

干扰对齐技术的发展与应用

Development and Application of Interference Alignment

刘伟/LIU Wei
李建东/LI Jiandong
盛敏/SHENG Min

(西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)
(Xidian University, Xi'an 710071, China)

干扰对齐(IA)作为干扰管理技术问题中的一个重大突破引起了本领域学术界的重视^[1]。IA技术由美国加州大学欧文分校的IEEE Fellow Syed Ali Jafar教授领导的研究小组率先发明^[2]。IA采用自由度作为系统可达容量的近似,通过设计各发射端的发射机向量矩阵和接收端的接收机向量矩阵,使得在每个接收端收到的干扰信号尽可能地“对齐”到维度较低的子空间,使未被干扰占用的信号子空间保留较高的维度,以供有用信号传输。

1 可行性问题

IA可以用一组IA条件进行描述。对于一组给定的IA条件,该条件是否可行是一个关键问题。对于IA条件的可行性问题,我们可以从充分条件和必要条件两方面来考虑。针对不同的系统配置,IA条件的可行性分析成为一个研究热点。

1.1 全连接系统的可行性分析

对于 K 用户多输入多输出(MIMO)

收稿日期: 2017-04-06

网络出版日期: 2017-05-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61231008); 国家自然科学基金(61401326)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0035-003

摘要: 认为干扰对齐(IA)技术是异构无线网络干扰管理的研究热点,可以极大地提升系统的自由度。IA研究过程中的关键问题包括IA条件的可行性以及IA条件的求解算法。同时,IA和其他方法相结合可产生更多的新方法。因此,IA技术是异构无线网络干扰管理的重要方法。

关键词: IA; 自由度; 异构无线网络; 家庭基站; 可行性

Abstract: Interference alignment (IA) attracts intensive research interests for interference management in the context of heterogeneous wireless networks, and it can substantially improve the degrees of freedom for the system. The key research issues about interference alignment include the feasibility and the algorithms for finding a solution. Meanwhile, by combining IA with other techniques, new methodology can be developed. IA is one key technique for interference management of heterogeneous wireless networks.

Keywords: IA; degrees of freedom; heterogeneous wireless network; femtocell; feasibility

干扰信道(IC)系统,在每个发送端发送单个数据流的情况下,文献[3]研究了IA条件的可行性问题,将线性IA条件的可行性与代数几何理论中具有泛化系数的多元多项式系统的适当性之间建立了联系。

对于 K 用户(K, N, N, d) MIMO IC系统,在发送端和接收端均配置 N 根天线,且每个发送端均传输 d 个数据流的条件下,文献[4]基于代数几何理论证明了IA可行的充要条件。针对任意配置的MIMO IC场景,文献[4]基于代数几何理论提出了IA条件可行的必要条件。

同样,针对任意配置的MIMO IC系统,文献[5]基于代数几何理论对IA条件对应的多元多项式方程组的可解性与该方程组中一阶项的独立性间建立了联系。同时,还提出两个定理来论证IA条件可行的充分必要

条件。对于任意配置的MIMO干扰广播信道(IBC)系统,基于代数几何理论,文献[6]证明了IA条件可行的必要条件,并且对于一类特殊配置的MIMO IBC系统,证明了IA条件可行的充要条件。

对于 K 用户($K, M, N, 1$) MIMO IC系统,当每个发送端均配置 M 根天线,每个接收端均配置 N 根天线,并且每个发送端均发送单个数据流时,在 T 倍有限信道扩展的场景下,文献[7]分别针对有限独立信道扩展和有限相关信道扩展两种情况,基于代数几何理论分析了IA条件的可行性,提出了两个定理,得到系统的最大可达自由度的上界。对于 K 用户单输入单输出(SISO)IC系统,在每个发送端均发送 d 个数据流、 L 倍有限信道扩展的场景下,文献[8]通过定义扩张算子、收缩算子,对齐宽度、稀

疏度、线性独立条件等,分析了IA条件的可行性;并针对有限独立信道扩展和有限相关信道扩展2种情况,提出了3个定理,得到系统的最大可达自由度的上界。

1.2 部分连接系统的可行性分析

由于路径损耗、阴影效应等,无线信号的传输可能会存在较大损耗,从而导致实际的无线通信系统可能是部分连接的。

对于 K 用户部分连接MIMO IC系统,在每个用户至多接收到 L 个干扰的条件下,基于代数几何理论,文献[9]提出了IA条件所对应的多元多项式方程组具有适当性的充分条件,并证明了在特定条件下该充分条件同时也是适当性存在的必要条件。对于部分连接MIMO干扰多址接入(IMAC)系统,每个基站至多接收到 L 个小区内用户的干扰,文献[10]提出了IA条件所对应的多元多项式方程组具有适当性的充分条件,同样也证明了在特定条件下该充分条件同时也是适当性存在的必要条件。同时,文献[10]指出该必要条件也是IA可行的必要条件。对于一类 $(L+J+1, M, N, 1)$ 部分连接下行异构网络,基于代数几何理论,文献[11]提出了IA条件可行的必要条件。针对文献[11]中相同的系统,在 T 倍有限信道扩展的场景下,文献[12]分别针对无信道扩展、有限独立信道扩展、有限相关信道扩展3种情况,基于代数几何理论,通过分析系统IA条件可行性,提出3个定理,分别得到系统IA可行的必要条件。

2 IA技术的算法

IA的另一个重要问题是如何得到一组可行解。由于IA条件是一组由发射机和接收机向量耦合在一起构成的多项式方程,针对普适的干扰网络的求解IA的方法是一个NP-Hard问题^[13]。为此,研究者们提出了很多非最优的求解发射机和接收机

向量的算法。

2.1 迭代算法

针对MIMO IC网络,文献[14]利用了IA的互易性,提出了两种IA可行解的迭代算法:一种是最小化干扰泄露的接收矩阵迭代设计方案;另一种是最大化信干噪比的接收矩阵迭代设计方案。同样针对MIMO IC网络,文献[15]将IA条件近似为一个带有秩约束的干扰空间的秩最小化问题,并设计了迭代方法进行求解。

2.2 非迭代算法

考虑到由发射机和接收机向量耦合构成的多项式方程组求解困难,可以将问题进行简化处理,分别设定发射机和接收机的需要完成的功能,将发射机和接收机的设计进行分离,从而使得在满足一定的系统配置条件下,可以采用非迭代的方法求解IA的发射机和接收机向量。针对不同的系统配置,设计方案也有不同。例如:针对MIMO IBC网络,在发射天线数和接收天线数相等的条件下,文献[16]首先将用户进行丰足,然后利用广义特征值分解,设计了用户端的接收机向量,从而实现分组后干扰可以对齐在相同的空间,最后利用零空间方法设计了基站端发射机向量。

针对一类部分连接的异构网络,文献[11]提出了一种两级IA方案。在该方案中,网络包括一个宏基站和多个家庭基站(Femtocell),其中家庭基站分为两组:一组相互之间有干扰,形成一个全连接干扰网络;另一组相互之间没有干扰,和宏基站构成了一个部分连接的网络。该方案首先设计宏基站的发射机向量,从而消除宏基站对部分连接网络中某些用户的干扰,然后设计部分连接网络中家庭基站的发射机向量。

3 IA技术的应用

由于IA技术在干扰管理方面的出色性能,其已经被应用于通信网络

中的多种场合。

3.1 在密集家庭基站网络干扰管理中的应用

家庭基站作为一种低功率配置的可管理的小型基站,已成为异构无线蜂窝网络的重要组成部分。其布设成本很低,能够有效地弥补宏小区部署的覆盖空洞,增大频谱复用增益,提升网络吞吐量。因此,近年来,家庭基站的部署密度日益增大。然而,由于重叠覆盖与频谱复用,如果没有合适的配置,家庭基站小区间干扰将会随着家庭基站密度的增加而恶化。

如何在正交资源分配的基础上,发挥IA技术的优势,更好地消除家庭基站小区间的干扰,已得到广泛的研究。文献[17-18]针对密集家庭基站网络中IA与资源分配的联合优化,给出了较完整的优化问题模型,并提出了一种直观简洁的求解方法——基于图论的求解方法。在系统建模方面,该项研究首次考虑了当每个用户都传输相同数目的数据流时IA用户与不参与IA的用户在资源分配上的公平性。在问题求解方面,该项研究首次针对包含IA组合的网络,提出了转化冲突图,并基于转化冲突图提出了一种低复杂度的3阶段求解方案:转化冲突图的构建、基于图的极大团检测的IA组合选择、基于转化冲突图的资源分配。

3.2 在网络虚拟化中的应用

受益于持续增长的对高速率业务的需求,无线网络虚拟化技术已被提议为下一代网络的关键技术之一。虚拟化技术可使多种异构服务动态共享底层基础设施,最大化底层网络的使用率;同时也降低了运营商的资本支出和运营支出^[19]。伴随着虚拟移动网络运营商概念的提出,一种完全虚拟化的异构网络架构应运而生:无线接入网中所有可用资源(例如宏基站、微基站、网关、天线、

频谱、功率)均为基础设施提供者(InP)所有,并由InP统一支配;网络运营商不再拥有任何资源,无需担负起基站的部署任务,也无需维护接入网的正常运行和管理^[19]。在这种架构下,传统的运营商均演进为虚拟移动网络运营商,需向InP租用一定的接入资源,并将资源分配给所属用户,同时,InP担负起无线接入网的正常维护,并向虚拟移动运营商收取一定的租赁费用。

实现网络虚拟化的资源隔离技术包括时域、频域以及时域频域联合隔离等。然而,IA技术为我们提供了实现网络虚拟化的另一种思路:空域隔离。文献[20]提出一种联合IA的异构蜂窝小区虚拟化机制,在空域上隔离多个虚拟网络。一方面,利用IA技术,多个基站可免于干扰地同时同频传输数据,借此实现多个运营商对同一底层基础设施的共享,同时,基站的异构性为用户提供了更多的备选节点接入方案,增大了虚拟化的灵活性;另一方面,虚拟化技术同样促进了IA机制的设计,例如:网络拓扑可对IA的结果造成深刻影响;IA过程易忽视期望信号的性能,通过实施最优的虚拟组合策略,虚拟化可有效克服这一缺陷,改善IA的性能。

4 结束语

IA技术对于异构无线网络中的干扰管理提供了一种新的方法,针对IA技术的研究持续成为热点问题。同时,IA与其他新兴技术相结合已经产生了广泛的影响,将会进一步提升网络的性能。

致谢

本研究得到了西安电子科技大学马英红博士、江南大学王侃博士的帮助,谨致谢意。

参考文献

- [1] NAZMUS S, EKRAM H, LONG B L, et al. Interference Management in OFDM Femtocell Networks: Issue and Approaches [J]. IEEE Transactions on Wireless

- Communications, 2012, 19(3): 1536–1284. DOI: 10.1109/MWC.2012.6231163
- [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] YETIS C M, GOU T, JAFAR S A, et al. On Feasibility of Interference Alignment in MIMO Interference Networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(9): 4771–4782. DOI: 10.1109/ICC.2008.190
- [4] RAZAVIYAYN M, LYUBEZNIK G, LUO Z Q, et al. On the Degrees of Freedom Achievable Through Interference Alignment in a MIMO Interference Channel[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(2): 812–821
- [5] RUAN L, LAU V K N, WIN M Z. The Feasibility Conditions for Interference Alignment in MIMO Networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(8): 2066–2077. DOI: 10.1109/TSP.2013.2241056
- [6] LUI T, YANG C. On the Feasibility of Linear Interference Alignment for MIMO Interference Broadcast Channels With Constant Coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(9): 2178–2191. DOI: 10.1109/TSP.2013.2248005
- [7] SUN R, LUO Z Q. Interference Alignment Using Finite and Dependent Channel Extensions: The Single Beam Case[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(1): 239–255. DOI: 10.1109/TIT.2014.2368984
- [8] LI C T, OZGUR A. Channel Diversity Needed for Vector Interference Alignment [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 62(4): 1211–1215
- [9] GUILLAUD M, GESBERT D. Interference Alignment in the Partially Connected K User MIMO Interference Channel[C]//Signal Processing Conference, 2011. USA: IEEE, 2011: 1095–1099
- [10] GUILLAUD M, GESBERT D. Interference Alignment in Partially Connected Interfering Multiple-Access and Broadcast Channels [C]// Global Communications Conference, GLOBECOM 2011. USA: IEEE, 2011: 1–5. DOI: 10.1109/GLOCOM.2011.6133957
- [11] LIU G, SHENG M, WANG X, et al. Interference Alignment for Partially Connected Downlink MIMO Heterogeneous Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(2): 551–564. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2388450
- [12] LIU W, CAI J, LI J, et al. Interference Alignment with Finite Extension in Partially Connected Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(2): 851–862. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2626369
- [13] MEISAM R, MAZIAR S, LUO Z Q. Linear Transceiver Design for Interference Alignment: Complexity and Computation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(5): 2896–2910. DOI: 10.1109/TIT.2012.2184909
- [14] GOMADAM K, CADAMBE V R, JAFAR S A. A Distributed Numerical Approach to Interference Alignment and Applications to Wireless Interference Networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(6): 3309–3322. DOI: 10.1109/TIT.2011.2142270

- [15] PAPAILIOPOULOS D S, DIMAKIS A G. Interference Alignment as a Rank Constrained Rank Minimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(8): 4278–4288. DOI: 10.1109/TSP.2012.2197393
- [16] LIU W, SUN J, LI J, et al. Interference Alignment for MIMO Downlink Multicell Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6159–6167. DOI: 10.1109/TVT.2015.2477358
- [17] MENG Y, LI J, LI H, PAN M. A Transformed Conflict Graph Based Resource Allocation Scheme Combining Interference Alignment in OFDMA Femtocell Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4728–4737. DOI: 10.1109/TVT.2014.2366747
- [18] MENG Y, LI J, LI H, LIU P. Graph-Based User Satisfaction Aware Fair Resource Allocation in OFDMA Femtocell Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 2165–2169. DOI: 10.1109/TVT.2014.2341250
- [19] LIANG C, YU F R. Wireless Virtualization for Next Generation Mobile Cellular Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(1): 61–69. DOI: 10.1109/TVT.2014.2341250
- [20] WANG K, LI H Y, YU F R, et al. Interference Alignment in Virtualized Heterogeneous Cellular Networks with Imperfect Channel State Information (CSI)[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 66(2): 1519–1532. DOI: 10.1109/TVT.2016.2562741

作者简介



刘伟, 西安电子科技大学教授; 主要研究方向为无线异构网络干扰管理和MIMO传输技术; 先后主持和参加基金项目10余项, 获得1项科研成果奖; 已发表SCI检索论文10余篇。



李建东, 西安电子科技大学教授、教育部长江学者特聘教授、国家新一代宽带无线移动通信网重大专项总体组专家; 主要研究方向为无线异构网络干扰管理、自组织网络和空天信息网络; 获国家技术发明二等奖1项, 省部级科技奖13项; 发表论文147篇, 出版著作和教材4部, 获国家发明专利62项。



盛敏, 西安电子科技大学教授、教育部长江学者特聘教授; 主要研究方向为无线异构网络干扰管理、自组织网络和空天信息网络、超密集网络; 获国家技术发明二等奖1项; 发表文章100余篇, 授权发明专利40余项。