



分层异构无线网络中基于预编码的干扰抑制技术^{*}

任品毅¹, 杜清河^{1,2}, 孙黎¹, 徐大同¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049;

2. 东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要:传统宏蜂窝(macro cell)与低功率小蜂窝(small cell)共存的分层异构组网方案能有效地提高无线通信系统的容量。但宏蜂窝与小蜂窝间的同频干扰严重影响了通信质量,并阻碍了系统容量的进一步提升。近年来,利用 MIMO 预编码及空域衰落特性进行干扰抑制的相关技术成为新的研究热点。本文着重介绍分层异构无线网络中基于 MIMO 预编码的干扰抑制技术的研究进展。以典型的双层异构下行网络为例,分析了利用多天线预编码进行干扰抑制的基本方法,并在此基础上介绍了多种基于 MIMO 预编码的新型干扰抑制方案,最后讨论了分层异构网络中干扰抑制技术的未来研究方向。

关键词:分层异构无线网络;MIMO 预编码;干扰抑制;蜂窝通信网络

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.06.006

Precoding Based Interference Suppression for Heterogeneous Multi-Tiered Network

Ren Pinyi¹, Du Qinghe^{1,2}, Sun Li¹, Xu Datong¹

(1. The School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The coexistence of conventional macro cells and lowpower small cells form the heterogeneous multi-tiered networks, which can significantly improve the capacity of wireless communications systems. However, the interferences between the macro cells and small cells due to sharing the same frequency band severely degrade the quality of communications and prevent the system capacity from being further enhanced. With the wide application of multiple-input-multiple-output(MIMO) for the 4th generation(4G) mobile communications systems, the interference suppression techniques using MIMO precoding and spatially fading properties have become an attracting and popular research area. The recent progress in the areas of MIMO precoding based interference suppression was introduced. Using the two-tier downlink networks as the typical example scenario, the heterogeneous interference model was analyzed and that the key task for interference suppression which pointed out was to jointly design the precoding matrices at transmitters and the processing matrices at receivers and to solve for them in a successive order. Following this principle, several recently emerged MIMO-precoding schemes were further introduced. Finally, the future research direction for interference suppression over heterogenous multi-tiered networks was discussed.

Key words: heterogenous multi-tiered network, MIMO precoding, interference suppression, cellular communications network

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.61172091), 国家科技重大专项基金资助项目(No.2013ZX03003004-003), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(No.2011D10), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目



1 引言

随着无线通信与网络技术的发展,用户对高速率、高质量的无线传输业务的需求呈现爆炸式增长趋势。目前被广泛商用的第2代、第3代移动通信系统乃至后3代移动通信系统(B3G)已经逐渐无法满足用户日益增长的以多媒体业务为主的业务需求。一方面,传统宏蜂窝覆盖面积较大,导致频率复用率偏低,从而难以进一步提升系统容量;另一方面,传统宏蜂窝对于家庭、室内办公场所、地下建筑等传输损耗较大的环境而言,难以形成有效覆盖,因此存在较多的覆盖死角或空洞。

为了解决以上问题,3GPP组织在第2代、第3代移动通信系统向以LTE-Advanced(long term evolution-advanced)为代表的第4代移动通信系统演进的过程中,逐步推动了小蜂窝(small cell)技术的发展和标准化进程。小蜂窝是采用较小发射功率基站覆盖形成的范围在10 m到数百米的小型高速率网络。其通过高速有线回程链路与骨干网相连,主要服务于家庭、小型企业办公场所等宏蜂窝不能形成有效覆盖的区域,也可用于热点服务区域以提供高速率传输业务。小蜂窝通过复用宏蜂窝频率资源进行传输,从而形成了宏蜂窝、小蜂窝共存的分层异构网络架构。其中,不同的层级是指各种不同类型的蜂窝网络,而异构则强调了信号功率传输、覆盖范围的显著差异。由于覆盖范围较小,小蜂窝网络不会对宏蜂窝网络造成过大范围的干扰。因此,小蜂窝的引入既充分提高了频率资源复用率,又有效地填补了宏蜂窝覆盖空洞,因而被广泛认为是大幅提升移动通信系统容量的有效方案。

小蜂窝形式多种多样,依据其发射功率的取值和覆盖范围,从大到小可分为微蜂窝(micro cell)、微微蜂窝(picocell)、毫微微蜂窝(femto cell)。随着LTE-Advanced标准的

演进与通信网络技术的发展,各种类型小蜂窝网络的处理能力逐步增强,目前小蜂窝技术已经成为LTE-Advanced标准R12版本推进的重要技术之一^[1]。尽管小蜂窝网络覆盖范围小,但小蜂窝用户与邻近的宏蜂窝用户之间依然存在较强的相互干扰。此外宏蜂窝用户之间干扰、小蜂窝用户之间干扰等多种异构干扰形式将严重影响通信质量,并阻碍系统容量的进一步提升。因此,如何在分层异构蜂窝网络中进行用户信号间的干扰抑制是移动通信技术演进过程中亟待解决的问题。

目前,多天线传输(MIMO)技术已在第4代移动通信系统中得到了广泛应用。MIMO技术充分地开发了空域资源,大幅提高了频谱效率和系统容量。同时,使用MIMO预编码技术可以有效地抑制分层异构无线网络中的干扰,因而吸引了众多通信科研者的目光,成为近年来的研究热点^[2-4]。本文将着重介绍分层异构网络中基于MIMO预编码的干扰抑制技术的研究进展。以双层异构网络为例,介绍了面向干扰抑制的MIMO预编码技术的设计特点与新型解决方案,并讨论了分层异构网络中干扰抑制技术未来的研究方向。

2 分层异构无线网络的系统模型

本节以典型的双层异构无线网络场景为例,介绍了物理层信号的传输模型。考察的双层异构网络包括1个宏蜂窝基站(macro cell base station, MBS)、 N^M 个宏蜂窝用户(macro cell user, MU)、 K 个小蜂窝基站(small cell base station, SBS),其中第 k 个小蜂窝服务 N_k^S 个小蜂窝用户(small cell user, SU)。双层异构无线网络场景如图1所示。本文主要讨论下行链路传输,MBS对MU的通信和SBS对SU的通信构成了两个不同的网络层级。MBS和SBS可以通过回程链路交换信息。为了提高频谱利用率,MBS和

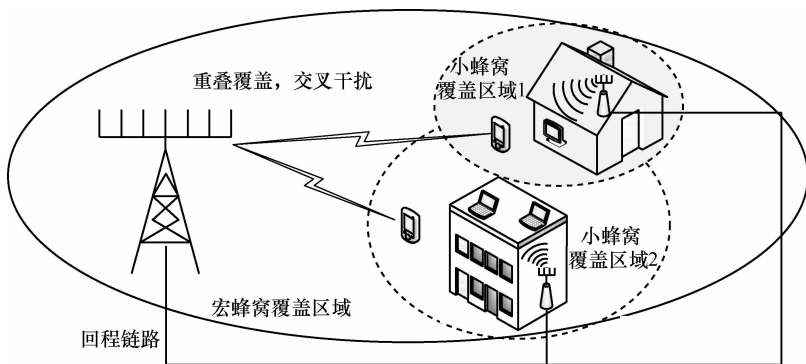


图1 宏蜂窝、小蜂窝重叠覆盖形成的双层异构无线网络场景示意

SBS 均在同一频段进行传输。由于 SU 和 MU 均可能处于宏蜂窝和小蜂窝的重叠覆盖下, MBS 和 SBS 的传输信号会在 SU 和 MU 接收机处形成相互干扰。

假设所有站点均装备多天线, 其中 MBS 的发射天线数为 R^M , 所有 MU 的接收天线数均为 R^M , 第 k 个 SBS 的

发射天线数为 R_k^S , 所有 SU 的接收天线数均为 R^{SU} , 收发天线之间的无线信道均为平坦衰落信道。相应的, 第 n 个 MU 的接收信号 y_n^M ($y_n^M \in \mathbb{C}^{R^M \times 1}$, $\mathbb{C}$ 为复数域)、第 k 个小蜂窝的第 u 个用户的基带接收信号 $y_{k,u}^S$ ($y_{k,u}^S \in \mathbb{C}^{R^{SU} \times 1}$) 可分别表示为:

$$y_n^M = \underbrace{H_n^{MM} \Gamma_n x_n}_{\text{第 } n \text{ 个 MU 的有用信号}} + \underbrace{H_n^{MM} \sum_{i=1, i \neq n}^{N^M} \Gamma_i x_i}_{\substack{\text{第 1 类干扰:} \\ \text{其他 MU 信号对目标 MU 信号的干扰}}} + \underbrace{\sum_{k=1}^K H_n^{MS,k} \sum_{u=1}^{N_k^S} \Phi_{k,u} z_{k,u}}_{\substack{\text{第 2 类干扰:} \\ \text{SU 信号对目标 MU 信号的干扰}}} + \xi_n^M \quad (1)$$

$$y_{k,u}^S = \underbrace{H_{k,u}^{SS,k} \Phi_{k,u} z_{k,u}}_{\substack{\text{第 } k \text{ 个小蜂窝的第 } u \text{ 个} \\ \text{用户的有用信号}}} + \underbrace{H_{k,u}^{SS,k} \sum_{j=1, j \neq u}^{N_k^S} \Phi_{k,j} z_{k,j}}_{\substack{\text{第 } k \text{ 个小蜂窝其他 SU 信号} \\ \text{对目标 SU 信号的干扰}}} + \underbrace{\sum_{l=1, l \neq k}^K H_{k,u}^{SS,l} \sum_{p=1}^{N_l^S} \Phi_{l,p} z_{l,p}}_{\substack{\text{其余小蜂窝的 SU 信号} \\ \text{对目标 SU 信号的干扰}}} + \underbrace{H_{k,u}^{SM} \sum_{i=1}^{N^M} \Gamma_i x_i}_{\substack{\text{第 4 类干扰:} \\ \text{来自 MU 信号的干扰}}} + \xi_{k,u}^S \quad (2)$$

其中, $x_n \in \mathbb{C}^{L_n \times 1}$ 为 MBS 向第 n 个 MU 传输的数据符号矢量 (L_n 为传输的符号流数), $\Gamma_n \in \mathbb{C}^{R^M \times L_n}$ 为第 n 个 MU 数据的预编码矩阵, $H_n^{MM} \in \mathbb{C}^{R^M \times R^M}$ 为 MBS 到第 n 个 MU 的信道矩阵, $H_n^{MS,k} \in \mathbb{C}^{R^M \times R_k^S}$ 为第 k 个 SBS 到第 n 个 MU 的信道矩阵, $\xi_n^M \in \mathbb{C}^{R^M \times 1}$ 为在第 n 个 MU 接收机引入的高斯白噪声矢量; $z_{k,u} \in \mathbb{C}^{L_{k,u} \times 1}$ 代表第 k 个 SBS 对其所属的第 u 个 SU 传输的数据信号 ($L_{k,u}$ 为传输的符号流数), $\Phi_{k,u} \in \mathbb{C}^{R_k^S \times L_{k,u}}$ 为对应的预编码矩阵, $H_{k,u}^{SS,l} \in \mathbb{C}^{R^{SU} \times R_k^S}$ 为第 l 个 SBS 到第 k 个 SBS 所属的第 u 个 SU 的信道矩阵, $H_{k,u}^{SM} \in \mathbb{C}^{R^{SU} \times R^M}$ 为 MBS 到第 k 个 SBS 所属的第 u 个 SU 的信道矩阵, $\xi_{k,u}^S \in \mathbb{C}^{R^{SU} \times 1}$ 为第 k 个 SBS 的第 u 个 SU 接收机端的高斯白噪声矢量。另外, 预编码矩阵的列数决定了发射信号每次传输时所含的符号数。当预编码矩阵的列数等于 1 时, 预编码矩阵就退化为波束成形矢量^[2,3]。

如式(1)和式(2)所示, 各 MU 和 SU 用户信号之间都存在相互干扰(具体干扰类型将在第 3 节中讨论)。这种情况对应 MU 和各 SU 距离较近的场景, 此时所有用户都被宏蜂窝和各小蜂窝重叠覆盖。在接收端, 各用户对接收信号进行线性处理。MU 和 SU 处理后的信号 $\tilde{y}_n^M$ 和 $\tilde{y}_{k,u}^S$ 可分别表示为: $\tilde{y}_n^M = W_n^H y_n^M$ 和 $\tilde{y}_{k,u}^S = G_{k,u}^H y_{k,u}^S$ 。其中, $W_n \in \mathbb{C}^{R^M \times L_n}$ 为第 n 个 MU 传输的接收处理矩阵, $G_{k,u} \in \mathbb{C}^{R^{SU} \times L_{k,u}}$ 为第 k 个 SBS 所属的第 u 个 SU 的接收处理矩阵, $(\cdot)^H$ 表示共轭转置。本文将主要关注用户预编码和接收矩阵的设计。

3 面向干扰抑制的预编码设计基本方法

3.1 分层异构无线网络中干扰抑制与预编码设计的基本特征

由于分层异构无线网络包含了两层至多层网络, 每层

网络又可能包含多个蜂窝, 因此结构十分复杂。可以从以下 4 个方面概括其预编码设计与干扰抑制的特征, 即 4 类干扰、两端抑制、耦合构造、顺序求解。下面对这 4 点进行介绍与讨论。

(1) 分层异构网中的干扰类型

分层异构网中的干扰可分为如式(1)、式(2)所示的 4 种类型。第 1 类为 MU 信号之间的干扰, 由各 MU 信号在 MBS 发射机叠加造成; 第 2 类为 SU 信号对 MU 信号的干扰, 由 SU 信号经衰落在 MU 接收机叠加造成; 第 3 类为 SU 间信号干扰, 既包括同一小蜂窝之间的信号干扰(在 SBS 发射机叠加形成), 也包括不同小蜂窝用户之间的干扰(在 SU 接收机叠加形成); 第 4 类为 MU 信号对 SU 信号的干扰, 由 MU 信号经衰落在 SU 接收机叠加形成。第 1 类和第 3 类统称为层内干扰, 而第 2 类和第 4 类统称为层间干扰。

(2) 分层异构网中的干扰抑制途径

将分层异构网中的干扰抑制途径概括为“两端抑制”, 既包括 MBS 和 SBS 对各用户信号的预编码矩阵设计, 也包括各 MU 和 SU 接收机的接收矩阵设计。本文所讨论的干扰抑制主要包括两种方式: 一种为干扰消除, 另一种为干扰削弱。干扰消除是通过预编码设计和接收矩阵的设计完全去除干扰; 干扰削弱技术不能完全消除干扰, 而是通过预编码和接收矩阵的设计将接收端的干扰功率尽可能降低。

(3) 预编码矩阵与接收矩阵的耦合构造

从式(1)、式(2)可以看出, 在分层异构无线网络中, MBS 和 SBS 的发射信号在 MU 和 SU 的接收机端叠加而耦合, 表明 MBS 和 SBS 针对各用户的预编码需要联合设计。同时, 接收矩阵会影响处理后的信号空间特征, 从而也会影响发射机预编码的选取。因此, 需要对 MBS 的发射预编码



矩阵 Γ_n 、SBS 的发射预编码矩阵 $\Phi_{k,u}$ 、MU 的接收矩阵 W_n 、SU 的接收矩阵 $G_{k,u}$ 进行耦合构造,才能有效地实现干扰抑制。

(4) 预编码矩阵与接收矩阵的顺序求解

上述 4 种矩阵 Γ_n 、 $\Phi_{k,u}$ 、 W_n 、 $G_{k,u}$ 的耦合构造通常可以描述为一个方程组或者优化问题。方程组中的未知数个数或者优化问题中的变量个数取决于网络内所有发射天线数以及接收天线数的总和。随着用户数和小蜂窝数的增加,方程组和优化问题的求解变得异常复杂。现有方法往往通过设计使得以上 4 类变量可以依次求解,从而获得复杂度较低的预编码方案。

3.2 面向干扰抑制的基本预编码方法

本节主要讨论面向干扰抑制的 3 种基本预编码方法,包括基于块对角化的预编码方法、基于干扰对齐的预编码方法、基于信漏噪比(signal-to-leakage-plus-noise ratio, SLNR)最大化的预编码方法。

(1) 基于块对角化的预编码方法

块对角化方法的本质是使目标用户的信道与干扰用户的信号空间正交,从而使得目标用户完全接收不到干扰信号^[5]。以式(1)为例,如果设置预编码矩阵 Γ_n 的列空间为矩阵 $[(H_1^{\text{MM}})^H (H_2^{\text{MM}})^H]^H$ 行的零空间的子空间,即 $H_1^{\text{MM}} \Gamma_n = 0$ 且 $H_2^{\text{MM}} \Gamma_n = 0$ 。根据式(1),这种情况下第 1 个和第 2 个 MU 均接收不到来自第 n 个 MU 的信号,从而避免了干扰。需要指出, Γ_n 存在的条件是 $[(H_1^{\text{MM}})^H (H_2^{\text{MM}})^H]^H$ 的秩小于发射天线数。块对角化预编码矩阵可通过奇异值分解获得^[5],也可使用基于 QR 分解的方法求解^[6]。

(2) 基于干扰对齐的预编码方法

干扰对齐技术的主要思想是通过预编码方法,使得多个发射机的干扰信号在目标用户接收机叠加时,处于同一信号子空间^[7]。这样,接收机就可以通过简单的迫零处理将干扰消除。以式(1)为例,如果希望将第 1 个小蜂窝的第 1 个 SU 以及第 2 个小蜂窝的第 1 个 SU 对第 n 个 MU 的干扰对齐到同一子空间,则需要满足 $\text{span}(H_n^{\text{MS}1} \Phi_{1,1}) = \text{span}(H_n^{\text{MS}2} \Phi_{2,1})$ 。其中, $\text{span}(\cdot)$ 表示矩阵列张成的空间,其占据的信号空间自由度取决于具体的预编码设计。通过干扰对齐,可以将来自不同发射机的干扰尽可能对齐到自由度较小的子空间,从而为目标用户信号保留具有一定自由度的无干扰信号空间,有效地提高网络吞吐量。

(3) 基于信漏噪比最大化的预编码方法

假设目标用户接收到的有用信号功率为 P 、接收端噪声总功率为 σ^2 、对其他用户造成的干扰总功率为 P_L ,则

SLNR 定义为 $P/(P_L + \sigma^2)^{[8]}$ 。与块对角化和干扰对齐方法不同,基于 SLNR 最大化的预编码方法的目标并非要将干扰完全消除,而是通过预编码矩阵设计,使 SLNR 最大化,从而在保证有用信号功率的同时,尽可能降低对其他用户的干扰。

在分层异构网络中,各种预编码矩阵往往并非独立使用,基于 MIMO 预编码的干扰抑制设计可归结为各种预编码的联合构造与应用。

4 基于预编码的干扰抑制技术的研究进展

本节主要讨论近期出现的新型预编码干扰抑制技术。选取了 3 种典型的新型预编码方案进行介绍,并讨论了各方案的优劣势。

4.1 基于机会干扰对齐的预编码方案

参考文献[2]研究了一种宏蜂窝和毫微微蜂窝组成的异构网络场景,提出了一种基于机会干扰对齐的预编码方案,并分析了毫微微蜂窝(以下仍统称为小蜂窝)中用户位置服从泊松分布条件下的网络传输性能。该方案假设每个小蜂窝内的用户采用分时传输策略,因此任一时刻每个小蜂窝内只有一个用户接收传输信号,即 $N_k^S = 1, \forall k$ 。此外,该方案假设 MBS 和 SBS 为每个用户只传输一个符号流,则预编码矩阵和接收矩阵设计退化为预编码矢量(即参考文献[2]中的波束成形矢量)和接收矢量设计。该方案可通过下面 4 个限制条件描述。

(1) MU 使用迫零接收机消除距其较近的小蜂窝干扰。因此,第 n 个 MU 的接收矢量 W_n 需要满足下面的条件: $W_n \in \text{null}_l(H_n^{\text{MS}k} \Phi_{k,1}), \forall k \in F_n$ 。其中 $\text{null}_l(\cdot)$ 代表矩阵的左零空间, F_n 表示距离其最近的 c_n 个 SBS 构成的集合; c_n 的大小取决于 MU 用户可以承受的干扰功率范围以及 MIMO 系统可以提供的信号空间自由度。

(2) 利用块对角化准则完全消除 MU 的层内干扰。根据这个原则,第 n 个 MU 用户信号对应的预编码矢量需满足 $\Gamma_n \in \text{null}(H_j^H H_j^{\text{MM}}), \forall j \neq n$ 。其中 $\text{null}(\cdot)$ 代表矩阵的零空间。

(3) 小蜂窝间使用干扰对齐技术控制距离目标 SU 最近的 SBS 造成的干扰,将该项干扰与来自宏蜂窝的干扰对齐。因此,可以得到 $\text{span}(H_{\theta(k),1}^{\text{SS}k} \Phi_{k,1}) = \text{span}(H_{\theta(k),1}^{\text{SM}} W_1, H_{\theta(k),1}^{\text{SM}} W_2, \dots, H_{\theta(k),1}^{\text{SM}} W_i), \forall k$ 。其中, $\theta(k)$ 为到第 k 个小蜂窝的用户距离最近的 SBS。该方程表示 MU 信号和第 k 个小蜂窝的 SU 信号分别经历衰落后,在第 $\theta(k)$ 个小蜂窝的 SU 接收机叠加时,处于相同的信号子空间。

(4) SU 使用迫零接收机消除来自宏小区的干扰,则第

k 个小蜂窝的 SU 接收矢量 $G_{k,1}$ 需要满足。 $G_{k,1} \in \text{null}_L(H_{k,1}^{\text{SM}}W_1, H_{k,1}^{\text{SM}}W_2, \dots, H_{k,1}^{\text{SM}}W_N^{\text{M}}), \forall k$ 。满足该矢量的条件不但可以在接收机将宏蜂窝信号的干扰消除,还可消除条件(3)中与宏蜂窝干扰已经对齐的 SU 信号干扰。

预编码矢量 $\Gamma_n, \Phi_{k,1}$, 接收矢量 $W_n, G_{k,1}$, 可由上述 4 个限制条件联立确定。参考文献[2]首先通过条件(1)~(3)联立求解了所有宏蜂窝预编码矢量 Γ_n , 随后利用条件(3)、条件(1)、条件(4)依次确定了所有小蜂窝预编码矢量 $\Phi_{k,1}$ 、所有 MU 接收矢量 W_n 、所有 SU 接收矢量 $G_{k,1}$ 。具体求解过程及可行解存在的条件请参阅参考文献[2]。

该方案的优点可以概括如下:一方面,宏蜂窝用户间的干扰可以被完全消除;另一方面,小蜂窝间的相互干扰以及小蜂窝对宏蜂窝用户信号的干扰虽然没有被完全去除,但其中较强的干扰分量被有效抑制。但是该方案也存在如下一些问题:同一小蜂窝的用户采用分时传输方法以避免小蜂窝内的相互干扰。尽管这种思想可以将更多的空间自由度用于干扰抑制,但是会降低系统频谱使用效率。另外,该方案等效于假设每个小蜂窝任一时刻只有一个激活用户,从而在一定程度上降低了适用性。

4.2 基于逐层干扰对齐的预编码方案

参考文献[3]提出了一种逐层干扰对齐的预编码方案。其研究场景包含 2 个小蜂窝(对应参考文献[3]中的微微蜂窝),即 $K=2$;每个小蜂窝服务一个用户,即 $N_1^{\text{S}}=N_2^{\text{S}}=1$;SBS 和 SU 装备的天线数分别为 $R_1^{\text{S}}=R_2^{\text{S}}=2$ 和 $R^{\text{SU}}=2$ 。宏蜂窝服务 $N^{\text{M}}=2$ 个用户,MBS 和 MU 使用的天线数分别为 $R^{\text{M}}=4$ 和 $R^{\text{MU}}=2$ 。MBS 和 SBS 向每个 MU 和 SU 均只传输一个符号流,因此依然关注预编码矢量与接收矢量的设计。该方案采用小蜂窝层、宏蜂窝层干扰对齐逐层求解的策略,可分解为 3 个步骤,具体描述如下。

(1)将 SU 信号对 MU 信号的干扰在 MU 接收机对齐,即 SBS 使用的预编码矢量需要满足以下两个方程: $\text{span}(H_1^{\text{MS}}\Phi_{1,1}) = \text{span}(H_1^{\text{MS}2}\Phi_{2,1})$ 和 $\text{span}(H_2^{\text{MS}1}\Phi_{1,1}) = \text{span}(H_2^{\text{MS}2}\Phi_{2,1})$ 。其中第一个方程保证了第一个 SBS 对其 SU 的传输信号和第二个 SBS 对其 SU 的传输信号在 MU1 接收机位于同一信号子空间;第二个方程则保证了两个 SBS 对 MU2 的干扰位于同一信号子空间。同时,这两个方程还可确保每个 SU 拥有自由度为 1 的信号子空间,以用于数据传输。对两个方程进行联立求解,即可得到相应的预编码矢量 $\Phi_{1,1}$ 和 $\Phi_{2,1}$,具体过程请参阅参考文献[3]。

(2)在 SU 接收机采用迫零接收,以消除来自另一个 SU 的干扰。相应的接收矢量可通过 $G_{1,1} \in \text{null}_L(H_1^{\text{SS}2}\Phi_{2,1})$ 和 $G_{2,1} \in \text{null}_L(H_2^{\text{SS}1}\Phi_{1,1})$ 求解而得。同时,在 MU 接收机采用迫零接收以消除来自 SU 的干扰。需要指出的是,在步骤(1)已将不同 SU 到两个 MU 的干扰分别对齐。因此,相应的接收矢量可通过分别求解 $W_1 \in \text{null}_L(H_1^{\text{MS}1}\Phi_{1,1})$ 和 $W_2 \in \text{null}_L(H_2^{\text{MS}1}\Phi_{1,1})$ 而得。

(3)针对两个 MU 的预编码矢量分别进行干扰对齐设计,以保证其对所有非目标 MU 和 SU 的干扰与在步骤(2)中设计的接收矢量正交。基于上述思想,MBS 针对第一个 MU 的预编码需满足 $[W_2^{\text{H}}H_2^{\text{MM}} \quad G_{1,1}^{\text{H}}H_{1,1}^{\text{SM}} \quad G_{2,1}^{\text{H}}H_{2,1}^{\text{SM}}]\Gamma_1=0$,即 $\Gamma_1 \in \text{null}([W_2^{\text{H}}H_2^{\text{MM}} \quad G_{1,1}^{\text{H}}H_{1,1}^{\text{SM}} \quad G_{2,1}^{\text{H}}H_{2,1}^{\text{SM}}])$;MBS 针对第二个 MU 的预编码矢量则可通过求解下面的方程得到 $\Gamma_2 \in \text{null}([W_1^{\text{H}}H_1^{\text{MM}} \quad G_{1,1}^{\text{H}}H_{1,1}^{\text{SM}} \quad G_{2,1}^{\text{H}}H_{2,1}^{\text{SM}}])$ 。

该方案的优点在于宏蜂窝和小蜂窝预编码矢量和接收矢量的耦合构造采用单向进行的方式。其中,小蜂窝预编码矢量的设计仅依赖于信道信息,而宏蜂窝预编码矢量的求解则依赖于信道信息和已经得到的小蜂窝预编码矢量,从而在一定程度上简化了预编码和接收矢量的求解过程。此外,该方案保证了所有用户可以在无干扰的环境下进行通信。该方案的主要缺点是仅考虑了固定的场景特例,从而较难于推广到更为一般性的场景。但是这种预编码和接收矢量的单向耦合构造思想为简化求解过程提供了重要参考。

4.3 两级级联预编码方案

前两节中讨论的方案均通过预编码和接收矩阵消除全部或者较强干扰,特别是对层间干扰进行了有效的消除。层间干扰(或其较强分量)的消除往往需要用户接收机获知处于其他蜂窝层用户的预编码矩阵,以进行迫零接收。但是,用户接收机通常不与骨干网直接相连,从而难于进行信息的快速共享,因此增加了网络的开销与实现的难度。避免该问题的一种干扰抑制策略是尽可能减小层间干扰的功率,同时使用 MMSE 接收机。MMSE 接收机需要目标用户信号和干扰信号的二阶统计特性。这些统计特性往往可以通过导频和接收信号有效地估计而得^[9],从而增强了方案的可实现性。

基于这种思想,参考文献[4]提出了一种两级级联预编码方案。该方案的主要思想描述如下。设 K 个 SBS 之间可通过回程链路共享数据,为 $\sum_{k=1}^K N_k^{\text{S}}$ 个用户共同服务。对所



有 SU 重新标号为: $1, 2, \dots, \tilde{N}^S$, 其中 $\tilde{N}^S = \sum_{k=1}^K N_k^S$, 发往第 ν 个 SU 的数据符号矢量为 z_ν ; 所有 SBS 均通过回程链路获取 z_ν , 并构造相应的预编码矩阵用于联合传输。相应的, 式(1)和式(2)可以等效转化为:

$$y_n^M = H_n^{MM} \Gamma_n x_n + H_n^{MM} \sum_{i \neq n} \Gamma_i x_i + \sum_{k=1}^K \sum_{\nu=1}^{\tilde{N}^S} H_n^{MS,k} \Phi_\nu^k z_\nu + \xi_n^M \quad (3)$$

$$y_\nu^S = \sum_{k=1}^K H_\nu^{SS,k} \Phi_\nu^k z_\nu + \sum_{k=1}^K \sum_{p \neq \nu} H_\nu^{SS,k} \Phi_p^k z_p + H_\nu^{SM} \sum_{i=1}^N \Gamma_i x_i + \xi_\nu^S \quad (4)$$

其中, Φ_ν^k 表示第 k 个 SBS 为 z_ν 使用的预编码矩阵, $H_\nu^{SS,k}$ 表示第 k 个 SBS 到第 ν 个 SU 的信道矩阵, H_ν^{SM} 为 MBS 到第 ν 个 SU 的信道矩阵, y_ν^S 和 ξ_ν^S 为第 ν 个 SU 的接收信号矢量和噪声矢量。考虑到联合传输, 定义 $\Phi_\nu = [\Phi_\nu^1 \Phi_\nu^2 \dots \Phi_\nu^{M^H}]$ 为针对 z_ν 的联合预编码矩阵。则该模型下的预编码设计需要确定所有的 Γ_n 和 Φ_ν 。参考文献[4]提出了使用级联的方式构造预编码矩阵, 即令 $\Gamma_n = \Gamma_n^{(1)} \Gamma_n^{(2)}$, $\Phi_\nu = \Phi_\nu^{(1)} \Phi_\nu^{(2)}$ 。其中, $\Gamma_n^{(1)}$ 和 $\Phi_\nu^{(1)}$ 为外层预编码矩阵, 用于消除层内干扰; $\Gamma_n^{(2)}$ 和 $\Phi_\nu^{(2)}$ 为内层预编码矩阵, 用于削弱层间干扰。参考文献[4]中使用了基于 QR 分解的块对角化方法求解 $\Gamma_n^{(1)}$ 和 $\Phi_\nu^{(1)}$, 使得 $H_j^{MM} \Gamma_n^{(1)} = 0, \forall j \neq n$ 以及 $H_b^{SS,\nu} \Phi_\nu^{(1)} = 0, \forall b \neq \nu$, 从而完全消除了层内干扰。

确定 $\Gamma_n^{(1)}$ 和 $\Phi_\nu^{(1)}$ 后, 参考文献[4]通过 SLNR 最大化的方法确定了 MU 的内层预编码矩阵 $\Gamma_n^{(2)}, n=1, 2, \dots, N^M$ 。随后使用最小化接收信号均方误差 (mean square error, MSE) 的方法确定 SU 内层预编码矩阵 $\Phi_\nu^{(2)}$, 具体描述如下。定义 $\tilde{H}_\nu = [H_\nu^{SS,1} H_\nu^{SS,2} \dots H_\nu^{SS,\tilde{N}^S}]$ 代表所有 SBS 到第 ν 个 SU 的聚合信道矩阵。对 $\tilde{H}_\nu$ 进行 SVD 分解后得到 $\tilde{H}_\nu = Q_\nu A_\nu P_\nu^H$, 其中 A_ν 为对角阵, Q_ν, P_ν 为酉矩阵; 并设 $\tilde{P}_\nu$ 为 P_ν 的前 R^{SU} 列 (R^{SU} 为 SU 接收天线数)。若以 $\tilde{P}_\nu$ 为联合预编码矩阵, 则等效于将 z_ν 的每个符号都映射到并行互不干扰的信道上^[9], 从而可有效地简化检测过程。

参考文献[4]定义预编码均方误差为 $E\{\|y_\nu^S - \tilde{H}_\nu P_\nu z_\nu\|^2\}$, 其中 $E\{\cdot\}$ 表示期望, $\|\cdot\|^2$ 代表 Frobenius 范数; 希望通过设计 $\Phi_\nu^{(2)}$, 使得接收信号 y_ν^S (含层间干扰和噪声) 与采用 $\tilde{P}_\nu$ 为联合预编码矩阵的预期接收信号尽可能接近。参考文献[4]进一步构造了相应的优化问题, 其目标为最小化预编码 MSE、优化变量为 $\Phi_\nu^{(2)}$ 、限制条件是保证第 ν 个 SU 信号对 MU 的干扰功率与第 ν 个 SU 接收到的有用信号功率之比小于指定的门限。该优化问题可以通过拉格朗日乘子法求解, 从而可以确定所有 SU 的内层预编码 $\Phi_\nu^{(2)}$ 。完成预编码后, SU 和 MU 接收端均进一步采用 MMSE 准则来最小化接收端经接收矩阵处理后的信号与发射信号之间的均方误差, 从而获得 SU 接收矩阵 G_ν 和 MU 接收矩阵 W_n 。

这种方案的优势在于宏蜂窝和小蜂窝预编码矩阵可并行设计, 简单易行, 可实现性高。同时, 两级预编码设计使得层内干扰消除和层间干扰抑制可以依次顺序进行, 简化了设计。该方案存在的问题是可能残留较强的层间干扰, 使得系统性能在高信噪比时缺乏优势。

上文所述 3 种预编码方案的对比见表 1。由表 1 可以看出, 3 种方案的共同特征为完全消除了 MU 信号间干扰。同时, 3 种方案尽量消除了 SU 间的干扰。该现象说明, 在分层异构网中, 层内干扰较容易消除。与之相比, 层间干扰的消除具有一定挑战性。此外, 各种方案的预编码矩阵和接收矩阵求解顺序各不相同, 取决于方案的具体目标和条件限制。

5 分层异构网络中干扰抑制技术的未来研究方向

分层异构网络中基于 MIMO 预编码的干扰抑制技术的未来研究方向主要包括以下几个方面。

(1) 非理想信道信息下的干扰抑制技术

块对角化、干扰对齐、迫零接收等技术对信道信息的准确性有很强的依赖性。在实际系统中, 信道估计往往存

表 1 3 种预编码方案特点对比

	预编码矩阵、接收矩阵求解顺序	MU 信号间干扰	SU 信号对 MU 信号干扰	SU 信号间干扰	MU 信号对 SU 信号干扰	主要劣势
基于机会干扰对齐的预编码方案	$\Gamma_n \rightarrow \Phi_{k,u} \rightarrow W_n \rightarrow G_{k,u}$	完全消除	消除最强分量	消除最强分量	完全消除	小蜂窝任一时刻只服务一个用户
基于逐层干扰对齐的预编码方案	$\Phi_{k,u} \rightarrow W_n \rightarrow \Gamma_n$	完全消除	完全消除	完全消除	完全消除	设计方法针对个例, 推广性受限
两步级联预编码方案	$\Gamma_n^{(1)} \rightarrow \Gamma_n^{(2)} \rightarrow W_n$ $\Phi_\nu^{(1)} \rightarrow \Phi_\nu^{(2)} \rightarrow G_\nu$	完全消除	通过最大化 SLNR 抑制干扰功率	完全消除	限制干扰功率与有用信号功率之比	残留层间干扰

在误差,可能会导致干扰无法得到完全消除。如何在存在误差的条件下设计具有顽健性的预编码矩阵将是今后研究的一个重要方向。

(2)结合用户选择 MIMO 预编码设计

现有的预编码干扰抑制方案大多采用的是被动设计的策略,即用户物理层资源已经分配完毕,从而使得 MIMO 预编码的设计受限较为严重。如果引入主动机制,将用户选择与 MIMO 预编码及干扰抑制结合起来进行联合优化,就可以充分发挥用户信号子空间互补的优势,避免或减弱层间以及层内用户间干扰。

(3)多层级异构网络中的预编码与干扰抑制技术

目前大多数的研究仍然主要关注两层异构网络。但是随着小蜂窝形式的多样化,多层异构网络共存的场景将成为未来蜂窝网络的主要特征。多层异构网络中的干扰类型和复杂程度将急剧增加,对预编码技术和干扰抑制形成巨大的挑战。多层异构网络中的分层干扰抑制、预编码设计、结合资源分配与用户配对的干扰抑制方法都是亟待研究的重要问题。

6 结束语

本文以双层异构下行网络为例,分析了分层异构网络中干扰抑制的特征,介绍了面向干扰抑制的基本 MIMO 预编码方法。在此基础上,对基于 MIMO 预编码的干扰抑制技术的新进展进行了探讨,介绍并分析了 3 种新型干扰抑制方案:基于机会干扰对齐的预编码、基于逐层干扰对齐的预编码方法和两步级联预编码方案。最后,对分层异构网络中干扰技术的未来研究方向进行了展望。

参考文献

- 1 3GPP TR 36.932. Release 12. Scenarios and Requirements for Small Cell Enhancements for E-UTRA and E-UTRAN, 2013
- 2 Nguyen T M, Jeong Y, Quek T, *et al.* Interference alignment in a poisson field of MIMO femto cells. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013(4):1~13
- 3 Shin W, Lee N, Noh W, *et al.* Hierarchical interference alignment for heterogeneous networks with multiple antennas. *Proceedings of Workshop of IEEE ICC'11, Kyoto, Japan*, 2011
- 4 Xu D T, Ren P Y, Du Q H, *et al.* Two-tier interferences mitigation via CECRS precoding in cooperative femto cell networks. *Proceedings of IEEE GLOBECOM 2013, Atlanta, CA, USA*, 2013
- 5 Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multisuser MIMO channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(2):461~471

- 6 Chen R H, Heath R W, Andrews J G. Transmit selection diversity for unitary precoded multiuser spatial multiplexing systems with linear receivers. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(3): 1159~1171
- 7 Cadambe V R, Jafar S A. Interference alignment and degrees of freedom of the K -user interference channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(8): 3425~3441
- 8 Ohwatari Y, Miki N, Asai T, *et al.* Performance of advanced receiver employing interference rejection combining to suppress inter-cell interference in LTE-Advanced downlink. *Proceedings of IEEE VTC'11 Fall, San Francisco, California, USA*, 2011
- 9 Goldsmith A. *Wireless Communications*. UK: Cambridge University Press, 2005

[作者简介]



任品毅,男,西安交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信、信号检测技术、分布式网络和认知无线网络。近年在国内外著名学术期刊和会议上共发表论文 80 余篇,出版译著 10 余本,申请及已授权国家发明专利 30 余项,已批准的国家计算机软件著作权 3 项。曾获 IEICE 通信协会 2010 年度最佳论文奖。



杜清河,男,西安交通大学讲师、硕士生导师,主要研究方向为无线网络中的统计服务质量保障、跨层设计、多播等。近年来在国际著名期刊和会议上发表论文近 50 篇。曾获 IEEE GLOBECOM 2007 最佳论文奖。



孙黎,男,西安交通大学讲师、硕士生导师,主要研究方向为协作通信网络、无线物理层安全。近年来在国内外重要学术期刊和国际会议上发表论文 20 余篇。



徐大同,男,西安交通大学博士研究生,主要研究方向为分层异构网络中的干扰抑制。

(收稿日期:2013-05-27)