

1-15-2021

Interference Alignment Based Throughput Optimization Model of Multi-hop Networks

Zui Xiong

Electronic Engineering Institut, Hefei 230037. China;

Keren Wang

Electronic Engineering Institut, Hefei 230037. China;

Jin Hu

Electronic Engineering Institut, Hefei 230037. China;

Feng Hui

Electronic Engineering Institut, Hefei 230037. China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Interference Alignment Based Throughput Optimization Model of Multi-hop Networks

Abstract

Abstract: Due to its benefits of enhancing the spectrum utility in information theory, interference alignment (IA) is quickly adopted in multi-hop wireless networks. *The constraints of "node activity in the existing throughput optimization model with IA are insufficient for converging to the optimal solution; the feasibility of IA is not involved. Thus, some measures were taken to compensate for the problems above. The longitudinal constraints of node activity were presented, and the feasibility condition of IA was discussed by the means of setting constraints on the data rates and the maximal number of interfering links at each node. The simulation results demonstrate that the feasible region of the modified optimization mode would be contracted with the longitudinal constraints. Meanwhile, IA feasibility would be guaranteed.*

Keywords

multi-hop network, interference alignment, mixed integer programming, throughput optimization

Recommended Citation

Xiong Zui, Wang Keren, Jin Hu, Feng Hui. Interference Alignment Based Throughput Optimization Model of Multi-hop Networks[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1240-1246.

一种基于干扰对齐的多跳网络吞吐量优化模型

熊最, 王可人, 金虎, 冯辉

(电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: 干扰对齐(Interference Alignment, IA)由于从信息论的角度提升了系统的频谱利用率, 很快被应用到多跳网络中。针对现有基于 IA 的吞吐量优化模型中存在节点状态约束不充分和干扰对齐可行性缺乏约束的问题, 通过对二组会话的节点路径建立分解模型, 推导给出了任意会话条件下的节点时间纵向约束条件和干扰对齐可行性约束条件。仿真实验表明, 加入节点状态纵向约束条件和干扰对齐可行性约束后, 优化模型的可行域得到有效收缩, 干扰对齐可行性得到了保证。

关键词: 多跳网络; 干扰对齐; 混合整数规划; 吞吐量优化

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 06-1240-07

DOI: 10. 16182/j. cnki. joss. 2015. 06. 013

Interference Alignment Based Throughput Optimization Model of Multi-hop Networks

Xiong Zui, Wang Keren, Jin Hu, Feng Hui

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Due to its benefits of enhancing the spectrum utility in information theory, interference alignment (IA) is quickly adopted in multi-hop wireless networks. The constraints of node activity in the existing throughput optimization model with IA are insufficient for converging to the optimal solution; the feasibility of IA is not involved. Thus, some measures were taken to compensate for the problems above. The longitudinal constraints of node activity were presented, and the feasibility condition of IA was discussed by the means of setting constraints on the data rates and the maximal number of interfering links at each node. The simulation results demonstrate that the feasible region of the modified optimization mode would be contracted with the longitudinal constraints. Meanwhile, IA feasibility would be guaranteed.

Keywords: multi-hop network; interference alignment; mixed integer programming; throughput optimization

引言

无线通信中, 其物理传输信道会造成用户之间的同频干扰和相邻信道干扰。对基于共享介质的多跳无线网络, 多个节点同时发送数据可能会造成彼

此之间的冲突和干扰, 节点之间需要以某种方式共享信道, 因此, 如何在消除干扰的同时有效提升多跳网络的容量成为当前的研究热点^[1-2]。干扰对齐(Interference Alignment, IA)^[3]通过将信号空间分为期望信号子空间和干扰子空间, 并设计合适的预编码方案使接收端各干扰矢量在干扰信号子空间内重叠, 从而减少干扰信号所占用的子空间维数, 使得在干扰消除的同时, 能够传输更多有用信号, 获得系统容量提升(详细研究内容可见文献[4])。在干扰对齐研究初期, 其应用范围大多局限在单跳网络^[5]。



收稿日期: 2014-05-20 修回日期: 2014-09-22;
作者简介: 熊最(1988-), 男, 湖北黄冈人, 博士生, 研究方向为通信信号处理、干扰对齐; 王可人(1957-), 男, 江苏镇江人, 教授, 博导, 研究方向为无线通信、信号处理等; 金虎(1973-), 男, 安徽潜山人, 博士, 副教授, 研究方向为无线通信、通信信号处理等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1240 •

与单跳网络相比, 多跳网络中涉及的节点数量大、节点自由度(Degree of Freedom, DoF)分配复杂、与上层调度密切相关等等特点, 均为干扰对齐的实施提出了挑战。

文献[6]最早研究了多跳 MIMO 无线网络中的干扰对齐问题。但该文在建模过程中并未完全贯彻干扰对齐的思想(即期望节点接收到的信号仍然可分)。文献[7]主要研究了单对源节点之间的通信, 考虑该对源节点之间存在 2 条不同路径, 将所有通信链路划分为多个可并发通信的集合, 并以干扰对齐完全理想实现时的 DoF 作为理论模型中所有链路的 DoF 之和的上界, 对该网络的吞吐量进行优化。但文献[7]中干扰对齐仅为理想状态, 并且也未考虑实际的并发链路之间的干扰。文献[8]文章标题中虽使用了干扰对齐的字眼, 却仅仅只研究了发送端的迫零技术, 对干扰对齐并未具体涉及。文献[9]较明确地将干扰对齐这一概念运用到了多跳网络中, 并且给出了一个较为完善的多跳网络容量优化框架模型。但该文仅考虑节点状态横向约束(即半双工模式), 并未从网络全局形成有效的节点状态纵向约束(保证在给定时间内所有连接均完成通信), 使得所给出的优化约束条件对于准确收敛到最优可行解而言不充分。同时, 文献[9]在考虑干扰对齐的实施时假设干扰对齐完全实现, 但并未考虑其完全实现时的可行性条件限制(后文中给出具体分析)。

因此, 本文通过对二组会话的多跳网络节点路径进行分解建模和理论推导分析, 给出了二组会话时的节点状态纵向约束条件, 并将该约束条件推广到了任意组会话的情形。同时, 通过对干扰对齐可行性的简要分析, 完善了可行性限制条件。仿真实验验证了本文改进模型的可行性。

1 原有模型

文献[9]将多跳网络容量优化的问题建模为一个混合整数规划问题, 以使网络会话的最小速率最大化为目标函数, 设置了半双工约束、节点活动状

态约束、干扰对齐约束、DoF 约束、链路容量约束、数据流守恒约束等条件。设定 N 为节点总数, T 为网络总传输时隙数, F 为网络中会话总数, M 为每个节点上配置的天线数, N_L 为网络中的所有数据连接总数, $\mathcal{L}_i^{out}$ 表示以节点 i 为发端的链路集合, $\mathcal{L}_i^{in}$ 表示以节点 i 为收端的链路集合, $\mathcal{I}_i$ 表示在节点 i 的干扰范围内的节点集合。

1.1 节点状态约束

设定 $x_i(t)$ 和 $y_i(t)$ 表示节点 i 的状态, 前者取 1 时节点 i 在时隙 t 内处于发射状态, 取 0 为非发射状态, 后者取 1 时节点 i 在时隙 t 内为接收状态, 取 0 时为非接收状态。也即是每个节点均满足半双工约束:

$$x_i(t) + y_i(t) \leq 1, 1 \leq i \leq N, 1 \leq t \leq T \quad (1)$$

同时, 设 $z_l(t)$ 表示在时隙 t 内某个链路 l 上的数据流数目。当任意节点 i 处于发送状态时, 其发送的数据流之和应当低于该节点配置的总的天线数, 即: $\sum_{l \in \mathcal{L}_i^{out}} z_l(t) \leq M$ 。而其处于接收状态或者其他非发送状态时, 该节点不发送任何数据流, 此时 $\sum_{l \in \mathcal{L}_i^{out}} z_l(t) = 0$ 。上述情况可表达为:

$$\begin{aligned} x_i(t) &\leq \sum_{l \in \mathcal{L}_i^{out}} z_l(t) \leq M \cdot x_i(t) \\ 1 &\leq i \leq N, 1 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (2)$$

同理, 考虑节点 j 是否处于接收状态时, 满足以下约束:

$$\begin{aligned} y_i(t) &\leq \sum_{l \in \mathcal{L}_i^{in}} z_l(t) \leq M \cdot y_i(t), \\ 1 &\leq i \leq N, 1 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (3)$$

1.2 干扰对齐约束

文献[9]假设干扰对齐能完全理想实现, 并分别对收发两端的干扰对齐进行了建模。设 $\alpha_{ij}(t)$ 表示在时隙 t 内节点 i 对节点 j 的干扰流数目, $\beta_{ij}(t)$ 表示在时隙 t 内节点 i 对节点 j 的干扰流中被对齐的干扰流数目。若节点 j 在节点 i 的干扰范围内, 那么, 当节点 i 处于发射状态且节点 j 此时处于接收状态时, 节点 i 对节点 j 的干扰 $\alpha_{ij}(t)$ 可表示为 $\sum_{l \in \mathcal{L}_i^{out}}^{Rx(l) \neq j} z_l(t)$, 其中 $Rx(l)$ 表示链路 l 的接收节点。

否则, 节点 i 对节点 j 的干扰为 0。因此, 可得:

$$\alpha_{ij}(t) = y_i(t) \cdot \sum_{l \in L_i^{out}} z_l(t),$$

$$j \in \mathcal{I}_i, 1 \leq i \leq N, 1 \leq t \leq T \quad (4)$$

对于任意节点 i 处于发送状态时, 必然满足 $\beta_{ij}(t) \leq \alpha_{ij}(t)$, $j \in \mathcal{I}_i$ 。而当节点 i 处于其他状态时, 必然有 $\beta_{ij}(t) = 0$, $\alpha_{ij}(t) = 0$ 。因此,

$$\beta_{ij}(t) \leq \alpha_{ij}(t), j \in \mathcal{I}_i, 1 \leq i \leq N, 1 \leq t \leq T \quad (5)$$

同时, 以节点 i 为发端的被对齐的干扰流之和应当小于以节点 i 为发端的数据流之和, 即:

$$\sum_{j \in \mathcal{I}_i} \beta_{ij}(t) \leq \sum_{l \in L_i^{out}} z_l(t),$$

$$j \in \mathcal{I}_i, 1 \leq i \leq N, 1 \leq t \leq T \quad (6)$$

当节点 j 处于接收状态时, 为了保证 $\beta_{ij}(t)$ 条干扰流均能够被完全对齐, 需满足一下条件:

$$\beta_{ij}(t) \leq \sum_{k \in \mathcal{I}_j} [\alpha_{kj}(t) - \beta_{kj}(t)],$$

$$j \in \mathcal{I}_i, 1 \leq i \leq N, 1 \leq t \leq T \quad (7)$$

1.3 DoF 分配约束

由于每个节点配置的天线数有限, 因此, 用于数据传输和干扰消除的 DoF 之和必然不能超过该节点的天线总数。当节点 j 处于接收状态时, 其用于数据接收的 DoF 总数为 $\sum_{l \in L_j^{in}} z_l(t)$, 而用于消除干扰的 DoF 总数为 $\sum_{i \in \mathcal{I}_j} [\alpha_{ij}(t) - \beta_{ij}(t)]$, 因此, 节点 j 上的 DoF 分配应当满足下式:

$$\sum_{l \in L_j^{in}} z_l(t) + \sum_{i \in \mathcal{I}_j} [\alpha_{ij}(t) - \beta_{ij}(t)] \leq M \cdot y_j(t)(t)$$

$$i \in \mathcal{I}_j, 1 \leq j \leq N \quad (8)$$

1.4 链路容量约束

假设 $r_l(f)$ 表示在会话 f 中链路 l 的传输速率, 那么, 每条链路上的数据速率之和不能超过网络平均的链路速率, 即

$$\sum_{f=1}^F r_l(f) \leq (1/T) \sum_{t=1}^T z_l(t) \quad 1 \leq l \leq N_L \quad (9)$$

1.5 数据流守恒约束

设 $r(f)$ 表示会话 f 的传输速率, $src(f)$ 表示某个会话 f 的源端节点, $dst(f)$ 表示某个会话 f

的终端节点。为了保证每个会话的数据流保持守恒, 会话 f 的传输速率 $r(f)$ 应当与会话 f 源端节点输出的速率保持一致, 即

$$\sum_{l \in L_i^{out}} r_l(f) = r(f) \quad i = src(f), 1 \leq f \leq F \quad (10)$$

同时, 会话 f 每个中间节点上的输入速率与输出速率保持一致, 即

$$\sum_{l \in L_i^{out}} r_l(f) = \sum_{l \in L_i^{in}} r_l(f)$$

$$i \neq src(f), i \neq dst(f), 1 \leq f \leq F \quad (11)$$

对于会话 f 的终端节点, 应当满足

$$r(f) = \sum_{l \in L_i^{in}} r_l(f),$$

$$i = dst(f), 1 \leq f \leq F \quad (12)$$

因此, 文献[9]的优化模型可归纳为:

$$OPT-IA: \quad \text{Max} \quad r_{min}$$

$$\text{s.t.} \quad \text{式(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)(11)(12)}$$

上述约束条件的具体推导过程详见文献[9]。

2 模型改进

文献[9]中 OPT-IA 模型从理论上解决了干扰对齐的建模, 理清了网络中各参数之间的物理逻辑关系, 但有两方面的问题需要改进。

改进 1: OPT-IA 模型中, 若节点 i 的状态 $x_i(t)$ 和 $y_i(t)$ 均取 0 时, 意味着该网络中任何节点均未发生通信, 这一结果并非期望得到的可行解。分析发现, 仅对每个节点进行半双工约束(本文称其为时间横向约束)并不能保证在给定的传输时间 T 内所有的数据连接上都完成通信, 因此, 还需要对其做时间纵向约束, 即, 在传输时间 T 内, 各节点需完成其对应的通信任务。

由于单个节点的状态与该节点所处的路径关系密切, 为了便于分析, 本文以二组会话的多跳网络为例。按照路径节点的不同分布(文献[10]对此也做了讨论), 二组会话的多跳网络可分解为 6 种基本模型, 如图 1 所示。

我们发现, 当节点 i 为会话 f 的源端节点时, 若二组会话路径相交于节点 i , 那么, 其节点状态应满足

$$1 \leq \sum_{t=1}^T x_i(t) \leq 2, \quad \sum_{t=1}^T y_i(t) = 1, \\ i \in \text{src}(f) \quad (13)$$

否则,

$$\sum_{t=1}^T x_i(t) = 1, \quad \sum_{t=1}^T y_i(t) = 0, \\ i \in \text{src}(f) \quad (14)$$

当节点 i 为会话 f 的终端端节点时, 若二组会话路径相交于节点 i , 那么, 其节点状态应满足

$$\sum_{t=1}^T x_i(t) = 1, \quad 1 \leq \sum_{t=1}^T y_i(t) \leq 2 \quad (15)$$

否则,

$$\sum_{t=1}^T x_i(t) = 0, \quad \sum_{t=1}^T y_i(t) = 1 \quad (16)$$

当节点 i 为会话 f 的中间节点时, 若二组会话路径相交于节点 i , 那么, 其节点状态应满足

$$1 \leq \sum_{t=1}^T x_i(t) \leq 2, \quad 1 \leq \sum_{t=1}^T y_i(t) \leq 2 \quad (17)$$

否则,

$$\sum_{t=1}^T x_i(t) = 1, \quad \sum_{t=1}^T y_i(t) = 1 \quad (18)$$

从式(13)-(18)中二组会话的时间纵向约束可以看出, 时间纵向约束与节点路径密切相关。那么, 对于存在多组会话的多跳网络而言, 在已知的节点传输路径中, 当某节点 i 不向任何节点发送数据时, 其发送状态参数 $x_i(t)$ 满足 $\sum_{t=1}^T x_i(t) = 0$, 而当其向其他 k 个节点发送数据时, 其发送状态参数 $x_i(t)$ 满足 $1 \leq \sum_{t=1}^T x_i(t) \leq \min(k, T)$ 。此处 $\min(k, T)$ 的物理涵义表示所有通信必须在传输时间 T 内完成。同理, 当某节点 i 不接收任何节点发来的数据时, 其接收状态参数 $y_i(t)$ 满足 $\sum_{t=1}^T y_i(t) = 0$, 而当接收来自其他点发来 k 个节点的数据时, 其接收状态参数 $y_i(t)$ 满足 $1 \leq \sum_{t=1}^T y_i(t) \leq \min(k, T)$ 。因此, 任意组会话的节点时间纵向约束条件可表示为:

$$\text{if } |\mathcal{L}_i^{\text{out}}| = 0, \quad \sum_{t=1}^T x_i(t) = 0 \\ \text{else} \\ 1 \leq \sum_{t=1}^T x_i(t) \leq \min(k_i^{\text{out}}, T) \\ \text{end}$$

$$\text{if } |\mathcal{L}_i^{\text{in}}| = 0, \quad \sum_{t=1}^T y_i(t) = 0 \\ \text{else} \\ 1 \leq \sum_{t=1}^T y_i(t) \leq \min(k_i^{\text{in}}, T) \\ \text{end} \quad (19)$$

上式中, $1 \leq i \leq N$, $|\cdot|$ 表示集合的基数。

$k_i^{\text{out}} = |\mathcal{L}_i^{\text{out}}|$ 表示节点 i 为发端的通信链路数, $k_i^{\text{in}} = |\mathcal{L}_i^{\text{in}}|$ 表示节点 i 为收端的通信链路数。

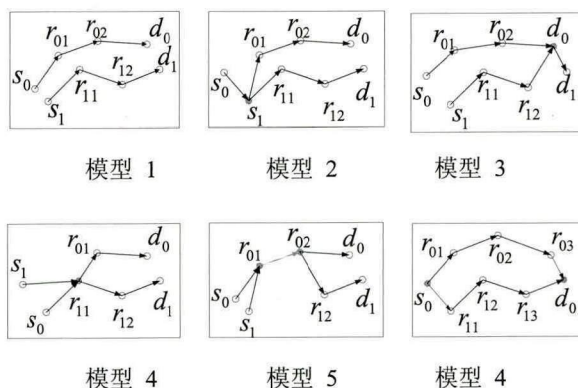


图 1 二组会话的多跳网络节点路径模型

改进 2: 文献[9]的优化结果并不符合干扰对齐的可行性要求。根据文献[9]的优化结果, 网络在 3 个传输时隙内均有多条链路同时通信, 每个时隙内的通信与干扰情况如下图 2 所示(实线为期望信号, 虚线为干扰信号):

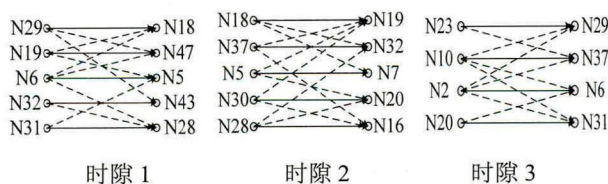


图 2 文献[9]中的优化结果

对于任意节点 i , 设 $I(i)$ 表示被节点 i 干扰的接收节点集合, $I^{-1}(i)$ 表示干扰节点 i 的发送节点集合。因此, 从上述不同时隙内用户间的干扰情况可以看出, 每个时隙内的传输信道为部分连接 (Partially Connected) 干扰信道, 且符合文献[11]中给出的部分连接定义。

定义 1 (L-干扰流 K 用户 MIMO 干扰信道): 若对于整数 $L < K$ (K 为信道中的用户数) 满足以下

条件则称部分连接 K 用户干扰信道为 L -干扰流:

$$\forall k \in \{1, \dots, K\}, |I(k)| \leq L \text{ 且 } |I^{-1}(k)| \leq L \quad (20)$$

设 $L(t), t \in \{1, 2, 3\}$ 表示不同时间隙内符合条件的参数 L , 那么, 对于文献[9]中的优化结果:

$$L(1)=3, L(2)=3, L(3)=3 \quad (21)$$

定理 1: 当满足如下条件时, 干扰对齐是合适 1 的:

$$D(M_t - D) + D'(M_r - D') - LDD' \geq 0 \quad (22)$$

其中, M_t 和 M_r 分别为发送端和接收端节点配置的天线数, D 为发送端信号的维数, D' 为接收端信号的维数。具体证明过程见文献[11]。

在文献[9]和本文中, 由于收发两端为一对一通信, 且各节点配置的天线数均一致, 故 $D' = D$, $M_t = M_r$ 。因此, 定理 1 中的条件可转化为

$$2M_r D - (L+2)D^2 \geq 0$$

可求得

$$D \leq 2M_r / (L+2) \quad (23)$$

将式(21)代入式(23)可知, 每个节点发送和接收信号维度 $D \leq 8/5$ 。而文献[9]中每条链路的数据流数为 2, 超出了该可行性限制, 因此产生了矛盾。

为了使得干扰对齐能在可行性范围内有效实施, 本文根据式(23)增加另外一条约束条件, 用于保证优化结果满足干扰对齐可行性条件:

$$0 \leq z_i(t) \leq \frac{2M}{L(t)+2} \quad (24)$$

其中, $L(t), t \in \{1, 2, \dots, T\}$ 表示不同时间隙内满足定义 1 的最大干扰流数目。式(24)旨在保证在每个时间隙内的干扰对齐可行性。

因此, 本文的改进模型 MOPT-IA 可归纳为:

$$\text{MOPT-IA: Max } r_{\min}$$

$$\text{s.t. 式(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(11)(12)(19)(24)}$$

3 模型对比

设网络中通信节点数为 N , 会话数为 F , 网络传输时间为 T 。在原模型的节点约束条件下, 节点状态只须满足 $x_i(t) + y_i(t) \leq 1$, 那么对于任意一个 i , $(x_i(t), y_i(t))$ 均有 $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 3 种状态,

因此, 原模型下 $(x_i(t), y_i(t))$ 的可行解总数为 3^{NT} 。

将改进模型 MOPT-IA 中所有节点划分为 3 类, 第 1 类为始终不发送数据的节点(节点数为 N_1), 第 2 类为始终不接收数据的节点(节点数为 N_2), 第 3 类为既发送数据, 又接收数据的节点(节点数为 $N - N_1 - N_2$)。下面分情况计算每一类条件下的可行解数目。第 1 类节点满足 3 个约束条件:

$$x_i(t) + y_i(t) \leq 1$$

$$\sum_{t=1}^T x_i(t) = 0, 1 \leq \sum_{t=1}^T y_i(t) \leq \min(k_i^{\text{in}}, T)$$

因此, $(x_i(t), y_i(t)) (1 \leq i \leq N_1, 1 \leq t \leq T)$ 的可行解个数为

$$\prod_{i=1}^{N_1} (\sum_{k=1}^{\min(k_i^{\text{in}}, T)} C_T^k)$$

上式中, $C_T^k = T! / (T-k)!k!$ 为排列组合函数。

对于第 2 类节点, 其满足的 3 个约束条件为

$$x_i(t) + y_i(t) \leq 1$$

$$1 \leq \sum_{t=1}^T x_i(t) \leq \min(k_i^{\text{out}}, T), \sum_{t=1}^T y_i(t) = 0$$

因此, $(x_i(t), y_i(t)) (1 \leq i \leq N_2, 1 \leq t \leq T)$ 的可行解个数为

$$\prod_{i=1}^{N_2} (\sum_{k=1}^{\min(k_i^{\text{out}}, T)} C_T^k)$$

对于第 3 类节点, 其满足的 3 个约束条件为

$$x_i(t) + y_i(t) \leq 1$$

$$1 \leq \sum_{t=1}^T x_i(t) \leq \min(k_i^{\text{out}}, T),$$

$$1 \leq \sum_{t=1}^T y_i(t) \leq \min(k_i^{\text{in}}, T)$$

因此, 当 $1 \leq i \leq N - N_1 - N_2, 1 \leq t \leq T$ 时, $(x_i(t), y_i(t))$ 的可行解个数为

$$\prod_{i=1}^{N-N_1-N_2} (\sum_{j=1}^{\min(k_i^{\text{in}}, T)} \sum_{k=1}^{\min(k_i^{\text{out}}, T)} C_T^k C_{T-k}^j)$$

在原有模型 2 种模型下, 节点 i 的状态 $(x_i(t), y_i(t))$ 可行解个数为 3^{NT} , 而在改进模型下, 节点 i 的状态 $(x_i(t), y_i(t))$ 可行解个数为

$$\prod_{i=1}^{N_1} (\sum_{k=1}^{\min(k_i^{\text{in}}, T)} C_T^k) \cdot \prod_{i=1}^{N_2} (\sum_{k=1}^{\min(k_i^{\text{out}}, T)} C_T^k) \cdot \prod_{i=1}^{N-N_1-N_2} (\sum_{j=1}^{\min(k_i^{\text{in}}, T)} \sum_{k=1}^{\min(k_i^{\text{out}}, T)} C_T^k C_{T-k}^j)$$

4 实验仿真与验证

本文所讨论的多跳网络的吞吐量优化问题 MOPT-IA 为混合整数规划问题 (Mixed Integer Linear Programming, MILP), 文献[9]采用了 CPLEX 优化工具来完成优化计算, 但该工具对于线性优化问题要求较规范的约束条件格式。本文则采用 YAMILP^[12]来完成求解。YAMILP 工具是一种基于符号运算工具箱编写而成, 采用定义和求解高级优化问题的模块化语言, 可用于求解线性规划、整数规划、非线性规划、混合规划等优化问题, 其显著特点在于无需人工将约束条件预处理为矩阵表达式, 一定程度上能简化处理流程。

4.1 仿真流程

为了不失一般性, 本文随机生成多跳网络初始通信节点, 采用常见的 Floyd 算法求解每组会话节点之间的最短路径。具体仿真流程如下:

步骤 1: 初始化天线数 M , 节点数 N , 会话数 F , 干扰距离 R_{inter} , 通信距离 R_{com} ;

步骤 2: 在给定区域内产生 N 个节点, 根据节点间距离, 计算邻接矩阵 **ComMatrix**;

步骤 3: 随机选取 F 组会话节点, 作为会话节点集 **NodeSession**;

步骤 4: 采用 Floyd 算法求解会话节点之间的最短路径, 获取路径节点集合 **PathNode**;

步骤 5: 根据节点通联关系, 设定约束条件;

步骤 6: 运用 Yamilp 工具进行迭代优化;

步骤 7: 对优化结果进行可行性检验;

步骤 8: 若可行, 仿真结束, 获取优化结果; 若不可行, 加入可行性约束, 返回至步骤 5。

4.2 仿真参数设置

本文在仿真时, 包括距离、带宽、时间、功率、速率等参数的单位均归一化。在 1000×1000 的区域内随机生成 50 个通信节点, 每个通信节点配备 4 根天线, 网络中的会话数设为 3 组。假设每个节点都具有相同的干扰距离和通信距离, 其中干扰距

离为 500, 通信距离为 250。选取初始会话节点为 (N32, N15), (N1, N33), (N29, N41)。网络传输时间选取为 2 个单位传输时间。

4.3 仿真结果分析

图 3 中, 实线表示传输数据流, 虚线表示干扰流。线上方的数字表示为 $(\alpha_{ij}, \beta_{ij})$ 。

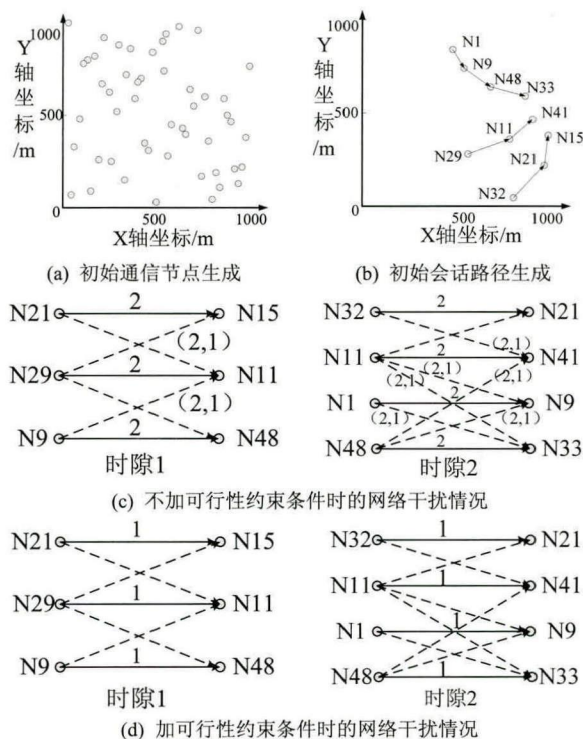


图 3 本文仿真结果

仿真结果分析:

(1) 模型可行解个数对比: 根据仿真实验参数设置及实验结果可知, 网络中节点总数 $N=10$, 网络传输时间 $T=2$, 第 1 类节点数 $N_1=3$, 且每个节点仅从其他 1 个节点接收数据, 即 $k_i^{in}=1$, 第 2 类节点数 $N_2=3$, 且每个节点仅向 1 个节点发送数据, 即 $k_i^{out}=1$, 第 3 类节点数为 4, 且 $k_i^{in}=1, k_i^{out}=1$ 。因此, 改进模型中 $(x_i(t), y_i(t))$ 的可行解个数为 $2^{10}=1024$ 个, 而原模型中 $(x_i(t), y_i(t))$ 的可行解个数为 $3^{NT}=3^{20}$ 个。由此可见, 加入本文提出的节点纵向约束后, $(x_i(t), y_i(t))$ 的可行解个数明显减少, 使得优化时的搜索范围得到大幅压缩, 从而能够有效降低优化计算所需的时间。

(2) 改进模型的可行性: 从图 3(c)中可以看出, 当优化约束条件中不添加可行性约束时, 网络的平均吞吐量为 1, 但在第 2 个时隙内, 节点最大的干扰链路有 3 条, 这一结果并不符合定理 1 中的干扰对齐可行性约束。当加入可行性约束条件后(如图 3(d)所示), 网络的平均吞吐量降低为 0.5, 尽管此时网络中的最大干扰链路是 3 条, 但该结果能够满足干扰对齐的可行性约束。

(3) 改进模型的计算量: 若设定 N 为节点总数, T 为网络总时隙数, N_L 为网络中连接总数, 本文计算量将较之原模型多出 $2NT + N_L T$ 次。因此, 尽管本文模型能将可行解缩小到更小的范围, 但会以计算量作为代价。

5 结论

本文针对原有基于干扰对齐的多跳网络优化模型中约束条件不充分的问题, 通过对二组会话的节点路径进行建模分析, 给出了任意组会话条件下的节点状态纵向约束条件。同时, 针对原有模型中的干扰对齐可行性缺乏约束的问题, 增加了干扰对齐的可行性约束。通过对原有优化模型的改进, 使得优化模型在可行解范围得到有效收缩, 同时保证了干扰对齐的可行性。尽管改进后的网络吞吐量相比改进前有所降低, 但干扰对齐的可行性得到了保证。因此, 如何在满足干扰对齐可行性条件的情况下进一步提升网络吞吐量是后续工作中值得研究的问题。

参考文献:

- [1] Jiang C, Shi Y, Hou Y, *et al.* Throughput Maximization for Multi-Hop Wireless Networks with Network-Wide Energy Constraint [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276), 2013, 12(3): 1255-1267.
- [2] Zhou Y, Li X, Liu M, *et al.* Throughput Optimizing Localized Link Scheduling for Multi-hop Wireless Networks Under Physical Interference Model [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System (S1045-9219), 2013, 25(10): 2708-2720.
- [3] Cadambe V R, Jafar S A. Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K-User Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory (S0018-9448), 2008, 54(8): 3425-3441.
- [4] Syed A Jafar. Interference Alignment: A New Look at Signal Dimensions in a Communication Network [M]. Boston, USA: Now Publishers Inc., 2011 (S1567-2328), 2011, 7(1): 1-134.
- [5] Omar E A, S W Peter, R W Heath Jr. The Practical Challenges of Interference Alignment [J]. IEEE Wireless Communication (S1536-1284), 2013, 20(1): 35-47.
- [6] Li E Li, R Alimi, D Shen, *et al.* A General Algorithm for Interference Alignment and Cancellation in Wireless Networks [C]// IEEE International Conference on Computer Communications (S0743-166X), San Diego, CA, USA: IEEE, 2010: 1774-1782.
- [7] Guo W, Huang X. On Throughput Enhancement of Multi-hop Wireless Networks Using Interference Alignment [C]// IEEE Wireless and Optical Communications Conference (ISBN: 978-1-4577-0453-6), Newark, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [8] D Hu, S Mao. Cooperative Relay with Interference Alignment for Video over Cognitive Radio Networks [C]// IEEE International Conference on Computer Communications (S0743-166X), Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 2014-2022.
- [9] Huacheng Zeng, Yi Shi, Y Thomas Hou, *et al.* On Interference Alignment for Multi-hop MIMO Networks [C]// IEEE International Conference on Computer Communications (S0743-166X), Turin, Italy, 2013. USA: IEEE, 2013: 1330-1338.
- [10] Sushant Sharma, Yi Shi, Y Thomas Hou, *et al.* Joint Flow Routing and Relay Node Assignment in Cooperative Multi-hop Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (S0733-8716), 2012, 30(2): 254-262.
- [11] M Guillaud, D Gesbert. Interference Alignment in Partially Connected K-User MIMO Interference Channel [C]// 19th European Signal Processing Conference (S2076-1465), Barcelona, Spain: IEEE, 2011: 1095-1099.
- [12] J Löfberg. YALMIP: A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB[C]// IEEE International Conference on Computer-Aided Control System Design (ISBN: 0-7803-8636-1), Taipei, Taiwan, China. U IEEE, 2004: 284-289.