

多接收天线下能量感知的性能研究

张培¹,孙士秀¹,见春雨¹,朱卫平²

(1.南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏南京 210003
2.南京邮电大学 信号处理与传输研究院,江苏南京 210003)

摘要:研究了多天线频谱感知技术,它能显著地提高衰落环境下的频谱感知性能。与协作频谱感知相比,它不需要花费额外的通信带宽开销。介绍了多天线频谱感知的两种实现方式,即基于决策融合的多天线频谱感知和基于数据融合的多天线频谱感知。在基于决策融合的多天线频谱感知中,分析了3种数据融合准则,即“AND”准则,“OR”准则和“K/N”准则。在基于数据融合的多天线频谱感知中,介绍了两种分集技术:最大比合并和选择合并。最后将这两种方式的感知性能通过仿真结果进行分析和比较。

关键词:认知无线电;频谱感知;能量检测;多天线

中图分类号:TN926 文献标识码:A 文章编号:1673-5439(2012)03-0036-04

Research on Energy Detection with Multiple Receiving Antennas

ZHANG Pei¹, SUN Shi-xiu¹, JIAN Chun-yu¹, ZHU Wei-ping²

(1. College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2. Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Energy detection with multiple antennas is studied in this paper. Energy detection with multiple antennas is able to achieve reliable detection in wireless multi-path fading channels. This method does not need extra communication bandwidth compared with multi-users cooperative spectrum sensing. Two energy detection multiple antennas methods, decision fusion and data fusion, are introduced. For multiple antennas with single energy detector, three data fusion rules are analyzed including AND rule, OR rule and K/N rule. For multiple antennas with multiple energy detectors, maximum ratio processing and selection ratio processing are presented. The performance of multiple antennas with decision fusion and data fusion are analyzed and compared through simulation results.

Key words:cognitive radio; spectrum sensing; energy detector; multi-antenna

0 引言

信号在传输的过程中可能会受到多径、衰落、阴影等的影响,当信号传输到次用户接收机端时,信号可能十分微弱,从而导致频谱检测概率降低,加大对主用户的干扰。能量检测器^[1-3]在低信噪比时的检测性能比较差。为减少对主用户的干扰,协作频谱感知技术^[4-5]和多天线频谱感知技术^[6-8]都能够提高频谱检测概率,在低信噪比的情况下也能获得较

高的检测概率。其中协作频谱感知需要次用户之间相互交换彼此的感知信息,因此要花费额外的通信带宽开销,这是不希望的,然而多天线频谱感知方法则不需要。

多天线频谱感知方法是次用户在接收机端利用多个天线接收信号,并将多个天线的接收信息进行融合处理,来判断主用户信号是否存在。结合相关参考文献,本文按照能量检测器的个数将多天线频谱感知技术进行分类,它有两种实现方

收稿日期:2011-10-28;修回日期:2011-11-25

基金项目:国家自然科学基金(60872104)和国家博士后科研资助计划(20090451239)资助项目

通讯作者:朱卫平 电话:(025)83535077 E-mail:zwp@njupt.edu.cn

式。第一种实现方式^[6-7]: 次用户将每个天线接收的信号分别送到相对应的能量检测器, 最后再将各个能量检测器的判决结果按照某种融合准则进行融合处理, 得到最终的判决结果, 将这种方式称之为基于决策融合的多天线频谱感知。第二种实现方式^[8]: 次用户利用多个接收天线来实现空间分集。次用户接收到主用户不同路径的信号, 将这些信号进行适当地合并构成总的接收信号, 能够大大减小衰落的影响, 合并后的信号被送到能量检测器中进行频谱检测, 将这种方式称之为基于数据融合的多天线频谱感知。

1 基于决策融合的多天线频谱感知

在次用户接收机端, 每个天线都需要配备一个能量检测器, 如图 1 所示。

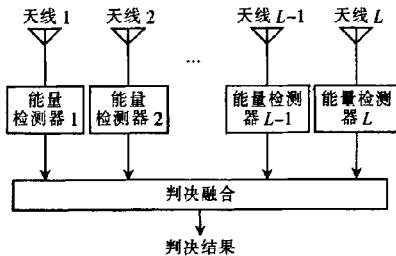


图 1 采用多个能量检测器的实现方式

如图 1 所示, 频谱感知分为两个阶段。在第一阶段, 各个天线分别接收信号, 并且 L 个天线的接收信号所经历的衰落是相互独立的。 L 个天线的接收信号分别送到相应的能量检测器进行判决, 各个能量检测器的检测结果是相互独立的。在第二阶段, 将 L 个判决结果按照某种融合准则进行融合, 得到最终的判决结果。目前研究最多的融合准则为“AND”准则, “OR”准则和“K 秩”准则。当 $K=1$ 时, “K 秩”退化为“OR”准则; 当 $K=L$ 时, “K 秩”退化为“AND”准则。在协作频谱感知中, 融合中心将多个次用户的感知结果进行融合。而基于多天线的频谱感知中, 次用户接收机端将多个天线的感知结果进行融合^[6-7]。

2 基于数据融合的多天线频谱感知

接收分集通过多个接收天线接收独立衰落的信号, 由于各个天线的接收信号在同一时刻都经历深衰落的概率很小, 因此经过适当的合并后, 接

收信号的衰落程度就会被减小。合并后的信号被送到能量检测器中进行检测, 只要被分集的几个信号之间是统计独立的, 那么经适当的合并就能使频谱感知性能大为改善。系统模型如图 2 所示。

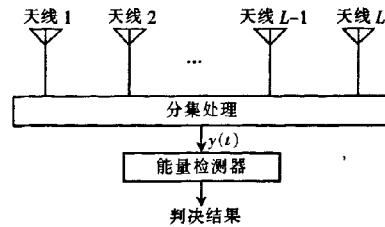


图 2 采用单个能量检测器的实现方式

本节假设分集的各个路径是独立同分布的, 并且服从瑞利分布。下面讨论最大比合并(MRC)和选择合并(SC)下的频谱感知^[8]。最大比合并使合并输出的信噪比最大。瑞利衰落信道下, 最大比合并下的平均检测概率 $\bar{P}_{D \text{ MRC}}$ 为:

$$\bar{P}_{D \text{ MRC}} = \int_0^{\infty} Q_{Lu}(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \frac{1}{(L-1)!} \frac{\gamma^{L-1}}{\gamma} e^{-\frac{\gamma}{2}} d\gamma, \quad (1)$$

在 AWGN 信道下的采用后最大比合并的虚警概率概率 $P_{F \text{ MRC}}$ 为:

$$P_{F \text{ MRC}} = 1 - F_E(\lambda) = \frac{\Gamma(u, \lambda/2\alpha_h^2)}{\Gamma(u)} \quad (2)$$

其中, $\alpha_h^2 = \sum_{i=1}^L |h_i|^2$ 在瑞利衰落信道下, 其概率密度分布函数为:

$$f_{\alpha_h^2}(x) = \frac{x^{L-1} e^{-x}}{\Gamma(L)} \quad (3)$$

将式(2)对 α_h^2 求平均可得瑞利衰落信道下, 最大比合并下的平均虚警概率 $\bar{P}_{F \text{ MRC}}$ 。选择合并输出信噪比最高的那个支路上的信号。选择合并下的平均检测概率 $\bar{P}_{D \text{ SC}}$ 和平均虚警概率 $\bar{P}_{F \text{ SC}}$ 为:

$$\bar{P}_{D \text{ SC}} = \int_0^{\infty} Q_{Lu}(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) L \sum_{i=0}^{L-1} C_i^{L-1} \frac{(-1)^i}{i+1} \frac{1}{\gamma/(i+1)} e^{-\frac{\gamma}{\gamma/(i+1)}} d\gamma \quad (4)$$

$$\bar{P}_{F \text{ SC}} = 1 - F_{E \text{ SC}}(\lambda) = 1 - \left[1 - \frac{\Gamma(u, \lambda/2)}{\Gamma(u)} \right]^L \quad (5)$$

3 仿真结果及分析

本文用接收工作特性曲线 ROC(检测概率 VS 虚警概率)来描述在不同情况下多天线频谱感知

的性能，并给出采用基于决策融合的多天线频谱感知和基于数据融合的多天线频谱感知的仿真结果。仿真参数： $u = TW = 2$ ，平均信噪比 $\gamma = 10 \text{ dB}$ 。

图3、图4给出了基于决策融合的多天线频谱感知的仿真结果。图3中每个天线的平均信噪比不同，分别为 $10 \text{ dB}, 8 \text{ dB}, 6 \text{ dB}$ ，采用“OR”融合准则对3个能量检测器的检测结果进行合并后，检测性能比单天线有明显的提高。另外，从图3还可以看出，随着信噪比的增大，单天线能量检测法的检测概率得到明显改善。图4中每个天线的平均信噪比不同，分别为 $10 \text{ dB}, 8 \text{ dB}, 6 \text{ dB}$ ，采用“AND”融合准则对3个能量检测器的检测结果进行合并，它的检测性能高于 6 dB 的单天线检测性能，低于 8 dB 和 10 dB 的单天线检测性能，改善效果不如采用“OR”融合准则的多天线检测性能。图5、图6给出了在每个天线的信噪比均为 10 dB 的情况下，基于数据融合的多天线频谱感知的仿真结果。图5为最大比合并的情况，图6为选择合并的情况。这两种合并分集都能提高频谱感知的性能，并且随着天线个数的增加，频谱感知性能越来越好。

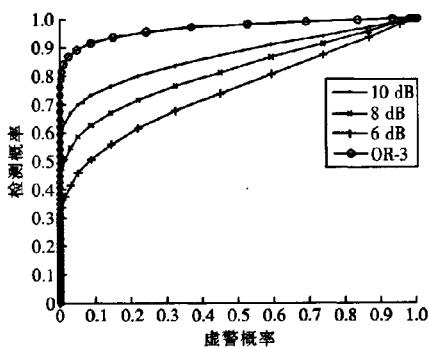


图3 不同信噪比下“OR”融合准则的性能曲线

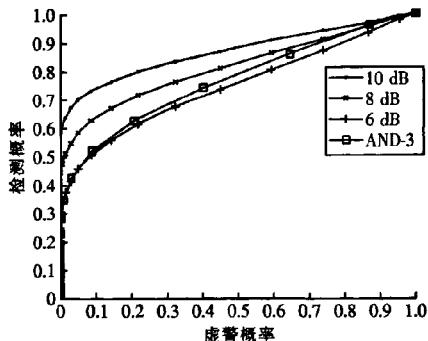


图4 不同信噪比下“AND”融合准则的性能曲线

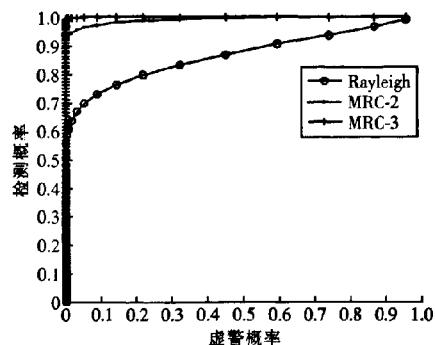


图5 最大比合并的性能曲线

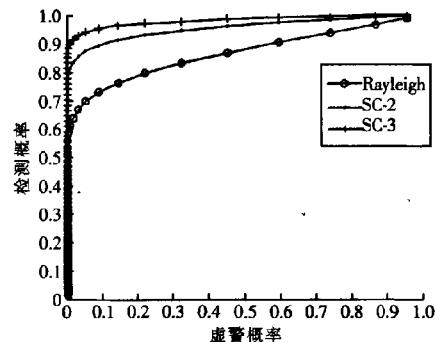


图6 选择合并的性能曲线

图7将基于决策融合的多天线频谱感知和基于数据融合的多天线频谱感知的性能进行比较。天线个数为2，每个天线的平均信噪比为 10 dB 。

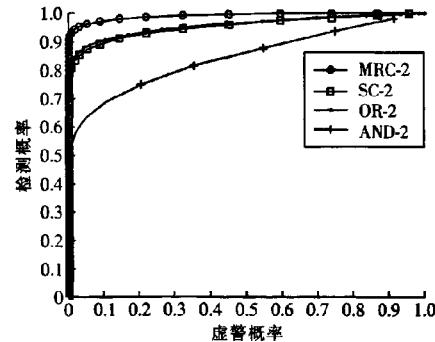


图7 2种方式的性能比较(天线个数为2)

从图7中可以看出，基于数据融合的多天线频谱感知的性能优于基于决策融合的多天线频谱感知的性能。其中最大比合并的检测性能最好，选择合并与“OR”融合准则的性能相近，次于最大比合并，“AND”融合准则的性能最差。图8描述了基于决策融合的多天线频谱感知和基于数据融合的多天线频谱感知中，当虚警概率为 0.01 ，天线个数为2时，两种实现方式在不同信噪比情况下的检测概率，并对其进行比较。通过对比可知基于数据融合的多天

线频谱感知更有利于检测性能的提高,在这种方式下,最大比合并优于选择合并。当信噪比大于15 dB时,最大比合并、选择合并和“OR”融合准则的检测概率都趋近于1,而“AND”融合准则的检测概率在信噪比大于25 dB时才趋近于1。

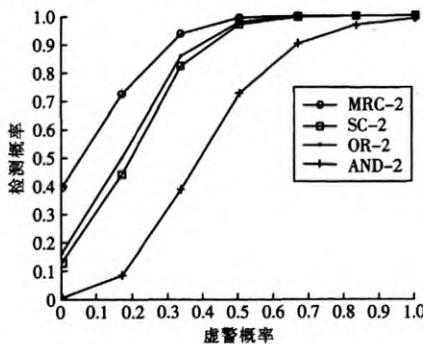


图8 不同信噪比下检测概率的比较
(能量检测器的虚警概率为0.01)

4 结语

在衰落阴影环境下,频谱感知的性能会下降。本文研究了在衰落环境下的多天线频谱感知技术,多天线频谱感知不仅能显著地提高频谱感知的性能,而且克服了协作频谱感知的缺点,它不需要花费额外的通信带宽开销。本文在瑞利衰落环境下对多天线频谱感知的两种实现方式分别进行仿真,仿真结果表明多天线频谱感知能够提高频谱感知的性能,并且天线个数越多,感知性能越好。此外,本文将两种实现方式的感知性能进行比较,发现基于数据融合的多天线频谱感知性能优于基于决策融合的多天线频谱感知性能,其中最大比合并的检测性能最好,选择合并与“OR”融合准则的性能相近,次于最大比合并,“AND”融合准则的性能最差。

参考文献:

- [1] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals [J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4): 523-531.
- [2] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(1): 21-24.
- [3] SAHAI A, CABRIC D. Spectrum sensing: Fundamental limits and practical challenges [C] // IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, Maryland, USA, 2005.
- [4] GHASEM A, SOUSA E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: The cooperation-processing tradeoff [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2007, 7(9): 1049-1060.
- [5] ZHENG X, CUI L, CHEN J, et al. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems [C] // Congress on Image and Signal Processing. 2008, 5: 262-266.
- [6] HWANG S H, BAEK J H, DOBRE O A. Spectrum sensing using multiple antenna-aided energy detectors for cognitive radio [C] // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2009: 209-212.
- [7] LEE J H, BAEK J H, HWANG S H. Collaborative spectrum sensing using energy detector in multiple antenna system [C] // Proc of the 10th International Conference on Advanced Communication Technology. 2008, 1: 427-430.
- [8] PANDHARIPANDE A, LINNARTZ J P M G. Performance analysis of primary user detection in a multiple antenna cognitive radio [C] // IEEE International Conference on Communications. 2007: 6482-6486.

作者简介:



张 培(1986-),女,江苏徐州人。南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生。主要研究方向为频谱感知。

孙士秀(1986-),女,江苏南京人。南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生。主要研究方向为频谱感知。

见春雨(1988-),女,安徽合肥人。南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生。主要研究方向为压缩感知。

朱卫平(1962-),男,江苏如皋人。南京邮电大学信号处理与传输研究院教授,博士生导师。(见本刊本期第20页)

(本文责任编辑:寇笑笑)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>