

基于压缩感知的协作频谱检测

王伟刚^{1,2}, 胡海峰²

(1. 南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210046;

2. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 频谱感知技术是认知无线电中的关键技术之一,它要求次用户快速检测出可用的频谱空穴。近年来提出的压缩感知是一种针对稀疏信号处理的新技术,其特点是将压缩与采样同步进行,并可以通过相应的重构算法恢复原始信号。由于认知无线电中的宽带频谱具有稀疏性,可以将压缩感知技术用于宽带信号频谱检测,以实现快速频谱检测并判断频谱空闲情况。文中提出一种基于压缩感知的宽频协作频谱检测模型(CDCS),并对该模型下的各种性能进行了分析。仿真结果表明,该模型能对频谱空穴做出快速检测,并且能通过对多认知节点数据融合以提高检测概率。

关键词: 认知无线电;压缩感知;频谱检测;观测矩阵

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2012)12-0241-04

Collaborative Spectrum Detection Based on Compressed Sensing

WANG Wei-gang^{1,2}, HU Hai-feng²

(1. College of Electronic Science & Engineering, Nanjing University of Posts
and Telecommunications, Nanjing 210046, China;

2. College of Telecommunications & Information, Nanjing University of Posts
and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: Spectrum sensing technology is one of the key technologies of cognitive radio and it requires second users to detect the available spectrum holes in short time. In recent years, compressed sensing is a new sparse signal processing technology with the characteristic of compression and sampling in synchronization. The original signal can be reconstructed by corresponding algorithm. As the sparsity of wideband, the idle spectrum in cognitive radio can be detected rapidly with compressed sensing technology. In this paper, proposed a model of wideband collaborative detection based on compressed sensing (CDCS). The detection performance of this model is analyzed in various kinds of situation. The simulation results show that the model can rapidly detect the spectrum holes and improve the detection probability by fusing multiple second uses data.

Key words: cognitive radio; compressed sensing; spectrum detection; measurement matrix

0 引言

随着全球无线电业务的迅速增长,可用的频谱资源已经非常有限。认知无线电(Cognitive Radio, CR)作为一种动态频谱共享技术,能够显著提高频谱利用率,近两年受到了人们的广泛关注,成为无线电发展的一个新里程碑^[1,2]。

认知无线网络中的非授权用户能自动感知所处的频谱环境,智能地学习并实现对已分配给授权用户但未被占用频谱空穴的接入^[3]。如何快速检测并识别频谱空穴、判断检测授权用户是否出现,是认知无线电

首先要解决的问题。

近些年来, Candes^[4], Romberg, Tao^[5] 和 Donoho^[6] 等人提出压缩感知技术(Compressed Sensing, CS)得到了广泛应用。压缩感知技术指出:如果信号具有稀疏性,则可以远低于传统的奈奎斯特采样率对信号进行采集并重构。Tropp^[7] 等人将信号的采集泛化到对信息的采集,并且给出了模拟信息转换器(Analog-to-Information converter, AIC)的结构, AIC 芯片的出现使得快速宽带频谱感知成为了可能。

基于主用户发射机的频谱检测算法主要有两大类^[8]:非协作检测和协作检测。

非协作检测主要包括匹配滤波器检测、能量检测和循环平稳特征检测等^[9]。很多情况下,需要多个认知用户协作来完成检测过程。

协作检测则通过软硬判决准则和数据融合来处理

收稿日期:2012-04-08;修回日期:2012-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61071092);南京邮电大学科研项目基金(NY210038);南京邮电大学教改项目(JG03311J75)

作者简介:王伟刚(1975-),男,硕士,讲师,研究方向为计算机应用及通信信号处理。

问题。

1 压缩感知理论

设长度为 $N \times 1$ 的信号 X , 该信号在一组正交基 Ψ 下的变换系数 $\theta = \Psi^T X$, 通过构造一个 $M \times N (M < N)$ 维的与变换基 Ψ 不相关的观测矩阵 Φ , 对该系数向量 θ 进行线性变换, 得到测量集 $Y: M \times 1$ 。此过程也可视为信号 X 经过信息算子 $A^{CS} (A^{CS} = \Phi \Psi^T)$ 进行非自适应测量, 得到测量值:

$$Y = A^{CS} X \quad (1)$$

由于 M 远小于 N , 这就使信号得到很大程度的压缩。可见, 信号 X 在正交基 Ψ 下的变换系数向量为 $\theta = \Psi^T X$, 如果对于 $0 < p < 2$ 和 $R > 0$, 这些系数满足:

$$\|\theta\|_p = (\sum_i |\theta_i|^p)^{1/p} \leq R \quad (2)$$

则说明信号 X 是稀疏的。Romberg 和 Tao 研究表明, 对于满足上述条件的稀疏信号可利用压缩感知理论恢复, 并且其重构误差满足:

$$E = \|x - \hat{x}\|_2 \leq C (k / (\log^n))^{-r} \quad (3)$$

其中, $r = 1/p - 1/2, 0 < p < 1, C$ 与 k 为系数。由于方程(1)是个欠定方程, 为了保证其有解则 A^{CS} 必须满足约束等距性质 (Restricted Isometry Property, RIP)。可描述为对任意向量 $X \in \mathbb{R}^{1 \times T}, T \subset \{1, \dots, N\}$ 和常数 $\delta_k \in (0, 1)$, 须下式成立:

$$(1 - \delta_k) \|X\|_2^2 \leq \|\Psi_T X\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|X\|_2^2 \quad (4)$$

其中 Ψ_T 为 Ψ 中由索引 T 所指示的 $K \times |T|$ 的子矩阵。如果满足 RIP 条件, 那么求解欠定方程(1)的问题实质上是求最小 l_0 范数问题:

$$\min \|\Psi_x\|_0 \text{ s.t. } A^{CS} x = y \quad (5)$$

通常将 l_0 范数问题转化为等价的 l_1 问题求解, 具体的重构算法已经有诸如 Basis Pursuit (BP), 另外也有 Matching Pursuit (MP)、Orthogonal Matching Pursuit (OMP) 等一些迭代算法^[10]。

2 频谱检测模型

2.1 单用户检测模型

根据文献[11], 假设在认知无线电系统中未被主用户占用的为空白频段, 次用户的任务就是要实时检测出这些空白频段并利用。为了简化模型, 将整个频谱空间划分成 S 个频谱子带, 每个子带的带宽为 B , 它是次用户所能检测的最小分辨率。那么可以将整个频谱空间表示为 $B = [B_1, B_1, \dots, B_S]$, 主用户所占用频段为一个或多个子带^[12]。

在单个认知用户检测模型下, 首先从时域角度分析。假设 X_t 是认知用户接收到的 N 点采样数据, $X_t = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ 。接收信号通过 AIC 器件, 其采集过程

是将信号投影到一个维数 $M \times N (M < N)$ 的随机矩阵上, 以实现信息的采集。

$$Y_t = \Phi X_t \quad (6)$$

$Y_t (M \times 1)$ 是感知的结果, 由于 M 小于 N , 从而实现了对采集信号的压缩。压缩感知重构时要求采样信号必须具有稀疏性, 为了达到这一条件, 将输入信号转换成频域表示:

$$X_f = F_N X_t \quad (7)$$

其中 F_N 为傅里叶变换矩阵, 将(7)代入(6)式得到:

$$Y_t = \Phi F_N^{-1} X_f = \Psi_{cs} X_f \quad (8)$$

其中 F_N^{-1} 表示傅立叶变换逆矩阵。虽然 X_f 在频域上是稀疏的, 但由于空间传播时各种噪声的加入, 使得稀疏性不够好, 对压缩感知的重构效果产生一定影响, 因此在原始信号重构之前需要对感知测量到的数据先做平滑处理。信号经过去噪后, 将频域信号乘以一个差分矩阵: $Z = \Gamma X_f$, 其中:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & \dots & & \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

又根据 $X_f = \Gamma^{-1} Z$, 代入(6)得到:

$$Y_t = \Phi X_t = \Phi F_N^{-1} X_f = \Phi F_N^{-1} \Gamma^{-1} Z \quad (10)$$

认知节点通过 AIC 采集到数据 Y_t , 由于 Z 具有良好的稀疏性, $\Phi F_N^{-1} \Gamma^{-1}$ 为压缩感知测量矩阵, \hat{Z} 估计值可以利用 l_1 范数意义下的最优化问题来求解:

$$\hat{Z} = \arg \min \|Z\|_1 \text{ s.t. } Y_t = \Phi F_N^{-1} \Gamma^{-1} Z \quad (11)$$

在得到 Z 的估计值后, 可以进一步由 $\hat{X}_f = \Gamma^{-1} \hat{Z}$ 获得频谱。

2.2 协作检测模型

认知无线电系统中的次用户在进行频谱检测时, 每个节点通过 AIC 采集到感知数据, 此数据均为直接获得的压缩数据。各节点将压缩数据发送到簇头节点, 由簇头节点集中进行解压缩, 并且对各节点的值进行融合与判决。构建了基于压缩感知下的协作检测模型 (collaborative detection on compressed sensing, CDCS), 见图 1, 并加以如下分析。

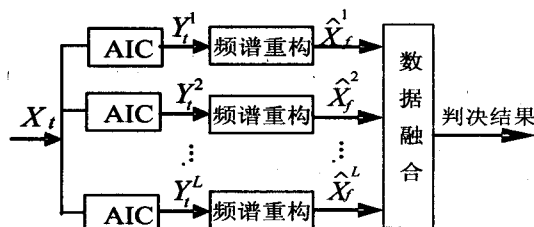


图 1 CSDC 协作检测模型

协作频谱检测可以消除无线通信过程产生的多径

衰落、阴影衰落等不利因素影响,同时提高检测性能。根据上节所述,单个节点可以确定出主用户所占频段的位置,当位置确定之后,对于每个子带而言,它是否被占用归结为一个“0”、“1”判决的问题。当存在多次用户进行联合检测时,有 OR 准则、AND 准则、K/M 准则等多种融合规则^[13]。

(1) OR 准则。

多个感知用户判决时,只要有一个感知用户的判决结果为“1”,那么最终判决结果就维持该判决;只有所有的判决为“0”时,判决结果才为“0”。在某个子带上,经过协作后的虚警概率 P_d 和检测概率 P_f 分别为:

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - P_d^i) \quad (12)$$

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - P_f^i) \quad (13)$$

其中 L 为参加合作的感知用户个数,而 P_d^i 和 P_f^i 分别为每个感知用户的检测概率和虚警概率。按本准则融合方法,会产生较小的漏检概率和较大的虚警概率。

(2) AND 准则。

AND 准则是指在感知的某个子带上,经过协作后的虚警概率 P_d 和检测概率 P_f 分别为:

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^L P_d^i \quad (14)$$

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^L P_f^i \quad (15)$$

该准则在多个感知用户判决时,只有当所有的感知用户的判决结果为“1”,最终判决结果才维持该判决;若有一个用户判决为“0”,判决结果则为“0”。此融合策略的特点是可以大大降低系统的虚警概率,但也会大大降低系统的检测概率。

(3) K/M 表决准则。

如果有 L 个感知用户的判决参与融合,至少有 K 个以上的用户判为“1”,则最终判决结果为“1”,否则判决结果则为“0”。它的性能介于 OR 准则和 AND 准则之间,当 $K=1$ 时即为 OR 准则,而 $K=L$ 时即为 AND 准则。在感知子带上,经过协作后的虚警概率 P_d 和检测概率 P_f 分别为:

$$\mu = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^N \mu_i \geq k \\ 0, & \sum_{i=1}^N \mu_i < k \end{cases} \quad (16)$$

此融合策略的特点是可以大大降低系统的虚警概率,但也会大大降低系统的检测概率。

$$P_d = \sum_{j=k}^N \sum_{\mu_i=j} \prod_i P_{d_i}^{\mu_i} (1 - P_{d_i})^{1-\mu_i} \quad (17)$$

$$P_f = \sum_{j=k}^N \sum_{\mu_i=j} \prod_i P_{f_i}^{\mu_i} (1 - P_{f_i})^{1-\mu_i} \quad (18)$$

3 仿真实验

文中利用 MATLAB 平台进行仿真实验,检测目标是频宽为 200M 到 450M 之间的频谱空穴。在这个频谱范围之间,频谱空穴的宽度与个数与频带宽度随机生成。图 2 显示了待检测信号为 OFDM 信号,其空穴数为 5 个,加性高斯白噪声为 8dB,功率谱幅度为归一化的功率谱。

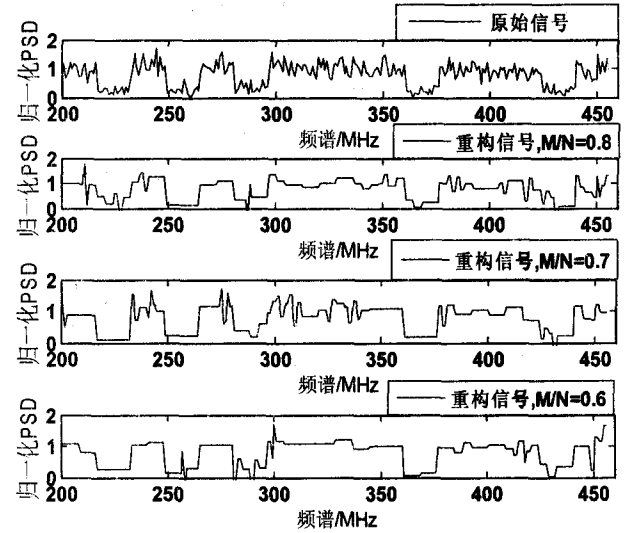


图2 不同压缩率下的频谱重构

在图 2 中,压缩感知矩阵的压缩率分别为 $M/N = 0.8, M/N = 0.7, M/N = 0.6$,其中 M 和 N 为采样随机矩阵的行与列的维数,从图中可以看出不同压缩率下的重构信号有差别,随着压缩率的增加,重构信号与原始信号之间的差距增加,对检测频谱空穴的位置准确度造成一定的失真。

为了观察不同信噪比下检测概率的情况,另一组仿真实验主要针对检测概率与信噪比的关系。待检测信号依然为 5 个空穴数的宽带频谱信号,加性高斯白噪声的变化范围为 6dB ~ 20dB,将重构信号中频谱空穴的位置与原始信号中频谱空穴的位置进行比较,在不同的压缩率下得出的检测概率如图 3 所示。

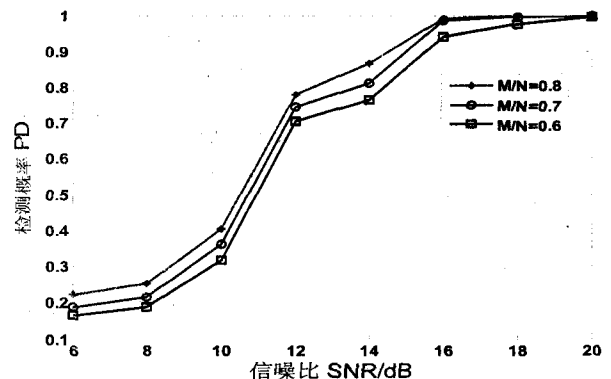


图3 不同压缩率下的检测概率

从图 3 中可以看出,随着信噪比的增加检测概率也相应增加,当信噪比增加到 20dB 左右时,检测概率

趋近于1。图3中的曲线从上往下的压缩率分别为 $M/N = 0.8$, $M/N = 0.7$, $M/N = 0.6$,可以看出压缩率高的采样下检测概率低。

为了提高检测概率,在认知无线电中设置多个检测节点,通过多个节点协作提高检测概率,本实验中针对CSCD模型,将3个不同节点的检测数据按一定准则进行融合。

图4中的曲线分别为“OR”、“AND”、“K/M”下的检测概率,可以看出“OR”准则下的检测概率最高,“AND”准则下的检测概率最低,当采用“K/M”准则时,检测概率介于二者之间。

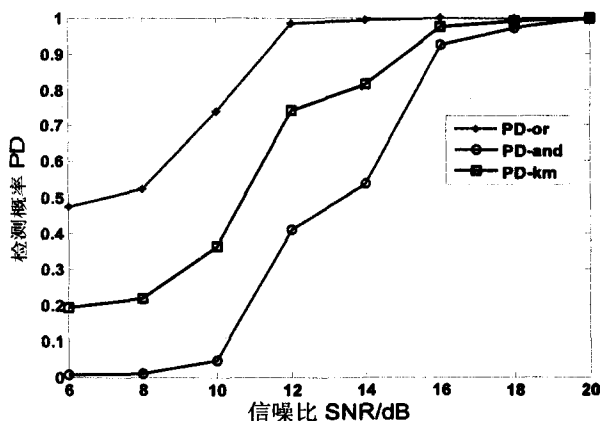


图4 协作宽带频谱的检测概率比较

在频谱检测中,漏检概率最能反映认知无线电系统中节点对频谱占用漏检的情况。图5针对漏检概率进行了比较,在本实验中,“OR”准则下的漏检概率最低,“AND”准则下的漏检概率最高,当采用“K/M”准则时,漏检概率介于二者之间。

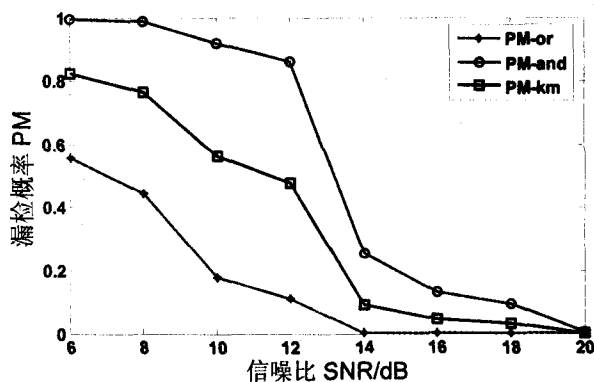


图5 协作宽带频谱的漏检概率比较

4 结束语

频谱检测是认知无线电中非常重要的一个环节,

由于宽带频谱具有稀疏性的特点,宽带频谱检测可以利用压缩感知技术对其进行快速检测。文中针对基于压缩感知的频谱检测进行了性能分析,建立了多个次用户下的协作检测(CSCD)模型,并且通过仿真实验验证了该模型有效性与实用性。由于认知无线电的环境复杂多样,还需要研究在其它环境下基于压缩感知的频谱检测,这些可作为以后深入研究的方向。

参考文献:

- [1] Mitola J. Cognitive radio: Making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Haykin S. Cognitive Radio: Brain Empowered Wireless Communications[J]. IEEE JSAC, 2005, 23(2): 2012-2020.
- [3] 张宇,冯春燕,郭彩丽,等. 认知无线网络频谱检测研究[J]. 吉林大学学报, 2008, 26(2): 126-135.
- [4] Candes E, Romberg J, Tao T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements[J]. Comm. Pure Appl. Math, 2006, 59(6): 1207-1223.
- [5] Candes E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [6] Donoho D. Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [7] Tropp J A, Laska J N, Duarte M F, et al. Beyond Nyquist: Efficient Sampling of Sparse Bandlimited Signals[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2010, 56(1): 520-544.
- [8] 王景平,张雷,赵君喜. 一种基于D-S理论的认知无线电分组协作频谱检测方法[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 404-406.
- [9] Cabric D, Mishra S M, Brodersen R W. Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios[C]//38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. California, USA: [s. n.], 2004: 772-776.
- [10] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [11] Tian Z, Giannakis G B. Compressed sensing for wideband cognitive radios[C]//International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Honolulu, HI, USA: [s. n.], 2007: 1357-1360.
- [12] 陈曦. 认知无线电中频谱感知算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [13] 卞荔,朱琦. 基于数据融合的协作频谱感知算法[J]. 南京邮电大学学报, 2009, 29(2): 73-78.