

点对点信道与两用户广播信道并存时的自由度

刘 锋 王媛媛 曾连荪

(上海海事大学信息工程学院 上海 201306)

摘 要 研究了两个网络并存时的自由度:一个网络是点对点(PTP)信道,另一个网络是两用户的广播信道(BC)。根据两个网络之间可能存在的消息认知情况,考虑了 4 种系统模型:次网 BC 对主网 PTP 发送端无消息认知、次网 PTP 对主网 BC 发送端无消息认知、次网 BC 对主网 PTP 发送端有消息认知、次网 PTP 对主网 BC 发送端有消息认知。运用干扰对齐和干扰消除的方法对干扰进行了干扰管理,分析了可达自由度,并给出了自由度的外界。通过比较 4 种情况,发现当主网是 PTP、次网是 BC 且次网认知主网发送端消息时获得的自由度区域最大。

关键词 并存,自由度,认知,干扰对齐,干扰消除

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.2.029

Degrees of Freedom of Coexistence Network with Point-to-Point and Two-user Broadcast Channels

LIU Feng WANG Yuan-yuan ZENG Lian-sun

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

Abstract The degrees of freedom (DoF) of two networks with coexistence was investigated in this paper. One is a point-to-point(PTP) channel and the other is a two-user broadcast channel (BC). Four system models were considered. First, BC as secondary network is not cognitive of PTP (primary network) transmitter's message. Second, PTP as secondary network is not cognitive of BC transmitters' messages. Third, BC as secondary network is cognitive of PTP transmitter's message. Fourth, PTP as secondary network is cognitive of BC transmitters' messages. The achievable DoF was obtained by using interference alignment and interference neutralization. Besides, the outer bound was proven. Compared with the other three system models, the achievable bound is biggest when BC as secondary network is cognitive of PTP transmitters' message.

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

1 引言

随着移动通信业务的大量普及以及各种无线应用模式的不断涌现,现有的无线频谱资源已越来越无法满足移动通信产业发展的需求。由于每一种无线通信系统独立地使用一个频段,这种固定的频谱授权方式虽然能够避免系统间或小区间的干扰,但是严重浪费了频谱资源。认知无线电技术和协作通信技术之所以能引起如此多的关注,一个重要原因在于其有望解决频谱资源利用率低这一瓶颈。认知无线电最早由 Mitola 提出,其基本思想是:次网络发送端或接收端与主网络建立认知与协作^[1],在同一频谱资源范围内共享信号空间,通过先进的干扰管理策略来提高整个系统的容量。本文讨论的次网络与主网络建立的是消息认知关系。

研究多用户的无线网络的容量对于无线网络的设计是非常重要的。由于直接研究网络的容量区域通常是困难的,因此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),也称为空间复用增益。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 $C(\text{SNR}) = d \log(\text{SNR}) + o(\log(\text{SNR}))$ ^[2], $C(\text{SNR})$ 表示网络容量,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,可以认为容量是由自由度决定的。自由度外界是一个极限值,是无法突破的,研究其外界对于网络规划具有理论上的指导意义。另一方面为自由度内界,指的是用某种方法,譬如波束成型、迫零、脏纸编码、干扰对齐等方法所达到的自由度值;由于内界是可实现的,自由度内界一般也称为可达自由度。通过某种方案使得内界接近于外界,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。为了提高系统容量,自由度内界的研究一直备受无线通信界和学术界的关注。

在多用户无线网络中,干扰是影响自由度的一个主要因素,存在两种处理干扰的基本方法^[3]:干扰对齐和干扰消除。

到稿日期:2015-01-16 返修日期:2015-05-13 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)资助。

刘 锋(1976—),男,博士,讲师,主要研究方向为无线通信与网络;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;曾连荪(1962—),男,教授,主要研究方向为定位导航系统。

干扰对齐的基本思想^[4-6]:接收端将所有的干扰信号尽量对齐在一个较小的信号维度内,同时保证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。线性干扰对齐^[7]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实现的方法。干扰消除指的是在满足一定的条件下,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^[8]。

对于 PTP、BC、MAC、IC 等信道,其自由度已经获知^[9];但对于更复杂的信道,例如两个或多个信道构成的复合信道,其自由度的研究仅有少量的进展。文献[10]用干扰对齐的方法分析了两个 MAC 共存时的自由度。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得到的自由度比前者用迫零方法得到的要大。干扰对齐在复杂网络中的应用越来越广泛,但是将干扰对齐与认知网络相结合的研究还是相对较少。

本文研究 PTP 和两用户 BC 并存时的自由度,运用干扰对齐、干扰消除的方法进行干扰管理,分析 4 种情形的自由度:1)主网是 PTP,次网是 BC,次网发送端对主网发送端消息无认知;2)主网是 BC,次网是 PTP,次网发送端对主网发送端消息无认知;3)主网是 PTP,次网是 BC,次网发送端认知主网发送端消息;4)主网是 BC,次网是 PTP,次网发送端认知主网发送端消息。

本文第 2 节介绍系统模型。第 3 节分析当次网未认知主网发送端消息时的可达自由度,该部分具体分为两小节:主网是 PTP,次网是两用户的 BC;主网是两用户的 BC,次网是 PTP。第 4 节探讨了当次网认知主网发送端消息时的可达自由度。第 5 节给出了 4 种情形的自由度外界。第 6 节分析了自由度的区域。最后总结全文。

2 系统模型

在 PTP 信道与两用户的 BC 共存的组网环境中,一个系统发送端的消息对于另外一个系统的接收端来说均是干扰。 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 $M_k = \{1, 2, \dots, 2^{nR_k}\}$, 且被编码成码长为 n 的码字 $X_i^k, k \in \{1, 2, 3\}$ 。根据发送端之间可能存在的消息认知,发送端发送的信号记作: $X_i = v_i^1 m_1 + v_i^2 m_2 + v_i^3 m_3$, v_i^j 是消息 m_j 对应的预编码向量,可以为 $\emptyset, i, j \in \{1, 2, 3\}$ 。发送端信号受功率约束: $E\{|X_i|^2\} \leq P$ 。接收端接收到的信号为 $Y_j, Y_j = h_{j1} X_1 + h_{j2} X_2 + h_{j3} X_3 + Z_j$ 。其中 Y_j 是第 j 个接收端输出信号; h_{ji} 为发送数据流 X_i 到接收端 RX_j 的无线信道的影响因子,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,均值为 0,方差为 1。整个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,使得平均差错概率 $p_e \rightarrow 0$ 。所有可达的码率元组的集合称为容量区域,系统总的

自由度记作 d_Σ , 定义 $d_\Sigma = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{C_\Sigma(P)}{\log(P)}$, 其中 $C_\Sigma(P) = \max_{(R_1, R_2, R_3) \in \mathcal{C}} (R_1 + R_2 + R_3)$ 。

3 次网未认知主网发送端消息时的可达自由度分析

求复合网络的可达自由度时,可以在接收端采用干扰对齐与干扰消除相结合的方法。在每个接收端,想要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,在接收端应该尽量将干扰消息消除,此时干扰将不占用信号空间;如果无法实现消除,应考虑采用干扰对齐的方法来尽量压缩干扰所占用的信号空间。本文讨论的是两个网络并存的情形,优先考虑主网络接收端的干扰消息的消除,其次考虑干扰对齐。对于次网络的接收端,也是如此。

3.1 PTP 为主网络、BC 为次网络时的可达自由度

在 3×3 的单天线的干扰信道(IC)中,当用户 2 和用户 3 的发送端互相认知消息时,系统模型如图 1 所示,整个网络相当于点对点(PTP)的主网络与两用户的 BC 作为的次网络并存,如图 2 所示。

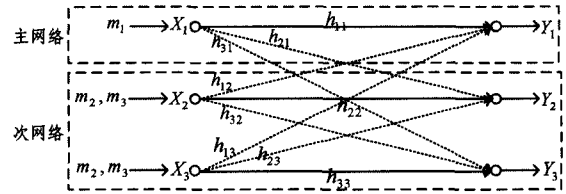


图 1 次网络发送端消息互相认知

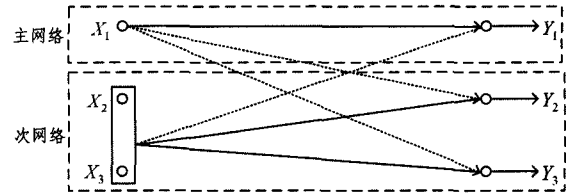


图 2 主网为 PTP,次网为 BC

发送端信号记作:

$$X_i = v_i^1 m_1 + v_i^2 m_2 + v_i^3 m_3 \quad (1)$$

其中, v_i^j 是要设计的预编码向量, v_i^j 可以为 \emptyset , 表示用户 i 发送端不发送消息 $m_j, i, j \in \{1, 2, 3\}$ 。

根据发送端认知消息的情况,发送端信号记作:

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

接收端输出信号记作:

$$Y_j = h_{j1} X_1 + h_{j2} X_2 + h_{j3} X_3 + Z_j \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)整理得到接收端信号:

$$Y_j = h_{j1} v_1^1 m_1 + (h_{j2} v_2^2 + h_{j3} v_3^2) m_2 + (h_{j2} v_2^3 + h_{j3} v_3^3) m_3 + Z_j \quad (4)$$

对于主网络接收端 RX_1 来说,其期望信号是 m_1 , 而消息 m_2, m_3 是干扰信号。为了得到期望信号 m_1 , 理想情况是将干扰信号 m_2, m_3 均消除,从表达式(4)中可以看到,各干扰信号前面的系数均由两项组成,因此可以将干扰消息消除,从而得到期望信号 m_1 , 即满足以下关系:

$$\begin{cases} h_{12} v_2^2 + h_{13} v_3^2 = 0 \\ h_{12} v_2^3 + h_{13} v_3^3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

在次级网络的接收端 RX_2 , 由于干扰消息 m_3 已经被消除一次,即得到一个关于预编码向量 v_2^2 与 v_3^2 的等式: $f_1(v_2^2, v_3^2) = 0$, 如果再对干扰消息 m_3 进行消除,即 $f_2(v_2^2, v_3^2) = 0$, 那

么同时满足 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: $v_2^3 = -\frac{h_{13}}{h_{12}} v_3^3$, 根据 f_2 等式得到: $v_2^3 = -\frac{h_{23}}{h_{22}} v_3^3$. 同时满足 $v_2^3 = -\frac{h_{13}}{h_{12}} v_3^3$ 和 $v_2^3 = -\frac{h_{23}}{h_{22}} v_3^3$ 的条件是 $\frac{h_{23}}{h_{22}} = \frac{h_{13}}{h_{12}}$, 但是信道系数 h_{ji} 取自一个连续分布函数, 取值是随机的, 因此正好满足上述条件的概率几乎为零, 所以在 RX_2 端无法消除 m_3 , 又因为干扰消息 m_1 前面的系数成分只有一项, 因此无法进行消除。综上, 只能考虑干扰消息 m_1, m_3 的对齐, 得到:

$$h_{22} v_2^3 + h_{23} v_3^3 = h_{21} v_1^1 \quad (6)$$

对于接收端 RX_3 , 其处理方案与在 RX_2 端的处理方式类似, 由于无法消除 m_1, m_2 , 为了尽量减少干扰信号所占的空间, 就考虑将干扰信号对齐, 即:

$$h_{32} v_2^3 + h_{33} v_3^3 = h_{31} v_1^1 \quad (7)$$

根据式(5)~式(7), 随机选取预编码向量 v_1^1 , 使得其他预编码向量 $v_2^2, v_2^3, v_3^2, v_3^3$ 与 v_1^1 的关系如图3所示。

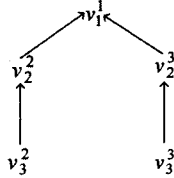


图3 预编码向量关系

其中 $a \rightarrow b$ 的图标表明 a 可以用 b 表示。

观察上述关系图可以发现, 各个预编码向量之间没有冲突, 且可以由预编码向量 v_1^1 唯一线性表示:

$$\begin{aligned} v_2^2 &= A v_1^1, v_2^3 = B v_1^1 \\ v_3^2 &= -\frac{h_{12}}{h_{13}} v_2^2 = -B \frac{h_{12}}{h_{13}} v_1^1, v_3^3 = -\frac{h_{12}}{h_{13}} v_2^3 = -A \frac{h_{12}}{h_{13}} v_1^1 \end{aligned} \quad (8)$$

$$A = h_{21} / (h_{22} - \frac{h_{23} h_{12}}{h_{13}}), B = h_{31} / (h_{32} - \frac{h_{33} h_{12}}{h_{13}})$$

经过干扰对齐和消除处理后, 接收端接收到的信号:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_1 &= h_{11} v_1^1 m_1 + Z_1 \\ \tilde{Y}_2 &= A(h_{22} - \frac{h_{23} h_{12}}{h_{13}}) v_1^1 m_2 + h_{21} v_1^1 (m_1, m_3) + Z_2 \\ \tilde{Y}_3 &= B(h_{32} - \frac{h_{33} h_{12}}{h_{13}}) v_1^1 m_3 + h_{31} v_1^1 (m_1, m_2) + Z_3 \end{aligned} \quad (9)$$

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, m_3 , 接收端 RX_2 对齐了干扰消息 m_1, m_3 , 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 满足关系:

$$\begin{cases} 0 \leq \max(d_1, d_3) + d_2 \leq 1 \\ 0 \leq \max(d_1, d_2) + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_i \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $i \in \{1, 2, 3\}$ 。在没有进行符号扩展且接收端是单天线时, 同一时刻最多只能解码出一个消息。由于自由度可以被解释成可解析的信号空间维度的个数, 因此每个自由度只能取0或者1。但是通过符号扩展的方法, 可以使自由度取0到1之间的任何有理数值。 $\max(d_i, d_j)$ 表示将消息 m_i, m_j 放到同一个空间中, 而这个空间的大小取这两个消息的自由度的最大值。

式(10)等价于式(11):

$$\begin{cases} 0 \leq d_1 + d_2 \leq 1 \\ 0 \leq d_3 + d_2 \leq 1 \\ 0 \leq d_1 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_i \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

其中 $i \in \{1, 2, 3\}$ 。可以用线性规划的方法求得 $\sum_{i=1}^3 d_i$ 的最大值。线性目标函数为 $d_{\text{inner}} = \sum_{i=1}^3 d_i$, 约束条件为式(11)。得到可达自由度 $d_{\text{inner}} = 3/2$ 。

3.2 BC为主网络, PTP为次网络时的可达自由度

用户1、用户2发送端的消息互相认知时的信道模型如图4所示, 相当于一个BC网络与PTP网络并存, 如图5所示。

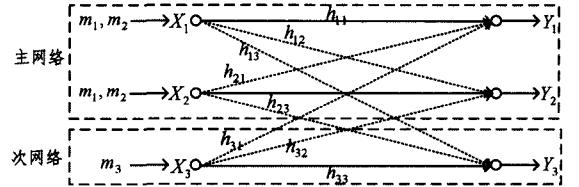


图4 次网络发送端消息互相认知

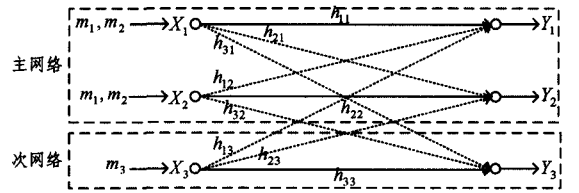


图5 主网为BC, 次网为PTP

发送端信号记作:

$$X_1 = v_1^1 m_1 + v_1^2 m_2, X_2 = v_2^1 m_1 + v_2^2 m_2, X_3 = v_3^3 m_3 \quad (12)$$

接收端信号:

$$\begin{aligned} Y_j &= h_{j1} X_1 + h_{j2} X_2 + h_{j3} X_3 + Z_j \\ &= (h_{j1} v_1^1 + h_{j2} v_2^1) m_1 + (h_{j1} v_1^2 + h_{j2} v_2^2) m_2 + h_{j3} v_3^3 m_3 + Z_j \end{aligned} \quad (13)$$

在 RX_1 端, 观察接收到的信号可以发现: 干扰消息 m_2 前面的系数成分只有2项, 根据3.1节中的分析, 干扰消息 m_2 最多能被消除一次, 干扰消息 m_3 只能进行对齐或者不处理。在 RX_2 端, 接收端的处理方式与 RX_1 端类似: 消除干扰消息 m_1 。在 RX_3 端, 其干扰信号 m_1, m_2 已经不能再被消除, 因此将其对齐。

综上, 得到每个接收端的处理方案:

$$\begin{cases} RX_1: h_{11} v_1^2 + h_{12} v_2^2 = 0 \\ RX_2: h_{21} v_1^1 + h_{22} v_2^1 = 0 \\ RX_3: h_{31} v_1^1 + h_{32} v_2^1 = h_{31} v_1^2 + h_{32} v_2^2 \end{cases} \quad (14)$$

随机选取预编码向量 v_1^1, v_3^3 (由于 v_1^1, v_3^3 是随机选取的, 因此能够保证向量 v_1^1, v_3^3 的线性独立), 使得其他预编码向量 v_1^2, v_2^1, v_2^2 满足:

$$v_2^1 = -\frac{h_{21}}{h_{22}} v_1^1, v_2^2 = -\frac{h_{11}}{h_{12}} v_1^2 = -A \frac{h_{11}}{h_{12}} v_1^1 \quad (15)$$

$$A = (h_{31} - h_{32} \frac{h_{21}}{h_{22}}) / (h_{31} - h_{32} \frac{h_{11}}{h_{12}})$$

根据干扰处理方式得到自由度的约束关系:

$$\begin{cases} 0 \leq d_1 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_2 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq \max(d_1, d_2) + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_i \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

式(16)可以简化为

$$\begin{cases} 0 \leq d_1 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_2 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_i \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

根据线性目标函数: $d_{inner} = \sum_{i=1}^3 d_i$, 结合约束条件(17), 当 $d_1 = d_2 = 1$ 且 $d_3 = 0$ 时, 得到可达自由度最大值 $d_{inner} = 2$, 此时次级用户 (PTP) 并不发送消息, 整个系统模型简化为一个两用户的 BC 信道, 得到可达自由度为 2。

4 次网认知主网发送端消息时的可达自由度分析

4.1 BC 为次网且认知主网 PTP 消息时的可达自由度

该情形的信道模型如图 6 所示。

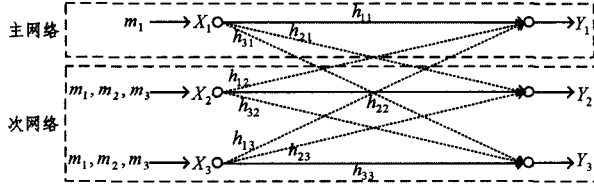


图 6 次网(BC)认知主网(PTP)发送端消息

发送端信号:

$$\begin{cases} X_1 = v_1^1 m_1 \\ X_2 = v_2^1 m_1 + v_2^2 m_2 + v_2^3 m_3 \\ X_3 = v_3^1 m_1 + v_3^2 m_2 + v_3^3 m_3 \end{cases} \quad (18)$$

接收端信号:

$$Y_j = (h_{j1} v_1^1 + h_{j2} v_2^1 + h_{j3} v_3^1) m_1 + (h_{j2} v_2^2 + h_{j3} v_3^2) m_2 + (h_{j2} v_2^3 + h_{j3} v_3^3) m_3 + Z_j \quad (19)$$

根据干扰处理原则即优先考虑主网络接收端信号的处理, 在接收端尽量消除干扰消息, 无法消除的情况下, 考虑干扰信号的对齐。那么设计的干扰处理方案如下:

$$\begin{cases} RX_1: h_{12} v_2^2 + h_{13} v_3^2 = 0 \\ h_{12} v_2^3 + h_{13} v_3^3 = 0 \\ RX_2: h_{21} v_1^1 + h_{22} v_2^1 + h_{23} v_3^1 = 0 \\ RX_3: h_{31} v_1^1 + h_{32} v_2^1 + h_{33} v_3^1 = 0 \end{cases} \quad (20)$$

得到自由度的约束关系:

$$\begin{cases} 0 \leq d_2 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_i \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

当 $d_2 + d_3 = 1$ 且 $d_1 = 1$ 时, 可达自由度最大值为 2。

4.2 PTP 为次网且认知主网 BC 消息时的可达自由度

该情形的信道模型如图 7 所示。

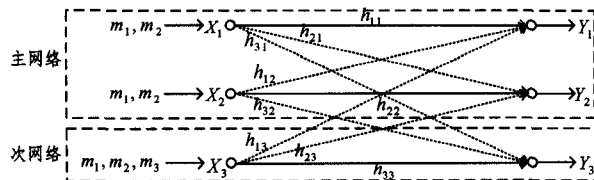


图 7 次网(PTP)认知主网(BC)发送端消息

该网络的输入输出关系:

$$Y_j = (h_{j1} v_1^1 + h_{j2} v_2^1 + h_{j3} v_3^1) m_1 + (h_{j1} v_1^2 + h_{j2} v_2^2 + h_{j3} v_3^2) m_2 + h_{j3} v_3^3 m_3 + Z_j \quad (22)$$

依然根据主网络优先处理干扰的原则, 设计干扰处理方案, 得到:

$$\begin{cases} RX_1: h_{11} v_1^2 + h_{12} v_2^2 + h_{13} v_3^2 = 0 \\ RX_2: h_{21} v_1^1 + h_{22} v_2^1 + h_{23} v_3^1 = 0 \\ RX_3: h_{31} v_1^1 + h_{32} v_2^1 + h_{33} v_3^1 = 0 \\ h_{31} v_1^2 + h_{32} v_2^2 + h_{33} v_3^2 = 0 \end{cases} \quad (23)$$

因此, 得到自由度不等式:

$$\begin{cases} 0 \leq d_1 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_2 + d_3 \leq 1 \\ 0 \leq d_i \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

可以发现, 当 $d_1 = d_2 = 1$ 且 $d_3 = 0$ 时, 可达自由度最大值为 2, 此时次级用户 3 并不发送消息, 而是辅助主用户发送消息。

5 自由度外界分析

文献[13]对两用户认知高斯干扰信道的自由度进行了归纳: 当仅有一个发送端(或者只有一个接收端, 或者只有一个对应的发送接收对)认知另一个发送端的待发消息时, 总的自由度为 M , M 为每个结点的天线数; 当两个发送端(或者两个接收端或者交叉的发送接收对)互相认知对方的待发消息时, 总的自由度 $2M$ 。文献[14]也给出了一个结论: 两用户的多人多出(MIMO)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, 得出的自由度与没有协作的两用户 MIMO 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。利用上述两个结论推导外界。

5.1 次网对主网发送端消息无认知时的自由度外界

PTP 信道与两用户 BC 信道共存时, 当 PTP 发送端不发送消息时, 系统整个网络变成两用户的 BC 信道^[15], 自由度外界为 2, 当 PTP 发送端与 BC 中的任意一个发送端联合求自由度外界时, 自由度均为 1。由于图 1 和图 4 两种情况下的发送端的消息认知数均相同, 无论是 PTP 作为主网络还是 BC 作为主网络, 网络的自由度外界相等。不妨以图 1 的系统模型为例, 图 4 求自由度外界的方法与其类似。

令 $m_1 = \emptyset$, 即用户 1 不发送消息 m_1 , 整个网络变成两用户的 BC 信道: 其发送端有 2 根天线, 接收端分别有 1 根天线, 根据 $d_{BC} = \min(M, N_1 + N_2) = \min(2, 2) = 2$, 得到:

$$0 \leq d_2 + d_3 \leq 2 \quad (25)$$

令 $m_2 = \emptyset$, 让用户 2 和用户 3 发送端、接收端互相协作, 整个网络变成两用户的 IC 信道, 信道模型如图 8 所示。

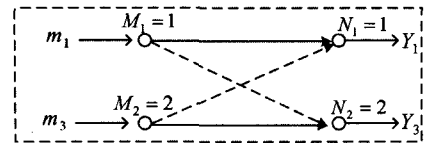


图 8 $m_2 = \emptyset$ 时的系统模型

根据两用户 MIMO-IC 的自由度公式: $d_{IC} = \min(M_1 + M_2, N_1 + N_2, \max(M_1, N_2), \max(M_2, N_1))$, 可以得到:

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

令 $m_3 = \emptyset$, 同理得到:

$$0 \leq d_1 + d_2 \leq 1 \quad (27)$$

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

5.2 次网对主网有消息认知时的自由度外界

5.2.1 主网为 PTP、次网是 BC 时的自由度外界

令 $m_1 = \emptyset$, 即用户 1 不发送消息 m_1 , 整个信道变成两用

户的 BC 信道,其发送端有 2 根天线,接收端分别有 1 根天线,根据 $d_{BC} = \min(M, N_1 + N_2) = \min(2, 2) = 2$, 得到:

$$0 \leq d_2 + d_3 \leq 2 \quad (28)$$

令 $m_2 = \emptyset$, 此时虽然用户 2 的消息 $m_2 = \emptyset$, 但是用户 2 仍然对消息 m_3 有认知。让用户 1 和用户 2 的发送端协作,使得用户 1 认知了消息 m_3 , 此时用户 1 和用户 3 发送端的消息互相认知,可以得到:

$$0 \leq d_1 + d_3 \leq 2 \quad (29)$$

同理得到:

$$0 \leq d_1 + d_2 \leq 2 \quad (30)$$

所以,总的自由度外界 $d_{up} = d_1 + d_2 + d_3 \leq 3$ 。

5.2.2 主网为 BC、次网是 PTP 时的自由度外界

令 $m_1 = \emptyset$, 整个网络可简化为两用户的认知 IC: 只有 RX_3 是认知的,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 $m_3 = \emptyset$, 整个网络可简化为两用户的 BC: 发送端有 2 根天线,接收端分别有 1 根天线,得到:

$$0 \leq d_1 + d_2 \leq 2 \quad (33)$$

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

6 自由度区域

令主网自由度为 d_p , 次网自由度为 d_s (适用于各个系统模型), 求次网是 BC 且未认知主网 (PTP) 消息时的整个系统的可达自由度时, 根据式 (11), 得到主次网可达自由度的关系: $0 \leq d_p \leq 1, 0 \leq d_s \leq 1, d_s \leq 2 - 2d_p$, 如图 9(a) 中虚线部分所示。该情形下自由度外界主次网关系为: $0 \leq d_p \leq 1, 0 \leq d_s \leq 2, d_s \leq 2 - 2d_p$, 如图 9(a) 中实线部分所示。

当次网是 PTP, 且未认知主网 (BC) 消息时, 根据可达自由度的关系式 (17) 得到主次网关系: $0 \leq d_p \leq 2, 0 \leq d_s \leq 1, d_s \leq 1 - \frac{1}{2}d_p$ 。根据该种情形的自由度外界关系, 得到主次网自由度关系: $0 \leq d_p \leq 2, 0 \leq d_s \leq 1, d_s \leq 1 - \frac{1}{2}d_p$, 可以发现此种情形下自由度的内外界是紧凑的, 如图 9(b) 所示。

当次网是 BC 且认知主网 (PTP) 消息时, 由式 (21) 得到可达自由度主次网自由度关系: $0 \leq d_p \leq 1, 0 \leq d_s \leq 1$, 如图 9(c) 中的 OBCE 构成的虚线区域部分所示。由式 (28) 一式 (30) 得到主次网自由度外界关系: $0 \leq d_p \leq 1, 0 \leq d_s \leq 2$, 如图 9(c) 中的 AOED 构成的实线区域部分所示。根据时间共享 (time-sharing) 的原理, 第一象限中两个截点 $E(1, 0)$ 、 $A(0, 2)$ 连线构成的自由度区域 AOE 是可达的。由于点 $C(1, 1)$ 表示的自由度状态可以通过干扰对齐的方法获得, 因此 AOEC 构成的自由度区域也是可达的。

当次网是 PTP 且认知主网 (BC) 消息时, 可达自由度和外界的主次网关系均为 $d_s \leq 1 - \frac{1}{2}d_p, 0 \leq d_p \leq 2, 0 \leq d_s \leq 1$, 即内外界是紧凑的, 如图 9(b) 所示。

综合上述分析, 可以发现 PTP 与两用户 BC 共存时, 若主网是 BC 网络, 不管次网 (PTP) 是否认知主网 (BC) 发送端消息, 得到的自由度内外界均是紧凑的, 并且两种情形的自由度

是相等的, 次网对主网发送端消息的认知并没有使得自由度增加。比较图 9(a) 和图 9(c) 中的可达自由度区域, 可以得到: 当主网是 PTP、次网是 BC 并且次网认知主网发送端消息时, 可达自由度有所改善。

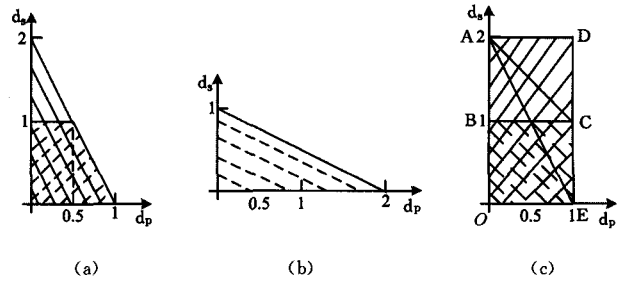


图 9 自由度区域

结束语 本文分析了 PTP 与两用户 BC 并存时的自由度, 具体讨论了当 PTP 为主网或者 BC 为主网时, 用于干扰对齐和干扰消除相结合的方法得到整个网络的可达自由度。另外, 根据主次网之间可能存在的认知关系, 讨论了当次网认知主网发送端消息时整个系统的自由度内外界, 并且得出结论: 当主网是 BC、次网是 PTP 且次网认知主网发送端消息时得到的自由度与次网对主网无消息认知时的自由度相同, 即次网对主网消息的认知并没有改善自由度; 而次网 (BC) 认知主网 (PTP) 消息时与次网没有认知主网消息相比, 自由度有明显提升。

参考文献

- [1] 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
- [2] Cadambe V R, Jafar S A. Interference alignment and the degrees of freedom of wireless X networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(9): 3893-3908
- [3] Shakeri Z, Chaghoooshi A F, Mirmohseni M, et al. Degrees of freedom in a three-user cognitive interference channel[C] // 2013 Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT). IEEE, 2013; 1-6
- [4] Cadambe V R, Jafar S A. Interference Alignment and Spatial Degrees of Freedom for the K User Interference Channel[C] // ICC. 2008; 971-975
- [5] Maddah-Ali M A, Motahari A S, Khandani A K. Signaling over MIMO multi-base systems; Combination of multi-access and broadcast schemes[C] // 2006 IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, 2006; 2104-2108
- [6] Maddah-Ali M A, Motahari A S, Khandani A K. Communication over MIMO X channels; Interference alignment, decomposition, and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3457-3470
- [7] 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
- [8] 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

- [9] Jafar S A, Fakhereddin M J. Degrees of freedom for the MIMO interference channel [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(7): 2637-2642
- [10] Lee N, Shin W, Heath R W, et al. Interference alignment with limited feedback for two-cell interfering MIMO-MAC[C]//2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, 2012: 566-570
- [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] 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
- [14] 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.
- [15] Yu W, Cioffi J M. Sum capacity of Gaussian vector broadcast channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(9): 1875-1892

(上接第 117 页)

```
(sequential-networks (xmasnetwork-sequential-networks * ntk * ))
(data (get-source-data 0 components))
(queue17-num (len (get-queue-data 17 channels)))
(queue13-num (len (get-queue-data 13 channels))))
(implies (and (xmasnetworkp * ntk * )
              (get-source-oracle 0 components)
              (get-sink-oracle 15 components)
              (not (endp (get-queue-data 8 channels)))
              (not (equal queue13-num (get-queue-length 13 components)))
              (not (equal queue17-num (get-queue-length 17 components))))
         (data-equal data (get-sink-data 15 (run-network-n channels components sequential-networks 6)))
```

结束语 本文的工作是基于 xMAS 模型的 SpaceWire 信誉逻辑的形式验证。对通信系统中信誉逻辑进行抽象建立 xMAS 模型,提取并成功验证了可发送性、可接收性和数据一致性等 3 个关键属性,证明其设计是正确的,为验证指导下的系统设计提供有效参考。另外本文用 ACL2 对 xMAS 模型进行形式化,建立的 xMAS 模型库可以重复利用,以提高模型验证工作的效率。

现有工作仅将信誉模块、发送模块和接收模块组合起来进行验证,在以后的工作中要对 SpaceWire 系统所有的模块建立规模更大的 xMAS 模型,提取更高层的属性,做到对 SpaceWire 规范的完备性验证,避免 SpaceWire 设计在未来的应用中可能造成的严重后果。此外在不影响原有 xMAS 元件的基础上,根据实际需要还可以对 xMAS 元件进行必要的扩展,让 xMAS 模型更加完善。

参 考 文 献

- [1] ECSS. Space Engineering: SpaceWire-Links, nodes, routers, and networks(ECSS-E-50-12A)[S]. The Netherlands: ESA Publications Division ESTEC, 2003
- [2] Chatterjee S, Kishinevsky M. Automatic Generation of Inductive Invariants from High-Level Microarchitectural Models of Communication Fabrics [J]. *Formal Methods in System Design*, 2012, 40(2): 147-169
- [3] Verbeek F, Schmaltz J. Hunting deadlocks efficiently in microarchitectural models of communication fabrics[C]//Formal Methods in Computer-Aided Design(FMCAD). 2011: 223-231
- [4] Chatterjee S, Kishinevsky M O. Quick formal modeling of communication fabrics to enable verification[C]//High Level Design Validation and TestWorkshop (HLDVT). IEEE, 2010: 42-49
- [5] Gotmanov A, Chatterjee S, Kishinevsky M. Verifying deadlock-freedom of communication fabrics [C] // *Verification, Model Checking, and Interpretation (VMCAI)*. 2011: 214-231
- [6] Ray S, Brayton R K. Scalable Progress Verification in Credit-Based Flow-Control Systems[C]//Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition(DATE). 2012: 905-910
- [7] Borrione D, Helmy A, Pierre L, et al. A generic model for formally verifying NoC communication architectures; a case study [C]//Networks-on-Chip (NOCS). 2007: 127-136
- [8] Verbeek F. Formal Verification of on-Chip Communication Fabrics[M]. Radboud University Nijmegen, 2013
- [9] van Gastel B, Schmaltz J. A formalisation of XMAS[C]//Electronic Proceeding in Theoretical Computer Science (EPTCS). 2013: 111-126
- [10] Kaufmann M, Moore J S, Manolios P. Computer-Aided Reasoning: An Approach[M]. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2000
- [11] Kaufmann M, Moore J S, Manolios P. Computer-Aided Reasoning: ACL2 Case Studies[M]. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2000
- [12] Joosten S J C, Verbeek F, Schmaltz J. WickedXmas: Designing and Verifying on-chip Communication Fabrics[C]//Design and Implementation of Formal Tools and Systems(DIFTS). 2014: 1-8
- [13] Kishinevsky M, Gotmanov A, Viktorov Y. Challenges in Verifying Communication Fabrics[C]//Interactive theorem proving (ITP). 2011: 18-21
- [14] Zhang Yu-peng, Shi Zhi-ping, Guan Yong, et al. Formal Verification of SpaceWire Decoding Circuit in HOL4[J]. *Journal of Chinese Systems*, 2013, 8: 1959-1963(in Chinese)
张玉鹏, 施智平, 关永, 等. SpaceWire 译码电路在 HOL4 中的形式化[J]. *小型微型计算机系统*, 2013, 8: 1959-1963
- [15] Dong Ling-ling, Guan Yong, Li Xiao-juan, et al. Verification for SpaceWire error detection mechanism by LTL model checking [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(22): 88-94(in Chinese)
董玲玲, 关永, 李晓娟, 等. 用 LTL 模型检验的方法验证 SpaceWire 检错机制[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(22): 88-94