

# 基于 MUD/SD 的认知无线电系统遍历容量研究\*

谢先斌, 郭伟

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731)

**摘要:** 提出了基于多天线选择分集接收的多用户分集认知无线电系统模型。该系统模型由于在认知接收端采用了多天线选择分集接收, 相比传统多用户分集认知无线电系统采用的单天线接收, 能够进一步提高认知用户系统信道遍历容量。推导并给出了认知接收端信噪比的概率密度函数与累积分布函数, 分析了多天线数目与认知用户数对系统信道遍历容量的影响, 同时给出了不考虑认知用户发送功率约束条件下的认知用户系统信道遍历容量的解析表达式。

**关键词:** 认知无线电; 频谱共享; 多用户分集; 选择分集; 遍历容量

**中图分类号:** TP311.52      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2012)12-4671-03

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.069

## Ergodic capacity for MUD/SD cognitive radio system

XIE Xian-bin, GUO Wei

(National Key Laboratory of Science & Technology on Communications, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** This paper proposed a new multi-user diversity spectrum-sharing cognitive radio system model based on multiple antennas switch diversity receiver. Compared with traditional multi-user diversity spectrum-sharing system model, this model improved cognitive user system channel ergodic capacity because of valid multiple antennas switch diversity gain in cognitive receiver. Utilizing the derived cumulative distribution function and probability density function of the cognitive received signal-to-noise ratio (SNR), it investigated the channel ergodic capacity of cognitive users system. For the case of unlimited cognitive user transmit power, it also derived the closed-form expression for the ergodic capacity.

**Key words:** cognitive radio; spectrum sharing; multiuser diversity; switch diversity; ergodic capacity

### 0 引言

由于认知无线电技术<sup>[1]</sup>能有效地解决现有频谱资源不足的问题,因而受到了极大的关注。认知无线电频谱共享系统允许认知用户使用主用户授权频段,前提是要保证认知用户对主用户造成的干扰是主用户能够承受的。认知无线电频谱共享系统受到了广泛的研究,文献[2~5]对单个认知用户与主用户频谱共享系统在不同信道条件下的系统信道容量与功率分配进行了研究。考虑到多用户分集(multi-user diversity, MUD)对传统单蜂窝网系统容量的显著提高<sup>[6]</sup>, Ban等人<sup>[7]</sup>首次将多用户分集技术应用到了认知无线电频谱共享系统中,其研究表明认知无线电频谱共享系统信道遍历容量随认知用户数的增加而显著提高,证明了多用户分集增益的存在。在通信系统收、发端采用 MIMO 通信技术<sup>[8,9]</sup>能有效提高系统性能,但同时也增加了系统实现复杂度。但在通信系统接收端采用多天线选择分集<sup>[10]</sup>接收,对系统实现复杂度要求不高,同时也能得到较好的系统通信性能。因而本文考虑在多用户分集认知无线电系统接收端采用多天线选择分集接收来改善系统相关性能。研究结果显示,在认知接收端采用多天线选择分集接收能显著提高认知用户系统信道遍历容量。

### 1 系统与信道模型

系统模型如图1所示,认知发送端为多个认知发送用户,认知接收端为认知基站,认知基站采用多天线选择分集接收认知用户发送信息。为了保护主用户通信不受干扰,对认知发送端的认知用户施加峰值干扰功率约束 $Q$ 。考虑到认知用户自身发送设备的限制,给定认知用户允许的最大发送功率为 $P$ 。在认知无线电系统中利用多用户分集与传统单蜂窝网利用多用户分集相比有所不同:在单蜂窝网通信系统中,基站选择与具备最好信道增益的用户进行通信;而在多用户分集认知无线电系统中,在每个工作时段,多个认知发送用户依据自身与主用户接收端间信道状态信息,选取信道增益最小的认知发送用户来发送信息到认知接收端,如此能获得更大的认知用户发送功率。同时,在认知接收端采用多天线选择分集接收,即认知接收端将接收到的多个信号副本依据接收信噪比最大准则,选择接收信噪比最大的信号为最终接收信号。系统模型中所有信道状态信息可以考虑通过一个公共的带宽管理机制调度获取<sup>[11]</sup>。

假定所有信道服从瑞利衰落信道分布,因而各个信道增益服从指数分布。为方便分析,假定其指数分布均值为1,则第 $i$ 个认知用户到主用户接收端间信道增益概率密度函数(PDF)为

$$f_{g_i}(g) = e^{-g} \quad g \geq 0, 1 \leq i \leq M \quad (1)$$

收稿日期: 2012-04-03; 修回日期: 2012-05-21      基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271168, 61001085); 国家“973”计划资助项目(2009CB320405)

作者简介: 谢先斌(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为认知无线电与认知网络容量等(xianbinxie@uestc.edu.cn).

为了获得更大的认知用户发送功率,在每个工作时段,选择干扰信道增益(每个认知用户到主用户接收端信道增益)最小的认知用户发送信息,同时考虑主用户自身最大发送功率约束  $P$ ,则最大允许认知用户发送功率可以表示为

$$p = \min\left(P, \frac{Q}{g}\right) \quad (2)$$

其中:  $g = \min\{g_1, g_2, \dots, g_M\}$ , 考虑到各干扰信道增益相互独立,则采用多用户分集(MUD)发送的等效干扰信道增益  $g$  的概率密度函数为<sup>[12]</sup>

$$f_g(g) = Me^{-Mg} \quad (3)$$

在认知接收端采用多天线选择分集(SD)接收,则认知接收端最终接收到的信噪比为

$$\gamma_{SD} = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} \{\gamma_j\} = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} \left\{ \frac{ph_j}{N_0 B} \right\} = \frac{P}{N_0 B} \max_{j \in \{1, \dots, N\}} \{h_j\} = \frac{P}{N_0 B} h \quad (4)$$

其中,  $h = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} \{h_j\}$ 。由于  $h_j (j=1, \dots, N)$  相互独立,则采用多天线选择分集(SD)接收等效认知信道增益  $h$  概率密度函数为<sup>[12]</sup>

$$f_h(h) = Ne^{-h}(1 - e^{-h})^{N-1} \quad (5)$$

依据式(2)(4),在认知接收端,利用多天线选择分集接收后,接收信噪比可以进一步表示为

$$\gamma_{SD} = \begin{cases} \frac{Ph}{N_0 B} & g \leq \frac{Q}{P} \\ \frac{Qh}{gN_0 B} & g > \frac{Q}{P} \end{cases} \quad (6)$$

则  $\gamma_{SD}$  的累积分布函数可以表示为

$$F_{\gamma_{SD}}(z) = P\{\gamma_{SD} \leq z\} = P\left\{ \frac{Ph}{N_0 B} \leq z \mid g \leq \frac{Q}{P} \right\} + P\left\{ \frac{Qh}{gN_0 B} \leq z \mid g > \frac{Q}{P} \right\} = F_1(z) + F_2(z) = (1 - e^{-\frac{MQ}{P}})(1 - e^{-\frac{zN_0 B}{P}})^N + \sum_{k=0}^N MQC_N^k (-1)^k e^{-\frac{QM}{P}} \frac{e^{-\frac{zN_0 Bk}{P}}}{QM + zN_0 Bk} \quad (7)$$

式(7)推导过程见附录。

$\gamma_{SD}$  的累积分布函数(CDF)表示为

$$F_{\gamma_{SD}}(z) = (1 - e^{-\frac{MQ}{P}})(1 - e^{-\frac{zN_0 B}{P}})^N + \sum_{k=0}^N MQC_N^k (-1)^k e^{-\frac{QM}{P}} \frac{e^{-\frac{zN_0 Bk}{P}}}{QM + zN_0 Bk} \quad (8)$$

对式(8)中  $z$  求导得到  $\gamma_{SD}$  的概率密度函数(PDF)为

$$f_{\gamma_{SD}}(z) = \frac{NN_0 B}{P} (1 - e^{-\frac{MQ}{P}}) (1 - e^{-\frac{zN_0 B}{P}})^{N-1} + \sum_{k=0}^N N_0 B MQC_N^k (-1)^{k+1} k e^{-\frac{QM}{P}} \times \frac{(QM + zN_0 Bk + P) e^{-\frac{zN_0 Bk}{P}}}{P(QM + zN_0 Bk)^2} \quad (9)$$

当不考虑认知用户自身发送功率约束,即当  $P \rightarrow \infty$  时,  $\gamma_{SD}$  的累积分布函数(CDF)与概率密度函数(PDF)可以表示为

$$F_{\gamma_{SD}}(z) = \sum_{k=0}^N MQC_N^k (-1)^k \frac{1}{QM + zN_0 Bk} \quad (10)$$

$$f_{\gamma_{SD}}(z) = \sum_{k=0}^N N_0 B MQC_N^k (-1)^{k+1} \frac{k}{(QM + zN_0 Bk)^2} \quad (11)$$

## 2 遍历容量

遍历容量是度量延时不敏感通信系统的一项重要性能指标。在快衰落信道环境下,码字足够长时,遍历信道容量表示

最大可达数据传输速率的数学期望。认知用户系统遍历信道容量可以表示为

$$C_{er} = E\{\ln(1 + \gamma_{SD})\} = \int_0^{\infty} \ln(1 + z) f_{\gamma_{SD}}(z) dz = \int_0^{\infty} \frac{1 - F_{\gamma_{SD}}(z)}{1 + z} dz \quad (12)$$

将式(8)代入式(12)可以得到认知用户系统信道遍历容量表达式。

当不考虑认知用户自身发送功率约束时,式(12)可以进一步表示为如下的解析表达式:

$$C_{er1} = \int_0^{\infty} \frac{1 - F_{\gamma_{SD}}(z)}{1 + z} dz = \sum_{k=1}^N MQC_N^k (-1)^{k+1} \frac{\ln(QM) - \ln(N_0 Bk)}{QM - N_0 Bk} \quad (13)$$

式(13)详细推导过程见附录。

## 3 数值仿真分析

本章给出了基于 MUD/SD 的认知无线电系统信道遍历容量随认知用户数与接收天线数变化的数值仿真分析结果。在数值仿真分析中,均设定  $N_0 B = 1$ 。

如图 2 所示,认知接收端为单天线接收,即传统多用户分集认知无线电系统(文献[7]中所示认知无线电系统),相当于本文提出的基于 MUD/SD 的认知无线电系统在接收天线数  $N=1$  时的情况。从图 2 中可以看出,即便在单天线接收情况下,采用多用户分集,随着可供选择发送认知用户数增加,认知用户系统信道遍历容量明显增加。同时也能看出,在一定的认知发送功率约束值条件下,增加峰值干扰功率约束值,认知用户系统信道遍历容量增加。这主要是因为增加峰值干扰功率约束值,即主用户系统对认知用户施加的约束越宽松,相应地认知用户能够允许发送的发送功率越大,从而提高了认知用户系统信道遍历容量。

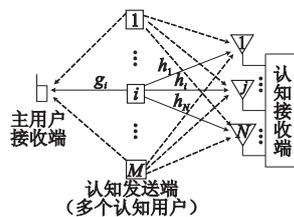


图1 基于MUD/SD的认知无线电系统模型

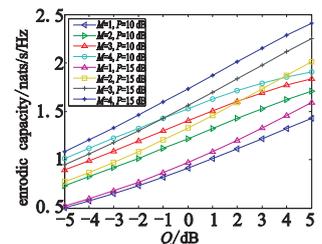


图2 单天线接收与不同认知用户数下信道遍历容量与峰值干扰功率约束关系

如图 3 所示,认知接收端采用多天线选择分集接收,从图中可以看出,即便是在单认知用户发送的情况下,认知用户接收端采用多天线选择分集接收,随着天线数增加,认知用户系统信道遍历容量增加。如当  $P = 10$  dB 与  $Q = -5$  dB 时,认知接收天线数从  $N=1$  增加到  $N=4$ ,认知用户系统信道遍历容量从 0.50 nats/s/Hz 增加到 0.86 nats/s/Hz。采用多用户分集选择发送,在  $M=4$  条件下,认知接收天线数从  $N=1$  增加到  $N=4$ ,认知用户系统信道容量从 1.01 nats/s/Hz 增加到 1.62 nats/s/Hz。以上分析可得,在传统多用户分集认知无线电系统接收端采用多天线选择分集接收能显著提高认知用户系统信道遍历容量。

在图 4 中,给定了认知用户数  $M=4$  与接收天线数  $N=4$ ,研究了不同认知用户发送功率约束值对认知用户系统信道遍历容量的影响。图中虚线表示在没有认知发送功率约束,即当  $P \rightarrow \infty$  时,采用渐进分析所得容量表达式计算结果。从图中可以看出,增加认知用户发送功率约束值,认知用户系统信道遍

历容量增加,但当认知用户发送功率约束值提高到一定程度后,进一步增加认知用户发送功率约束值对认知用户系统信道遍历容量提高不明显。这主要是因为,当认知用户发送功率约束变大以后,认知用户发送功率主要受限于峰值干扰功率约束。同时也能看到,当  $P/Q$  较大时,通过增加认知用户发送功率约束值  $P$ ,对认知用户系统信道容量提高明显;当  $P/Q$  较小时,通过增加认知用户发送功率约束值  $P$ ,对认知用户系统信道容量提高不大。

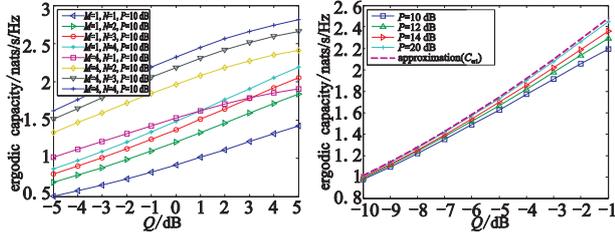


图3 多天线接收与不同认知用户数下信道遍历容量与峰值干扰功率约束关系

图4  $M=4$ 与 $N=4$ 条件下信道遍历容量与峰值干扰功率约束关系

### 4 结束语

本文提出了一种基于 MUD/SD 的认知无线电系统,该系统由于在认知接收端采用了多天线选择分集接收,相比传统多用户分集认知无线电系统采用单天线接收能进一步提高认知用户系统信道遍历容量。本文推导并给出了认知接收端信噪比的概率密度函数(PDF)与累积分布函数(CDF),分析了多天线数目与认知用户数对系统信道遍历容量的影响,给出了不考虑认知用户发送功率约束条件下的认知用户系统信道遍历容量的解析表达式。

#### 附录

式(7)重写为

$$F_{\gamma_{SD}}(z) = P\{\gamma_{SD} \leq z\} = P\left\{\frac{Ph}{N_0B} \leq z \mid g \leq \frac{Q}{P}\right\} + P\left\{\frac{Qh}{gN_0B} \leq z \mid g > \frac{Q}{P}\right\} = F_1(z) + F_2(z) \quad (14)$$

求得  $F_1(z)$  如下:

$$F_1(z) = P\left\{\frac{Ph}{N_0B} \leq z \mid g \leq \frac{Q}{P}\right\} = P\left\{h \leq \frac{zN_0B}{P}\right\} P\left\{g \leq \frac{Q}{P}\right\} = \int_0^{\frac{zN_0B}{P}} Ne^{-h}(1-e^{-h})^{N-1} dh \int_0^{\frac{Q}{P}} Me^{-Mg} dg = (1 - e^{-\frac{MQ}{P}})(1 - e^{-\frac{zN_0B}{P}})^N \quad (15)$$

求得  $F_2(z)$  如下:

$$F_2(z) = P\left\{\frac{Qh}{gN_0B} \leq z \mid g > \frac{Q}{P}\right\} = P\left\{\frac{Qh}{gN_0B} \leq z, g > \frac{Q}{P}\right\} = \int_{\frac{Q}{P}}^{\infty} \int_0^{\frac{zgN_0B}{Q}} f_h(h) dh f_g(g) dg = \int_{\frac{Q}{P}}^{\infty} \int_0^{\frac{zgN_0B}{Q}} Ne^{-h}(1-e^{-h})^{N-1} dh Me^{-Mg} dg = \int_{\frac{Q}{P}}^{\infty} Me^{-Mg}(1 - e^{-\frac{zgN_0B}{Q}})^N dg = \int_{\frac{Q}{P}}^{\infty} Me^{-Mg} \sum_{k=0}^N C_N^k (-1)^k e^{-\frac{zgN_0Bk}{Q}} dg =$$

$$\sum_{k=0}^N MC_N^k (-1)^k \int_{\frac{Q}{P}}^{\infty} e^{-g(M + \frac{zN_0Bk}{Q})} dg = \sum_{k=0}^N MQC_N^k (-1)^k \frac{e^{-\frac{Q}{P}(M + \frac{zN_0Bk}{Q})}}{QM + zN_0Bk} = \sum_{k=0}^N MQC_N^k (-1)^k e^{-\frac{QM}{P}} \frac{e^{-\frac{zN_0Bk}{P}}}{QM + zN_0Bk} \quad (16)$$

结合式(15)(16),即为式(13)。

式(13)详细推导过程如下:

$$C_{er1} = \int_0^{\infty} \frac{1 - F_{\gamma_{SD}}(z)}{1+z} dz = \int_0^{\infty} \frac{1 - \sum_{k=0}^N MQC_N^k (-1)^k \frac{1}{QM + zN_0Bk}}{1+z} dz = \int_0^{\infty} \frac{1 - (1 + \sum_{k=1}^N MQC_N^k (-1)^k \frac{1}{QM + zN_0Bk})}{1+z} dz = \int_0^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^N MQC_N^k (-1)^{k+1} \frac{1}{QM + zN_0Bk}}{1+z} dz = \int_0^{\infty} \frac{\sum_{k=1}^N MQC_N^k (-1)^{k+1} \frac{1}{QM + zN_0Bk}}{1+z} dz = \sum_{k=1}^N MQC_N^k (-1)^{k+1} \int_0^{\infty} \frac{1}{(1+z)(QM + zN_0Bk)} dz = \sum_{k=1}^N MQC_N^k (-1)^{k+1} \frac{\ln(QM) - \ln(N_0Bk)}{QM - N_0Bk} \quad (13)$$

#### 参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] GHASEMI A, SOUSA E S. Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(2): 649-658.
- [3] ZHANG Rui. On peak versus average interference power constraints for protecting primary users in cognitive radio networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(4): 2112-2120.
- [4] SURAWEEERA H A, SIMITH P J, SHAFT M. Capacity limits and performance analysis of cognitive radio with imperfect channel knowledge[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1811-1822
- [5] MUSAVIAN L, AISSA S. Fundamental capacity limits of cognitive radio in fading environments with imperfect channel information[J]. IEEE Trans on Communications, 2009, 57(11): 3472-3480.
- [6] KNOPP R, HUMBLET P. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications [C]// Proc of IEEE International Conference on Communications. 1995: 331-335.
- [7] BAN T W, CHOI W, JUNG B C, et al. Multi-user diversity in spectrum sharing system[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(1): 102-106.
- [8] LEVIN G, LOYKA S. On the outage capacity distribution of correlated keyhole MIMO channel[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2008, 54(7): 3232-3245.
- [9] ZHONG Cai-jun, WONG K K, JIN Shi. Capacity bounds for MIMO nakagami- $m$  fading channels[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2009, 57(9): 3613-3623.
- [10] HAN S F, LI J W, ZHOU S D. Optimal diversity performance of space time block codes in correlated distributed MIMO channels[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2008, 7(6): 2106-2118.
- [11] PEHA J M. Approaches to spectrum sharing[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(2): 10-12.
- [12] PAPOULIS A. Probability, random variables, and stochastic processes[M]. 2nd ed. New York: McGraw Hill Book Company, 1986.