

802.11ac 无线网络下行链路的干扰抑制

王欢, 李莉, 凌峰, 王发展

(上海师范大学信息与机电工程学院, 上海 200234)

摘要: 在 802.11ac 无线局域网中, 无线智能设备(WID)需通过无线接入点(AP)连接到网络, 下行传输过程中其他 AP 会对目标 WID 造成干扰. 提出采用基于迭代最小化均方误差干扰对齐算法(IMMSE-IA), 抑制其他 AP 对目标 WID 的干扰. 该方法通过对 AP 端和 WID 端分别进行线性预编码和后置编码处理, 在最小化均方误差准则和功率限制约束下, 得到最优预编码和后置编码. 仿真结果表明: 本方法在信噪比为 5 dB 情况下, 单位带宽传输速率相对于传统最大化信干噪比算法求得的传输速率增加了 1 bit/s.

关键词: 802.11ac; 无线接入点; 线性预编码; 后置编码; IMMSE-IA 算法; Mas-SINR 算法

中图分类号: TN 929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5137(2016)02-0155-06

0 引言

无线智能设备(WID)如智能手机、平板电脑等可通过无线接入点(AP)连接到无线局域网(WLAN)中, 获得很多免费应用服务, 包括视频数据传输、数据备份、操作系统或固件升级等. 智能设备的增加就需要更多的无线接入点. 为了满足人们对于无线网络的需求及增强 WLAN 的平均吞吐率, IEEE 在 802.11n 基础上推出了 802.11ac 标准, 它通过 5 GHz 频带进行通信, 理论上能够提供最少 1 Gbps 带宽进行无线局域网通信, 这样 WLAN 中就能容纳更多的 WID. 同时, WID 与 AP 采用多输入多输出(MIMO)技术进行通信, 进一步提高系统吞吐量. 但 802.11ac 无线局域网中, WID 通过 AP 连接到网络后, 下行传输过程中其他 AP 会对目标 WID 造成干扰.

针对 WLAN 中下行链路的干扰问题, 干扰对齐算法因能够很好地消除多节点之间的干扰、提高无线频谱使用率等优点而获得启用. 干扰对齐通过预编码技术使干扰在接收端重叠在一起^[1], 以此来消除干扰, 压缩干扰所占的信号维度, 使系统获得最大自由度^[2]. 此外, 将 MIMO 技术应用于 WLAN 下行链路的干扰网络中, 可以进一步利用 MIMO 的复用增益来提高 WLAN 的吞吐量^[3]. 文献[4]中研究了多小区多用户 MIMO 系统干扰消除问题, 设置发送端线性预编码, 将其他用户发射机的干扰信号对齐到接收机同一信号的子空间内, 然后通过接收端后置编码消除干扰, 很好地解决了多用户之间的干扰. 专利[5]中提出了认知 MIMO 系统二级预编码设计, 很好解决了认知用户的干扰, 利用 MIMO 通信提高了系统吞吐量.

文献[6]在传统最大化信干噪比干扰对齐算法基础上, 引入拉格朗日乘数, 列出拉格朗日目标函数, 采用 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)优化方法, 在发送功率限制约束条件下, 求出最小化均方误差的预编码和后置编码, 在不完全消除干扰的情况, 最大化系统的吞吐量. 文献[7]在文献[6]

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61503251)

通信作者: 李莉, 中国上海市徐汇区桂林路 100 号, 上海师范大学信息与机电工程学院, 邮编: 200234, E-mail: lilyxuan@shnu.edu.cn

之上,结合牛顿迭代计算方法,迭代优化线性预编码和后置编码.文献[8]将最大化信干噪比等传统的干扰对齐算法运用到 WLAN 收发器中,分别对 AP 端和 WID 端设置线性预编码和后置编码,来消除它们之间的干扰,但发送端和接收端编码相互之间没有通过准则联系起来,而是单独起作用.

本文作者针对 802.11ac 无线局域网中下行链路干扰问题,提出一种基于迭代最小化均方误差干扰对齐算法,设计 AP 端线性预编码和无线智能设备端后置编码,在最小化均方误差准则和功率限制约束下,通过引入拉格朗日乘数,列出拉格朗日目标函数,计算得到最优预编码和后置编码.该算法既有效地抑制了其他 AP 对目标 WID 的干扰,同时能够提高 AP 的下行传输速率.

1 系统模型

假定一个 AP 只接入一个 WID. AP 对 WID 的干扰信道模型如图 1 所示,系统模型包含 K 个 AP 和 K 个 WID,假设 AP 和 WID 都具备 N 根天线,同时设 AP 可以获得完美信道状态信息. WID 连接到对应的 AP 之后,AP 对 WID 进行下行链路通信,令 s_k 是 AP k 发送给 WID k 的信号向量,维度是 $d \times 1$,其中 d 表示信息比特数.对发送信号进行预编码处理之后,WID k 接收到的信号电平 y_k 可表示为:

$$y_k = H_{kk} V_k s_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K H_{ki} V_i s_i + n_k, \quad (1)$$

其中, H_{kk} 是 AP k 与 WID k 之间的信道矩阵,维度是 $N \times N$; V_k 是 AP k 上的预编码矩阵,维度是 $N \times d$. n_k 是 AP k 接收到的环境噪声,维度是 $d \times 1$,服从均值为 0 的高斯分布, $E(n_k n_k^H) = \sigma^2 I$, I 为 N 阶的单位矩阵.式(1)中, $H_{kk} V_k s_k$ 代表 WID k 的期望信号(图 1 中用实线连接的部分), $H_{ki} V_i s_i$ 代表 WID k 接收到的干扰信号(图 1 中虚线连接的部分).

对 WID k 接收到信号电平进行后置编码处理之后,接收到的信号电平 \tilde{y}_k 可表示如下:

$$\tilde{y}_k = U_k^H H_{kk} V_k s_k + U_k^H \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K H_{ki} V_i s_i + U_k^H n_k. \quad (2)$$

其中, U_k 是 WID k 上的后置编码,维度是 $N \times d$;上标 H 表示矩阵的共轭转置.

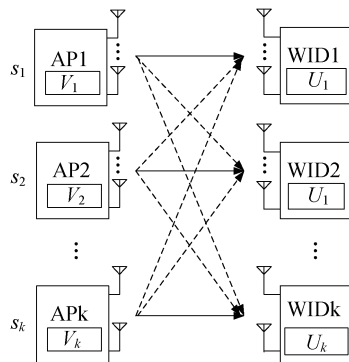


图 1 802.11ac 无线局域网中干扰信道模型

2 基于迭代最小化均方误差干扰对齐算法(IMMSE-IA)

针对 WLAN 中下行链路干扰问题,在 AP 端进行线性预编码和 WID 接收端进行后置编码处理的前提下,以最小化 WID 接收信号均方误差为准则和发送功率约束的条件下,引入拉格朗日乘数和列

出拉格朗日目标函数后,用迭代求值方法,得到预编码矩阵 $\mathbf{V}_k (k=1, \dots, K)$ 和后置编码矩阵 $\mathbf{U}_k (k=1, \dots, K)$,抑制其他 AP 对目标 WID 的干扰. 算法目标是抑制式(2)中等号右边的第二项表示的干扰.

以 WID k 作为研究对象,那么其均方误差(MSE)可用如下表达式计算:

$$MSE_k = E[\|\tilde{\mathbf{y}}_k - \tilde{\mathbf{y}}_k\|^2] = E\{\text{tr}[(\tilde{\mathbf{y}}_k - \tilde{\mathbf{y}}_k)(\tilde{\mathbf{y}}_k - \tilde{\mathbf{y}}_k)^H]\}. \quad (3)$$

然后,优化问题可以建模为:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k} MSE_k \\ & \text{s. t.} \quad \text{tr}(\mathbf{V}_k^H \mathbf{V}_k) = P_k, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\text{tr}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 \mathbf{A} 的迹; P_k 表示 AP k 的发送功率,满足 $\sum_{k=1}^K P_k = P$, P 为 AP 发送总功率;

通过引入 AP k 的拉格朗日乘数 λ_k ,优化问题转化为求拉格朗日函数极值问题,如下所示:

$$L(\mathbf{V}_k, \mathbf{U}_k, \lambda_k) = MSE_k + \lambda_k [\text{tr}(\mathbf{V}_k^H \mathbf{V}_k) - P_k]. \quad (5)$$

分别对拉格朗日函数求预编码矩阵 \mathbf{V}_k 和后置编码矩阵 \mathbf{U}_k 的偏导数,如下所示:

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{V}_k} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \mathbf{U}_k} = 0. \quad (6)$$

可以得到如下表达式:

$$\mathbf{V}_k = \left(\sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{ik}^H \mathbf{U}_i^H \mathbf{U}_i \mathbf{H}_{ik} + \lambda_k I \right)^{-1} \mathbf{H}_{kk}^H \mathbf{U}_k^H, \quad (7)$$

$$\mathbf{U}_k = \mathbf{V}_k^H \mathbf{H}_{kk}^H \left(\sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{ki} \mathbf{V}_i \mathbf{V}_i^H \mathbf{H}_{ki}^H + \sigma^2 I \right)^{-1}. \quad (8)$$

由(7),(8)二式,可以看到,预编码矩阵 \mathbf{V}_k 表达式中包含后置编码矩阵 \mathbf{U}_k ,后置编码 \mathbf{U}_k 的表达式同样包含预编码矩阵 \mathbf{V}_k . 对于这个问题,直接求解 \mathbf{V}_k 、 \mathbf{U}_k 很难求得. 为了解决这一问题,采用迭代求值方法,具体步骤如下:

- (1) 初始化预编码矩阵 \mathbf{V}_k :按维度初始化为随机矩阵;
- (2) 把预编码矩阵 \mathbf{V}_k 代入式(8),计算出后置编码矩阵 \mathbf{U}_k ;
- (3) 将式(7)代入功率限制条件 $\text{tr}(\mathbf{V}_k^H \mathbf{V}_k) = P_k$ 中,求出 $\lambda_k (\lambda_k \geq 0)$ 的值,代入式(8)求出预编码矩阵 \mathbf{V}_k ,更新预编码矩阵 \mathbf{V}_k 的值;

(4) 计算出 WID k 的均方误差 MSE_k ;

(5) 重复步骤 2、3、4,直至 MSE_k 收敛,得到的 \mathbf{V}_k 、 \mathbf{U}_k 即为所求解;

获得了预编码矩阵 \mathbf{V}_k 和后置编码矩阵 \mathbf{U}_k 之后,WID k 上的信干噪比(SINR)可表示如下:

$$SINR_k = \frac{|\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_{kk} \mathbf{V}_k|^2}{\sum_K |\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_{kk} \mathbf{V}_k|^2 + \|\mathbf{U}_k\|_2^2 \sigma^2}. \quad (9)$$

此时所有客户端(STA)的和速率为:

$$R = \sum_{k=1}^K \log_2(I + SINR_k). \quad (10)$$

图2显示了WID的均方误差与信噪比(SNR)关系曲线图,对4个AP和4个WID的干扰信道模型进行了仿真,AP和WID具备2根天线,从图2可以看出,当迭代次数为16次时,随着SNR的增大,MSE的值趋近于0.1;而迭代次数为18次时,SNR=20时,MSE的值已经小于0.1.此时,继续增加迭代次数,只会增加运算量且MSE至多趋近于0,意义不大.

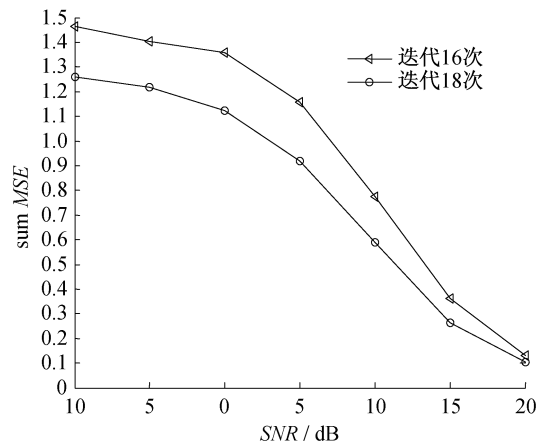


图2 接收端均方误差与迭代次数关系图

3 仿真结果与分析

本节对 IMMSE-IA 进行仿真. 选取 4 个 AP 和 4 个 WID, 编号都为 1, 2, 3, 4; AP 和 WID 都配备 2 根天线, 即 $N=2$, 所有信道矩阵都服从高斯分布; 以下行传输速率作为指标, 总的发送功率限制为 40 mW, 设定噪声方差 $\sigma^2=1$.

将 AP 端的线性预编码和 WID 端的后置编码联合在一起考虑, 通过最小化均方误差的准则和功率限制约束下, 得到最优的线性预编码和后置编码, 抑制其他 AP 端对目标 WID 的干扰, 仿真结果曲线是在迭代 18 次基础上得出的; 为了说明迭代最小化均方误差算法提高和速率的效果, 分别对文献[7]中的最大化信干噪比的干扰对齐算法 (Max-SINR) 和不采用干扰对齐算法 (IA) 进行仿真, 得到 3 种方法的比较图, 如图 3 所示.

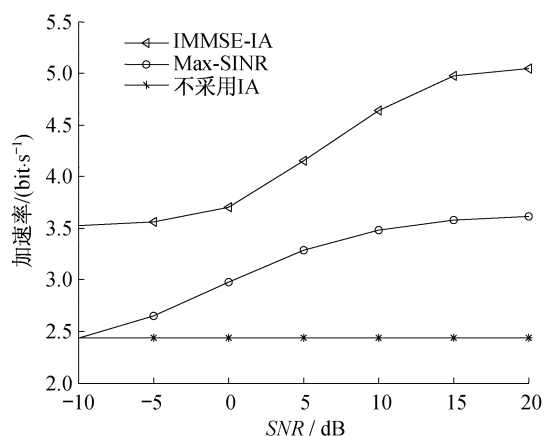


图3 3种干扰对齐算法性能比较

从图 3 中可以看到, 随着 SNR 的增大, WLAN 系统的和速率增大, 说明干扰得到了良好的抑制, 采用 IMMSE-IA 时, 系统的和速率明显高于文献[7]采用的传统 Max-SINR, 因文献[7]没有将收发端的编码联合在一起进行考虑, 而是分割开来, 各自发挥作用, 作用有限.

为表述简洁, 用 $[K, N]$ 表示 WLAN 中共有 K 个 AP 和 4 个 WID, AP 和 WID 都配备 N 根天线; 注意到 $[2, 2]$ 与 $[4, 2]$ 二种不同配置下, 2 条曲线相交. 在相同的天线数下, 当总发送功率一定时, 增加用户数, 由

于 AP 的发送功率降低,在信噪比小于 0 时,导致 4AP 和 WID 的和速率低于 2AP 主 WID 的和速率.同时,观察[4,2]发现其和速率低于[3,2],在 SNR 等于 10 dB 时,配置为[3,2]的和速率相较于配置为[4,2],提高了 0.4 bit/s,说明在发送功率约束条件下,用户不是越多越好,越多相应的干扰也会越多,导致和速率下降.

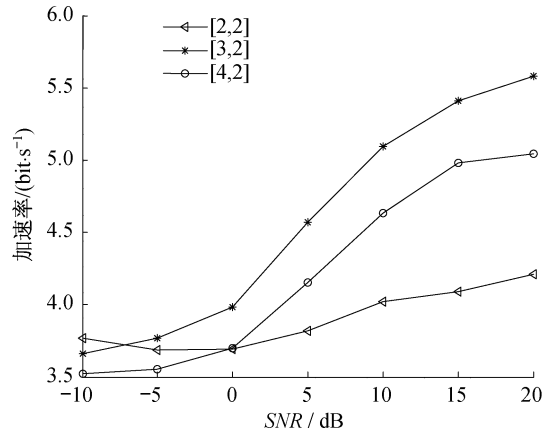


图4 不同配置条件下系统和速率

4 总结

本文作者研究了 WLAN 中下行链路干扰抑制问题,在文献[6]方法的基础上,采用更为复杂但效果更好的 IMMSE-IA,该方法将 AP 端和 WID 端通过编码联系在一起,协作抑制其他 AP 对目标 WID 的干扰,而不是文献[7]中所述的 AP 端和 WID 端之间割裂开来,各自发挥作用.假设已知信道状态信息和总发送功率的情况下,对 AP 端设置线性预编码和 WID 端设置后置编码,通过最小化接收端均方误差,采用迭代求值的方法,得到最优预编码和后置编码.仿真结果表明:在信噪比为 5 dB 情况下,采用的方法单位带宽传输速率相对于传统最大化信干噪比算法所得传输速率,可以增加 1 bit/s.

本算法接收端需获得完美的信道反馈,当选取 4AP 和 4WID 时,该算法需要花费时间大约是传统最大化信干噪比算法的 3 倍,当系统接入更多 WID 时,其计算量更加繁重;而且算法没有完全消除干扰,随着 WID 的增加,干扰累积,对 WID 会造成更大影响.

参考文献:

- [1] Gomadam K, Cadambe V R, Jafar S A. Approaching the Capacity of Wireless Networks through Distributed Interference Alignment [C]//IEEE. IEEE global telecommunications conference. New Orleans; IEEE, 2008.
- [2] Cadambe V, Jafar S. Interference alignment and degrees of freedom of the k-user interference channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3425 - 3441.
- [3] Jie Tang, Lambotaran S. Interference Alignment Techniques for MIMO Multi-Cell Interfering Broadcast Channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(1): 164 - 175.
- [4] Shen H, Li B, Tao M, et al. The new interference alignment scheme for MIMO interference channel [J]. IEEE Wireless Communications & Networking Conference, 2010, 29(16): 1 - 6.

- [5] LI L,ZHANG H J. Design method of two stage pre-coding a cognitive MIMO communication system;201410061223 [P]. 2014 - 02 - 21.
- [6] Schmidt D A,Shi C,Berry R A,et al. Minimum Mean Squared Error interference alignment [J]. Asilomar Conference on Signals,2009,59(9);2616 - 2626.
- [7] Li Q Z,Gu X M,Li H Q. MMSE Interference Alignment with Imperfect CSI [J]. International Conference on Instrumentation Measurement Computer Communication & Control,2012,7363(1);197 - 201.
- [8] Oh J,Choi J,Song M,et al. Simple Linear Transceiver Designs for Interference Alignment in IEEE 802. 11ac Interfering Network [C]//IEEE. 2014 International Symposium on Communications and Information Technologies. Incheon: IEEE,2014.

Downlink interference suppression of 802. 11ac wireless network

WANG Huan, LI Li, LING Feng, WANG Fazhan

(College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: In the 802. 11ac wireless local area network, wireless intelligent devices (WID) need to be connected to the network through the wireless access point (AP), and other wireless APs in the downlink transmission process will cause interference to the target WID. In this paper, we propose a method based on iterative minimum mean square error interference alignment, which can suppress the interference from the other wireless APs to the target WIDs. The wireless access terminal and wireless smart devices have designed linear precoder and decoder respectively. Under the minimum mean square error criterion and limitation the power constraint, optimal precoder and decoder can be received. Simulation results show that the proposed method, when the signal to noise ratio is 5 dB, the transmission rate of the unit bandwidth transmission rate is increased by 1 bit/s compared with the traditional Max-SINR algorithm.

Key words: 802. 11ac; wireless access point; linear precoder; decoder; iterative minimum mean square error interference alignment algorithm; Max-SINR algorithm

(责任编辑:包震宇)