

# 两个点对点(PTP)网络并存时的自由度研究

周璐娜 刘 锋 曾连荪

(上海海事大学信息工程学院 上海 201306)

**摘 要** 自由度来源于使用多天线系统时引入的空间复用概念,体现了通信系统对空间资源的利用效率。认知无线电中,主、次网络的同时存在,将使其在传输过程中相互干扰,从而降低系统自由度。为此,研究了两个点对点网络(PTP)并存时的自由度以及对应的干扰消除方法。得出在主网络的自由度资源还有空余时,次网络在同一频谱资源上利用剩余的空间资源进行消息传递时可获得的自由度范围;同时给出了当主网络的自由度资源完全占用时,次网络可获得的自由度。在此基础上,还研究了主、次网络在接收端进行协作,通过某种方式借用主网络剩余的天线来提高整个网络的自由度。分析比较表明,当  $M_1 \leq N_1$  或  $N_1 \geq M_1 + M_2$  时,接收端的协作能提高网络的总自由度。

**关键词** 自由度,认知无线电,干扰消除,协作

**中图分类号** TP393.01 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.1.026

## Research on Degrees of Freedom of Two PTP Networks Coexistence

ZHOU Lu-na LIU Feng ZENG Lian-sun

(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract** The degree of freedom (DoF) is derived from the concept of spatial multiplexing introduced by the using of multi-antenna system, reflecting the utilization efficiency of communication system to the resources of space. In cognitive radio networks, the coexistence of primary network and secondary network will interfere each other and reduce the DoF of system. This paper studied the DoF of two point to point(PTP) coexisting networks and the corresponding method for interference elimination. We obtained the DoF range of secondary network for message transmission when it is available to use the spare space resource of primary network in the same frequency. Meanwhile, the maximum DoF of secondary network was given, when the space resource of primary network is fully exploited. In addition, a new cooperation approach was proposed to increase the degrees of freedom of the whole network by some ways to borrow the spare receive antennas from primary network. Analysis and comparison show that when  $M_1 \leq N_1$  or  $N_1 \geq M_1 + M_2$ , cooperation at receivers can increase the degrees of freedom.

**Keywords** Degrees of freedom, Cognitive radio, Interference cancellation, Cooperation

对于集中式网络,如多址接入信道(multiple access channel, MAC)和广播信道(broadcasting channel, BC),文献[1-3]给出了上述网络容量的具体表达式。同时,对于多网络并存的容量也已有不少研究,文献[4-9]对两个多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)的干扰信道(interference channel, IC)、BC 以及点对点(point to point, PTP)的主网络和 IC 次网络并存时的自由度做了推导和研究。但是 PTP 网络并存时的容量仍未得出具体结论。对于容量的直接研究比较困难,因此提出了可以用来近似衡量容量的自由度概念,在高信噪比下,通信网络的容量是由自由度决定的<sup>[7]</sup>。

对于认知网络的研究也越来越受关注,认知网络中存在主网络和次网络,次网络能在不影响主网络的传输下利用主网络剩余的空间资源<sup>[10]</sup>,使空间资源得到更有效的利用<sup>[11]</sup>。

从自由度角度来说主网络没有充分利用其可用的自由度,比如,主网络能利用的最大自由度为 2,但是在传输过程中主网络仅仅使用一半的自由度,那么次网络就可以考虑利用主网络剩余的一半自由度。在利用空间资源的同时,干扰处理也是一个重要问题,对干扰进行有效处理能增加网络的自由度,文献[12,13]介绍了在认知网络中处理干扰的方法。

本文研究的是两个 PTP 网络并存时对于干扰进行有效处理下可取得的最大自由度,利用文献[14]中的干扰消除方法消除主、次网络之间的干扰,不仅考虑次网络对主网络的干扰,同时也考虑主网络对次网络造成的干扰。为了提高次网络在传输中的自由度,本文提出在主网络通信业务量不大时,将一部分剩余的空间资源供次网络进行通信,并得出了该情况下网络的自由度表达式。同时为了最大限度地提高两个网络的总自由度,还提出了在接收端利用天线借用协作机制,分

到稿日期:2014-02-12 返修日期:2014-05-17 本文受国家自然科学基金项目:具有块对角消息拓扑的无线分层网络自由度研究(61271283),上海海事大学科研基金项目:新型无线船舶通信技术的研究(20120107)资助。

周璐娜(1989-),女,硕士生,主要研究方向为智能信息处理,E-mail:zhouluna890307@sina.com;刘 锋(1976-),男,博士,讲师,主要研究方向为无线通信;曾连荪(1962-),男,教授,主要研究方向为定位导航系统。

析比较得出:当  $M_1 \leq N_1$  或  $N_1 \geq M_1 + M_2$  时接收端的协作能提高网络的总自由度。

符号说明:主网络的自由度为  $d_1$ ,次网络的自由度为  $d_2$ ,网络的总自由度为  $d_{sum}$ 。

## 1 系统模型

两个点对点网络并存,天线配置为  $(M_1, M_2, N_1, N_2)$ ,其中  $(M_1, N_1)$  为主网络,  $(M_2, N_2)$  为次网络,如图 1 所示,输入输出关系为

$$\mathbf{Y}^{[k]}(t) = \sum_{l=1}^2 \mathbf{H}^{[kl]}(t) \mathbf{X}^{[l]}(t) + \mathbf{Z}^{[k]}(t) \quad (1)$$

其中,  $k \in \{1, 2\}$ ,  $\mathbf{Y}^{[k]}(t)$  是第  $k$  个接收端  $R_k$  的输出信号,  $\mathbf{X}^{[l]}(t)$  是第  $l$  个发送端  $T_l$  的输入信号,  $\mathbf{H}^{[kl]}(t)$  是发送端  $l$  到接收端  $k$  在  $t$  时刻的信道矩阵,  $\mathbf{Z}^{[k]}(t)$  是接收端  $k$  的加性高斯白噪声,假设所有的噪声是独立同分布的(i. i. d),均值为 0,方差为 1。

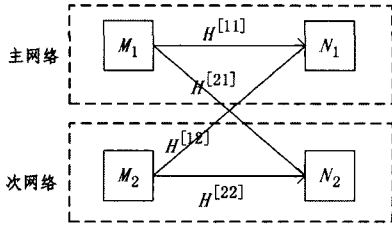


图 1 两个 PTP 网络并存模型

式(1)可写为

$$\mathbf{Y}^{[k]}(t) = \mathbf{H}^{[kk]}(t) \mathbf{X}^{[k]}(t) + \sum_{l=1, l \neq k}^2 \mathbf{H}^{[kl]}(t) \mathbf{X}^{[l]}(t) + \mathbf{Z}^{[k]}(t) \quad (2)$$

其中,  $\sum_{l=1, l \neq k}^2 \mathbf{H}^{[kl]}(t) \mathbf{X}^{[l]}(t)$  为接收端  $k$  收到的干扰信号,对于两网络 PTP 共存时,可写为

$$\begin{cases} \mathbf{Y}^{[1]}(t) = \mathbf{H}^{[11]}(t) \mathbf{X}^{[1]}(t) + \mathbf{H}^{[12]}(t) \mathbf{X}^{[2]}(t) + \mathbf{Z}^{[1]}(t) \\ \mathbf{Y}^{[2]}(t) = \mathbf{H}^{[22]}(t) \mathbf{X}^{[2]}(t) + \mathbf{H}^{[21]}(t) \mathbf{X}^{[1]}(t) + \mathbf{Z}^{[2]}(t) \end{cases} \quad (3)$$

可以将  $\mathbf{H}^{[12]}(t)$ 、 $\mathbf{H}^{[21]}(t)$  进行奇异值分解,  $\mathbf{H}^{[12]}(t) = \mathbf{U}_{12} \mathbf{\Lambda}_{12} \mathbf{V}_{12}^H$ ,  $\mathbf{H}^{[21]}(t) = \mathbf{U}_{21} \mathbf{\Lambda}_{21} \mathbf{V}_{21}^H$ ,代入式(3)得

$$\begin{cases} \mathbf{Y}^{[1]}(t) = \mathbf{H}^{[11]}(t) \mathbf{X}^{[1]}(t) + \mathbf{U}_{12} \mathbf{\Lambda}_{12} \mathbf{V}_{12}^H \mathbf{X}^{[2]}(t) + \mathbf{Z}^{[1]}(t) \\ \mathbf{Y}^{[2]}(t) = \mathbf{H}^{[22]}(t) \mathbf{X}^{[2]}(t) + \mathbf{U}_{21} \mathbf{\Lambda}_{21} \mathbf{V}_{21}^H \mathbf{X}^{[1]}(t) + \mathbf{Z}^{[2]}(t) \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)进行处理得

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{12}^{-1} \mathbf{Y}^{[1]}(t) = \mathbf{U}_{12}^{-1} \mathbf{H}^{[11]}(t) \mathbf{V}_{21} \mathbf{V}_{21}^H \mathbf{X}^{[1]}(t) + \mathbf{\Lambda}_{12} \mathbf{V}_{12}^H \mathbf{X}^{[2]}(t) + \mathbf{U}_{12}^{-1} \mathbf{Z}^{[1]}(t) \\ \mathbf{U}_{21}^{-1} \mathbf{Y}^{[2]}(t) = \mathbf{U}_{21}^{-1} \mathbf{H}^{[22]}(t) \mathbf{V}_{12} \mathbf{V}_{12}^H \mathbf{X}^{[2]}(t) + \mathbf{\Lambda}_{21} \mathbf{V}_{21}^H \mathbf{X}^{[1]}(t) + \mathbf{U}_{21}^{-1} \mathbf{Z}^{[2]}(t) \end{cases} \quad (5)$$

整理可得

$$\begin{cases} \mathbf{Y}^{[1]'}(t) = \mathbf{H}^{[11]'}(t) \mathbf{X}^{[1]'}(t) + \mathbf{\Lambda}_{12} \mathbf{X}^{[2]'}(t) + \mathbf{Z}^{[1]'}(t) \\ \mathbf{Y}^{[2]'}(t) = \mathbf{H}^{[22]'}(t) \mathbf{X}^{[2]'}(t) + \mathbf{\Lambda}_{21} \mathbf{X}^{[1]'}(t) + \mathbf{Z}^{[2]'}(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{Y}^{[1]'}(t) = \mathbf{U}_{12}^{-1} \mathbf{Y}^{[1]}(t)$ ,  $\mathbf{Y}^{[2]'}(t) = \mathbf{U}_{21}^{-1} \mathbf{Y}^{[2]}(t)$ ,  $\mathbf{H}^{[11]'}(t) = \mathbf{U}_{12}^{-1} \mathbf{H}^{[11]}(t) \mathbf{V}_{21}$ ,  $\mathbf{H}^{[22]'}(t) = \mathbf{U}_{21}^{-1} \mathbf{H}^{[22]}(t) \mathbf{V}_{12}$ ,  $\mathbf{X}^{[1]'}(t) = \mathbf{V}_{21}^H \mathbf{X}^{[1]}(t)$ ,  $\mathbf{X}^{[2]'}(t) = \mathbf{V}_{12}^H \mathbf{X}^{[2]}(t)$ ,  $\mathbf{Z}^{[1]'}(t) = \mathbf{U}_{12}^{-1} \mathbf{Z}^{[1]}(t)$ ,  $\mathbf{Z}^{[2]'}(t) = \mathbf{U}_{21}^{-1} \mathbf{Z}^{[2]}(t)$ ,  $\mathbf{\Lambda}_{12} = [\text{diag}(\lambda_1^{(1)}, \lambda_2^{(1)}, \dots, \lambda_{\min(M_2, N_1)}^{(1)}) \mathbf{0}_{[N_1 - \min(M_2, N_1)] \times [M_2 - \min(M_1, N_1)]}]$ 。因此,  $\mathbf{X}_1^{(2)}$ ,  $\mathbf{X}_2^{(2)}$ ,  $\dots$ ,  $\mathbf{X}_{\min(M_1, N_2)}^{(2)}$  代表网络 2 的发送端对网络 1 接收端造成的干扰。

同理  $\mathbf{X}_1^{(1)}$ ,  $\mathbf{X}_2^{(1)}$ ,  $\dots$ ,  $\mathbf{X}_{\min(M_1, N_2)}^{(1)}$  代表网络 1 的发送端对网络 2 的接收端造成的干扰。当网络的接收端天线数小于其干扰发送端天线时,接收端的天线将被用来处理干扰而无法完全获得来自其目的接收端的消息。为了使网络接收端能同时接收期望消息并消除其他网络对其的干扰,使系统的总自由度最大化,假设  $N_1 \geq M_2$  或  $N_2 \geq M_1$ 。

以下讨论以假设  $N_1 \geq M_2$  为前提,  $N_2 \geq M_1$  的情况与  $N_1 \geq M_2$  的相同。

## 2 自由度的推导

首先建立两个网络之间的通信机制,如下所述:

1) 主网络的接收端对次网络广播其空闲天线数和已使用自由度数目;

2) 次网络的发送端根据收到的广播结合自身的天线数,在确保不影响主网络的传输前提下确定可发送的最大消息数。

下面对具体情况进行分类讨论。

(1)  $M_1 \leq N_1$

a)  $N_1 \geq M_1 + M_2, N_2 \geq M_1$

假设主网络传递消息的自由度为  $d_1$  ( $d_1 \in [0, M_1]$ ),此时,次网络利用主网络剩余的空间资源进行消息的传递,如图 2 所示,用虚线分隔主、次网络,虚线以上部分为主网络,虚线以下部分为次网络,黑点间的连线表示网络内部发射端与接收端之间传输消息所使用的自由度,该消息在另一网络的接收端视为干扰并占用对应数目的天线(黑点与白点连线)。以下各图的符号表示均相同,不再赘述。

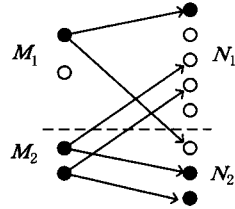


图 2  $N_1 \geq M_1 + M_2, N_2 \geq M_1$

此时次网络可传输的消息数为  $d_2 = \min(M_2, N_2 - d_1)$ 。

$$d_{sum} = d_1 + \min(M_2, N_2 - d_1), d_1 \in [0, M_1] \quad (7)$$

当  $d_1 = M_1$ , 即主网络完全利用其空间资源时,次网络可获得的最大自由度为  $d_2 = \min(M_2, N_2 - M_1)$ ,网络的总自由度为  $d_{sum} = M_1 + \min(M_2, N_2 - M_1)$ 。

b)  $N_1 \geq M_1 + M_2, N_2 < M_1$

假设主网络传递消息的自由度为  $d_1$  ( $d_1 \in [0, M_1]$ ),如图 3 所示,此时次网络能获得的自由度为  $d_2 = \min(M_2, [N_2 - d_1]^+)$ , (注  $[a]^+ = \max(0, a)$ )。故网络的总自由度为

$$d_{sum} = d_1 + \min(M_2, [N_2 - d_1]^+), d_1 \in [0, M_1] \quad (8)$$

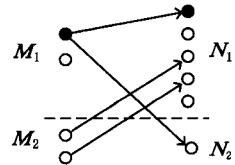


图 3  $N_1 \geq M_1 + M_2, N_2 < M_1$

当  $d_1 = M_1$  时,与 a) 情况相同,即主网络完全利用其空间资源,因为  $N_2 < M_1$ ,所以此时次网络可获得的最大自由度为  $d_2 = \min(M_2, [N_2 - M_1]^+)$ ,网络的总自由度为  $d_{sum} = M_1 + \min(M_2, [N_2 - M_1]^+)$ 。

$$c) N_1 < M_1 + M_2$$

假设主网络传递消息的自由度为  $d_1$  ( $d_1 \in [0, M_1]$ ) 时, 如图 4 所示, 与前面分析类似, 该网络的总自由度为

$$d_{sum} = d_1 + \min[M_2, N_1 - d_1, [N_2 - d_1]^+], d_1 \in [0, M_1] \quad (9)$$

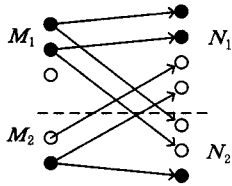


图 4  $N_1 < M_1 + M_2$

当  $d_1 = M_1$  时, 次网络的自由度最大可取  $d_2 = \min(N_1 - M_1, [N_2 - M_1]^+)$ , 总网络的自由度为  $d_{sum} = M_1 + \min(N_1 - M_1, [N_2 - M_1]^+)$ 。

(2)  $M_1 > N_1$

假设主网络传输消息的自由度为  $d_1$  ( $d_1 \in [0, N_1]$ ), 如图 5 所示, 此时该网络的自由度为

$$d_{sum} = d_1 + \min(M_2, N_1 - d_1, N_2 - d_1), d_1 \in [0, N_1] \quad (10)$$

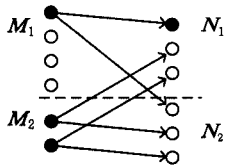


图 5  $M_1 > N_1$

当主网络完全利用其空间资源、次网络的自由度为  $d_2 = \min(\min(M_2, N_1 - d_1), N_2 - d_1)$  时, 总网络的自由度则为  $d_{sum} = N_1$ 。

### 3 接收端有协作时自由度的推导

经过上述分析可以看到, 从自由度的角度而言, 两网络 PTP 共存时在某些条件下主网络的接收端是有空余天线的, 但如果接收端之间没有协作这些空余天线将被浪费掉。为了提高网络的总自由度, 可以考虑让两网络的接收端进行协作, 通过借用空余天线来充分利用空间资源。其协作机制为:

1) 主网络的接收端对次网络广播其空余天线数  $A_f$  和自由度  $d_1$ 。

2) 次网络的发送端根据收到的广播结合自身的天线数, 在确保不影响主网络的传输前提下确定可发送的最大消息数。

3) 假设在知道主网络剩余的天线数的前提下, 利用天线借用, 在接收端通过某种方式, 比如有线或无线的方式, 让  $R_2$  收到  $R_1$  剩余天线上的数据, 与多址接入信道 (MAC) 不同的是此时接收端只是部分天线之间协作, 并不是完全协作。

4) 假设次网络的自由度为  $d_2$ , 从次网络自身的天线数和主次网络对干扰的处理来考虑,  $d_2$  要满足  $d_2 \leq M_2, A_f + N_2 \geq d_1 + 2d_2$  两个条件, 得出  $d_2 \leq \min(M_2, (A_f + N_2 - d_1)/2)$ 。

5) 网络的总自由度为  $d_{sum}^c = d_1 + d_2$ 。

下面具体讨论各种情况下的自由度。

(1)  $M_1 \leq N_1$

a)  $N_1 \geq M_1 + M_2, N_2 \geq M_1$

当主网络传输消息的自由度为  $d_1$  时, 利用上述协作机制, 图 2 可变为图 6, 次网络的虚线节点为主网络的剩余天线, 此时的自由度为

$$d_{sum}^c = d_1 + \min(M_2, (N_2 + N_1 - 2d_1)/2), d_1 \in [0, M_1] \quad (11)$$

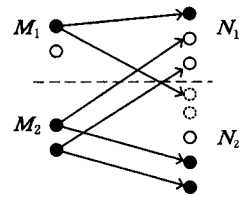


图 6  $N_1 \geq M_1 + M_2, N_2 \geq M_1$

当  $d_1 = M_1$  即主网络完全利用其空间资源时, 网络的自由度为  $d_{sum}^c = M_1 + \min(M_2, (N_2 + N_1 - 2M_1)/2)$ 。

b)  $N_1 \geq M_1 + M_2, N_2 < M_1$

当主网络的自由度为  $d_1$ , 根据协作机制, 图 3 可转化为图 7, 此时的自由度为

$$d_{sum}^c = d_1 + \min(M_2, [(N_2 + N_1 - 2d_1)/2]^+), d_1 \in [0, M_1] \quad (12)$$

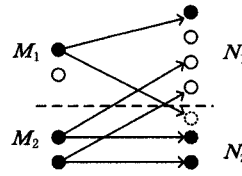


图 7  $N_1 \geq M_1 + M_2, N_2 < M_1$

当  $d_1 = M_1$  时, 网络的自由度为  $d_{sum}^c = M_1 + \min(M_2, [(N_2 + N_1 - 2M_1)/2]^+)$ 。

将 a)、b) 两种情况合并可得, 当  $N_1 \geq M_1 + M_2$ , 主次网络均参与通信时, 网络的总自由度为

$$d_{sum}^c = d_1 + \min(M_2, [(N_2 + N_1 - 2d_1)/2]^+), d_1 \in [0, M_1] \quad (13)$$

c)  $N_1 < M_1 + M_2$

该情况下的模型如图 8 所示。

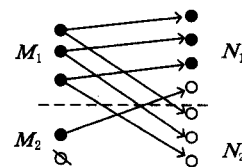


图 8  $N_1 < M_1 + M_2$

此时自由度为

$$d_{sum}^c = d_1 + \min(M_2, N_1 - d_1, [N_2 - d_1]^+) \quad (14)$$

将式 (14) 与没有协作时的自由度式 (9) 相比, 此时接收端的协作并不能提高自由度, 因为  $N_1 < M_1 + M_2$ , 主网络的接收端没有多余的天线借给次网络使用, 并且考虑主网络接收端天线的有限性, 在  $N_1 - d_1 < M_2$  的情况下, 为了消除次网络发送端对主网络接收端造成的干扰, 必须将次网络接收端的发送消息天线数降为  $M_2'$ 。

(2)  $M_1 > N_1$

此情况如图 9 所示。

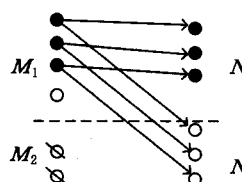


图 9  $M_1 > N_1$

[5] JI Q J. Can Multifractal traffic burstiness be approximated by markov modulated poisson processes? [C]// Proceedings 12<sup>th</sup> IEEE International Conference Networks, 2004 (ICON 2004), 2004; 26-30

[6] 邹柏贤, 姚志强. 一种网络流量平稳化方法[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 14-23

[7] Liu J K, Shu Y T, Zhang L F, et al. Traffic modeling based on FARIMA models [C]// IEEE Canadian Conference Electrical and Computer Engineering. Canndian, 1999; 162-167

[8] 高茜, 冯琦, 李广侠. 基于组合模型的自相似业务流量预测[J]. 计算机科学, 2012, 39(4): 123-126

[9] 高波, 张钦宇, 梁永生, 等. 基于 EMD 及 ARMA 的自相似网络流量预测[J]. 通信学报, 2011, 32(4): 47-56

[10] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [C]// Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1998, 454: 903-995

[11] Tipping M. Sparse Bayesian Learning and the Relevance Vector Machine [J]. Journal of Machine Learning Research, 2001, 1(1): 211-244

[12] 胡昌华, 王兆强, 周志杰, 等. 一种 RVM 模糊模型辨识方法及在故障预报中的应用[J]. 自动化学报, 2011, 37(4): 503-512

[13] 夏靖波, 柏骏, 赵小欢, 等. 基于相关向量机的在线网络流量分类方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2014, 44(2): 459-464

[14] 王晓兰, 张万宏, 王慧中. 基于小波变换和 AR-LSSVM 的非平稳时间序列预测[J]. 控制与决策, 2008, 23(3): 357-360

(上接第 112 页)

此时的自由度为

$$d_{sum}^{\infty} = d_1 + \min(M_2, N_1 - d_1, N_2 - d_1) \quad (15)$$

比较发现接收端协作并不能提高自由度, 因为  $M_1 > N_1$ , 主网络的接收端没有多余的天线, 与  $N_1 < M_1 + M_2$  情况类似, 并且为了彻底消除干扰, 将抑制次网络发送端发送消息的天线数。

将上述分析结果归纳于表 1, 经过比较发现只有当  $M_1 < N_1$  或  $N_1 \geq M_1 + M_2$  时接收端的协作能增加自由度。

表 1  $N_1 \geq M_2$  时两个 PTP 网络 ( $M_1, M_2, N_1, N_2$ ) 并存时的自由度

	$N_1 \geq M_1 + M_2$	$d_1 = M_1$ $d_{sum} = M_1 + \min(M_2, N_2 - M_1)$	$d_1 < M_1$ $d_{sum} = d_1 + \min(M_2, [N_2 - d_1]^+)$
	接收端有协作	$d_{sum}^{\infty} = d_1 + \min(M_2, [(N_2 + N_1 - 2d_1)/2]^+)$	
$M_1 \leq N_1$ $d_1 \in [0, M_1]$	$N_1 < M_1 + M_2$	$d_1 = M_1$ $d_{sum} = M_1 + \min(N_1 - M_1, [N_2 - M_1]^+)$	$d_1 < M_1$ $d_{sum} = d_1 + \min(M_2, N_1 - d_1, [N_2 - d_1]^+)$
	接收端有协作	$d_{sum}^{\infty} = d_{sum}$	
$M_1 > N_1, d_1 \in [0, N_1]$		$d_1 = N_1$ $d_{sum} = N_1$	
	接收端有协作	$d_1 < N_1$ $d_{sum} = d_1 + \min(M_2, N_1 - d_1, N_2 - d_1)$	$d_{sum}^{\infty} = d_{sum}$

$N_1 < M_2$  的情况相当于将  $N_1 \geq M_2$  情况下的发送端和接收端互换, 自由度推导方法和  $N_1 \geq M_2$  完全一样, 只要将  $N_1 \geq M_2$  时对应条件公式中的  $M_1, M_2$  分别换成  $N_1, N_2$  即可, 此时  $d_{sum}^{\infty}$  代表在发送端进行协作时的自由度。受版面限制, 具体情况不再赘述。

**结束语** 本文讨论了两个 PTP 认知网络并存时的自由度, 给出了在主网络的自由度资源完全利用和部分利用两种情况下, 次网络利用剩余的空间资源进行通信时网络自由度的表达式; 此外还分析了两个网络在接收端以部分天线借用的协作方式进行通信时网络的总自由度。比较发现, 当满足一定条件时, 两网络接收端或发送端之间的协作能提高网络的总自由度。

## 参考文献

[1] Viswanath P, Tse D N C. Sum capacity of the vector Gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality [J]. IEEE Trans.

Inf. Theory, 2003, 49(8): 1912-1921

[2] Viswanath S, Jindal N, Goldsmith A. Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of Gaussian MIMO broadcast channels [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2003, 49(10): 2658-2668

[3] Yu W, Cioffi J M. Sum capacity of Gaussian vector broadcast channels [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2004, 50(9): 1875-1892

[4] Huang Chia-chi, Jafar S A. Degrees of freedom of the MIMO interference channel with cooperation and cognition [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2009, 55(9): 4211-4220

[5] Vaze C S, Varanasi M K. A new outer bound via interference localization and degree of freedom regions of MIMO interference networks with no CSIT [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2012, 58(11): 6853-6869

[6] Zhu Yan, Guo Dong-ning. The degrees of freedom of isotropic MIMO interference channels without state information at the transmitters [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2012, 58(1): 341-352

[7] Vaze C S, Varanasi M K. On completing the degrees of freedom characterization of MIMO interference networks with CSIT [C]// IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings, 2011

[8] Chen Guo-xing, Xiang Zheng-zheng, Xu Chang-qing, et al. On Degree of Freedom of Cognitive Networks with User Cooperation [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2012, 1(6): 617-620

[9] Park S H, Lee I. Degree of Freedom for Mutually Interfering Broadcast Channels [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2012, 58(1): 393-401

[10] Fette B A. Cognitive Radio Technology [M]. Academic Press, 2006

[11] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2005, 23(2): 201-202

[12] Amir M, El K A, Nafie M. Constrained interference alignment and the spatial degrees of freedom of MIMO cognitive networks [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2011, 57(5): 2994-3004

[13] Jafar S A. Interference alignment: a new look at signal dimensions in a communication network [M]. Foundations and Trends in Commun. And Inf. Theory, 2011

[14] Jafar S A, Fakhereddin M J. Degrees of Freedom for the MIMO Interference Channel [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2012, 58(1): 2737-2641