

点对点信道感知两用户干扰信道时的自由度研究

王媛媛 刘 锋 曾连荪 张友俊

(上海海事大学信息工程学院 上海 201306)

摘要 研究了两个感知网络的自由度:主网络是两用户干扰信道,次网络是点对点信道,其中次网络感知主网络的消息或者信号。考虑了3种感知情形:次网络发送端感知主网络发送端的消息;次网络接收端感知主网络接收端的信号;次网络接收端感知主网络发送端的消息。用干扰对齐和干扰中和的方法得出了相应的自由度内界,并且给出了自由度的外界,发现3种情形的自由度内外界均是紧的,发射端感知比接收端感知能获得更大的自由度。

关键词 感知网络,自由度,干扰对齐,干扰中和

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.9.021

On Degrees of Freedom of Cognitive Networks from Point-to-Point Channel to Two-user Interference Channel

WANG Yuan-yuan LIU Feng ZENG Lian-sun ZHANG You-jun

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

Abstract This paper investigated the degrees of freedom(DoF) of two cognitive networks, where the primary network is a two-user interference channel(IC), the secondary network is point-to-point channel(PTP), and the secondary network has cognition to the messages or signals of the primary network. Three cognition scenarios were considered: (1)PTP transmitter is cognitive of IC transmitters' messages, (2)PTP receiver is cognitive of IC receivers' signals, (3)PTP receiver is cognitive of IC transmitters' messages. The inner bound of the DoF was obtained by using interference alignment and interference neutralization. Besides, the outer bound was proven. We found that inner and outer bound is tight and transmitter cognition can achieve higher DoF than receiver cognition.

Keywords Cognitive network, Degrees of freedom, Interference alignment, Interference neutralization

1 引言

研究多用户无线网络的容量区域对于无线网络的设计是非常重要的。然而,对于一般网络,直接研究其容量区域通常是困难的。在无法精确表述容量特性的情况下,一些能近似描述容量特性的度量被提出来了,其中就包括自由度(DoF),也称作空间复用增益。从直观上理解,自由度代表了可解析的信号空间的维度大小。自由度与容量的关系可以表示为 $C(\text{SNR}) = d \log(\text{SNR}) + o(\log(\text{SNR}))$, $C(\text{SNR})$ 表示网络的容量,是信噪比(SNR)的一个函数; d 表示自由度; $o(\log(\text{SNR}))$ 表示的是某个函数 $f(\text{SNR})$, 满足: $\lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{f(\text{SNR})}{\log(\text{SNR})} = 0$ 。在高信噪比时, $o(\log(\text{SNR}))$ 相对于 $\log(\text{SNR})$ 是可以忽略的,此时自由度可以表征容量随 $\log(\text{SNR})$ 变化的线性因子。因此,在高信噪比时,可以认为无线网络的容量是由自由度决定的。自由度外界表示的是一个极限值,是无法突破的,研究其外界对于实际的网络规划具有理论上的指导意义;内界指的是用某种方法,譬如迫零、脏纸编码、连续解码、干扰对齐等,得到的值。通过一些方法使得自由度与外界越来越接近,

当内界与外界相等时,就认为自由度是紧的,此时的方案为最优方案。内界的研究对于无线网络的设计,例如4G中的MI-MO系统,及提高整个系统的频谱资源利用率有重要作用。为了提高系统容量,自由度的研究备受关注。

在无线网络中,干扰是限制信道自由度的一个主要因素,因此对干扰进行处理就显得尤为重要。有两种处理干扰的基本方法:干扰对齐和干扰中和。干扰对齐的思想^[1]是:在每个接收端,将所有的干扰信号对齐在一个较小的信号维度内,同时要保持干扰信号与期望信号的相互独立,使得期望信号能够被解析出来。近期,干扰对齐得到广泛研究^[2-7]。线性干扰对齐^[8]是所有干扰对齐形式中最简单的一个形式,它是基于线性预编码(波束成型)方案的信号空间对齐。由于波束成型方案在现存的多人多出(MIMO)点对点信道(PTP)、广播信道(BC)、多址接入信道(MAC)中非常普遍,因此从实践角度出发,线性干扰对齐也是最容易的实现方法。譬如在 K 用户的干扰信道(IC)中,通过干扰对齐,每个用户可以得到 $1/2$ 的自由度。另一方面,干扰中和指的是在满足一定的条件下,在接收端可以将干扰信号进行中和,从而达到消除干扰的目的。例如文献^[9]运用干扰中和的思想使得 $2 \times 2 \times 2$ IC 系统获得

到稿日期:2014-09-27 返修日期:2014-12-01 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),上海海事大学科研项目:新型无线船舶通信技术的研究(20120107),研究生案例库课程建设研(YZ)(2010020)资助。

王媛媛(1989-),女,硕士生,主要研究方向为无线网络中多网并存自由度, E-mail: yuanyuanwang0211@sina.com; 刘 锋(1976-),男,博士,讲师,主要研究方向为无线通信与网络; 曾连荪(1962-),男,教授,主要研究方向为定位导航系统; 张友俊(1961-),男,教授,主要研究方向为微波与天线。

2个自由度。

对于 PTP、BC、MAC、IC 等简单信道,其自由度大多已经获知^[10];但对于更复杂的信道,例如两个或多个简单信道共存构成的复合信道,其自由度研究仅有少量的进展。文献[11,12]推导了两个 BC 并存时的自由度,通过比较发现,后者用干扰对齐的方法比前者用迫零方法得到的自由度要大。文献[13]用干扰对齐的方法分析了两个 MAC 共存时的自由度。干扰对齐在复杂网络中的应用越来越广泛,但是将干扰对齐与感知网络相结合的研究还是相对较少的。近些年,基于信号空间共享的感知网络技术备受关注,其基本思想是:次网络发送端或接收端与主网络建立感知与合作,在同一频谱资源范围来共享信号空间,通过先进的干扰管理策略来增加自由度,从而提高整个系统的容量。感知干扰网络是最基本的感知网络,文献[14]推导出在不同的消息感知时,两个 PTP 共存时的自由度。文献[15]从信息论角度分析了 MAC 感知网络和 PTP 共存时整个系统的自由度,发现自由度有所改善。

本文研究次网络为单用户 PTP、主网络为两用户 IC 并存时的自由度,采用干扰对齐和干扰中和相结合的方法来进行干扰管理,分析当次网络发送端感知主网络发送端的消息、次网络接收端感知主网络接收端的信号、次网络接收端感知主网络发送端的消息这3种情况下,感知网络整体的自由度内界与外界。

本文第2节介绍系统模型;第3节用干扰中和、干扰对齐的方法得出自由度的内界;第4节给出了自由度的外界;第5节给出了自由度区域;最后对文章进行了总结。

2 系统模型

对于主网络是两用户单天线高斯干扰信道,次网络是单天线点对点信道的共存网络,可以将其看作是一个三用户单天线干扰信道。 m_1, m_2, m_3 分别是发送端 TX_1, TX_2, TX_3 的消息,接收端 RX_1, RX_2, RX_3 分别想要解码得到消息 m_1, m_2, m_3 。消息 m_i 取自一个独立同分布集合 $M_k = \{1, 2, \dots, 2^{nR_k}\}$, 被编码成码长为 n 的码字 $X_k^n, k \in \{1, 2, 3\}$ 。由于次网络发送端可以感知主网络的消息,因此发送端的信号是所有消息的集合,记作: $X_i = v_i^1 m_1 + v_i^2 m_2 + v_i^3 m_3, v_i^1, v_i^2, v_i^3$ 是各消息对应的预编码向量,可以为 $\emptyset, i \in \{1, 2, 3\}$ 。发送端信号满足功率约束关系: $E\{|X_i|^2\} \leq P$ 。当次网络发送端感知主网络发送端的消息或者次网络接收端感知主网络发送端的消息时,接收端 j 的输出信号记作: $Y_j = \sum_{i=1}^3 h_{ji} X_i + Z_j$; 当次网络接收端感知主网络接收端信号时,接收端 j 还可以进一步处理: $\tilde{Y}_j = \sum_{i=1}^3 U_j Y_i, U_j$ 是后处理向量,可以为 $\emptyset, i, j \in \{1, 2, 3\}$ 。其中 Y_i 是接收端 i 的输出信号; \tilde{Y}_j 是经过后处理后接收端 j 的输出信号; h_{ji} 是发送端 i 到接收端 j 的信道系数,取自一个连续分布函数; Z_j 是接收端 j 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。将系统平均差错概率记作 p_e ,码率元组 (R_1, R_2, R_3) 是可达的,是指存在一个码簿序列 $(n, 2^{nR_1}, 2^{nR_2}, 2^{nR_3})$, 当 $n \rightarrow \infty$ 时,平均差错概率 $p_e \rightarrow 0$ 。所有可达的码率元组的集合称为容量区域,该网络总的自由度记作 d_Σ , 定义 $d_\Sigma = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{C_\Sigma(P)}{\log(P)}$, 其中 $C_\Sigma(P) =$

$$\max_{(R_1, R_2, R_3) \in c} (R_1 + R_2 + R_3)。$$

文中主要研究3种感知情形的自由度。

Case A: 次网络发送端感知主网络发送端的消息,即 TX_3 感知 TX_1, TX_2 的消息。

Case B: 次网络接收端感知主网络接收端的消息,即 RX_3 感知 RX_1, RX_2 的消息。

Case C: 次网络接收端感知主网络发送端的消息,即 RX_3 感知 TX_1, TX_2 的消息。

3 自由度内界

对于上述3种不同感知情况,自由度内界可以通过在接收端运用干扰对齐与干扰中和等方法来获得。在每个接收端,期望解码得到的是对应的发送端发来的消息,而将其他发送端发送的消息视作干扰,在接收端应尽量中和,此时干扰并不占用信号空间;如果无法实现中和,应考虑干扰对齐,以尽量压缩干扰所占用的信号空间。本文由于考虑了感知下的两个网络并存,因此优先考虑在主网络的接收端进行干扰中和,其次考虑干扰对齐。对于次网络的接收端,也是如此。

3.1 Case A 的内界

该情形的信道模型如图1所示,上方的虚线框图代表主网络,下方的虚线框图代表次网络(文中图形均适用)。

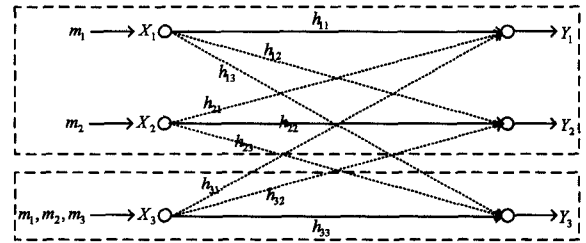


图1 次网络发送端感知主网络发送端消息

根据发送端之间消息的感知情况,发送端信号记作:

$$\begin{aligned} X_1 &= v_1^1 m_1 \\ X_2 &= v_2^2 m_2 \\ X_3 &= v_3^1 m_1 + v_3^2 m_2 + v_3^3 m_3 \end{aligned} \quad (1)$$

接收端信号记作:

$$\begin{aligned} Y_j &= h_{j1} X_1 + h_{j2} X_2 + h_{j3} X_3 + Z_j \\ &= (h_{j1} v_1^1 + h_{j3} v_3^1) m_1 + (h_{j2} v_2^2 + h_{j3} v_3^2) m_2 + h_{j3} v_3^3 m_3 + Z_j \end{aligned} \quad (2)$$

v_i^1, v_i^2, v_i^3 是要设计的预编码向量, $i, j \in \{1, 2, 3\}$ 。

设计如下干扰处理方案。

在 RX_1 端,将 m_2 干扰中和:

$$h_{12} v_2^2 + h_{13} v_3^2 = 0 \quad (3)$$

在 RX_2 端,将 m_1 干扰中和:

$$h_{21} v_1^1 + h_{23} v_3^1 = 0 \quad (4)$$

对于接收端 RX_3 ,干扰消息 m_1, m_2 是无法中和的,因为根据式(4)已有一个关于 v_1^1, v_3^1 的等式可以表示成 $f_1(v_1^1, v_3^1) = 0$,若在 RX_3 端中和干扰消息 m_1 ,即 $f_2(v_1^1, v_3^1) = 0$,同时满足 f_1, f_2 两个等式,必将造成其中的一个未知量产生冲突,因为根据 f_1 等式得到: $v_1^1 = -\frac{h_{23}}{h_{21}} v_3^1$,根据 f_2 等式得到: $v_1^1 = -\frac{h_{33}}{h_{31}} v_3^1$ 。同时满足 $v_1^1 = -\frac{h_{23}}{h_{21}} v_3^1$ 和 $v_1^1 = -\frac{h_{33}}{h_{31}} v_3^1$ 的条件是 $\frac{h_{23}}{h_{21}} = \frac{h_{33}}{h_{31}}$,但是信道系数 h_{ji} 取自一个连续分布函数,是随机的,正好满

足上述条件的概率几乎为零,因此在 RX_3 端无法中和 m_1 。同理也无法中和 m_2 ,所以只能考虑干扰消息的对齐。

在 RX_3 端,将 m_1, m_2 干扰对齐:

$$h_{31}v_1 + h_{33}v_3 = h_{32}v_2 + h_{33}v_3 \quad (5)$$

根据式(3)一式(5),随机选取预编码向量 v_1, v_3 (由于是随机选取的,因此能够保证向量 v_1, v_3 的线性独立),然后设计预编码向量 v_2, v_3, v_3 ,使之满足:

$$v_2 = Av_1, v_3 = -\frac{h_{21}}{h_{23}}v_1, v_3 = -\frac{h_{12}}{h_{13}}v_2 = -A\frac{h_{12}}{h_{13}}v_1 \quad (6)$$

$$A = (h_{31} - \frac{h_{33}h_{21}}{h_{23}}) / (h_{32} - \frac{h_{33}h_{12}}{h_{13}})$$

根据设计的预编码向量,接收端接收到的信号为:

$$Y_1 = (h_{11} - \frac{h_{13}h_{21}}{h_{23}})v_1 m_1 + h_{13}v_3 m_3 + Z_1$$

$$Y_2 = A(h_{22} - \frac{h_{23}h_{12}}{h_{13}})v_1 m_2 + h_{23}v_3 m_3 + Z_2 \quad (7)$$

$$Y_3 = (h_{31} - \frac{h_{33}h_{21}}{h_{23}})v_1 (m_1 + m_2) + h_{33}v_3 m_3 + Z_3$$

假设消息 m_1, m_2, m_3 的自由度分别为 d_1, d_2, d_3 。由于接收端 RX_1 消除了干扰消息 m_2 ,接收端 RX_2 消除了干扰消息 m_1 ,接收端 RX_3 对消息 m_1, m_2 进行了干扰对齐,因此 d_1, d_2, d_3 满足如下关系:

$$\begin{cases} 0 \leq d_1 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_2 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq \max(d_1, d_2) + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_i \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $i \in \{1, 2, 3\}$ 。

注:如果单天线不做符号扩展,每个自由度只能取 0 或者 1;然而通过一些方法,例如符号扩展,可以使得自由度取到 0 到 1 之间的任何有理数值。由于自由度可以被解释成可解析的信号空间维度的个数,因此 $\max(d_i, d_j)$ 表示的是将消息 m_i, m_j 放到同一个空间中,而这个空间的大小取的是这两个消息的自由度的最大值。

令主、次网络的自由度分别为 d_p, d_s ,自由度的内界为 $d_m, d_m = d_p + d_s = d_1 + d_2 + d_3 \leq d_1 + d_2 + 2d_3 \leq 2$ 。可以得到当 $d_1 = d_2 = 1, d_3 = 0$,即发送端 TX_3 不发送消息 m_3 ,而是辅助主用户发送消息时,获得可达自由度最大值 $d_m = 2$,此时的信道模型如图 2 所示。

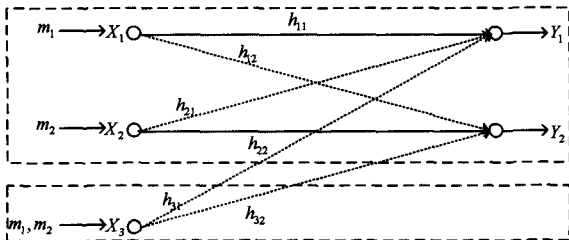


图 2 次网络发送端不发送消息 m_3

其可达性具体说明如下。

发送端信号记作:

$$\begin{aligned} X_1 &= v_1 m_1 \\ X_2 &= v_2 m_2 \end{aligned} \quad (9)$$

接收端信号记作:

$$Y_j = h_{j1}X_1 + h_{j2}X_2 + h_{j3}X_3 + Z_j$$

$$= (h_{j1}v_1 + h_{j3}v_3)m_1 + (h_{j2}v_2 + h_{j3}v_3)m_2 + Z_j \quad (10)$$

在 RX_1 端,将 m_2 干扰中和: $h_{12}v_2 + h_{13}v_3 = 0$;

在 RX_2 端,将 m_1 干扰中和: $h_{21}v_1 + h_{23}v_3 = 0$ 。

经过处理后,每个接收端均得到期望信号,而无干扰信号的存在,所以得到 $d_1 = d_2 = 1$,获得可达自由度 $d_m = 2$ 。

3.2 Case B 的内界

该情形的信道模型如图 3 所示。

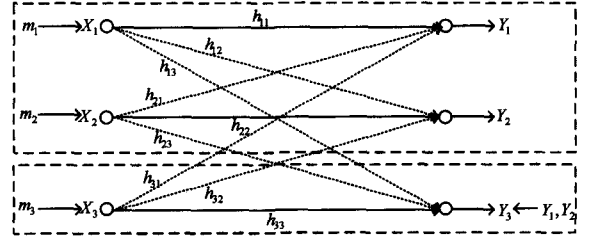


图 3 次网络接收端感知主网络接收端信号

发送端信号记作:

$$X_1 = v_1 m_1, X_2 = v_2 m_2, X_3 = v_3 m_3 \quad (11)$$

各个接收端的接收信号为:

$$\begin{aligned} Y_j &= h_{j1}X_1 + h_{j2}X_2 + h_{j3}X_3 + Z_j \\ &= h_{j1}v_1 m_1 + h_{j2}v_2 m_2 + h_{j3}v_3 m_3 + Z_j \end{aligned} \quad (12)$$

收到该信号后,可以进一步处理如下:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_1 &= U_1^1 Y_1 = U_1^1 (h_{11}v_1 m_1 + h_{12}v_2 m_2 + h_{13}v_3 m_3) + Z_1 \\ \tilde{Y}_2 &= U_2^2 Y_2 = U_2^2 (h_{21}v_1 m_1 + h_{22}v_2 m_2 + h_{23}v_3 m_3) + Z_2 \\ \tilde{Y}_3 &= U_3^3 Y_1 + U_3^3 Y_2 + U_3^3 Y_3 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} &= (U_3^3 h_{11} + U_3^3 h_{21} + U_3^3 h_{31})v_1 m_1 + (U_3^3 h_{12} + \\ &U_3^3 h_{22} + U_3^3 h_{32})v_2 m_2 + (U_3^3 h_{13} + U_3^3 h_{23} + \\ &U_3^3 h_{33})v_3 m_3 + Z_3 \end{aligned}$$

其中, v_k, U_m^n 是要设计的预编码和后处理向量, $k, i, m, n \in \{1, 2, 3\}$ 。

设计如下干扰处理方案。

在 RX_1 端,将 m_2, m_3 干扰对齐:

$$h_{12}v_2 = h_{13}v_3 \quad (14)$$

在 RX_2 端,将 m_1, m_3 干扰对齐:

$$h_{21}v_1 = h_{23}v_3 \quad (15)$$

在 RX_3 端,将 m_1, m_2 干扰中和:

$$U_3^3 h_{11} + U_3^3 h_{21} + U_3^3 h_{31} = 0 \quad (16)$$

$$U_3^3 h_{12} + U_3^3 h_{22} + U_3^3 h_{32} = 0$$

随机选取向量 v_3, U_1^2, U_2^3, U_3^3 ,然后设计向量 v_1, v_2, U_3^3, U_3^3 ,使之满足:

$$v_2 = \frac{h_{13}}{h_{12}}v_3, v_1 = \frac{h_{23}}{h_{21}}v_3, U_3^3 = AU_3^3 \quad (17)$$

$$U_3^3 = \frac{h_{21} + A}{h_{11}}U_3^3, A = \frac{h_{12}h_{21} - h_{11}h_{22}}{h_{11}h_{32} - h_{12}h_{31}}$$

所以:

$$\begin{cases} 0 \leq d_1 + \max(d_2, d_3) \leq 1 \\ 0 \leq d_2 + \max(d_1, d_3) \leq 1 \\ 0 \leq d_i \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

自由度内界 $d_m = d_p + d_s \leq 1.5$ 。当 $d_1 = d_2 = d_3 = 0.5$ 时,可达自由度最大值为 1.5,其可达性具体说明如下:当信道经过 n 符号扩展,这里取 $n=2$,因此每个结点的信号空间大小变为 2 维,由于每个发送端发送 1 个消息,在接收端 RX_1, RX_2 ,期望信号分别占据 1 维空间大小,而干扰信号对齐

在另 1 维空间,所以期望信号可以被解析出来,而在接收端 RX_3 ,由于经过处理后期望消息 m_3 可以直接解析出来,因此经过符号扩展后,得到可达的自由度为 $d_m = \frac{d_1+d_2+d_3}{n} = \frac{3}{2}$ 。

3.3 Case C 的内界

该情形的信道模型如图 4 所示。

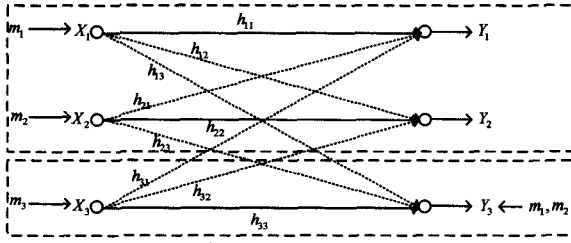


图 4 次网络接收端感知主网络发送端消息

发送端信号与 Case B 相同,接收端信号记作:

$$Y_j = h_{j1} v_1^j m_1 + h_{j2} v_2^j m_2 + h_{j3} v_3^j m_3 + Z_j \quad (19)$$

设计如下干扰处理方案。

在 RX_1 端,将 m_2, m_3 干扰对齐:

$$h_{12} v_2^1 = h_{13} v_3^1 \quad (20)$$

在 RX_2 端,将 m_1, m_3 干扰对齐:

$$h_{21} v_1^2 = h_{23} v_3^2 \quad (21)$$

在 RX_3 端,由于已经知道干扰消息 m_1, m_2 ,相当于消除了消息 m_1, m_2 ,因此能够解码出 m_3 。

选取预编码向量 v_3^j ,使 v_1^j, v_2^j 满足:

$$v_2^j = \frac{h_{13}}{h_{12}} v_3^j, v_1^j = \frac{h_{23}}{h_{21}} v_3^j \quad (22)$$

根据设计的干扰处理方案,可以得到:

$$\begin{cases} 0 \leq d_1 + \max(d_2, d_3) \leq 1 \\ 0 \leq d_2 + \max(d_1, d_3) \leq 1 \\ 0 \leq d_3 \leq 1 \end{cases} \quad (23)$$

所以 $d_m = d_p + d_s \leq 1.5$ 。当 $d_1 = d_2 = d_3 = 0.5$ 时,可达自由度最大值为 1.5,与 Case B 得到的自由度相等,其可达性也可以用 Case B 中的 2 符号扩展方法证明。

4 自由度外界

文献[16]总结了两用户对称感知高斯干扰信道的自由度:当只有一个发送端(或者只有一个接收端,或者只有一个对应的发送接收对)是感知消息的,系统总的自由度为 M, M 表示每个结点的天线数。当两个发送端(或者两个接收端或者交叉的发送接收对)感知消息时,总的自由度 $2M$ 。文献[17]推导了两用户多人多出感知高斯干扰信道自由度:

$$d_{\Sigma} = \min\{M_1 + M_2, N_1 + N_2, (1 - l_{T2})\{(1 - l_{R2}) \max(M_1, N_2) + l_{R2}(M_1 + M_2)\} + l_{T2}(M_1 + M_2), (1 - l_{T1})\{(1 - l_{R1}) \max(M_2, N_1) + l_{R1}(M_1 + M_2)\} + l_{T1}(M_1 + M_2)\} \quad (24)$$

$l_{T_i} = 1(0)$ 表示发送端 T_i 是(不是)感知发送端, $l_{R_i} = 1(0)$ 表示接收端 R_i 是(不是)感知接收端。 M_1, M_2, N_1, N_2 分别是发送端 1,2 和接收端 1,2 的天线数。

注:这里所说的感知消息指的是感知发送端消息。另外文献[16]给出了一个结论:两用户的多人多出高斯干扰信道中,当只在发送端(或者接收端或者发送端接收端)协作时,得出的自由度和没有协作的两用户多人多出高斯干扰信道自由度相同,即协作并不会提高两用户高斯干扰信道自由度。可

利用上述结论推导外界。

4.1 Case A 的外界

令 $m_1 = \emptyset$ 即消息 m_1 不发送,整个信道变成两用户的感知干扰信道,只有 TX_3 是感知的,得到:

$$0 \leq d_2 + d_3 \leq 1 \quad (25)$$

同样令 $m_2 = \emptyset$,同理得到:

$$0 \leq d_1 + d_3 \leq 1 \quad (26)$$

令 $m_3 = \emptyset$,让 TX_1, TX_2 互相感知,整个信道变成广播信道,其发送端有 2 根天线,接收端分别有 1 根天线,根据 $d_{BC} = \min(M, N_1 + N_2)$,所以:

$$0 \leq d_1 + d_2 \leq 2 \quad (27)$$

因此,总的自由度外界为 $d_{up} = d_1 + d_2 + d_3 \leq 2$ 。

4.2 Case B 的外界

令 $m_1 = \emptyset$,让 RX_2, RX_3 协作,得到:

$$0 \leq d_2 + d_3 \leq 1 \quad (28)$$

同理得到:

$$0 \leq d_1 + d_3 \leq 1 \quad (29)$$

令 $m_3 = \emptyset$,得到:

$$0 \leq d_1 + d_2 \leq 1 \quad (30)$$

所以,总的自由度外界 $d_{up} = d_1 + d_2 + d_3 \leq 1.5$ 。

4.3 Case C 的外界

令 $m_1 = \emptyset$,变成两用户的感知 IC,其中只有 RX_3 是感知的。所以:

$$0 \leq d_2 + d_3 \leq 1 \quad (31)$$

同理,令 $m_2 = \emptyset$,得到:

$$0 \leq d_1 + d_3 \leq 1 \quad (32)$$

令 $m_3 = \emptyset$,变成非感知的两用户 IC,得到:

$$0 \leq d_1 + d_2 \leq 1 \quad (33)$$

所以,总的自由度外界 $d_{up} = d_1 + d_2 + d_3 \leq 1.5$ 。

5 自由度区域

综合上述内界与外界的分析,可以得到自由度是紧的。不同感知情形下的自由度区域如图 5 所示。根据时间共享(time-sharing)的原理,得到主、次网络各自的自由度均为 1,第一象限中两个截点(1,0)、(0,1)连线构成的自由度区域 I 都是可达的。根据 Case A 自由度约束条件(8)得出其自由度区域: $d = I + II + III$,截点(2,0)是当 $d_1 = d_2 = 1, d_3 = 0$,即发送端 TX_3 不发送消息 m_3 ,而是辅助主用户发送消息时得到的,此时总的自由度为 2,可以发现两网共存时最大可达自由度等于这两个网络单独存在时自由度的和值。从 Case B 的自由度满足约束关系(18)可以得到其自由度区域 $d = I + III$,而 Case C 自由度约束条件与 Case B 相同,所以自由度区域也相同。可见,Case A 代表的发射端消息感知情况下对应的处理方式能获得最大的自由度区域。

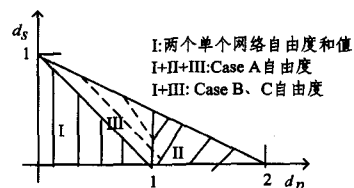


图 5 不同感知情形的自由度区域

结束语 本文在三用户 IC 信道基础上加入不同的消息或信号感知将信道转化为两用户 IC 和单用户 PTP 网络共存

的情形。用干扰对齐和干扰中和相结合的方法,分析了该共存网络最大可达自由度,并给出了自由度上界,得出3种感知情况的自由度的上下界是紧的。通过比较发现:在接收端进行感知获得的最大可达自由度与没有感知的三用户IC的自由度值相同;而在发射端进行感知可以获得更大的自由度。

参考文献

- [1] Cadambe V R, Jafar S A. Interference Alignment and Spatial Degrees of Freedom for the K User Interference Channel[C]// ICC. 2008, 971-975
- [2] Cadambe V R, Jafar S A. Interference alignment and degrees of freedom of the k-user interference channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3425-3441
- [3] Tresch R, Guillaud M, Riegler E. On the achievability of interference alignment in the K-user constant MIMO interference channel[C]// IEEE/SP 15th Workshop on Statistical Signal Processing, 2009(SSP'09). IEEE, 2009: 277-280
- [4] Yetis C M, Gou T, Jafar S A, et al. Feasibility conditions for interference alignment[C]// Global Telecommunications Conference, 2009(GLOBECOM 2009). IEEE, 2009: 1-6
- [5] Suh C, Tse D. Interference alignment for cellular networks[C]// 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. IEEE, 2008: 1037-1044
- [6] Bolcskei H, Thukral I J. Interference alignment with limited feedback[C]// IEEE International Symposium on Information Theory, 2009(ISIT 2009). IEEE, 2009: 1759-1763
- [7] Lee N, Lim J B, Chun J. Degrees of freedom of the MIMO Y channel: Signal space alignment for network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(7): 3332-3342
- [8] Ning H, Ling C, Leung K K. Feasibility condition for interference alignment with diversity[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(5): 2902-2912
- [9] Gou T, Jafar S A, Wang C, et al. Aligned interference neutralization and the degrees of freedom of the $2 \times 2 \times 2$ interference

- channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(7): 4381-4395
- [10] 周璐娜, 刘锋, 曾连荪. CSIT对无线MIMO网络自由度的影响[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(12): 3813-3817
- Zhou Lu-na, Liu Feng, Zeng Lian-sun. Influence of CSIT on degrees of freedom of wireless MIMO networks[J]. Application Research of Computer, 2014, 31(12): 3813-3817
- [11] Kim J, Park S H, Sung H, et al. Sum rate analysis of two-cell MIMO broadcast channels: spatial multiplexing gain[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC), 2010. IEEE, 2010: 1-5
- [12] Shin W, Lee N, Lim J B, et al. On the design of interference alignment scheme for two-cell MIMO interfering broadcast channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 437-442
- [13] Lee N, Shin W, Heath R W, et al. Interference alignment with limited feedback for two-cell interfering MIMO-MAC[C]// International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). 2012 IEEE, 2012: 566-570
- [14] 周璐娜, 刘锋, 曾连荪. 两个点对点(PTP)网络并存时的自由度研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(1): 110-112
- Zhou Lu-na, Liu Feng, Zeng Lian-sun. Research on degrees of freedom of two PTP networks coexistence[J]. Computer Science, 2015, 42(1): 110-112
- [15] Chaaban A, Sezgin A. Interference alignment and neutralization in a cognitive 3-user MAC-interference channel: degrees of freedom[C]// 12th Canadian Workshop on Information Theory (CWIT 2011). IEEE, 2011: 26-29
- [16] Jafar S A, Shamai S. Degrees of freedom region of the MIMO X channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(1): 151-170
- [17] Huang C, Jafar S A. Degrees of freedom of the MIMO interference channel with cooperation and cognition[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(9): 4211-4220

(上接第96页)

- [3] Xiang Y, Ling Y. The Research on Chinese Taxation Policies Based on E-commerce Model Classification [C]// ISECS'09. Washington DC, USA, 2009: 431-434
- [4] Li Q. Analysis on Channel Information and Control Structure Performance in Food Supply Chain Under E-commerce Environment [C]// ISISE'09. Washington DC, USA, 2009: 119-121
- [5] Xia Y, Li Q, Wang L. Research on Decentralized E-commerce Architecture in P2P Environment [C]// ICECE'10. Washington DC, USA, 2010: 2929-2932
- [6] Fan X, Li M, Ren Y. Dual-EigenRep: A Reputation-Based Trust Model for P2P File-Sharing Networks [C]// UIC-ATC'10. Washington DC, USA, 2010: 358-363
- [7] Li J, Wang X, Chen Y, et al. A Reputation Management Framework Based on Global Trust Model for P2P Systems [C]// ICCS'06. Berlin, Heidelberg, 2006: 896-899
- [8] 刘武, 段海新, 张洪, 等. TRBAC: 基于信任的访问控制模型[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(8): 1414-1420
- Liu Wu, Duan Hai-xin, Zhang hong, et al. TRBAC: Trust Based Access Control Model[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(8): 1414-1420

- [9] Mehdi M, Bouguila N, Bentahar J. A QoS-Based Trust Approach for Service Selection and Composition via Bayesian Networks [C]// ICWS'13. Washington DC, USA, 2013: 211-218
- [10] 李唯冠, 赵逢禹. 带属性策略的RBAC权限访问控制模型[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(2): 328-331
- Li Wei-guan, Zhao Feng-yu. RBAC Permission Access Control Model with Attribute Policy[J]. Mini-micro Systems, 2013, 34(2): 328-331
- [11] Fernandez-Gago C, Agudo I, Lopez J. Building Trust from Context Similarity Measures[J]. Comput. Stand. Interfaces, 2014, 36(4): 792-800
- [12] Bahtiyar S, Caglayan M U. Security Similarity Based Trust in Cyber Space[J]. Know-Based Syst. 2013, 52(2): 290-301
- [13] Rahmani M. Software modeling & design: UML, use cases, patterns, & software architectures by Hassan Gomaa [J]. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 2011, 36(4): 35-45
- [14] 林庆国, 刘宴兵. 一种基于信任的动态访问控制策略[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, 22(4): 478-482
- Lin Qing-guo, Liu Yan-bing. A trust-based dynamic access control scheme[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010, 22(4): 478-482