究方向:毫米波电子技术、微波/毫米波高速光子技术、无线接入与光网络融合技术以及光纤传感技术; 郑史烈(1975-),女,博士,副教授,研究方向:微波光子学、人体区域网络通信、光网络与光通信器件。

