



项目批准号	61571055
申请代码	F010301
归口管理部门	
收件日期	

# 国家自然科学基金 资助项目进展报告

资助类别： 面上项目

亚类说明：

附注说明： 常规面上项目

项目名称： 未来超高速毫米波网络下的高效传输机制研究

负责人： 邹卫霞 电话： 62281489

电子邮件： zwx0218@bupt.edu.cn

依托单位： 北京邮电大学

联系人： 刘迎华 电话： 62282612

直接费用： 51（万元） 执行年限： 2016.01-2019.12

填表日期： 2017年12月26日

国家自然科学基金委员会制（2012年）



## 报告正文

### 一、重要研究进展

#### (1) 毫米波系统中频域干扰对齐理论研究

毫米波系统带宽很宽，如45GHz系统，其带宽高达1.08GHz，在各个频域信道上天然经历独立衰落过程，这符合了频域多信道干扰对齐先决条件。

##### 1) 频域多信道干扰对齐系统用户容量

本课题深入研究了频域多信道干扰对齐系统，证明了对于具有M独立信道的网络，若网络内的每个用户的期望数据流数目为1，则网络自由度为2M-2。这表明M独立衰落信道的干扰网络的用户容量为2M-2。

假设频域多信道网络具有M个独立衰落信道以及K个用户（发射机与接收机）， $H(k,l)$ 表示发射机1到接收机k的信道矩阵，这里由于系统为频域多信道系统，则信道矩阵均为对角矩阵。 $V(1), \dots, V(K)$ 和 $U(1), \dots, U(K)$ 分别表示发射编码向量与接收编码向量。则干扰对齐条件要求：

其中条件（1）使得在每一个接收机处，干扰信号被约束至干扰子空间，条件（2）保证每一个接收机都能够将其对应的期望信号提取出来。

事实上，对于具有M个独立衰落信道的单数据流频域干扰对齐系统，若用户数为 $K=2M-1$ 时，系统仅具有退化的干扰对齐解，即此时所有的干扰对齐解仅能满足条件（1）而无法同时满足条件（2）。下面简略证明这一事实。考虑 $K=2M-1$ 的情形，并假设 $V(1), \dots, V(K)$ 和 $U(1), \dots, U(K)$ 为干扰对齐解。

首先，证明 $V(1), 1 \in \{1, \dots, M\}$ 和 $V(n), n \in \{M+1, \dots, 2M\}$ 可以相互唯一确定并相互线性表示。对于接收机 $k=M, \dots, 2M-1$ ，其干扰子空间可表示为： $I_m = \text{span}\{H(m,l)V(1), 1 \leq l \leq M-1\}$ ，从而在这些接收机处，接收解码向量 $U(m), M \leq m \leq 2M-1$ 可以通过求解干扰子空间的法向量来获取。考虑后M个发射机与接收机，由干扰对齐条件（1），对于发射机 $n=M, \dots, 2M-1$ 来说，其发射编码向量 $V(n), n \in \{M, \dots, 2M\}$ 可由子空间 $\text{span}\{H(m,n)U(m), M \leq m \leq 2M-1, m \neq n\}$ 的法向量来获取。从而 $V(n), n \in \{M+1, \dots, 2M\}$ 可以由 $V(1), 1 \in \{1, \dots, M\}$ 线性表示。于是，可以得到关于 $V(1), 1 \in \{1, \dots, M\}$ 和 $V(n), n \in \{M+1, \dots, 2M\}$ 的一组线性方程： $V(n) = f_n(V(1), 1 \leq l \leq M), n \in \{M+1, \dots, 2M\}$ 。同理， $V(1), 1 \in \{1, \dots, M\}$ 可由 $V(n), n \in \{M+1, \dots, 2M\}$ 线性表示，又可以得到另一组线性方程 $V(1) = f_1(V(n), M+1 \leq n \leq 2M), 1 \in \{1, \dots, M\}$ 。由这两组线性方程，可以得到关于 $V(m), m \in \{1, \dots, M\}$ 的线性方程：

然后，由该线性方程可以求得 $V(m)$ 所应满足的一个必要条件：

由（4）可知， $V(m)$ 必为 $F(m)$ 的0特征值或1特征值所对应的特征向量。

最后，来分析 $F(m)$ 。事实上， $F(m)$ 是由M-1个随机对角矩阵G构成，而每一个G均由信道矩阵H经过有限次的乘法运算得到。而 $F(m)$ 的构成式可看做具有M-1个自变量的随机线性函数，更进一步的， $F(m)$ 可以看做M维空间内的一个随机超平面上的随机点并且该超平面方程的系数为随机变量。显然，在该随机超平面上，可以通过适当地选择G以使得 $F(m)$ 具有M-1个元素为1（或者0），然而 $F(m)$ 将具有至少一个元素为1（或者0）的概率是0。



从而 $F(m)$ 将至少有一个元素为0或者1的概率为0。因此, $V(m)$ 将至少有一个元素为0。更进一步,由(4)可以得到 $V(m), m \in \{1, \dots, M\}$ 相互表出的线性表示式,因此可以得出结论:对于所有的 $l \in \{1, \dots, 2M\}$ ,  $V(l)$ 至少有一个相同位置元素为0。

从而,在该情况下,干扰对齐解均为退化解。

综上所述,可知对于具有 $M$ 个独立衰落信道的单数据流频域干扰对齐系统,当用户数 $K$ 为 $2M-1$ 时系统仅存在退化解,于是系统只有在用户数小于 $2M-1$ 时才具有满足条件(2)的干扰对齐解,因此其用户容量为 $2M-2$ 。

基于此,我们提出干扰对齐复用技术原理。在传统的频分复用系统中,3个独立衰落信道将分别用于支持3对用户同时通信。而采用干扰对齐复用技术后,3个独立信道可同时支持4对用户通信,并且所有用户同时在3个信道上收发信息,而系统中的每个收发终端均采用干扰对齐技术对信号进行编解码,如图1所示。从用户容量的角度来看,采用干扰对齐技术后,相对于传统频分复用系统,3信道系统的频谱利用率将提升33.3%。

## 2) 3信道4用户系统的解析解

本课题深入探讨了3信道4用户频域干扰对齐系统,并在理论上给出了系统的解析解。基于该解析解,采用了模拟退火技术研究了系统在网络和速率意义下的最优干扰对齐解,称之为模拟退火下的干扰对齐算法(Simulated Annealing Interference Alignment, SAIA算法)。图2比较了经典的Max-SINR算法、Min-IL算法、单用户容量、3用户频分复用容量以及4用户无干扰对齐下的用户速率性能。SAIA算法在低信噪比时的网络和速率性能略低于Max-SINR算法,而在高信噪比时,其性能明显高于Max-SINR算法,亦即SAIA能够有效克服高信噪比下Max-SINR算法过早收敛的问题。而Min-IL算法则明显差于SAIA算法,这是由于Min-IL算法的优化目标是找到干扰对齐解但并不关心所找到干扰对齐解的网络和速率性能,从而Min-IL算法将随机收敛于干扰对齐解空间内的点。

## 3) 频域多信道干扰对齐算法研究

前述的SAIA算法虽然能够完美解决3信道4用户干扰对齐系统,但对于独立信道数多于3的干扰对齐系统并不适合,这是因为在信道数增多后,SAIA算法的复杂度将迅速升高。而有的毫米波系统(如45GHz系统)支持至少5个频域信道,为了使得未来频域多信道干扰对齐技术得以顺利应用,本课题从网络和速率梯度角度研究了功率渐增下的梯度上升算法(Gradient Ascend under Power Increase, GAPI)。

### a) GAPI算法

关于频域多信道单数据流干扰对齐系统的网络和速率梯度函数,可以得出结论:当信号功率 $P$ 趋于无穷小时,网络和函数 $R$ 将具有唯一的局部最优值点,即全局最优值点。这是因为当信号功率 $P$ 趋于无穷小时,用户的期望信号自相关矩阵与干扰信号自相关矩阵均趋于0矩阵,从而可得唯一全局最优解为 $V(k) = v_m(H(kk)H^H(kk))$ 。而随着信号功率的增大,网络和速率函数将涌现出越来越多的局部最优值点,这将导致最优求解算法难以获取网络最优和速率。为此,本课题提出了GAPI算法。该算法从一个信号功率参数 $P$ 足够低的状态出发,采用梯度上升搜索获取当前的最优解,然后增大功率参数,再进行最优解搜索。算法通过采用功率逐级增大的方案以跟踪网络和速率全局最优解的变化趋势。以4信道6用户系统为例进行仿真,考虑了Max-SINR以及Min-IL算法作为对比,如图3所示。GAPI算法在高信噪比区域具有明显优于Max-SINR算法的性能。这是因为,随着信噪比的增加,网络和速率函数中将显现出越来越多的局部最优值,这导致了Max-SINR算法以



较大概率过早收敛于局部最优解。而GAPI算法却能够很好地跟踪全局最优解随信号功率变化的趋势，从而能较好地收敛于全局最优解。

#### b) Grad-PSO算法

GAPI算法基本能实现在任意信道数下的干扰对齐最优解的搜索，但随着信道数和用户数的增加，干扰对齐解的解空间会变得越来越复杂，解空间内会凸显出越来越多的局部最优解，所以其同样会以一定的概率陷入局部最优解。本课题结合粒子群搜索技术又提出了基于梯度信息的粒子群搜索（gradient-exploited particle swarm optimization algorithm - Grad-PSO）算法。

粒子算法是一种典型的解决此类问题的数值搜索算法，它以一定数量的粒子群体确保了较大的搜索空间，以向种群历史最佳位置学习确保了一定的收敛性。但是干扰对齐系统的解空间较为复杂，具有丰富的局部最优值，并且随着通信系统中用户数的增加，信噪比的升高，干扰对齐解空间的复杂性会越来越高，局部最优值越来越多，粒子群算法的搜索范围的广度以及收敛速度会变得不足，甚至导致无法求解。Grad-PSO算法通过对速度向量在位置向量的法平面上做投影以加强全局搜索能力，并在粒子群标准位置更新的基础上增加沿目标函数梯度方向的学习搜索来提高算法收敛速度和趋向全局最优值的能力。仿真中对比了Max-SINR、Min-IL以及GAPI算法。由图4及图5知，Grad-PSO和GAPI算法在高信噪比区域具有明显优于Max-SINR的性能。这是因为，随着信噪比的增加，网络和速率函数中将显现出越来越多的局部最优值，这导致了Max-SINR以较大概率过早收敛于局部最优解。Grad-PSO相对于GAPI算法有更广的搜索范围，更强的全局搜索性能，在多次独立实验中可以以更高的概率获得最优干扰对齐解。所以Grad-PSO算法下的干扰对齐解可以获得比GAPI算法更好的（平均）网络和速率性能。

#### (2) 毫米波系统下的频域干扰对齐实现方案

为解决多个交叠的BSS之间的干扰问题，提高OBSS (Overlap Basic Service Set, 交叠的基本业务集) 场景下系统的信道容量，课题研究了OBSS场景下的部分干扰对齐技术，在部分干扰对齐条件下的分布式干扰对齐算法基础上，把弱干扰加入分布式干扰对齐协方差矩阵，达到在迭代中消除强干扰的同时消除弱干扰的目的。然后在不同的功率衰减因子情况下，对算法的性能进行了仿真，仿真结果表明该算法可以有效提高系统的信道容量，并且弱干扰越大，改善效果越明显。

## 二、存在问题及解决方法

目前不存在问题

## 三、其他需要说明情况

无



## 研究成果目录

项目负责人通过ISIS系统，从文献库中检索研究成果或者按要求格式自行填入。请按照期刊论文、会议论文、学术专著、专利、会议报告、标准、软件著作权、科研奖励、人才培养、成果转化的顺序列出，其它重要研究成果如标本库、科研仪器设备、共享数据库、获得领导人批示的重要报告或建议等，应重点说明研究成果的主要内容、学术贡献及应用前景等。

项目负责人不得将非本人或非参与者所取得的科研成果，以及与受资助项目无关的科研成果列入报告中。发表的科研成果，项目负责人和参与者均应如实注明得到国家自然科学基金项目资助和项目批准号，科学基金作为主要资助渠道或者发挥主要资助作用的，应当将自然科学基金作为第一顺序进行标注。

### 期刊论文

#### 1. 第一作者论文

(1) Zou, Weixia<sup>(#)(\*)</sup>, Li, Hui, Wang, Ye, A new hierarchical beam search algorithm for wireless ad hoc networks in multipath channel scenario, AD Hoc Networks, 2017.4, 58: 105~111, 第三标注

### 会议论文

#### 1. 第一作者论文

(1) Zou, Weixia<sup>(#)(\*)</sup>, Zhao Yang, Differentiated Data Transmission Based on Instantly Decodable Network Coding, IEEE International Conference on Communication, Signal, Processing, and System, 哈尔滨, 2017.7.14-2017.7.15, 第一标注

### 人才培养

#### 1. 出站博士后/毕业博士/毕业硕士/在站博士后/在读博士/在读硕士

- (1) 王多万, 毕业硕士, 频域多信道干扰对齐研究及其在毫米波通信中的应用, 邹卫霞, 2014.9.1-2016.12.1
- (2) 王龙飞, 毕业硕士, 毫米波通信系统中3D 波束赋形与多播技术研究, 邹卫霞, 2014.9.1-2016.12.1
- (3) 卢文倡, 毕业硕士, 毫米波Massive MIMO 系统信道估计研究, 邹卫霞, 2014.9.1-2016.12.1
- (4) 李辉, 毕业硕士, 毫米波模拟波束赋形技术研究, 邹卫霞, 2014.9.1-2016.12.1
- (5) 徐悦, 毕业硕士, Massive MIMO系统中预编码技术的研究, 邹卫霞, 2014.9.1-2016.12.1