

6-6-2020

## Compressed Cooperative Eigenvalue Spectrum Sensing for Radio Signal

Jingjing Yang

1. *Wireless Innovation Lab, School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China;;*

Feng Yun

2. *Radio Monitoring Center of Yunnan Province, Kunming 650228, China;;*

Zhigang Chen

2. *Radio Monitoring Center of Yunnan Province, Kunming 650228, China;;*

Tang Hao

2. *Radio Monitoring Center of Yunnan Province, Kunming 650228, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Compressed Cooperative Eigenvalue Spectrum Sensing for Radio Signal

### Abstract

**Abstract:** Detecting the abnormal radio emission through radio monitoring is an important task of radio management. A regional cooperative compressed spectrum sensing model is proposed. *A multi-node sensing system based on software defined radio platform is built, and the effectiveness of cooperative spectrum sensing is demonstrated. Results show that a high detection probability could be achieved at a suitable decision threshold based on the test statistics extracted from the eigenvalue of the received signal; what's more, compressed spectrum sensing employed to the detection system greatly reduced the size of the data transmitted from the sensing nodes to the fusing node.* This work will be helpful for the development of large-scale grid radio monitoring network and the finer management of radio spectrum.

### Keywords

radio monitoring, interference detection, cooperative sensing, compressed spectrum sensing, simulation

### Authors

Jingjing Yang, Feng Yun, Zhigang Chen, Tang Hao, and Huang Ming

### Recommended Citation

Yang Jingjing, Feng Yun, Chen Zhigang, Tang Hao, Huang Ming. Compressed Cooperative Eigenvalue Spectrum Sensing for Radio Signal[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3061-3066.

## 无线电信号协同检测和压缩传感研究

杨晶晶<sup>1</sup>, 冯云<sup>2</sup>, 陈志钢<sup>2</sup>, 唐皓<sup>2</sup>, 黄铭<sup>1,3</sup>(1. 云南大学信息学院, 无线创新实验室, 昆明 650091; 2. 云南省无线电监测中心, 昆明 650228;  
3. 云南省高校谱传感与边疆无线电安全重点实验室, 昆明 650091)

**摘要:** 通过无线电监测发现异常无线电发射是无线电管理中的一项重要工作。提出了适用于区域性无线电监测的多节点协同检测和压缩传感模型, 并基于软件无线电平台建立多节点监测系统验证了协同检测方法的有效性。结果表明, 基于接收信号本征值构造测量统计量, 在合适的判决门限下可以获得较高的检测率; 在系统中引入压缩传感极大地减少了从传感节点到汇聚节点的数据传输量。这对发展网格化无线电监测网络, 实现无线电频谱的精细化管理具有重要意义。

**关键词:** 频谱监测; 干扰检测; 协同检测; 压缩传感; 模拟

中图分类号: TN99

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 12-3061-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712017

## Compressed Cooperative Eigenvalue Spectrum Sensing for Radio Signal

Yang Jingjing<sup>1</sup>, Feng Yun<sup>2</sup>, Chen Zhigang<sup>2</sup>, Tang Hao<sup>2</sup>, Huang Ming<sup>1,3</sup>

(1. Wireless Innovation Lab, School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Radio Monitoring Center of Yunnan Province, Kunming 650228, China;

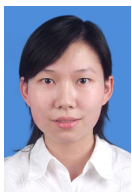
3. Key Laboratory of Spectrum Sensing and Borderland Radio Safety of University in Yunnan Province, Kunming 650091, China)

**Abstract:** Detecting the abnormal radio emission through radio monitoring is an important task of radio management. A regional cooperative compressed spectrum sensing model is proposed. A *multi-node sensing system based on software defined radio platform* is built, and the effectiveness of cooperative spectrum sensing is demonstrated. Results show that a high detection probability could be achieved at a suitable decision threshold based on the test statistics extracted from the eigenvalue of the received signal; what's more, compressed spectrum sensing employed to the detection system greatly reduced the size of the data transmitted from the sensing nodes to the fusing node. This work will be helpful for the development of large-scale grid radio monitoring network and the finer management of radio spectrum.

**Keywords:** radio monitoring; interference detection; cooperative sensing; compressed spectrum sensing; simulation

## 引言

对无线电发射进行搜索、测量、分析、识别、



收稿日期: 2015-10-27 修回日期: 2015-12-16;  
基金项目: 国家自然科学基金(61461052, 11564044),  
云南省自然科学基金(2013FA006, 2015FA015), 教育部  
博士点基金(20135301110003, 20125301120009),  
中国博士后基金(2013M531989, 2014T70890);  
作者简介: 杨晶晶(1983-), 女, 云南河口, 博士, 副  
教授, 研究方向为谱传感与无线电监测。

测向和定位, 以获取其技术参数、功能、类别、位置和用途, 是进行无线电管理的关键环节。目前, 全国各省已建立了以固定监测站为主的无线电监测网<sup>[1]</sup>, 但主要是针对大功率常发信号设计的。由于受多径和阴影效应的影响, 固定监测站难以实现对局部区域无线电发射的检测。同时, 随着无线技术的发展, 目前无线通信设备已经由窄带、大功率发射逐渐向微型化、数字化和智能化方向发展, 各

<http://www.china-simulation.com>

• 3061 •

种小功率无线发射设备增多给无线电监管工作带来了困难。在对一些重要的考场和会场进行无线电安全保障时,无线电监测部门通常采取的方法是派出监测车,通过人工查找的方式来排查异常无线电信号发射源,监测工作量大,并且采用人工查找的方式难以检测到随机突发无线电信号。

如何通过理论和技术创新完善现有的技术体系,以便更好的发挥无线电监测网络的效能、高效地实施无线电安全保障是目前关注的热点。从技术层面上来看,发展基于谱传感的无线电监测,使传感节点尽量靠近发射源是克服无线电波传播的多径、反射和阴影等效应的有效途径。例如, Pfammatter 等<sup>[2]</sup>采用廉价的谱传感节点 RTL-SDR 代替昂贵的专用设备,构建了大规模、宽带、分布式频谱监测网络,通过增加传感节点数量提高了检测灵敏度,达到了克服多径和阴影效应的目的。常见的谱传感算法主要有能量检测、匹配滤波和循环平稳特征检测<sup>[3]</sup>。能量检测算法实现起来较为简单,但检测率受背景噪声和判决门限的影响大;匹配滤波算法只需要很短的时间就可以获得高的处理增益,但需要知道待测信号的先验信息;循环平稳特征检测利用了通信信号特殊的循环平稳性,通过考察信号的循环谱来检测信号,虽与噪声无关,但运算复杂,检测时间较长。基于随机矩阵理论和接收信号本征值的频谱感知<sup>[4]</sup>、基于信息熵的检测算法<sup>[5]</sup>以及压缩宽带谱感知<sup>[6]</sup>是近年来发展起来的一些新的谱传感方案。同时,由于单节点的接收信号容易受到电波传的多径、阴影和衰落效应的影响,为了克服这些影响,多节点协同检测<sup>[7-10]</sup>受到广泛关注,例如, Xu 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于加权硬判决的自适应谱感知算法,证明该算法对空闲频谱的检测率增加了 15%; Cao 等<sup>[9]</sup>研究了基于博弈理论的协同检测方法,提高了检测率和可靠性; Zeng 等<sup>[10]</sup>研究了基于加权硬判决的协同谱传感方案,通过多节点的协同处理提高了检测率。

根据谱传感技术的特点,并针对精细化无线电监测的需求,本文提出了适用于区域性无线电监测

的多节点协同检测和压缩传感模型。首先,比较了不同检测算法的检测率,分析了信噪比、传感节点数量等因素对检测率的影响。其次,采用软件无线电平台 USRP 作为传感节点进行实验,验证了模型的有效性。

## 1 多节点协同压缩传感模型

建立了多节点协同传感模型<sup>[11]</sup>,见图 1 所示。模型由多个传感节点和一个汇聚节点构成。传感节点为软件无线电平台,如 USRP,负责监测无线电频谱;传感节点将无线电频谱信号经压缩后传送到汇聚节点;汇聚节点负责信号的重构和处理,并将处理结果显示在移动终端,以便于进行测向和定位;汇聚节点与监测中心相连,能够进行远程控制。

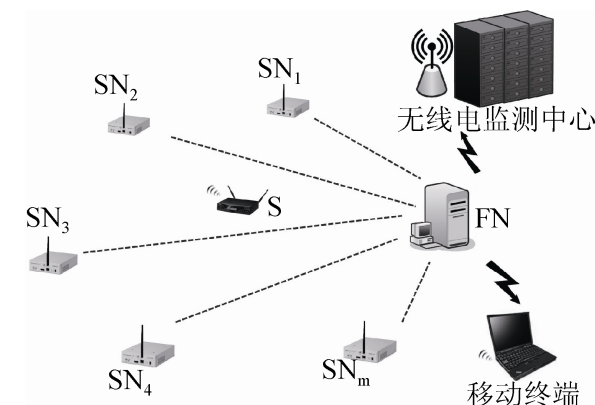


图 1 多节点协同传感模型, SN<sub>i</sub>-传感节点, S-发射源, FN-汇聚节点

Fig.1 Multi node cooperative spectrum sensing model. SN<sub>i</sub>-spectrum sensing node, S- Emission source, FN- fusion node.

假设有  $m$  个传感节点,每一个接收的信号为  $X$ , 长度为  $N$ , 记为  $X \in C^{N \times 1}$ 。由于频域信号具有稀疏性,因此可以压缩。压缩过程是通过一个测量矩阵  $\Phi \in C^{M \times N}$  对信号  $X$  进行线性投影,得到  $M \times 1$  的观测数据  $X' = \Phi X$ , 在压缩测量过程中,所需的观测数据量远小于原数据长度 ( $M \ll N$ )<sup>[12]</sup>。压缩比记为  $\delta = M/N$ , 则汇聚节点的接收信号可以表示为  $Y' \in C^{\delta N \times m}$ 。假设  $H \in C^{1 \times m}$  为表示传感节点与汇聚节点之间信道特性的矩阵, 元素为  $\{h_i\}$ ,

$i=1,2,\dots,m$ , 同时假设  $\mathbf{V}$  和  $\mathbf{V}_{IN} \in \mathbb{C}^{\delta N \times m}$  分别代表热噪声和脉冲噪声, 并且干扰信号随机发射, 脉冲噪声以一定的概率产生, 则  $\mathbf{Y}' = \mathbf{I}t\mathbf{x}\mathbf{X}'\mathbf{H} + \mathbf{V} + \mathbf{i}in\mathbf{V}_{IN}$ , 其中  $\mathbf{I}t\mathbf{x}$  等于 0 或 1, 为均匀分布的随机数,  $\mathbf{i}in$  等于 0 或 1, 是满足 1 的概率为  $P=0.2$  的随机数。汇聚节点对接收信号进行恢复, 恢复算法可以分为凸优化算法和贪婪算法两类<sup>[13]</sup>。本文的检测模型中采用了贪婪算法中的正交匹配追踪算法(OMP: Orthogonal Matching Pursuit), 恢复后的信号表示为  $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{m \times N}$ 。

汇聚节点对接收信号进行重构后, 获得协方差矩阵  $\mathbf{R} = \mathbf{Y}\mathbf{Y}^\dagger$  及其本征值  $\{\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \lambda_m\}$ , 其中  $(\cdot)^\dagger$  表示复共轭和转置。协同传感可以用如下二元假设检验模型表示:  $H_0$ -无信号发射  $H_1$ -有信号发射, 与传感性能相关的两个重要参数是检测概率  $P_d$  和虚警率  $P_{fa}$ , 表示为:

$$\begin{aligned} P_d &= \Pr\{H_1 | H_1\} = \Pr\{T > \lambda | H_1\} \\ P_{fa} &= \Pr\{H_1 | H_0\} = \Pr\{T > \lambda | H_0\}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\Pr(\cdot)$  为给定事件的概率,  $T$  为测量统计量,  $\lambda$  为判决门限,  $T$  由不同的检测方法决定<sup>[14]</sup>。若采用广义似然比准则(GLRT)构造测量统计量,

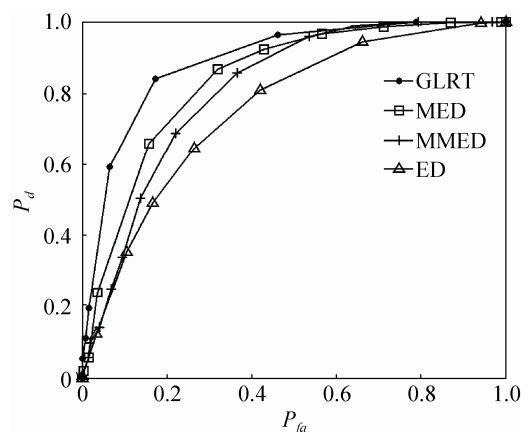
则  $T_{GLRT} = m\lambda_1 / \sum_{i=1}^m \lambda_i$ , 即最大本征值与平均值之比; 若采用最大和最小本征值之比(MMED)构造测量统计量, 则  $T_{MMED} = \lambda_1 / \lambda_m$ , 即最大和最小本征值之比; 若采用最大本征值(MED)构造测量统计量, 则  $T_{MED} = \lambda_1 / \sigma^2$ , 其中  $\sigma^2$  为热噪声功率; 若采用能量检测(ED), 则  $T_{ED} = \sum_{i=1}^m \lambda_i / (m\sigma^2)$ 。

## 2 结果与讨论

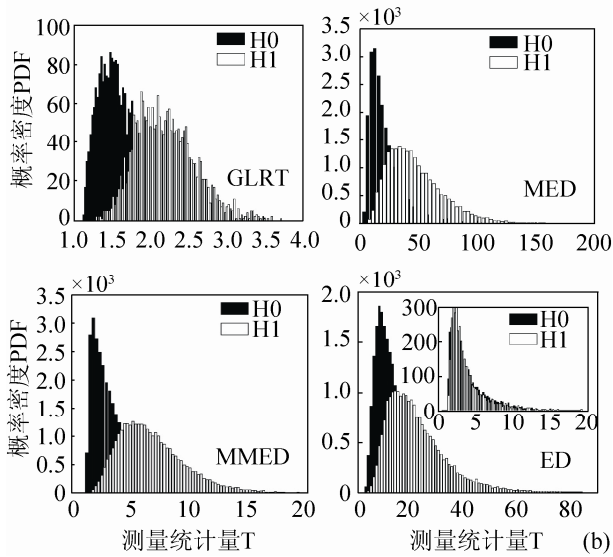
假设发射信号为一个单边带调幅(SSB)信号。首先, 我们比较了原始 SSB 信号和压缩恢复后的信号。采用的恢复算法为 OMP, 测量矩阵为  $\mathbf{M} \times \mathbf{N} = 23 \times 256$  的随机高斯矩阵。结果表明, 经过 500 次仿真统计得到恢复信号的平均错误概率接近于零, 这说明了在没有信道噪声的情况下, 算法可以将长度只有原始信号 1% 的信号恢复。由于传感节点接收到的信号都是噪声和有效信号的叠加,

为了研究 OMP 算法在噪声环境中的效能, 假设传感节点接收到的信号经历了瑞利衰落, 并受到热噪声和脉冲噪声干扰。结果表明当 SNR=5 dB、压缩率为  $\delta=0.5$  时, 错误概率为 0.52。通常, 对于给定的压缩比, 错误概率随 SNR 的增大而减小, 压缩率为 0.5 时, 在 SNR>5 dB 的情况下恢复数据的错误概率将小于 0.5。

假设信噪比为 SNR=15 dB, 基于蒙特卡洛方法仿真了采用不同的方式构造测量统计量时检测率与虚警率的关系, 见图 2(a)所示。仿真时, 针对每一个判决门限值进行了 2000 次统计; 每次统计时随机地改变  $\mathbf{I}t\mathbf{x}$  和  $\mathbf{i}in$  的值, 以模拟信号的发射和脉冲信号的有无; 根据式(1)计算出检测率  $P_d$  和错误概率  $P_{fa}$ ; 同时, 分别在  $\mathbf{I}t\mathbf{x}=1$  和  $\mathbf{I}t\mathbf{x}=0$  时, 记录相应的测量统计量  $T$ , 获得其统计特性, 仿真结果见图 2(b)所示。由图可得, 在相同的信噪比条件下, 对于不同的测量统计量构造方式,  $H_1$  和  $H_0$  具有类似的分布特征, 但分布范围不同, 因此, 对于 GLRT、MED、MMED 和 ED 4 种方式, 判决门限  $\gamma$  的取值范围分别为: 1.1-1.3、2-120、1-15、2-60。比较图 2(a)和(b)可得, GLRT 方法的检测性能较好, 这主要是由于通过该方法获得的  $H_1$  和  $H_0$  的测量统计量分布区域基本处于分离状态; 反之, 若  $H_1$  和  $H_0$  对应的测量统计量分布区域重合(如图 2(b)中插图所示)则难以提高检测率。



(a) 采用不同方法构造测量统计量得到的检测率与虚警率的关系



(b) SNR=15 dB 时, 采用不同方法构造测量统计量获得的 H1 和 H0 的分布特性

图 2 基于仿真得到的检测率、虚警率以及测量统计量  
Fig.2 Detection probability, false alarm and the test statistic obtained based on simulation

以 GLRT 为例, 研究了传感节点数量、观察信号长度对检测率的影响。在 SNR=10 dB 时, 分别改变传感节点数量  $m$  和观察信号长度  $n$ , 仿真了  $P_d$  和  $P_{fa}$  的关系。结果表明, 在信噪比较低的情况下, 增加传感节点数量和观察信号长度能够有效提高检测率。这在复杂环境下通过布置多传感节点进行信号监测提供了理论依据。

以 MMED 方式为例, 在不同信噪比下仿真了  $P_d$  和  $P_{fa}$  的关系, 见图 3 中虚线所示, 观测信号长度为  $N=256$ , 压缩比为  $\delta=0.5$ ; 当 SNR=20 dB、15 dB 和 10 dB 时, 判决门限  $\gamma$  的范围分别设置为 0~20、1~12 和 1~10。图中曲线越向左上方弯曲则说明检测性能越好, 这主要体现在较小的虚警率下就能够获得较大的检测概率, 例如, 当 SNR=20 时, 检测率在虚警率等于 0.2 时趋近于 1 并达到稳定; 而当 SNR=10 时, 检测率在虚警率等于 0.75 时才能够达到稳定。由于信道衰落和噪声的影响, 汇聚节点不能完全重构来自传感节点的信号, 为了研究在信号不能被完全恢复的情况下是否会影响检测率, 比较了采用和不采用压缩传感的情况下多节点协同检测的工作特性曲线, 无压缩时的仿真结果见图 3 中实线所示。可以看出, 两种情况下工作特性曲线

基本重合, 这表明在多节点协同传感系统中加入压缩传感模块不影响系统的工作性能, 并能够极大地减少从传感节点到汇聚节点的数据传输量。

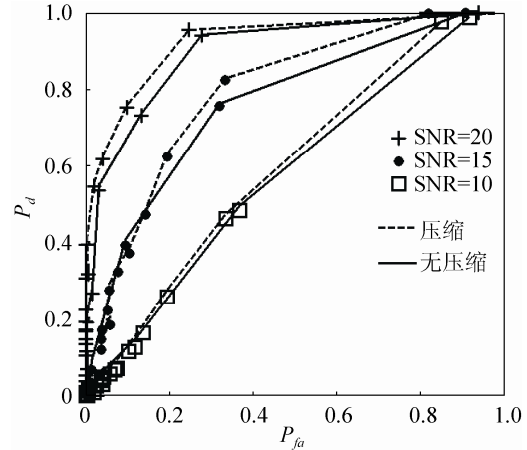


图 3 不同 SNR 下的检测率与虚警率  
Fig.3 Detection probability and false alarm for different SNR.

### 3 检测模型验证与分析

根据提出的多节点协同传感模型, 在实验楼五楼东侧通过软件无线电平台 USRP 建立了实验系统, 见图 4 所示, 信号发射源置于 508 室内, 黑色三角形表示传感节点, 室内圆点表示汇聚节点。

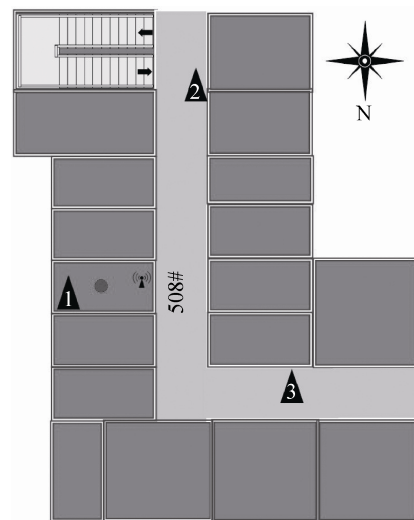


图 4 实验场景示意图  
Fig.4 Schematic diagram of experimental environment.

实验过程中, 采用一个工作频率为 93.8 MHz, 功率为 100 mW 的调频信号发生器作为信号源模

拟干扰信号发射, 发射源置于 508 室内; USRP 型号为 N210, 控制软件采用 LabVIEW 设计; 布置了三个监测节点, 其中一个置于室内, 另外两个分别置于楼道南侧和西侧拐角, 汇聚节点为一台 PC, 置于室内; 各传感节点与汇聚节点间通过 Wifi 连接; 各个传感节点的 IQ 速率为 1.5 M sample/s, 载频为 93.5 MHz, 采样率为 350。图 5 显示了各节点监测到的信号频谱。从上到下分别对应干扰信号发射源关闭时, 以及干扰信号发射源打开时节点 1-3 监测到的频谱其中, 图 5(a)为没有干扰信号发射时的测量结果, 93.5 MHz 附近的峰为一个调频广播电台; 图 5(b)-(d)分别对应传感节点 1、2 和 3 接收到的信号频谱, 图中虚线圈所示为干扰信号。

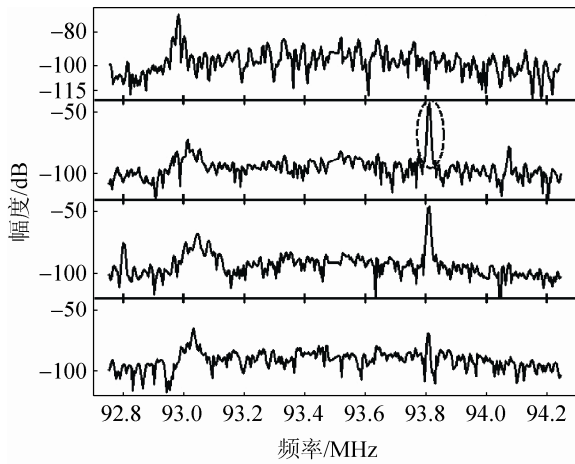
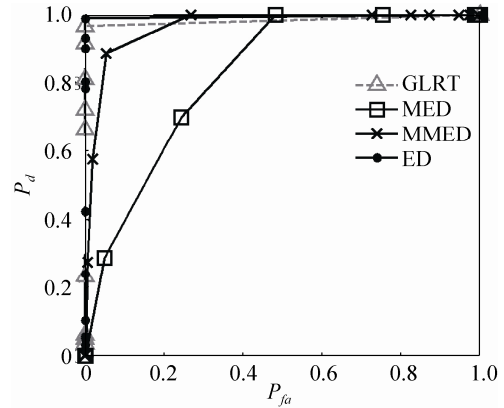


图 5 信号频谱  
Fig.5 Spectrum of the signal.

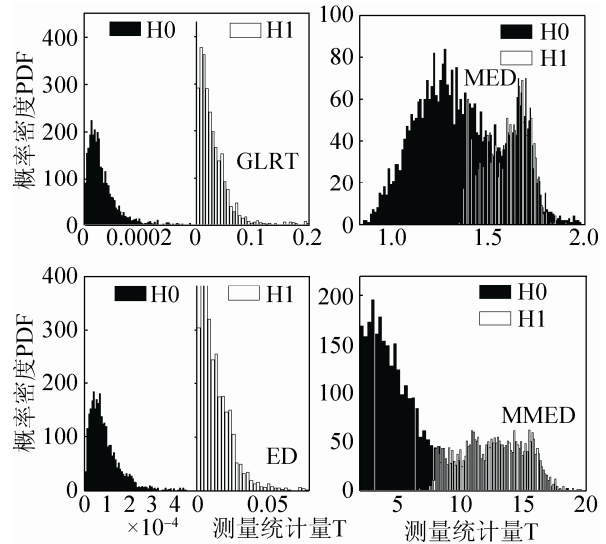
系统中各个传感节点将测量到的频谱数据通过 DataSocket 传输方式传到汇聚节点进行处理; 实验时各传感节点每 15 s 进行一次扫频和传输, 汇聚节点连续地接收和处理信号, 并显示检测结果。汇聚节点接收传感节点发来的频谱数据后, 通过与 Matlab 接口编程进行协同检测。

为了分析检测方法的性能, 我们在有/无干扰信号发射的情况下, 分别在各个传感节点进行了一万次测量, 并将数据存在矩阵  $X_{1i}$  和  $X_{0i}$  中进行离线分析, “1”和“0”分别表示信号有和无, “i”为传感节点编号。根据本文第二部分介绍的方法,

利用测量到的频谱数据得到了 GLRT、MED、MMED、ED 四种检测方法检测率与虚警率的关系, 见图 6(a)所示。



(a) 不同检测方法对应的检测率与虚警率的关系



(b) 测量统计量分布

图 6 基于测量数据分析得到的检测率、虚警率以及测量统计量

Fig.6 Detection probability, false alarm and the test statistic obtained based on the analysis of measured datum

仿真时针对每一种检测方法, 设定一个判决门限范围, 并对每一个判决门限值进行 5 000 次统计; 在每一次统计时产生一个随机数  $I_{tx}$  (等于 1 或 0, 满足均匀分布); 当  $I_{tx}=1$  时, 接收信号为  $X_1 \in C^{m \times n}$ , 当  $I_{tx}=0$  时, 接收信号为  $X_0 \in C^{m \times n}$ ,  $m=3, n=320$  表示传感节点数量和数据长度; 分别采用上述四种方法构造测量统计量, 并根据式(1)

与判决门限比较, 统计获得检测率和虚警率。从图 6(a)可以看出, 对于 GLRT 和 ED 两种检测方法,  $P_d$  在  $P_{fa}$  很小的情况下就能够趋于饱和, 这主要是由于  $H_1$  所对应的测量统计量分布范围和概率密度远大于  $H_0$ ; 仿真时, GLRT 和 ED 两种检测方法的判决门限取值范围分别为 0-0.1 和 0-0.05。对于 MED 和 MMED 两种方法, 检测概率分别在虚警率等于 0.48 和 0.27 时趋近于 1, 仿真时判决门限的取值范围分别为 0.82-2 和 1.2-20。测量统计量分布特性见图 6(b)所示。

## 4 结论

提出了适合于区域性无线电监测的多节点协同检测和压缩传感模型。该模型由多个传感节点和一个汇聚节点构成, 传感节点对接收信号进行压缩后传到汇聚节点; 汇聚节点对信号进行恢复和检测。结果表明, 基于接收信号本征值, 可采用不同的方式构造测量统计量, 并且在适当的判决门限下均可以获得较高的检测率; 虽然在信道衰落和噪声的影响下汇聚节点不能够完全重构接收信号, 但并不影响系统的检测性能, 通过压缩传感有效降低了从传感节点到汇聚节点的数据传输量。基于软件无线电平台建立三节点监测系统验证了协同检测方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] Chen D Z, Yang J J, Wu J D, et al. Spectrum Occupancy Analysis Based on Radio Monitoring Network[C]//IEEE International Conference on ICC2012, Beijing, China, Aug. 15-17, 2012: 815-820.
- [2] Damian Pfammatter, Domenico Giustiniano, V. Lenders, A software-defined sensor architecture for large-scale wideband spectrum monitoring[C]// IPSN '15, New York, USA, 2015: 1-12.
- [3] Yücek T, Arslan H. A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials (S1553-877X), 2009, 11(1): 116-130.
- [4] Kortun A, Ratnarajah T, Sellathurai M, Liang Y C, Zeng Y H. On the Eigenvalue-Based Spectrum Sensing and Secondary User Throughput[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on (S0018-9545), 2014, 63(3): 1480-1486.
- [5] Vaidehi G, Swetha N, Sastry P N. Entropy based Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks[J]. IJARCC (S2319-5940), 2015, 4(11): 39-43.
- [6] Sun H, Nallanathan A, Cui S, Wang C X. Cooperative Wideband Spectrum Sensing over Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2015, 65(3): 1382 - 1394.
- [7] Akyildiz I F, Lo B F, Balakrishnan R. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey[J]. Physical Communication (S1874-4907), 2011, 4(1): 40-62.
- [8] Xu F M, Zheng X F, Li X Q, et al. Partial cooperative spectrum sensing schedule in cognitive network[J]. Science in China Series F: Information Sciences (S1862-2836), 2009, 52(12): 2332-2341.
- [9] Cao K, Yang Z. A novel cooperative spectrum sensing method based on cooperative game theory[J]. Journal of Electronics (China) (S0217-9822), 2010, 27(2): 183-189.
- [10] Zeng K, Peng Q H, Tang Y X. Mitigating spectrum sensing data falsification attacks in hard-decision combining cooperative spectrum sensing[J]. Science China Information Sciences (S1674-733X), 2014, 57(4): 1-9.
- [11] 杨晶晶, 黄铭, 张骞. 一种实时无线电协同监测、检测与定位方法[P]. 中国, CN103634060A, 2014-03-12.
- [12] Yang J J, Huang M, Zhang Q. A real-time radio cooperative monitoring, detection and localization method[P]. China, CN103634060A, 2014-03-12.
- [13] Pudlewski S, Prasanna A, Melodia T. Compressed-sensing-enabled video streaming for wireless multimedia sensor networks[J]. Mobile Computing, IEEE Transactions on (S1536-1233), 2012, 11(6): 1060-1072.
- [14] Hayashi K, Nagahara M, Tanaka T. A user's guide to compressed sensing for communications systems[J]. IEICE Transactions on Communications (S0916-8516), 2013, 96(3): 685-712.
- [15] Guimarães D A, de Souza R A A, Barreto A N. Performance of Cooperative Eigenvalue Spectrum Sensing with a Realistic Receiver Model under Impulsive Noise[J]. Journal of Sensor and Actuator Networks (S2224-2708), 2013, 2(1): 46-69.