

FANET 中时延感知的跨层优化方法

文少杰, 黄传河

(武汉大学计算机学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对 FANET 中的实时路由、速率分配和功率控制问题, 提出异步的分布式跨层优化 (ADCO) 方法。为了解决所提问题, 首先设计时延约束的跨层优化框架, 然后利用拉格朗日松弛和对偶分解方法把联合优化问题分解为几个复杂度较低的子问题。ADCO 允许每一个中继节点仅通过局部信息来完成对不同子问题的优化, 同时, 中继节点利用异步更新机制实现对偶变量的更新。仿真结果表明, 所提方法有效地增加了吞吐量, 减少了数据分组的超时率和功率消耗。

关键词: FANET; 时延感知; 跨层优化; 对偶分解; 异步更新

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018070

Delay-aware cross-layer optimization method for FANET

WEN Shaojie, HUANG Chuanhe

Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: An asynchronous distributed cross-layer optimization (ADCO) method was proposed to solve the problem of jointly considering real-time routing, rate allocation and power control in FANET (flying ad hoc network). And a delay-constrained cross-layer optimization framework was designed to formally represent proposed problem. Then Lagrangian relaxation and dual decomposition methods was used to divide joint optimization problem into several sub-problems. ADCO allowed each relay node to perform the optimization operation for different sub-problems with local information, and the relay nodes could update the dual variables based on asynchronous update mechanism. The simulation results show that the proposed algorithm can improve the network performance effectively in terms of energy efficiency, packet timeout ratio and network throughput.

Key words: FANET, delay-aware, cross-layer optimization, dual decomposition, asynchronous update

1 引言

无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 可以作为传感器收集环境中的数据, 并把这些收集的数据传递到地面基站 (GB) [1]。单架 UAV 系统由于其灵活性、易安装和可扩展性等特点已经被广泛地应用于不同的场景中 [2], 但是单架 UAV 系统由于受到功能简单、覆盖范围有限的限制, 因此不能扩展到更多的应用中。为了克服单架 UAV 系统的不足,

可以通过不同 UAV 之间的协作建立 multi-UAV 系统 [3] 扩展应用范围。在 multi-UAV 系统中, 由于受到通信半径的限制单架 UAV 与 GB 之间的链路可能会出现不连通的情况, 这种局限性缩小了 multi-UAV 系统的应用范围。一种可选的解决方案是在不同的 UAV 之间建立 ad hoc 模式的网络, 称为飞行自组网络 (FANET, flying ad hoc network)。在 FANET 中, 每架 UAV 可以通过单跳或多跳方式与 GB 进行通信, 同时每架 UAV 既可以作为源节点

收稿日期: 2017-08-07; 修回日期: 2018-02-07

通信作者: 黄传河, huangch@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61373040, No.61572370)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61373040, No.61572370)

也可以作为中继节点帮助其他 UAV 传递数据分组。与单架 UAV 系统相比, FANET 具有更好的灵活性和可扩展性, 它允许 UAV 可以根据实际需求选择不同的通信模式, 同时也允许 UAV 可以在一定范围内自由地飞行从而扩大监测的范围。尽管 FANET 能够弥补单 UAV 系统的不足, 但是 FANET 也面临一些挑战, 其中, 实时路由、速率分配和功率控制是 3 个主要的问题。

FANET 具有更高的移动性和空间维度^[4], 这导致源节点和目的节点之间预先建立的路径可能会很快失效, 因此, FANET 中的路由问题需要考虑节点之间的连通时间。实时路由要求每一种数据分组在时延约束内到达目的节点, 如何设计一种算法同时满足 FANET 的特征和时延约束的要求是主要研究的内容之一。UAV 处于三维空间中, 它们之间建立的链路更易受到其他无线信号的干扰, 如何选择发射功率既能减少信号之间的干扰又能保证传输的可靠性是另一个研究的主要内容。一个精确的干扰模型不仅能够使传输者选择更合适的中继节点而且也能够保证每个数据分组以较高的概率传递到目的节点。在 FANET 中, UAV 之间的链路容量受到物理信道的约束, 每个 UAV 的传输速率被限制在一定的范围内, 如果超出了这个范围数据分组将不能被正确地接收到。传输速率的上界是由发射功率和干扰信号决定的, 因此, 需要选择合适的发射功率和传输速率, 既保证端到端传输的可靠性又满足实时路由的要求。根据 FANET 的特征可知, 链路状态的快速变化使集中式优化方法不能很好地工作, 而分布式的方法可以很好地解决这个问题, 因为它允许每个 UAV 仅与邻居交换信息来更新所对应的网络参数而不需要全局拓扑知识。为了实施分布式方法, 首先利用拉格朗日松弛方法把集中式问题转化为分布式问题, 然后使用原始-对偶分解方法^[5]把全局问题分解为若干个规模较小的子问题。由于无线链路的不可靠性, 数据分组在传输过程中的丢失容易导致部分中继节点不能根据当前的信息更新网络参数。传统的同步优化方法^[6]需要所有节点在同一时刻根据最新接收到的数据分组更新参数, 这在不可靠的通信环境中很难实现。异步优化方法^[7]允许节点在没有接收到最新数据分组时使用最近保存的信息更新参数, 所以利用异步优化方法能够很好地解决因数据分组丢失导致部分节点不能正常更新参数的问题。本文的主要贡献包

括以下 2 点。1) 提出时延约束的跨层优化框架, 利用拉格朗日松弛和原始-对偶分解技术把问题划分为若干个多项式时间可解的子问题。2) 提出基于异步更新的时延感知分布式优化算法, 每一个中继节点仅使用局部信息更新原始和对偶变量以达到最优解。

2 相关工作

对于 FANET 中的路由问题, 目前, 已经存在很多的研究工作^[8,9], 它们通过构建不同的网络模型和考虑不同的网络参数设计路由算法以满足 FANET 的需要。这种仅考虑路由优化的算法局限性比较大, 在考虑实时性和信号干扰的情况中不能很好地工作。跨层优化问题在其他网络中提出了很多解决方案, 文献[10]针对智能电网通信的服务质量问题, 提出了一种满足端到端时延约束的跨层优化算法以保证物理层、MAC 层和网络层能够很好地进行交互。在实时的无线网络中, 为了联合优化速率控制和调度问题, 文献[11]提出了 2 种简单的分布式策略, 其中, 优化操作在每个节点处完成而不要求节点间的协同; 文献[12]提出了一种基于干扰管理的高容量跨层优化策略, 在多跳多基站场景中考虑干扰消除和区域划分方法, 并基于最小跳数建立的路由或多时间片分配设计吞吐量更大的优化策略。上面介绍的优化方法虽然能够很好地解决所提出的问题, 但是不能直接应用于链路状态快速变化的 FANET 中。

UAV 的高速移动性导致 FANET 的网络拓扑快速变化和链路不可靠, 这些特征使源节点和目的节点之间预先建立的路径很快失效。同步优化方法^[13,14]需要所有节点在同一时刻更新自身的网络参数, 而在多跳不可靠传输中这些方法不能正常工作。虽然文献[15]考虑端到端时延要求下的动态速率分配方案, 但是它要求网络中所有节点同步地更新原始和对偶参数, 这种操作将会带来大量的通信开销, 在资源有限的 FANET 中是不合适的。然而异步优化方法不需要节点间的协作, 每个节点可以使用旧的信息更新当前的参数, 这些方法在时延较大和通信质量较差的场景中能够保证算法的收敛性和优化性能。异步方法的优势使它在不同的场景中得到广泛的应用, 包括智能电网^[16]、通信网络^[17]等。近些年, 出现了很多异步优化方法^[18,19], 这些方法从不同的角度出发, 例如, 目标函数的性质、算法收敛

速率和解的优劣等,设计不同的参数更新方法以满足应用的需要。文献[18]针对可分的非平滑成本函数分布式优化问题提出了一种基于随机对偶近似梯度的异步优化算法。文献[19]研究了非凸和非平滑优化问题中 ADMM 的异步实施问题,该文提出的算法在每次迭代过程中只需要部分节点更新自身的参数。在这些文献中,文献[18,19]提出的异步优化方法假设通信的时延是有界的,而文献[17]讨论了在通信时延不受限制的情况下如何保证异步对偶子梯度方法的性能,并在可分的凸规划中给出了一种解决方案。文献[7]针对编码无线网络多播场景中的资源分配问题,结合异步优化的思想提出了一种联合优化端到端传输层速率、链路容量和平均功率消耗等的跨层设计方案。文献[20]研究了如何以在线的方式设计一个平均最优的资源分配策略问题,并提出一种异步递增对偶下降的资源分配算法,其中每个节点使用时延的随机梯度更新参数。文献[7,20]解决了不同网络模型中的跨层优化问题,但是它们都没有考虑实时性和动态拓扑问题。FANET 是自组织的网络,网络中的所有节点都是同构和快速移动的,而这些移动节点构成随机变化的网络拓扑,文献[20]中的多跳模式建立在环形网络拓扑基础上,不能满足 FANET 的要求。

针对以上方法的局限性,结合异步更新的思想并同时考虑端到端时延和每个中继节点处的干扰,本文提出一种分布式的跨层优化方法解决所提出的问题。

3 网络模型和问题描述

3.1 网络模型

假设 UAV 基本均匀地分布在一定的区域内,每个 UAV 同时可以作为源节点和中继节点,而地面基站(GB)只作为目的节点。所有的 UAV 可以自由地在区域内飞行,而 GB 的坐标在任意时间固定不变,UAV 可以通过一跳或多跳的传输模式把数据传递到 GB,如图 1 所示。使用无向图 $G=(V,E)$ 表示 FANET 的网络拓扑结构,其中, V 表示所有 UAV 的集合, E 表示网络中所有链路的集合(图 1 中 UAV 之间的虚线)。为了简化符号,节点 i 表示第 i 个 UAV。如果节点 i 发射的信号能够被节点 j 正确的接收到,那么节点 $j \in N_i^t$,其中 $N_i^t = \{j | (i,j) \in E\}$ 是节点 i 在 t 时间的邻居集合。二元组 (i,j) 表示一

条连接节点 i 和节点 j 的链路,也可以用符号 l 代替。第 k 个数据流在链路 l 上消耗的时延表示为 t_{ij}^k ,端到端时延不能超过预设的时延阈值 \mathfrak{S}_k 。假设每一个数据流具有相同的时延阈值,网络中所有节点都存储关于 GB 的位置信息,并且每个节点具有相同的通信半径 R 。每一个中继节点可以根据问题的最优解在 $[p_{\min}, p_{\max}]$ 中选择发射功率 p 和确定传输速率 r 。

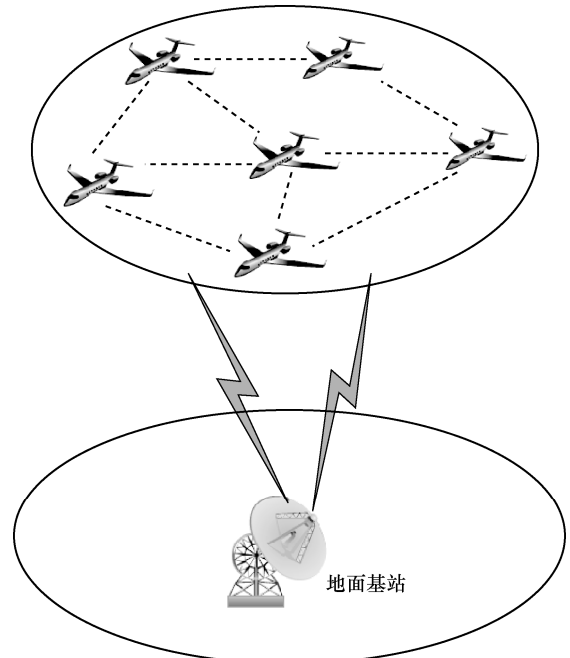


图1 FANET 模型

3.1.1 干扰中断概率

为了提高传输效率,减少网络资源和时延的消耗,每一个中继节点需要评估与邻居节点之间的链路质量。由于网络中每一个节点的位置随着时间变化,所以任意 2 个节点之间的距离也是动态变化的。为了评估动态性对传输的影响,利用干扰预测方法^[21]得到 Δt 时间内每个中继节点处的平均干扰值。 $I(t|t_0)$ 表示在 t_0 时刻消息可用的情况下 t 时刻的干扰值,当 $t_0=t$ 时, $I(t|t_0)=0$ 称为 t 时刻的瞬时干扰值。在移动场景中,由 $I(t|t_0)$ 得到的瞬时 SINR 不能很好地反映一段时间内链路的质量,而平均 SINR 可以很好地满足这个要求。假设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别表示与时间 t 相关的链路增益函数和衰减函数,在节点 j 处的预测干扰可以表示为

$$I_j(t|t_0) = \sum_{k \neq j} \int_{t_0}^t g(x) f(x) dx \quad (1)$$

根据式(1)可以得到链路 (i, j) 上的平均 $SINR$, 其中, 传输者为节点 i , 接收者为节点 j , 则有

$$\gamma_j^i(t|t_0) = \frac{g(x)f(x)}{N_0 + I_j(t|t_0)} \quad (2)$$

为了简化表示, 用 γ_j^i 代替 $\gamma_j^i(t|t_0)$ 。利用式(2)可以得到从 t_0 到 t 时刻的信道容量为

$$c_i(t) = W \ln(1 + \gamma_j^i) \quad (3)$$

其中, W 表示网络带宽, 其值为常数。参考文献[22]中速率中断概率的定义, 链路质量表示为节点 i 的传输速率不超过链路容量 c_i 的概率。假设路径增益 $|h_{ij}|^2$ 服从方差为 $\sigma^2=1$ 的指数分布, 速率中断概率可以表示为

$$p_{ij}^{\text{out}} = 1 - \exp\left(-\frac{\frac{r_i}{2^W} - 1}{s_j^i}\right) \quad (4)$$

其中, $s_j^i = \frac{p_i g(t)}{N_0 + I_j(t|t_0)}$, p_i 表示节点 i 的发射功率,

根据式(4)可以得到链路质量 $q_{ij} = 1 - p_{ij}^{\text{out}}$ 。

3.1.2 排队时延

在每一个中继节点处只考虑排队时延, 假设数据分组服从均值为 K bit 的指数分布, 每一个节点维持单一的队列。根据文献[23]计算的结果, 当到达过程服从独立的指数分布时, 在 t 时刻链路 l 的期望排队时延可以近似表示为

$$\bar{D}_l(t) = \frac{K}{c_l - r_l} \quad (5)$$

其中, r_l 和 c_l 分别表示 t 时刻的传输速率和链路最大容量。

3.1.3 链路连通时间

为了延长路径的使用时间, 减少重建消耗的网络资源, 每一个源节点尽量选择生命周期较长的路径传输数据流。在 t_0 时刻, 节点 i 和 j 的坐标分别为 $L_i = (x_i^{t_0}, y_i^{t_0}, z_i^{t_0})$ 和 $L_j = (x_j^{t_0}, y_j^{t_0}, z_j^{t_0})$, 移动速率向量分别表示为 (v_x^i, v_y^i, v_z^i) 和 (v_x^j, v_y^j, v_z^j) 。根据 t_0 时刻节点 i 和 j 的坐标可以得到它们之间的距离为 $d_{ij}^{t_0}$, 如果在一定时间间隔内所有节点匀速地沿着各自的方向移动, 那么经过 Δt 时间后节点 i 的坐标为

$$L_i^{\Delta t} = (x_i^{t_0} + v_x^i \Delta t, y_i^{t_0} + v_y^i \Delta t, z_i^{t_0} + v_z^i \Delta t) \quad (6)$$

节点 j 在 Δt 时间后的坐标 $L_j^{\Delta t}$ 与式(6)的计算方式相同。根据 $L_i^{\Delta t}$ 和 $L_j^{\Delta t}$ 可以得到 2 个节点在 Δt 时间后的距离 $d_{ij}^{t_0+\Delta t}$, 当 $\Delta t=1$ 时可以得到节点 i 和 j 相离的速率 $\bar{v}_{ij} = d_{ij}^{t_0+1} - d_{ij}^{t_0}$ 。如果 \bar{v}_{ij} 为正数, 节点 i 和 j 总的相离距离为 $\Delta d_{ij}^1 = R - d_{ij}^{t_0}$; 如果 \bar{v}_{ij} 为负数, 总的相离距离为 $\Delta d_{ij}^2 = d_{ij}^{t_0} + R$ 。综上可知

$$\Delta d_{ij} = \begin{cases} \Delta d_{ij}^1, & \bar{v}_{ij} > 0 \\ \Delta d_{ij}^2, & \bar{v}_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)和相离速率 \bar{v}_{ij} , 可以得出节点 i 和 j 的连通时间为

$$CT_{ij} = \frac{\Delta d_{ij}}{|\bar{v}_{ij}|} \quad (8)$$

其中, $|\bar{v}_{ij}|$ 表示取 \bar{v}_{ij} 的正数值。

3.2 问题描述

为了提高网络性能, 使用有效传输速率 r_{ij}^e 代替实际传输速率 r_l , 其中, $r_{ij}^e = r_l q_{ij}$ 。每个传输节点使用较大的发射功率可以保证传输的可靠性, 同时也对其他链路产生干扰, 如果网络中的数据流比较多时, 这种干扰信号可能使接收者不能正确接收到数据分组。因此, 控制每一个传输者的发射功率不仅能够减少对其他数据流的干扰也能提高链路可靠性, 同时还能够保证数据分组在给定的时延阈值内到达 GB。因为 ACK 消息一般比数据分组小很多, 所以 ACK 对传输性能的影响可以忽略^[24]。为了更直观地表示路径选择问题, 需要定义 2 个变量。

$$\tilde{r}_{ij}^e = \begin{cases} r_l q_{ij}, & \text{节点 } j \text{ 为节点 } i \text{ 的下一跳} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\tilde{t}_{ij} = \begin{cases} t_{ij}^k, & \tilde{r}_{ij}^e \neq 0 \\ 0, & \tilde{r}_{ij}^e = 0 \end{cases} \quad (10)$$

在形式化问题之前定义 2 个函数: $C(\tilde{r}_{ij}^e)$ 和 $V(p_i)$, 这 2 个函数具有有界的、平滑的和凸的成本函数性质, 同时假设 2 个函数都存在一阶导数。利用式(9)和式(10)把跨层优化问题表示为

$$\min_k \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} C(\tilde{r}_{ij}^e) + \sum_{i \in V'} V(p_i) \quad (11)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in V} \tilde{r}_{ij} \leq c_i, \forall i \in V \quad (12)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \tilde{t}_{ij} \leq \mathfrak{I} \quad (13)$$

$$p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max}, \forall i \in V \quad (14)$$

式(11)为联合成本函数, 主要目标是最小化以有效传输速率和功率为参数的成本函数。式(12)保证每一个发送者所使用的传输速率不能超过当前链路的最大容量, 根据式(4)可知, 链路的质量和期望排队时延与中继节点的传输速率相关, 选择合适的速率不仅能够保证链路可靠性也能减少单跳时延。实时路由问题是需要考虑的一个主要问题, 式(13)表示每一个数据流所消耗的端到端时延不能超过给定阈值, 否则数据分组将会被中继或 GB 丢弃。由于硬件的限制每一个节点不能用无限大的功率传输数据分组, 式(14)把中继节点发射功率限制在一定的范围内, 既要保证传输的可靠性又要减少对其他数据流的干扰。

4 分布式解决方案

集中式的优化方法需要网络中的每一个节点频繁地与控制中心通信来更新网络参数以得到最优解, 这种优化方法在节点快速移动的 FANET 中是不可取的。一方面, 节点频繁地与控制中心交换信息将会消耗大量的带宽和功率资源, 同时并发的传输将会对其他链路产生干扰, 降低链路质量。另一方面, 集中式优化需要控制中心接收到所有节点发送的更新信息才能进行下一步优化, 在链路质量较差的情况下, 控制中心可能会花费大量的时间等待最后一个节点的更新信息。以上 2 个方面决定了集中式优化方法不能用于高速移动的实时传输场景, 而分布式的方法^[25]可以很好地解决集中式方法存在的问题, 它仅需要节点与其邻居节点交换更新信息来执行优化操作。由于提出的跨层优化问题是一个非凸问题, 利用对偶分解^[5]方法可以把非凸约束消除使问题转化为凸优化问题。

为式(12)引入拉格朗日对偶向量 λ , 向量中的每一元素 λ_{ij} 对应一条链路的约束, 问题可以转化为

$$L(\tilde{r}_{ij}^e, p_i) = \min \left\{ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C(\tilde{r}_{ij}^e) + \sum_{i \in V} V(p_i) + \sum_{i \in V} \left(\sum_{j \in V} \lambda_{ij} (\tilde{r}_{ij}^e - c_{ij}) \right) \right\} \quad (15)$$

重新组合式(15)可以得到另外一种形式

$$L(\tilde{r}_{ij}^e, p_i) = \min \left\{ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (C(\tilde{r}_{ij}^e) + \lambda_{ij} \tilde{r}_{ij}^e) + \sum_{i \in V} \left(V(p_i) + \sum_{j \in V} (\lambda_{ij} c_{ij}) \right) \right\} \quad (16)$$

根据式(16)可知, 提出的跨层优化问题被分解为 2 个子问题, 分别为

$$L^1(\tilde{r}_{ij}^e, \lambda) = \min \left\{ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (C(\tilde{r}_{ij}^e) + \lambda_{ij} \tilde{r}_{ij}^e) \right\} \quad (17)$$

s.t. (13)

$$L^2(p_i, \lambda) = \min \left\{ \sum_{i \in V} \left(V(p_i) + \sum_{j \in V} (\lambda_{ij} c_{ij}) \right) \right\} \quad (18)$$

s.t. (14)

从式(17)和式(18)的结构和函数定义可知, 2 个子问题都为凸优化问题。式(17)联合优化实时路由和速率分配问题, 而式(18)主要优化功率控制问题, 2 个问题都可以利用分布式的方法在每个节点处独立地执行。对于式(17)还需要解决另外一个问题, 由于路径的时延约束条件是全局耦合的, 所有包含在路径上的节点必须要协同的工作才能使端到端时延满足式(13)。为了消除全局耦合约束式(13), 利用原始分解方法^[5]进一步对式(17)进行划分。引入一个辅助向量 \mathbf{y} 把全局约束式(13)转化为局部约束, \mathbf{y} 中的每一项与单条链路上的时延约束相关。通过考虑向量 \mathbf{y} , 可将式(17)转化为

$$\min \left\{ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (C(\tilde{r}_{ij}^e) + \lambda_{ij} \tilde{r}_{ij}^e) \right\} \quad (19)$$

s.t. $\sum_{j \in V} \tilde{t}_{ij} \leq y_{ij}, \forall i \in V$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} y_{ij} \leq \mathfrak{I}, \lambda_{ij} \geq 0$$

如果把 y_{ij} 看作 t 时刻链路 l 上的单跳时延阈值, 优化式(19)可以划分为 2 个子问题, 对于每一个发送节点 i , 其优化目标为

$$\min \left\{ \sum_{j \in V} (C(\tilde{r}_{ij}^e) + \lambda_{ij} \tilde{r}_{ij}^e) \right\} \quad (20)$$

s.t. $\sum_{j \in V} \tilde{t}_{ij} \leq y_{ij}, \forall i \in V$

$$\lambda_{ij} \geq 0, \forall i, j \in V$$

假设 $F^*(\mathbf{y})$ 表示问题式(20)在时延约束向量 \mathbf{y} 时的最优成本函数, 通过解决下面的优化形式更新耦合的时延约束集合 \mathbf{y}

$$\begin{aligned} \min F^*(\mathbf{y}) \quad (21) \\ \text{s.t. } \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} y_{ij} \leq \mathfrak{I} \end{aligned}$$

为问题式(20)中的时延约束引入对偶向量 $\boldsymbol{\mu}$, 问题转化为

$$\begin{aligned} L^3(\tilde{\mathbf{r}}_{ij}^e, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \min \left\{ \sum_{j \in V'} \left(C(\tilde{\mathbf{r}}_{ij}^e) + \lambda_{ij} \tilde{r}_{ij}^e + \mu_{ij} (\tilde{t}_{ij} - y_{ij}) \right) \right\} \quad (22) \\ \text{s.t. } \lambda_{ij} \geq 0, \mu_{ij} \geq 0, \forall i, j \in V \end{aligned}$$

推论 1 如果式(21)和式(22)存在最优解, 那么对偶向量 $\boldsymbol{\mu}$ 满足条件 $\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \mu_{ij} = 1$ 。

证明 为式(21)引入对偶向量 $\boldsymbol{\beta}$, 可以得到

$$L^4(\mathbf{y}, \boldsymbol{\beta}) = \min \left\{ F^*(\mathbf{y}) + \left(\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \beta_{ij} \right) \left(\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} y_{ij} - \mathfrak{I} \right) \right\} \quad (23)$$

因为 β_{ij} 和 y_{ij} 是正数, 可以得到 $\left(\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \beta_{ij} \right)$ 。

$\left(\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} y_{ij} \right) \geq \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} (\beta_{ij} y_{ij})$, 用不等式右边的项代替左边的项, 式(23)可以改为

$$L^5(\mathbf{y}, \boldsymbol{\beta}) = \min \left\{ F^*(\mathbf{y}) + \left(\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} (\beta_{ij} y_{ij}) - \mathfrak{I} \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \beta_{ij} \right) \right\} \quad (24)$$

其中, $\beta_{ij} \mathfrak{I}$ 可以看作分配给链路 l 的最大可用时延时间。如果向量 \mathbf{y}^* 是式(23)的最优解, 那么它一定也是式(24)的最优解, 所以 $\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} (\beta_{ij} \mathfrak{I}) = \mathfrak{I}$ 和 $y_{ij} \leq \beta_{ij} \mathfrak{I}$ 成立。因为 \mathfrak{I} 是一个常数, 所以可以得到 $\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \beta_{ij} = 1$ 。式(22)得到最优解或可行解的前提是式(22)中所使用的向量 \mathbf{y} 必须是式(21)的最优解或至少是可行解。根据这个思路可以得到 2 个问题中对偶向量 $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 的关系, 即 $\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} (\mu_{ij} y_{ij})$ 与 $\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} (\beta_{ij} y_{ij})$ 是等价的。如果式(21)得到的解 \mathbf{y}^* 能够满足 (22) 的约束条件, 那么必须满足

$$\begin{aligned} \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \mu_{ij} = \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \beta_{ij}, \text{ 结合之前的结论, 可得} \\ \sum_{i \in V'} \sum_{j \in V'} \mu_{ij} = 1. \end{aligned}$$

假设式(21)存在一个最优解 \mathbf{y}^* , 那么跨层优化问题的对偶形式可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}} D(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = L^2(\mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda}) + L^3(\tilde{\mathbf{r}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \quad (25) \\ \text{s.t. } \boldsymbol{\lambda} \geq 0, \boldsymbol{\mu} \geq 0 \end{aligned}$$

利用传统的基于对偶的优化方法, 可以得到向量 $\boldsymbol{\lambda}$ 和 $\boldsymbol{\mu}$ 在每一次迭代的更新操作为

$$\lambda_{ij}(t+1) = \left[\lambda_{ij}(t) + \varepsilon \left(\sum_{j \in V'} \tilde{r}_{ij} - c_i \right) \right]^+ \quad (26)$$

$$\mu_{ij}(t+1) = \left[\mu_{ij}(t) + \xi \left(\sum_{j \in V'} \tilde{t}_{ij} - y_{ij} \right) \right]^+ \quad (27)$$

其中, ε 和 ξ 分别表示 2 个更新操作的步长, $[x]^+$ 表示参数 x 在非负象限内的投影即 $[x]^+ = \max\{0, x\}$ 。

由于 FANET 中节点的高速移动性导致链路的连通性快速变化, 所以选择常数步长可以保证优化问题的收敛性和加快收敛速率^[26]。根据对偶参数值可以计算在 $t+1$ 时刻原参数 r_{ij} 和 p_i 的值, 即

$$\begin{aligned} r_{ij}(t+1) \\ = \arg \min \left\{ \sum_{j \in V'} \left(C(\tilde{\mathbf{r}}_{ij}^e) + \lambda_{ij}(t+1) \tilde{r}_{ij}^e + \mu_{ij}(t+1) (\tilde{t}_{ij} - y_{ij}) \right) \right\} \quad (28) \end{aligned}$$

$$p_i(t+1) = \arg \min_{p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max}} \left\{ \sum_{j \in V'} \left(V(p_i) + \sum_{j \in V'} (\lambda_{ij}(t+1) c_{ij}) \right) \right\} \quad (29)$$

式(26)~式(29)提出的解决方案只适合于同步优化的场景, 因为优化过程中的每一次迭代都需要最新的参数信息。在 FANET 中, 由于节点的移动性和信号的干扰导致链路质量较差, 数据分组将会因为消耗的总时延大于给定的阈值而被丢弃, 因此, 部分中继节点可能在有些时候接收不到当前的参数信息。在以上提到的场景中同步优化不能很好地进行工作, 所以为了解决这个问题使用异步更新的方式优化不同的网络参数。异步更新方法允许数据分组在传输过程中丢失, 没有接收到数据分组的节点可以使用它们存储的旧信息来更新网络参数。定义变量 $\tau_{ij}(t)$ 和 $\varsigma_{ij}(t)$ 为在迭代序列 t 上的投影, 即离 t 最近一次迭代的序号。因为每个数据分组有一个

时延阈值, 当传输在一些中继节点消耗的时延大于阈值时, 中继节点认为当前数据分组失效并丢弃它, 而之后的节点可以根据存储的旧参数信息进行更新。这样利用 $\tau_{ij}(t)$ 和 $\varsigma_{ij}(t)$ 代替当前迭代序列 t , 如果中继节点接收到了数据分组, 则有 $\tau_{ij}(t)=t$ 和 $\varsigma_{ij}(t)=t$, 更新操作式(26)和式(27)可以修改为

$$\lambda_{ij}(t+1) = \left[\lambda_{ij}(\tau_{ij}(t)) + \varepsilon \left(\sum_{j \in V'} \tilde{r}_{ij} - c_i \right) \right]^+ \quad (30)$$

$$\mu_{ij}(t+1) = \left[\mu_{ij}(\varsigma_{ij}(t)) + \xi \left(\sum_{j \in V'} \tilde{t}_{ij} - y_{ij} \right) \right]^+ \quad (31)$$

原问题中的参数更新操作式(28)和式(29)保持不变。为了使优化问题快速地收敛到最优解, 实际操作中利用到目前迭代 t 的平均值代替式(28)和式(29)参数 r_{ij} 和 p_i , 其中, $\bar{r}_{ij} = \frac{1}{t} \sum_{n=1}^t r_{ij}(n)$ 和 $\bar{p}_i = \frac{1}{t} \sum_{n=1}^t p_i(n)$ 。

和传统的路由方法一样, 源节点预先为每一个数据分组建立一条端到端路径, 而这条路径的生命周期不是确定的而是与路径上链路的最小连通时间有关^[9]。网络中每一个节点广播路由请求消息将会消耗大量不必要的资源, 因为在 FANET 中每个 GB 的位置一般是固定的, 每个节点都存储有 GB 的相关信息, 所以需要采用一些方法减少广播带来的资源消耗。定义一个变量 SPP (single-hop packet progress)^[27] 表示中继节点 j 相对于它的父节点 i 对数据产生的距离增益。

$$sp_{ij} = \hat{d}_i - \hat{d}_j \quad (32)$$

其中, \hat{d}_i 表示节点 i 到 GB 的距离。为每个节点定义一个可用邻居集合 $A_i = \{j | (i, j) \in E \cap sp_{ij} > 0, \forall j \in V'\}$, 当节点 i 接收到路由请求信息时, 它仅把这个信息广播给 A_i 中的节点。在路径选择阶段, 每个节点使用相同的速率和功率传输请求分组, 所以需要设计一个路由指标使节点选择最优路径。这里定义 2 个常数权重因子 ω_1 和 ω_2 , 假设数据分组从源节点到 i 所经过的链路集合为 L_i , 在节点 i 处的路径效用为

$$U_i = \omega_1 \min_{l \in L_i} \{CT_l\} + \frac{\omega_2}{H_i} \quad (33)$$

其中, H_i 为从源节点 s 到当前节点 i 经过的跳数。时延感知的跨层优化分 2 个步骤实施, 包括满足时

延约束的路径选择算法和联合优化速率分配及功率控制的算法。路径选择算法描述如算法 1 所示。

算法 1 路径选择算法

- 1) //初始化
- 2) 在中继节点 i 处:
- 3) if 节点 i 第一次接收到请求分组
- 4) for N'_i 中的每一个节点 j
- 5) if $sp_{ij} > 0$
- 6) 把节点 j 加入 A_i 中;
- 7) end if
- 8) end for
- 9) end if
- 10) 基于式(8)和式(33)计算 CT_{si} 和 U_i ;
- 11) if $U_i > \tilde{U}_i$ then
- 12) $\tilde{U}_i \leftarrow U_i$ 并保存父节点 s ;
- 13) else
- 14) 丢弃数据分组;
- 15) end if
- 16) if $CT_{si} < CT$ then
- 17) $CT \leftarrow CT_{si}, ch++$;
- 18) end if
- 19) 节点 i 把数据分组广播给 A_i 中的每一个节点
- 20) end if
- 21) 目的节点 GB 处:
- 22) GB 选择具有最大 U_{GB} 的路径转发数据分组并向源节点返回一个回复数据分组

算法 1 的具体执行过程和参数描述如下。

网络初始化阶段, 每个节点 i 向邻居广播一个 HELLO 分组。当邻居节点 j 接收到来自节点 i 的 HELLO 分组时返回一个包含自身的识别符和坐标等信息的应答分组, 然后节点 i 从收到的应答分组中提取出 j 的信息保存到 N'_i 中。如果节点 i 接收到了来自节点 s 的路径请求分组, 它根据式(8)和式(33)分别计算 CT_{si} 和 U_i , 如果 U_i 大于 i 当前保存的值 \tilde{U}_i , 那么用 U_i 替换这个值并把传输节点记录到路由表中, 否则丢弃这个数据分组。如果 CT_{si} 小于分组头部中已存在的 CT , 那么用当前的 CT_{si} 替换这个值, 同时分组头部的传输跳数 ch 值加 1。然后 i 把路径请求分组广播给 A_i 中的每一个节点直到请求分组到达 GB。当 GB 收到一个路径请求信息后, 从请求分组中提取出 CT_{min} 和 H_{GB} , 利用式(33)计算总的路径效用 U_{GB} , 如果 U_{GB} 大于当前保存的值,

那么用它替换这个值并把传输节点记录到路由表中, 否则, GB 丢弃这个请求分组。

到达路径请求的终止时间后, GB 发送一个回复消息给路由表记录的节点, 每个中继节从回复包中提取并保存 CT_{\min} , 重复这个过程直到回复消息到达源节点。

通过以上的路径建立过程, 每个被选择的节点都保存下一跳节点的信息和路径的最小持续时间 CT_{\min} , 基于这些信息可以进行下一步优化操作。利用分布式优化的思想, 在每一个中继节点 i 处执行算法 2。

算法 2 异步分布式跨层优化 (ADCO)

- 1) 在中继节点 i 和它的中继节点 j 处:
- 2) 初始化参数 $\lambda_{ij}(0)$ 、 $\mu_{ij}(0)$ 并从路由表中获得中继节点 j ;
- 3) 基于式(3)计算链路容量;
- 4) if 当前总的时延 $t < \mathfrak{I}$ then
- 5) 从分组头部获得 $\bar{\mu}_i$ 并计算剩余条数 H_r ;
- 6) if $1 - \bar{\mu}_i \leq \mu_{ij}$ then
- 7) 基于式(30)和式(31)更新对偶变量 λ_{ij} 和 μ_{ij} ;
- 8) else
- 9) $\mu_{ij} \leftarrow \frac{1 - \bar{\mu}_i}{H_r}$;
- 10) 然后利用当前的 λ_{ij} 和 μ_{ij} 更新对偶变量;
- 11) end if
- 12) end if
- 13) 节点 i 基于式 (4)、式(5)、式(28) 和式(29) 计算 \bar{r}_{ij} 和 \bar{p}_i ;
- 14) 节点 i 发送数据分组给算法 1 选择出的中继节点 j
- 15) if $t+1 > CT_{\min}$
- 16) 调用算法 1;
- 17) end if

算法 2 不要求每一个节点拥有全局的优化信息, 每个中继节点仅利用接收到的邻居信息来完成优化操作。为了更清楚地理解算法 2, 其执行过程描述如下。

初始化对偶向量 $\lambda(0)$ 和 $\mu(0)$, 同时给定由算法 1 得到的中继节点集合。中继节点 i 在 $t \leq CT_{\min}$ 时刻接收到数据分组, 首先判断在当前时刻数据分组是否超时。如果数据分组总的传输时延超过了给定阈值, 节点 i 丢弃接收到的数据分组。否则节点 i 从

数据分组头部提取出 $\bar{\mu}_i = \sum_{l \in p} \mu_l$, 其中, p 为由算法 1

选择的路径, 同时根据数据分组经过的跳数, 计算剩余跳数 H_r 。如果 $1 - \bar{\mu}_i \leq \mu_{ij}$ (参考推论 1 的结果), 则表明前面的链路质量较好, 节点 i 使用当前的 μ_{ij} 更新对偶变量, 否则, 把保存的 μ_{ij} 替换为 $\frac{1 - \bar{\mu}_i}{H_r}$ 并用此参数更新对偶变量。节点 i 根据自身存储的局部对偶变量 $\lambda_{ij}(t)$ 和 $\mu_{ij}(t)$, 利用式(4)、式(5)、式(28)和式(29)得到当前的传输速率 $r_{ij}(t)$ 和功率 $p_i(t)$, 并分别计算它们的均值 \bar{r}_{ij} 和 \bar{p}_i 。如果 $t+1 > CT_{\min}$, 节点 i 从缓存表中清空路由表和对偶变量, 返回到算法 1。否则, 节点 i 根据式(30)和式(31)更新 2 个对偶变量, 并保存到缓存中。节点 i 使用 \bar{r}_{ij} 和 \bar{p}_i 把数据分组传递给下一跳节点 j , 重复步骤 2)直到数据分组到达 GB。如果部分中继节点在时延阈值 \mathfrak{I} 内没有接收到数据分组, 它们将使用之前存储的相关参数更新对偶变量。直到 GB 接收到数据分组本次传输任务结束。

结论 1 算法 1 和算法 2 的总时间复杂度为 $O(|V|^3)$ 。

证明 假设每一个节点的最大邻居数量为 $N_{\max} = \max_{i \in V} \{|N_i^i|\}$, 针对算法 1, 在初始化阶段, 每个节点向周围的邻居节点发送查询分组以构建网络拓扑, 这个过程的时间复杂度为 $O(|V|^2)$ 。对于每一个节点 i , 为了得到可用邻居集合 A_i 节点 i 参照算法 1 中的步骤 3)~步骤 7)判断哪些邻居节点可以加入 A_i 中, 其时间复杂度为 $O(N_{\max})$ 。在步骤 8)中节点 i 基于式(8)和式(33)计算 CT_{st} 和 U_i , 时间复杂度为 $O(1)$ 。步骤 9)~步骤 16)是 2 个判断条件, 它们都可以在单位时间内完成所有时间复杂度可以表示为 $O(1)$ 。在步骤 17)中节点 i 广播路径请求分组给 A_i 的每一个节点, 其时间复杂度为 $O(1)$ 。为了找到最优成本路径, 节点 i 可能接收到多个来自邻居的路径请求分组, 如果节点 i 是第一次接收到路径请求分组则执行步骤 3)~步骤 19), 否则只执行步骤 10)~步骤 19)。节点 i 最多能够接收到 N_{\max}^2 个路径请求数据分组, 执行步骤 10)~步骤 19)的时间复杂度为 $N_{\max} (O(1) + O(1) + O(1))$, 可以简化为 $O(N_{\max}^2)$ 。而步骤 3)~步骤 19)只执行一次, 所以时

间复杂度为 $O(N_{\max})$ 。网络中所有节点执行算法 1 的时间复杂度为 $|V|O(N_{\max}^2)$, 因此, 可以得到最坏情况下的时间复杂度 $O(|V|^3)$ 。结合初始化的时间复杂度和路径选择的时间复杂度, 算法 1 总的时间复杂度为 $O(|V|^3)$ 。

接下来, 分析算法 2 的时间复杂度, 由于算法 2 是分布式实施的, 因此, 可以先分析每个节点 i 处的时间复杂度。在步骤 3) 中为每个邻居节点计算链路容量, 可以在单位时间内完成, 所以这个过程的时间复杂度最大为 $O(N_{\max})$ 。因为步骤 3)、步骤 5)、步骤 8) 为判断条件, 可以在单位时间内完成, 时间复杂度为 $O(1)$, 而计算剩余时延与更新原始和对偶变量操作也可以在单位时间内完成, 所以步骤 3)~步骤 11) 总的时间复杂度为 $O(1)$ 。计算和判断操作可以在单位时间内完成, 同时单跳传输操作也可以在单位时间内完成, 所以步骤 12)~步骤 16) 的时间复杂度为 $O(1)$ 。在节点 i 处总的时间复杂度为 $O(N_{\max})+3O(1)$, 最坏情况下的时间复杂度为 $O(|V|)$, 对于整个网络来说, 总的时间复杂度为 $O(|V|^2)$ 。结合以上对 2 个算法时间复杂度的分析可知, 整个运行过程的时间复杂度为 $O(|V|^3)$ 。

5 仿真实验

下面, 利用 OMNeT++5.0 仿真平台对 ADCO 的性能进行仿真评估。ADCO 主要考虑排队时延和传输时延, 而由 MAC 层竞争产生的时延在实验中被忽略, 并利用 slotted-ALOHA 协议实现 MAC 层的功能。假设所有的 UAV 均匀分布在 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 的区域内, 地面基站固定在 $(700\text{ m}, 700\text{ m})$ 的位置。所有 UAV 有相同的传输半径 250 m , 当有数据分组传输时, UAV 根据优化得到的传输速率和功率层发送数据, 而所要优化的功率值从区间 $[0.37\text{ W}, 0.66\text{ W}]$ 中选择。网络中数据流的产生服从参数为 25 的泊松分布, 每一个数据分组的最大时延为 10 跳, 假设每个 UAV 上都安装有 GPS, 同时, 所有 UAV 都拥有基站的位置信息。对偶向量 $\lambda(0)$ 初始化为每条链路的排队时延, 如果在路由发现阶段建立的路径跳数为 H , 那么在每一个中继节点处 $\mu_i(0) = \frac{1}{H}$ 。另外, 2 个步长因子的值分别设置为

$\varepsilon=0.01$ 和 $\xi=0.01$, 权重因子 $\omega_1=0.3$ 和 $\omega_2=0.7$ 。为了使实验结果更加准确, 针对每一个网络参数, 根据 5 次不同的运行结果求平均得到最后的值, 同时假设每个中继节点对同一个数据分组最多重传 2 次。

ADCO 与文献[9]中的 RARP (robust and reliable predictive) 路由协议和文献[15]中提出的平均端到端时延约束的动态速率分配方法 (DA-DNUM) 进行比较。RARP 是为 FANET 提出的三维路由协议, 主要考虑连通时间和端到端跳数, 而 DA-DNUM 不考虑路由的问题。在 RARP 中节点的传输速率为 12 Mbit/s , 传输功率为 0.45 W , 其他参数的设置和以上提到的一样。实验结果主要包含超时率、分组丢失率、吞吐量和能量消耗 4 个参数, 同时根据不同的移动速率和节点数量把这些结果分为 2 部分。图 2~图 5 主要表示在不同移动速率下 4 个网络参数在 3 种方法中的对比结果, 图 6~图 9 是在不同节点数量下 3 种方法的对比结果。

图 2 表示随着移动速率的增加, 3 种方法的数据分组超时率也随着增加。ADCO 考虑端到端时延约束, 每一个中继节点在传输数据分组之前都要根据式(5)评估与邻居之间的时延。因为 DA-DNUM 允许数据分组的时延在一定范围内大于阈值, 而在本文中这些数据分组将会被中继节点丢弃, 所以在严格要求端到端时延条件下本文提出的方法比 DA-DNUM 的分组超时率小。为了得到优化问题的最优解, 中继节点选择能够满足当前时延约束的邻居作为下一跳节点, RARP 不考虑端到端时延约束的问题, 它所选择的中继节点有可能消耗更多的时间传输数据分组。由于在每一个中继节点处考虑时延约束, 所以 ADCO、DA-DNUM 与 RARP 相比具有更小的超时率,

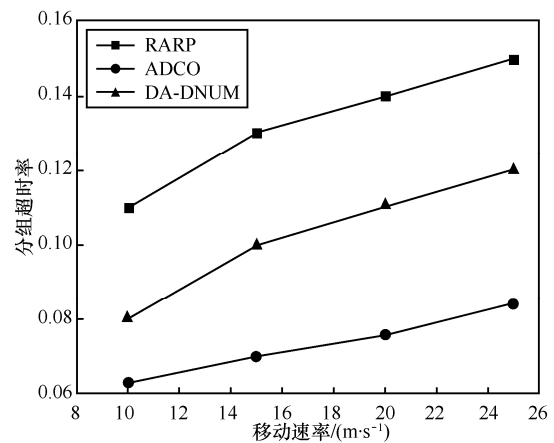


图 2 不同移动速率下 3 种路由方法的分组超时率

如图 2 所示。移动速率的增加使链路具有更短的连通时间，2 个节点之间的传输可能会因为它们移出彼此的通信范围而失败，从而消耗更多的时延，所以在 3 种方法中超时率随着移动速率的增加而逐渐增加。

总的分组丢失率包含超时率和在中继节点处超过重传次数导致的分组丢失率，在 ADCO 中每一个中继节点根据式(4)评估与邻居之间的链路质量，同时链路质量作为一个参数在目标函数中被优化。式(28)得到的最优传输速率也暗示着当前最好的链路质量，而 RARP 使用固定传输速率可能会导致较差的链路质量。因此，DA-DNUM 和 RARP 比 ADCO 在中继节点处会花费更多的传输次数，而更多的传输次数可能会带来更大的分组丢失率。DA-DNUM 没有考虑链路质量问题，单纯的优化传输速率并不能保证传输的可靠性，所以 DA-DNUM 的总分组丢失率比 ADCO 中的大。如图 3 所示，ADCO 比 DA-DNUM 和 RARP 具有更低的总丢失率。一般来说，总的丢失率越小表示被目的节点接收到的数据分组越多，也代表网络的吞吐量越大，所以图 4 说明 ADCO 比 DA-DNUM 和 RARP 具有更高的吞吐量。

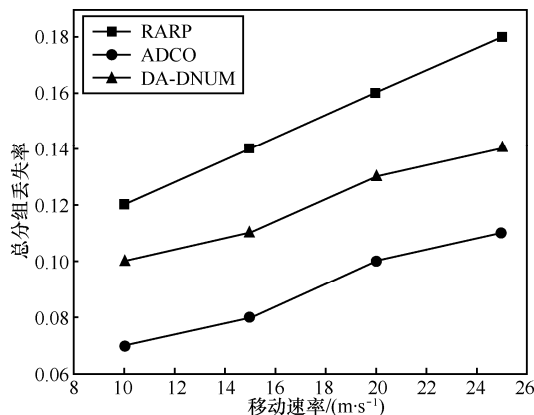


图 3 不同移动速率下 3 种路由方法的总分组丢失率

为了减少信号之间的干扰，提高端到端传输的可靠性，ADCO 要求每个中继节点根据式(29)计算当前的最优功率层，得到的当前最优功率不仅可以减少信号之间的干扰，同时也提高了链路质量，使中继节点可以用较少的重传次数完成端到端传输。而 DA-DNUM 和 RARP 使用固定的功率层，在数据流较多的情况中将会导致较差的链路质量。在每一个中继节点处更多的重传表示更多的能量消耗，所以 ADCO 传输单个数据分组所消耗的能量比 DA-DNUM 和 RARP 少，如图 5 所示。

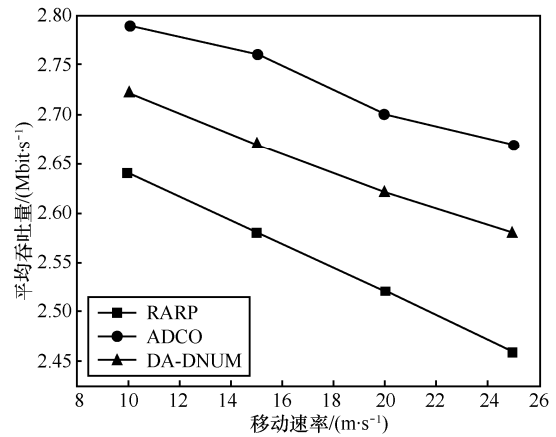


图 4 不同移动速率下 3 种路由方法的平均吞吐量

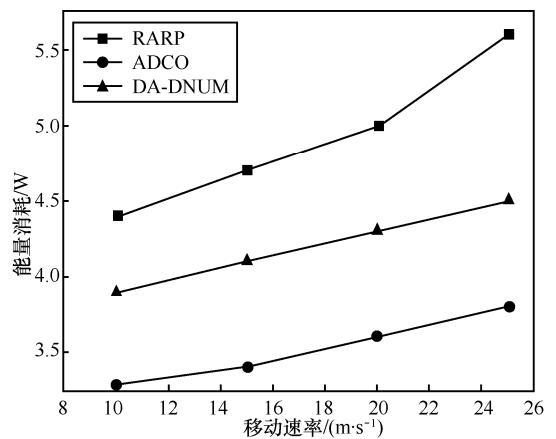


图 5 不同移动速率下 3 种路由方法中的能量消耗

当节点的移动速率设置为 15 m/s 时，运行 3 种不同的方法可以得到图 6~图 9 的结果。从图 6 可以看出，当网络中节点的数量增加时，3 种方法的超时率呈下降趋势。因为考虑端到端时延约束，总节点数量越少中继节点所能选择的下一跳节点也越少。在链路质量较差的情况下，中继节点可能要花费更多的时延完成一跳传输，这增加了数据分组超时的概率。当网络中的节点数量较多时，每一个中继节点可以选择更好链路质量的邻居传输数据分组。另一方面，较大的节点密度意味着更长的连通时间，因过多重传次数导致数据分组丢失的概率较小，所以随着节点数量增加，3 种方法中的总丢失率减少。由于 ADCO 考虑端到端时延和链路质量，因此，它与 RARP 和仅考虑端到端时延的 DA-DNUM 相比具有较低的总分组丢失率，如图 7 所示。和前面的分析相同，越低的总分组丢失率表示越高的吞吐量，从图 8 中可知，ADCO 在不同节点数量下比 DA-DNUM 和 RARP 有更高的吞吐量。联合考虑速率和功率优化不仅提高了网络吞吐量，

同时也减少了信号间的干扰和单跳重传次数, 从图 9 中可以看到, 当节点数量不同时, ADCO 比 DA-DNUM 和 RARP 消耗更少的能量完成端到端传输。

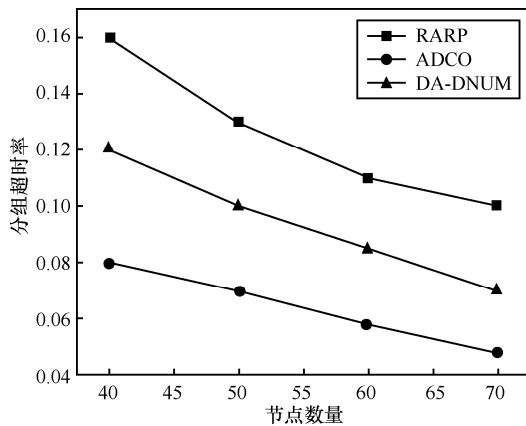


图 6 不同节点数量下 3 种路由方法的分组超时率

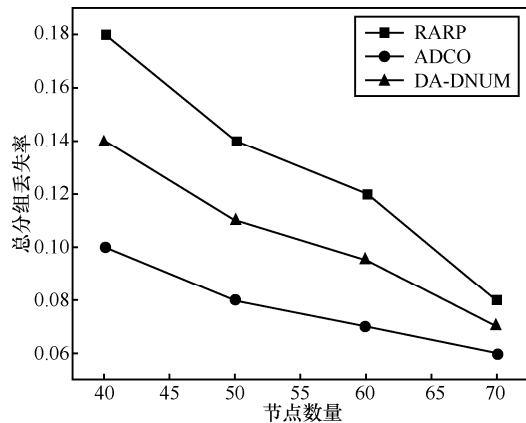


图 7 不同节点数量下 3 种路由方法的总分组丢失率

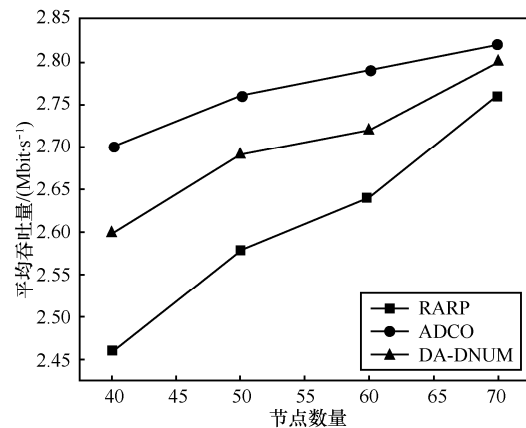


图 8 不同节点数量下 3 种路由方法的平均吞吐量

6 结束语

本文提出了一种时延感知的分布式跨层优化方法 ADCO, 该方法通过把优化过程分为 2 个步骤

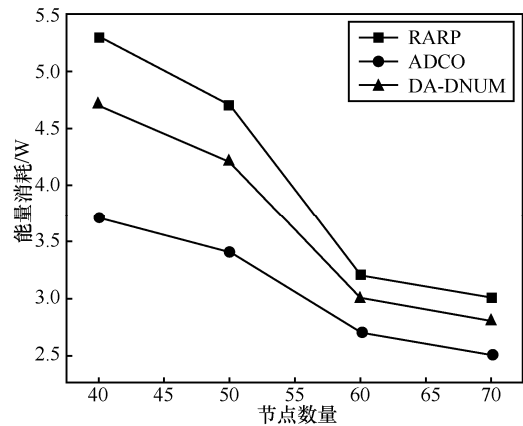


图 9 不同节点数量下 3 种路由方法的能量消耗

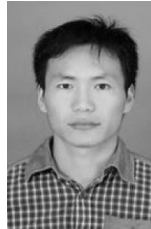
分别解决了实时路由、速率分配和功率控制问题。为了实现分布式的方案, 首先把跨层优化问题形式化为一个非凸优化问题, 并使用拉格朗日松弛技术把非凸约束消除。然后利用对偶分解方法把一个全局问题分解为 2 个子问题, 通过原始分解方法消除全局耦合的时延约束。考虑到无线链路的不可靠性, 利用异步更新的思想更新原始和对偶参数, 直到算法达到最优解或给定的更新间隔时间。实验结果表明, ADCO 在吞吐量、能量消耗和超时率等方面都有很好的性能。所提方法要求所有节点的可用邻居集合不能为空, 但当 UAV 的移动速率很快导致网络中某些中继节点不满足这个条件时, 会产生空节点问题^[28], 如何在 FANET 中解决这个问题将会是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] LAV G, RAJ J, GABOR V. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [2] ANIKET D. MANETs as propellant in the growth of the Internet of things [J]. Journal of Computer Engineering, 2016, 18(5): 1-7.
- [3] İLKER B, OK S, ŞAMIL T. Flying ad hoc networks (FANET): a survey [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3):1254-1270.
- [4] VISHAL S, RAJESH K. Cooperative frameworks and network models for flying ad hoc networks: a survey[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2017, DOI: 10.1002/cpe.3931.
- [5] ALEJANDRO R, GEORGIOS B. G. Separation principles in wireless networking [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(9): 4488-4505.
- [6] PENG L, WEI R, JAY A F. Distributed continuous-time optimization: non-uniform gradient gains, finite-time convergence, and convex constraint set [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(5): 2239-2253.
- [7] KETAN R, NIKOLAOS G, GEORGIOS B G. Cross-layer designs in coded wireless fading networks with multicast [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(5):1276-1289.

- [8] STEFANO R, KAROL K, GRÉGOIRE H, et al. Dynamic routing for flying ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(3): 1690-1700.
- [9] GANBAYARG, ANISH P S, SANG J Y. Robust and reliable predictive routing strategy for flying ad hoc networks [J]. *IEEE Access*, 2017, 5(2017): 643-654.
- [10] INES H, NOUREDDINE H. Cross layer optimization of end to end delay in WSN for smart grid communications [C]//International Symposium on Signal, Image, Video and Communications (ISIVC). 2016: 217-223.
- [11] SHUAI Z, I-HONG H, TIE L, et al. Joint rate control and scheduling for real-time wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, DOI: 10.1109/TWC.2017.2700302.
- [12] 石雷, 韩江洪, 石怡, 等. 无线多跳网络下基于干扰管理的高容量跨层优化策略[J]. *通信学报*, 2014, 35(12): 89-97.
- SHI L, HAN J H, SHI Y, et al. High capacity cross layer optimization strategy for multi-hop wireless network with interference management[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(12): 89-97.
- [13] JUE Y L, GUO C, ZHI Y W, et al. Distributed subgradient method for multi-agent optimization with quantized communication [J]. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2017, 40(2017): 1201-1213.
- [14] GUO Q Z, RICHARD H. Distributed optimization using the primal-dual method of multipliers [J]. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 2017, DOI: 10.1109/TSIPN.2017.2672403.
- [15] HAJIESMAILI M H, TALEBI M S, KHONSARI A. Utility-optimal dynamic rate allocation under average end-to-end delay requirements[C]//54th Annual Conference on Decision and Control (CDC).2015: 4842-4847.
- [16] NIKOLAOS G, GEORGIOS B G. Residential load control: distributed scheduling and convergence with lost AMI messages [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(2): 770-786.
- [17] NIKOLAOS G, GEORGIOS B G. Asynchronous sub-gradient methods with unbounded delays for communication networks [C]//51st IEEE Conference on Decision and Control, 2012: 5870-5875.
- [18] IVANO N, GIUSEPPE N. Asynchronous distributed optimization via randomized dual proximal gradient [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(5): 2095-5875.
- [19] MING Y H. A distributed, asynchronous and incremental algorithm for nonconvex optimization: an ADMM approach [J]. *Transactions on Control of Network Systems*, 2017, DOI: 10.1109/TCNS.2017.2657460.
- [20] AMRIT S B, KETAN R. Asynchronous incremental stochastic dual descent algorithm for network resource allocation[J]. *arXiv preprint, arXiv: 1702.08290*, 2017.
- [21] YI R C, XIANG Y Z, RODNEY A K, et al. Interference prediction in mobile ad hoc networks with a general mobility model [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(8): 4277-4290.
- [22] TAO L, PING Y F, KHALED B L. Outage probability of energy harvesting relay-aided cooperative networks over rayleigh fading channel[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(2): 972-978.
- [23] GAGAN R G, NESS B S. Delay analysis for wireless networks with single hop traffic and general interference constraints [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(2): 393-405.
- [24] TONG M, FAN W, ZHENG Y, et al. Vasilakos spatial reusability-aware routing in multi-hop wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2016, 65(1): 244-255.
- [25] TYCHOGIORGOS G, LEUNG K K. Optimization-based resource allocation in communication networks[J]. *Computer Networks*, 2014, 66(2014): 32-45.
- [26] ANDREA S, HADI J R. Primal recovery from consensus-based dual decomposition for distributed convex optimization[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2016, 168(1): 172-197.
- [27] LONG C, JIAN W N, JIAN N C, et al. QoS aware geographic opportunistic routing in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(7): 1864-1875.
- [28] SARAB F A R, MEHMMOOD A A, BRAJENDRA K S, et al. 3D real-time routing protocol with tunable parameters for wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(3): 843-853.

[作者简介]



文少杰 (1987-), 男, 河南临颍人, 武汉大学博士生, 主要研究方向为物联网、移动 ad hoc 网络等。



黄传河 (1963-), 男, 湖北随州人, 武汉大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机网络 (移动互联网、移动 ad hoc 网络、无线传感器网络、未来互联网)、物联网、网络安全、高性能计算等。