

文章编号: 2095-4980(2013)02-0219-05

基于多天线的认知无线电系统容量性能分析

赵友轩, 朱世磊, 王大鸣

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 认知无线电与多入多出(MIMO)技术结合而成的认知 MIMO 技术, 能够进一步提高系统性能以及频谱利用率。而系统容量是表征通信系统性能最重要的标志之一, 即通信系统的最大传输速率。本文在传统的 MIMO 容量推导的基础上, 引入了主次用户间干扰项, 给出了存在用户干扰情况下信道传输速率的理论上限。然后, 重点仿真分析了用户间的干扰导致的容量损失。最后, 分析给出了干扰门限对主用户容量的影响。

关键词: 认知无线电; 多入多出; 系统容量; 用户间干扰; 干扰门限

中图分类号: TN914.5

文献标识码: A

Capacity analysis of cognitive radio system based on multiple antenna

ZHAO You-xuan, ZHU Shi-lei, WANG Da-ming

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: The cognitive Multiple-Input and Multiple-Output(MIMO) technology integrated by the cognitive radio and MIMO, can improve the system performance and spectrum efficiency. The system capacity characterizes the maximum transmission rate of the communication system, namely, the communication system performance. In basis of the traditional MIMO system capacity derivation, the channel transmission rate theory limit under user interference is given after introducing the interference between the primary users and the secondary users. And then, the capacity loss caused by the interference between users is simulated and studied. The influence of the interference threshold on the primary user is analyzed.

Key words: cognitive radio; Multiple-Input and Multiple-Output(MIMO); system capacity; interference between users; interference threshold

近年来, 认知无线电由于能够通过频谱共享和动态接入获得足够的频谱效率, 被认为是下一代无线通信解决频谱稀缺问题的重要方式, 从而得到越来越多的关注^[1-2]。与此同时, MIMO 技术作为商用无线产品增加容量的实现方式得到广泛的应用^[3], 已成为现有和未来演进的商用移动通信的关键部分, 如第三代合作伙伴技术标准组织 3GPP 的长期演进(Long Term Evolution, LTE), 国际电气及电子工程师协会 802.16(IEEE 802.16)/全球微波互联接入(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)及 802.11n 等。

认知无线电技术和 MIMO 技术各自具有明显的技术优势。认知无线电技术通过高效灵活的频谱接入管理策略, 在不影响主用户正常工作的前提下动态接入空闲授权频谱, 从时间和频率多维度来提高频谱利用效率^[4-6]。而 MIMO 技术在空间处理上具有独特的优势, 能够提高系统的传输效率和可靠性^[7-8], 实现空间的多个数据流并行传输, 同时可以用于消除用户间干扰, 形成多用户的空分多址传输。因此, 将认知无线电与 MIMO 技术结合而成的认知 MIMO 技术, 能够获得更大的自由度, 进一步提高系统性能以及频谱利用率。

系统容量是表征通信系统性能最重要的标志之一, 即通信系统的最大传输速率。MIMO 系统自身具有的一个最大优势是, 它能够提供其他任何系统所不能达到的容量优势^[9-10]。特别是在散射丰富的无线环境中, MIMO 能够大幅度地提高信道容量, 并且信道容量随着天线个数的增加而线性增加。这是因为相对于单天线系统来说, 多天线系统在理论上实现了多个并行的相互独立的信道, 其中每个信道都可以达到单天线系统时的最大信道容量。

认知 MIMO 信道的容量分析是一个崭新的领域,文献[11]结合信息论给出了信道容量区域,但是认知用户需要提前知道主用户的发送信息,在实际中很难实现。文献[12]利用脏纸预编码达到了 MIMO 信道的容量域,但是没有给出闭式解,且因复杂度过高而无法实用。本文在传统的 MIMO 容量推导的基础上,首先,引入了主次用户间存在干扰项系统模型,然后,给出了存在用户干扰情况下信道传输速率的理论上限及干扰门限对主用户容量的影响。最后,重点仿真分析了用户间的干扰导致的容量损失以及干扰门限对主用户容量损失的影响。

1 系统模型

如图 1 所示,给出了认知 MIMO 系统的信道模型。其中 m 表示数据传输编码前的原始信息序列, x, n, y 分别表示实际的发射信号、信道加性高斯白噪声和接收到的实际信号, H 表示接收机的信道的传输函数,下标 P, C 分别表示主用户系统和认知用户系统的相关参数, H_{PC} 表示主用户发射机到认知用户接收机干扰信道的传输函数, H_{CP} 表示由认知用户发射机到主用户接收机干扰信道的传输函数。与认知无线信道模型相比,认知 MIMO 信道模型考虑到认知收发机的多天线配置,因此传输函数用与天线有关的矩阵表示。

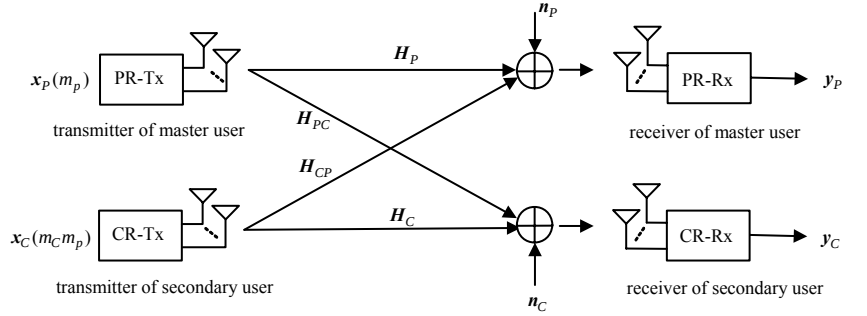


Fig.1 Channel model of the cognitive MIMO
图1 认知 MIMO 信道模型

则认知用户和主用户接收机接收到的信号分别表示为:

$$\begin{aligned} y_P &= H_P x_P + H_{CP} x_C + n_P = H_P x_P + z_P + n_P \\ y_C &= H_C x_C + H_{PC} x_P + n_C = H_C x_C + z_C + n_C \end{aligned} \quad (1)$$

定义 $\Sigma_P = E[x_P x_P^H]$, $\Sigma_C = E[x_C x_C^H]$ 分别表示主用户和认知用户发送信号的协方差矩阵,上标 H 表示对矩阵的转置并取共轭运算,称为厄米特(Hermite)运算。 $z_P = H_{CP} x_C$ 和 $z_C = H_{PC} x_P$ 分别为主用户受到认知用户的干扰项和认知用户对主用户的干扰项。考虑到模型中的认知用户和主用户具有对称性,则式(1)可以简写为:

$$y_i = H_i x_i + z_i + n_i, i \in \{P, C\} \quad (2)$$

2 系统容量分析

2.1 存在用户干扰情况下信道传输速率的理论上限

用户 i ($i \in \{P, C\}$) 发送信号向量 x_i 和接收信号向量 y_i 之间的平均互信息为:

$$I(x_i; y_i) = H(y_i) - H(y_i | x_i) \quad (3)$$

由于认知用户和主用户隶属于 2 个独立的系统,因此不妨假设主用户发送信号 x_P 和认知用户发送信息 x_C 相互独立,且都是均值为零的伪随机序列,则期望接收信号 $H_i x_i$ 、其他用户干扰项 z_i 以及噪声项 n_i 三者之间相互独立,令等效噪声为 $n'_i = z_i + n_i$,则式(3)可以化简为:

$$I(x_i; y_i) = H(y_i) - H(n'_i) \quad (4)$$

式中: $H(y_i) = E[-\log_2 p(y_i)]$ 表示接收信号矢量 y_i 的差分熵; $H(n'_i)$ 表示等效复高斯噪声的差分熵。由式(4)可以看出,互信息 $I(x_i; y_i)$ 最大化等效于最大化接收向量的差分熵 $H(y_i)$ [13]。 y_i 的协方差矩阵为:

$$R_{yy} = E[y y^H] = H_i \Sigma_i H_i^H + R_{n'n'} \quad (5)$$

式中: $R_{n'n'} = E[n' n'^H] = E[(z_i + n_i)(z_i + n_i)^H] = R_{zz} + \sigma^2 I$ (等效噪声的自相关函数); Σ_i 表示对角阵。

则用户接收向量的差分熵为:

$$H(y_i) = E[-\log_2 p(y_i)] = \log_2 \det[\pi e (H_i \Sigma_i H_i^H + R_{n'n'})] \quad (6)$$

式中: $\det$ 表示行列式函数; π 和 e 分别表示圆周率和自然常数。

同时等效噪声的差分熵为:

$$H(n'_i) = \log_2 \det[\pi e R_{n'n'}] \quad (7)$$

式(4)可以等效为:

$$I(\mathbf{x}_i; \mathbf{y}_i) = \log_2 \det(\mathbf{I} + (\mathbf{R}_{zz} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Sigma}_i \mathbf{H}_i^H) \quad (8)$$

则认知 MIMO 系统信道容量为:

$$C = \max_{\boldsymbol{\Sigma}_i} \{B \log_2 \det(\mathbf{I} + (\mathbf{R}_{zz} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Sigma}_i \mathbf{H}_i^H)\} \quad (9)$$

其中 B 表示系统带宽。与传统的 MIMO 系统相比, 式(9)的容量公式多了用户间干扰的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{zz}$, 其对应的物理含义可以解释为传统 MIMO 系统的信道容量与用户的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)矩阵有关, 而认知 MIMO 系统由于考虑了主次用户间的干扰, 其信道容量与其对应的信干噪比(Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR)矩阵有关。

当信道为独立同分布(i.i.d.)瑞利信道时, 如果认知用户发送和接收天线都为 N , 当 N 趋于无穷大时, 信道容量为:

$$C = N \log_2(1 + \text{SINR}) \quad (10)$$

其中 SINR 表示信号信干噪比。式(10)说明了当干扰一定时, 认知 MIMO 系统容量和天线数呈线性关系, 可以通过增加天线数目来提高系统容量。

2.2 干扰门限对主用户容量的影响

考虑到主用户系统拥有频谱使用权, 认知用户系统必须保证对主用户传输的透明性。将主用户干扰目标作为约束条件, 强制认知系统满足主用户干扰限制, 求解一定干扰门限下的最优系统性能。为了衡量用户间干扰对主用户容量损失的影响, 作为干扰门限选择的依据, 本文给出命题 1 来说明干扰门限取值对主用户容量损失的影响。

命题 1: 在认知 MIMO 系统中, 由于认知用户和主用户共享频谱资源, 用户间存在相互干扰, 用户 i ($i \in \{P, C\}$) 的容量损失上界为 $B \min(n_T, n_R) \log_2(1 + \frac{\Gamma_i}{\sigma_i^2})$, 其中 n_T, n_R 分别为用户 i 的发送和接收天线数目; Γ_i 为干扰功率限制门限, 即 $\text{tr}(\mathbf{R}_{zz}) \leq \Gamma_i$; σ_i^2 为信道噪声功率。

证明: 式(8)给出了一般 MIMO 系统的互信息表达式:

$$I_1 = I(\mathbf{x}_i; \mathbf{y}_i) = \log_2 \det(\mathbf{I} + (\mathbf{R}_{zz} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Sigma}_i \mathbf{H}_i^H) \quad (11)$$

当认知用户和主用户之间不存在干扰 $\mathbf{z}_i = 0$, 则可以认为主用户系统和认知系统相互独立, 认知 MIMO 系统退化为 2 个独立的传统 MIMO 系统, 此时信道互信息为:

$$I_2 = \log_2 \det(\mathbf{I} + \sigma_n^{-2} \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Sigma}_i \mathbf{H}_i^H) \quad (12)$$

根据行列式恒等式 $\log_2(\det(\mathbf{I} + \mathbf{AB})) = \log_2(\det(\mathbf{I} + \mathbf{BA}))$

式(11)可等价于:

$$I_1 = \log_2 \det(\mathbf{I} + \boldsymbol{\Sigma}_i^{1/2} \mathbf{H}_i^H (\mathbf{R}_{zz} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Sigma}_i^{1/2}) \quad (13)$$

对于任意矩阵 $\mathbf{A}$, 如果不等关系式 $D_1 \geq D_2 \geq 0$ 成立, 则

$$\log_2(\det(\mathbf{I} + \mathbf{AD}_1 \mathbf{A}^H)) \geq \log_2(\det(\mathbf{I} + \mathbf{AD}_2 \mathbf{A}^H)) \quad (14)$$

而干扰功率限制 $0 \leq \text{tr}(\mathbf{R}_{zz}) \leq \Gamma_i$, 则

$$\begin{aligned} I_1 &\geq \log_2 \det(\mathbf{I} + \boldsymbol{\Sigma}_i^{1/2} \mathbf{H}_i^H (\Gamma_i + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Sigma}_i^{1/2}) = \log_2 \det(\mathbf{I} + \frac{1}{(\Gamma_i + \sigma_n^2)} \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Sigma}_i \mathbf{H}_i^H) \geq \\ &\log_2 \det(\frac{\sigma_n^2}{(\Gamma_i + \sigma_n^2)} \mathbf{I} \times (\mathbf{I} + \sigma_n^{-2} \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Sigma}_i \mathbf{H}_i^H)) = -\min(n_T, n_R) \log_2(1 + \frac{\Gamma_i}{\sigma_i^2}) + I_2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\Delta I \leq \min(n_T, n_R) \log_2(1 + \frac{\Gamma_i}{\sigma_i^2}) \quad (16)$$

则

$$\Delta C \leq B \min(n_T, n_R) \log_2(1 + \frac{\Gamma_i}{\sigma_i^2}) \quad (17)$$

命题 1 说明主用户的容量损失上界只与认知用户对主用户的干扰和自己的天线配置有关, 而与认知用户采用的调制方式、编码方式、具体的收发天线个数、认知用户信道状态等无关。因此, 要实现认知系统和主用户系统空域共存, 只要保证认知用户对主用户的干扰功率限制, 即可确保主用户正常通信的 QoS 需求。此外, 从表达式上看, 用户的容量损失上界与 Γ_i / σ_i^2 呈对数关系, 当 $\Gamma_i \ll \sigma_i^2$ 时, 此时 $\Delta C \approx 0$ 。说明当用户间干扰项 Γ_i 远小于

本地接收噪声 σ_i^2 , 此时噪声为主要因素。相比之下, 由于用户间干扰造成主用户的容量损失非常小, 可以忽略。因此, 实际中即使存在信道反馈延迟、信道估计误差和有限反馈误差等非理想因素, 导致了用户的预编码矩阵存在偏差, 无法完全消除用户间干扰, 但是, 只要将用户间的干扰控制在一定的干扰门限以下, 对用户容量的影响就可以忽略。

3 仿真分析

1) 实验一: 用户间干扰对容量的影响

如前所述, 认知 MIMO 系统容量和其 SINR 有关, 即不仅和噪声方差有关, 还和用户间干扰的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{zz}$ 有关。为了进一步说明用户间干扰对用户容量的影响, 对有用户间干扰和无用户间干扰的用户容量进行仿真对比。

图 2 给出了用户发送天线和接收天线都为 4, 用户接收的信噪比从 0 dB 变化到 20 dB 条件下, 无用户间干扰以及不同大小的用户间干扰对应用户容量对比曲线, 说明了干扰会造成用户的容量损失, 且在大信噪比下特别明显。在无干扰的情况下, 用户容量随信噪比的提高呈指数上升趋势; 而在有干扰的情况下, 随着信噪比的提高, 容量的上升趋势会逐渐变缓, 最终趋于饱和, 说明了用户间干扰逐渐成为主要因素, 会严重限制容量的进一步提高。因此, 需要采取一定的处理技术来抑制或者消除用户间干扰, 提高认知系统性能。

2) 实验二: 干扰门限对主用户容量的影响

由命题 1 可知, 当 $\Gamma_i \ll \sigma_i^2$ 时, $\Delta C \approx 0$ 。即当 Γ_i 远小于本地接收噪声 σ_i^2 时, 此时噪声为主要因素。则只要保证认知用户对主用户的干扰功率限制, 即可确保主用户正常通信的 QoS 需求。图 3 给出干扰门限为 0.05 时用户理论容量损失与仿真容量损失随用户接收信噪比的仿真曲线。由图可知, 当干扰门限远小于用户接收信噪比时, 对用户容量的影响几乎可以忽略。

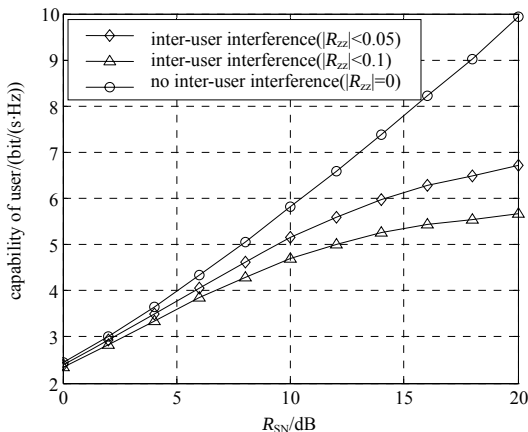


Fig.2 User capacity contrast curves of inter-user interference
图2 有/无用户间干扰, 用户容量对比曲线

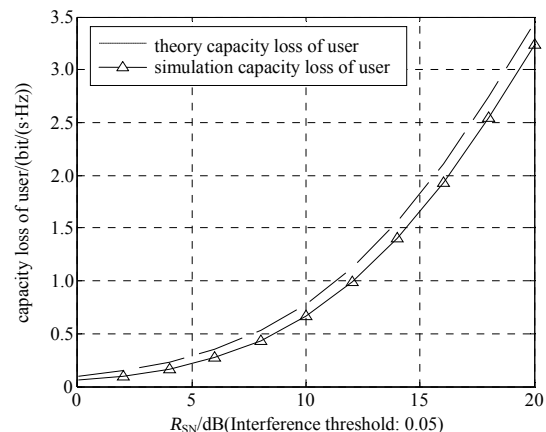


Fig.3 Contrast between theory and simulation capacity loss of user for the cognitive MIMO
图3 认知 MIMO 系统理论上界和仿真容量损失对比

4 结论

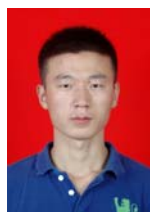
本文在传统的 MIMO 容量推导的基础上, 引入了主次用户间干扰项, 首先给出了存在用户干扰情况下信道传输速率的理论上限以及干扰门限对主用户容量的影响, 然后重点仿真分析了用户间的干扰导致的容量损失。仿真结果表明, 干扰会造成用户的容量损失, 且在大信噪比下特别明显。最后给出了干扰门限对主用户容量的影响。仿真结果表明, 当干扰门限远小于用户接收信噪比时, 对用户容量的影响几乎可以忽略。

参考文献:

- [1] Mitola J. Cognitive radio: Making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999,6(4):13-18.
- [2] 曹蒙,余志勇,谭武端. 基于能量和循环谱的两步频谱感知[J]. 信息与电子工程, 2011,9(5):560-563. (CAO Meng,YU Zhiyong,TAN Wuduan. Two steps spectrum sensing based on energy and cyclostationary spectrum[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(5):560-563.)
- [3] 赵海龙,张健,周劼. 下一代无线通信关键技术及其在遥测中的应用[J]. 信息与电子工程, 2012,10(1):1-6. (ZHAO Hailong,ZHANG Jian,ZHOU Jie. Key techniques of next generation wireless communication and their applications in

- telemetry[J]. Information and Electronic Engineering, 2012,10(1):1-6.)
- [4] Zhang R,Liang Y C,Cui S. Dynamic resource allocation in cognitive radio network: a convex optimization perspective[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010,27(3):102-114.
- [5] Mitola J. The Software radio architecture[J]. IEEE Communication Magazine, 1995,33(5):26-38.
- [6] Mitola J. Cognitive Radio:An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. Stockholm,Sweden:Royal Institute of Technology(KTH), 2000.
- [7] Bliss D,Chan A,Chang N. MIMO wireless communication channel phenomenology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagations, 2004,52(8):2073-2082.
- [8] Collin L,Berder O,Rostaing P,et al. Optimal minimum distance-based precoder for MIMO spatial multiplexing systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004,52(3):617-627.
- [9] Aleksandar J,Viswanath P. Cognitive Radio: An Information-Theoretic Perspective[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009,55(9):3945-3958.
- [10] Devroye N,Mitran P,Tarokh V. Achievable rates in cognitive radio channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006,52(5):1813-1827.
- [11] Sridharan S,Vishwanath S. On the capacity of a class of MIMO cognitive radios[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal processing, 2008,2(1):103-117.
- [12] Zhang L,Xin Y,Liang Y C. Weighted sum rate optimization for cognitive radio MIMO Broadcast Channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009,8(6):2950-2959.
- [13] Proakis J K. Digital communications[M]. 4th ed. New York:McGraw-Hill, 2003.

作者简介:



赵友轩(1987-),男,河南省商丘市人,在读硕士研究生,主要研究方向为认知无线电频谱感知技术.email:zhaoyouxuan@126.com.

朱世磊(1987-),男,江苏省淮安市人,在读博士研究生,研究方向为认知 MIMO 系统预编码技术.

王大鸣(1971-),男,辽宁省大连市人,博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为无线与移动通信、第三代移动通信系统.