

标志位频谱感知方法研究^{*}孙彪 江建军[†]

(华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

(2011年1月1日收到; 2011年2月12日收到修改稿)

文章提出了一种新的标志位频谱感知方法, 主要由数据采集和频谱感知两部分组成. 前者主要基于标准的压缩感知技术, 研究了一种标志位数据采集方法, 仅保留测量数据的标志位信息, 从而减少了测量数据的存储量. 后者基于一致恢复原理和共轭梯度算法来构造频谱感知算法. 仿真结果表明, 标志位频谱感知方法可以在降低数据采集量及存储量的同时完美获取原始信号的频谱信息. 该方法可以应用于无线通信、电子对抗、智能吸波结构以及感知无线电的前端频谱测量设计阶段中.

关键词: 频谱感知, 标志位压缩感知, 智能吸波结构

PACS: 07.50.Qx, 84.40.Ua

1. 引言

在电子对抗及信息探测应用环境中, 吸波技术获得了广泛应用. 为了使吸波技术能适应不断发展的雷达探测技术的要求, 智能吸波结构技术越来越引起人们的关注. 频率选择表面(FSS)对电磁波具有选择透过性^[1], 这使它可以应用于雷达罩^[2]、空间电磁滤波器^[3-5]、对吸波材料复合改性等领域^[6,7]. 在智能吸波结构的实际应用环境中, 前端信号的频谱测量是实现精确测控吸波性能的前提. 众所周知, 传统的频谱感知技术存在测量速率低下、存储空间要求高、计算量大、实时性差等问题. 因此, 压缩感知技术^[8]作为一种新型的低速率信号采样方法而受到广泛关注. 由于对稀疏信号和可压缩信号的采样效率很高, 可以在远低于传统奈奎斯特采样率的速率下实现对稀疏信号和可压缩信号的采样, 结合特定的信号恢复算法, 可以完美恢复原始信号.

基于标准的压缩感知理论, 本文提出了一种新的标志位频谱感知方法^[9]. 该方法主要由数据采集和频谱感知两部分组成, 对此进行了系统地研究探索.

2. 标志位数据采样方法

2.1. 压缩感知理论

Donoho 等人率先提出的压缩感知理论是一种新型的稀疏信号采样理论. 不失一般性, 定义信号 x 为一个 N 维向量, 并且信号 x 在某个稀疏基 $\{b_i\}$ 下为稀疏信号, 即在该稀疏基表示下信号至多只有 K 个非零点, 如下式所示:

$$x = \sum_i \alpha_i b_i, \text{supp}(\alpha_i) \leq K. \quad (1)$$

其中 $\text{supp}(\alpha_i)$ 表示 α_i 中非零点的个数. 表示为矩阵形式为

$$x = B\alpha. \quad (2)$$

其中 B 为稀疏基, α 为信号 x 在稀疏基下的表示向量.

使用一个 M 行采样矩阵 Φ 对信号 x 进行采样, 采样矩阵 Φ 中的采样向量为 $\phi_i, i = 1, \dots, M$, 如下所示:

$$y_i = \langle x, \phi_i \rangle. \quad (3)$$

联合(1), (2), (3)式, 转化为矩阵形式为

$$y = \Phi x = \Phi B \alpha. \quad (4)$$

其中 y 为测量值序列, Φ 为测量矩阵.

根据传统奈奎斯特采样理论, 需要对信号 x 进

^{*} 国家自然科学基金(批准号:61172003)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jiangjj@mail.hust.edu.cn

行 N 点采样,才能完美恢复信号. 而根据压缩感知理论,只需 $M = O(K \log(N/K)) \ll N$ 点采样,即可以完美恢复原始信号. 从压缩感知测量向量 y 中恢复原始信号 x 为一个凸优化过程

$$\hat{x} = \operatorname{argmin} \|x\|_1 \text{ s. t. } y = \Phi x. \quad (5)$$

其中, $\|x\|_1 = \sum_i |x_i|$ 为信号的 1-范数. 文献[10]中表明,只要选择恰当的测量矩阵 Φ , 通过(5)式可以完美恢复原始信号 x . 测量矩阵需要满足 RIP 准则,即

$$(1 - \delta) \|x\|_2^2 \leq \|\Phi x\|_2^2 \leq (1 + \delta) \|x\|_2^2, \forall \delta > 0. \quad (6)$$

一般来讲,高斯随机矩阵即可以很大概率满足此

条件.

2.2. 标志位数据采样方法

1) 信号模型

假设待采集信号 $x(t)$ 具有有限信息率,即信号在频域上稀疏,仅有 K 个非零点,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i b_i, \operatorname{supp}(\alpha_i) \leq K. \quad (7)$$

其中 $B = \{b_i\}$ 为傅里叶变换基.

2) 采样结构

基于标准压缩感知理论,在此研究了一种标志位数据采样方法,采样流程如图 1 所示.

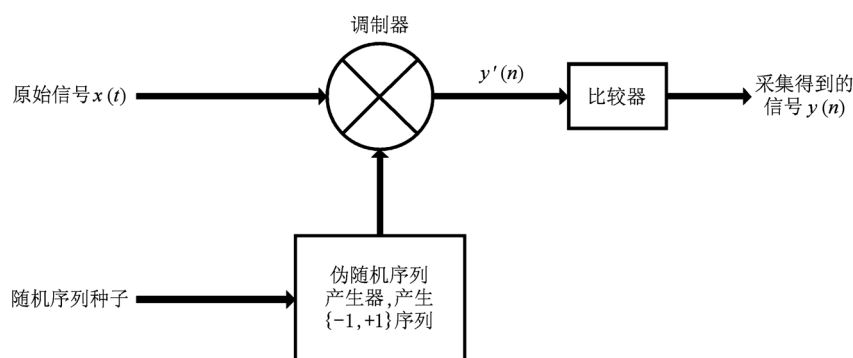


图 1 标志位数据采样流程

根据压缩感知理论,采样矩阵必须满足 RIP 准则. 在此,为了系统硬件实现上的方便性,本文采用最大长度线性反馈移位寄存器 (maximal-length linear feedback shift register, MLFSR) 来产生符合 RIP 准则的测量矩阵 Φ , 该移位寄存器可以在给定初始种子的情况下产生相同的伪随机序列. 经过测量矩阵 Φ 后的信号为

$$y'(n) = \Phi x(t). \quad (8)$$

之后,在标志位数据采样方法中,仅仅保留测量信号的标志位,而丢弃测量信号的幅值信息,即将采样后的信号通过比较器,比较器的阈值选择可以根据具体信噪比的需要,本文不考虑外界噪声影响的情况,因此选择的比较阈值为 0,即

$$y(n) = \operatorname{sign}(y'(n)) = \operatorname{sign}(\Phi x(t)). \quad (9)$$

其中 $y(n) \in \{-1, +1\}, \forall n \leq M$.

3. 标志位频谱感知算法

标志位频谱感知可以归结为具有量化噪声的

压缩感知问题. 通常此类问题可以建模为添加噪声的测量模型,即

$$y = Ax + n. \quad (10)$$

其中, n 为有限能量的量化噪声,且

$$\|n\|_2 \leq \varepsilon. \quad (11)$$

在标准压缩感知理论中,解决此类问题通过求解带限制条件的凸优化问题^[11,12],即

$$\hat{x} = \operatorname{argmin} \|x\|_1 \text{ s. t. } \|y - Ax\| \leq \varepsilon. \quad (12)$$

在标志位数据采样方法中,幅度信息被丢弃,因此需要使用一致恢复方法恢复原始信号. 一致恢复是指恢复后的信号和原始信号具有一致性,即恢复后的信号通过同样的标志位采样后,可以得到和原信号完全相同的采样序列. 在具有量化噪声的压缩感知系统中,一致恢复方法可以显著提高信号恢复性能^[13,14].

以一致恢复方法为基础,由此标志位频谱感知算法如算法 1 所示.

在下面的算法 1 中,步骤 2 计算恢复信号是否符合一致恢复原理,并计算出误差结果,步骤 3 将误

差结果中对信号恢复影响最大的点找出,在步骤4中将这此点置零,从而使这此点对信号恢复的影响降到最低,然后使用优化追踪方法获得最优化的恢复信号.在本文中,此处使用共轭梯度算法来进行优化追踪.步骤5中判断循环是否收敛,如果收敛,结束循环,输出恢复后的信号.

算法1 标志位频谱感知算法(伪代码) Inputs:

$y(n) \in \{-1, +1\}$, $A = \Phi B$, K (sparsity)

Initialize: flag = False, $\hat{x}$, iteration count $l = 0$

While flag $\neq$ True Do

1. Increase iteration count

$l \leftarrow l + 1$

2. Compute error estimate

$$\text{err} = A^T \text{diag}(y) \frac{|\text{diag}(y) A \hat{x}^{l-1}| - \text{diag}(y) A \hat{x}^{l-1}}{2}$$

3. Find the supports of most K values in error estimate

Supp = supp(err(most_K_values))

4. In Step 4's supports, find the best signal estimate

$$\hat{x} = \underset{s. t.}{\text{argmin}} \left(\frac{|\text{diag}(y) A \hat{x}| - \text{diag}(y) A \hat{x}}{2} \right)$$

$$\hat{x}_{\text{Supp}} = 0$$

5. If converged

flag = True

Output: $\hat{x}$

4. 实验结果分析

本实验硬件平台为美国国家仪器公司 NI-PXI1045 及相关信号产生、调理、采集模块.原始信号为多频正弦波信号,其中包含多个频段.为了对比采集长度不同时候的频谱感知效果,实验设置的采集长度从 100 到 4000.为了和传统奈奎斯特采样方法进行对比,实验也使用标准奈奎斯特采样定律对信号进行了采集.实验采用的信号为标准多频正弦波,频谱宽度 $N = 256$,频段数量 $K = 20$.

当采集长度为 1000 时,原始信号频谱和经过标志位频谱感知所得频谱对比如图 2 所示.由图可知,标志位频谱感知方法可以精确感知获得原始信号频谱.

当采样长度逐渐增高时,频谱感知效果会越来越好,为了评估感知所得频谱与原始频谱的差别,计算感知频谱和原始频谱的信差比(R_{SER}),其中

$$R_{\text{SER}} = 20 \log_{10} \left(\frac{\|x\|_2}{\|x - \hat{x}\|_2} \right). \quad (13)$$

当采样长度从 100 到 4000 逐渐增高时,感知频

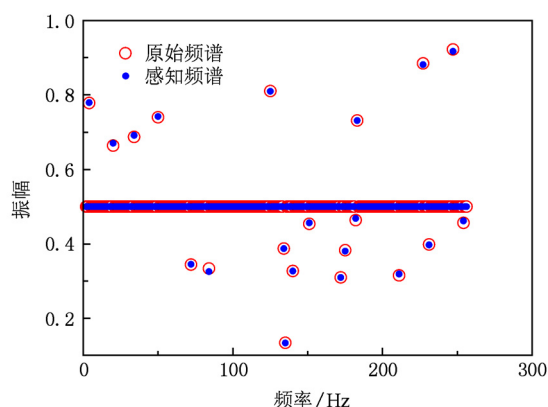


图2 原始频谱和感知频谱对比

谱和原始频谱的信差比如图 3 所示.

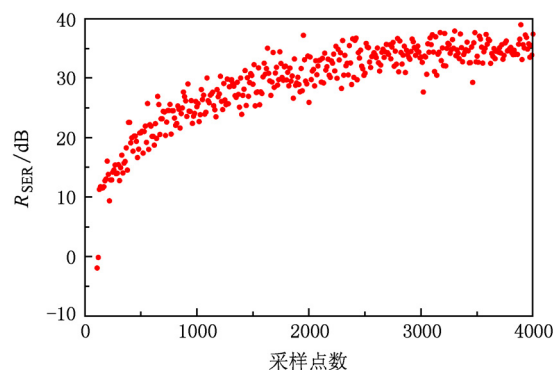


图3 感知频谱和原始频谱的信差比

由图 3 可知,随着采样点数的增加,信差比逐渐升高,当采样点数达到 3000 以上时,信差比接近 40 dB.在标志位频谱感知方法中,每个采样点仅保留标志位信息,因此仅仅使用 1 bit 即可以将单个采样点保存下来.

在传统奈奎斯特采样方法中,需要将采样点先进行量化然后保存,常用的量化精度有 4 bit, 8 bit, 16 bit, 32 bit 等.对信号进行量化一般使用模数转换器(ADC).而标志位频谱感知方法中,只需要保留标志位信息,可以简单地使用电压比较器即可以对采样点进行量化.

本实验中将标志位频谱感知方法和传统量化方法进行了比较,如图 4 所示.

标志位频谱感知方法在量化精度较低的情况下可以获得比传统量化方式更高的信差比,并且只需用比较器即可完成量化过程,比传统模数转换器量化方式硬件实现简单.但是在模数转换器量化精度较高时,传统量化方式可以获得较高信差比.

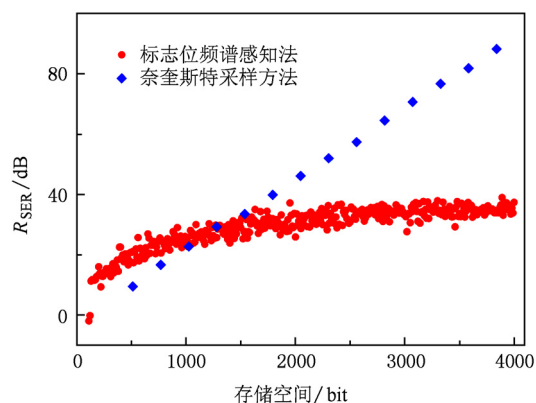


图4 标志位频谱感知方法和传统量化方式在相同数据量下的信差比比较

5. 总 结

本文基于标准的压缩感知理论,提出了一种新的标志位频谱感知方法,该方法使用比较器对采样点进行量化,仅仅保留标志位信息,因此每个采样点使用 1 bit 即可保存. 实验结果表明,标志位频谱感知方法可以在较低存储空间要求的情况下,实现精确的频谱感知,信差比可达 40 dB 左右.

该频谱感知方法可以应用于感知无线电的前端频谱感知部分,也可应用于智能吸波结构的前端频谱测量.

- [1] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (New York: Wiley-Interscience) pp1—25
- [2] Li X Q, Gao J S, Zhao J L, Sun L C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3803 (in Chinese) [李小秋、高劲松、赵晶丽、孙连春 2008 物理学报 **57** 3803]
- [3] Li X Q, Feng X G, Gao J S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3193 (in Chinese) [李小秋、冯晓国、高劲松 2008 物理学报 **57** 3193]
- [4] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun L C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 505 (in Chinese) [贾宏燕、高劲松、冯晓国、孙连春 2009 物理学报 **58** 505]
- [5] Fang C Y, Zhang S R, Lu J, Wang J B, Sun L C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5023 (in Chinese) [方春易、张树仁、卢俊、汪剑波、孙连春 2010 物理学报 **59** 5023]
- [6] Lu J, Chen X Y, Wang J B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7200 (in Chinese) [卢俊、陈新邑、汪剑波 2008 物理学报 **57** 7200]
- [7] Nie Y, Feng Z K, Zhang X C, He H H 2004 *J. Huazhong*

- University of Science and Technology (Natural Science)* **32** 50 (in Chinese) [聂彦、冯则坤、张秀成、何华辉 2004 华中科技大学学报(自然科学版) **32** 50]
- [8] Donoho D 2006 *Information Theory, IEEE Transactions on* **52** 1289
- [9] Boufounos, Baraniuk R G 2008 *Conference on Information Sciences and Systems (CISS) Princeton NJ* 16
- [10] Candès E, Romberg J 2006 *Infor. Theor. IEEE Trans.* **52** 489
- [11] Candès E 2006 *Proc. Inter. Congress of Mathematicians 3 Madrid Spain* 2006 1433
- [12] Needell D, Tropp J A 2008 *Appl. Comp. Harmonic Anal.* **26** 301
- [13] Thao N, Vetterli M 1994 *Sig. Proc. IEEE Trans.* **42** 200
- [14] Goyal V K, Vetterli M, Thao N 1998 *IEEE Transaction on Information Theory* **44** 16

Investigation of sign spectrum sensing method^{*}

Sun Biao Jiang Jian-Jun[†]

(*Department of Electronic Science & Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 1 January 2011; revised manuscript received 12 February 2011)

Abstract

Spectrum measurement technology is widely used in wireless communication, electronic countermeasure, cognitive radio, smart absorbing structure, etc. In this paper we propose a new sign spectrum sensing approach which contains mainly data acquiring stage and spectrum sensing stage. In the former stage, based on the standard compression sensing, we propose a new sign data acquiring approach, in which we preserve only the sign information about the measurements, so that the data storage space is reduced. In the latter stage, we construct the spectrum sensing algorithm based on the consistent reconstruction principle and the gradient steepest descent algorithm. Simulation results demonstrate that this approach reduces the number of measurements and the data storage space, and at the same time this approach perfectly acquires the spectrum information. This approach can well be used in front spectrum measurement stage of wireless communication, electronic countermeasure, smart absorbing structure and cognitive radio.

Keywords: spectrum sensing, sign compressed sensing, smart absorbing structure

PACS: 07.50.Qx, 84.40.Ua

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172003).

[†] Corresponding author. E-mail: jiangjj@mail.hust.edu.cn