

多包接收无线 Mesh 网络的跨层优化

石雷¹, 韩江洪¹, 石怡², 魏振春¹

1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009

2. 弗吉尼亚理工大学 电气和计算机工程系, 弗吉尼亚州 24061

摘要: 多包接收是一种可有效提高无线网络吞吐量的技术. 文中建立了无线 mesh 网络的多包接收跨层设计模型, 该模型是一个混合整数规划模型, 一般不可能在多项式时间内求解. 为此设计了一种可在多项式时间内求解的近似最优策略, 将模型中的整数变量释放到实数域空间, 使原来的混合整数规划模型成为一线性规划模型, 并通过反复迭代寻找近似最优解. 仿真显示采用该策略的多包接收跨层模型使数据传输速率提高了至少 3 倍.

关键词: 无线 mesh 网络; 多包接收; 协议-干扰模型; 混合整数线性规划

中图分类号: TN911.7 **文章编号:** 0255-8297(2012)03-0227-07

Cross-Layer Optimization for Wireless Mesh Network with Multi-packet Reception

SHI Lei¹, HAN Jiang-hong¹, SHI Yi², WEI Zhen-chun¹

1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia 24061, USA

Abstract: Multi-packet reception (MPR) technique can effectively increase throughput of wireless networks. We establish a suitable cross-layer design model for a wireless mesh network. It is a mixed integer programming model, which cannot be solved within polynomial time in general. We then propose a near-optimal solution to be solved in polynomial time. In this solution, integer variables are released into the space of a real number field, and the original mixed integer programming model becomes a linear programming model. We can obtain the near-optimal solution by iteration. Compared with optimal solutions without MPR, we show that throughput is increased by about 300% when using MPR.

Keywords: wireless mesh network, multi-packet reception, protocol-interference model, mixed-integer linear programming

无线 mesh 网络 (wireless mesh network, WMN)^[1] 由无线 mesh 路由器和无线 mesh 终端两种网络节点组成, 是一种可以快速部署和自组织的无线网络. 其中 mesh 终端通常具有相对位置固定的特点, 因此适合于按需网络部署场景. 作为无线网络的共同特征, 如何最大限度地利用传输信道是 WMN 的一个研究要点. 多包接收 (multiple packets reception, MPR)^[2] 是一种物理层的实现技术, 它通过信号处理的相关技

术手段, 如串行干扰消除算法 (successive interference cancellation, SIC)^[3], 可以让接收端同时接收多个发送端的数据包并进行有效分离. 而在传统方案下, 当接收端同时接收到多个数据包时会把这些数据包当作冲突包丢弃, 并要求发送端重新发送. 因此, 多包接收可有效提高网络的吞吐率.

多包接收并不是一种新的物理层实现技术, 早在 20 世纪 80 年代, 文献 [4-5] 就把多包接收引入时隙

收稿日期: 2010-12-21; 修订日期: 2011-04-17

基金项目: 教育部博士点基金(No.20100111110004); 安徽省国际科技合作计划项目基金(No.10080703001); 广东省产学研项目基金(No.2010B090400332)资助

作者简介: 石雷, 博士生, 研究方向: 无线网络算法设计及优化, E-mail: thunder10@163.com; 韩江洪, 教授, 博导, 研究方向: 计算机控制、可靠性工程、无线网络, E-mail: hanjh@hfut.edu.cn

Aloha,但在当时有线网络都未曾普及的情况下,这一研究工作并未得到重视.随着无线网络的不断普及,尤其是随着多媒体应用的普及,对于网络流量的要求越来越高.当传统方法无法进一步满足需求时,人们开始重新考虑多包接收.文献[6]证明了多包接收可以明显改善网络性能.

多包接收作为物理层的实现技术,要有效应用到无线网络中,在上层(数据链路层、网络层)也需要有相应的改变.目前,学者们已经在链路层上进行了大量的多包接收工作.如文献[4]建立了在一个时隙 Aloha 中成功发送信息的节点数与试图发送信息的节点数之间的函数关系,并确立了有效区分节点的方法.文献[6]则从信息论的角度出发,假定在时隙 Aloha 中有无限多的节点且没有衰减的情况下,提出了传播功率的动态控制和随机功率控制,并给出了在时隙 Aloha 中提高网络吞吐率和频谱利用率的方法.文献[7]在有限多节点的环境下引入多包接收,并研究了时隙 Aloha 的稳定性和节点的延时性.这些工作都是通过引入多包接收对时隙 Aloha 进行改进,从而提高无线网络的性能.

传统的网络分层结构——开放式系统互联(open system interconnect, OSI)模型为有线网络设计的模块化、标准化和透明化提供了很好的保障,然而它并不能妥善地解决无线网络中的一些问题.这是因为无线网络具有很多有线网络所不具有的特性^[8],如无线信道作为共享的媒介需要精心设计的 MAC 协议、信号在无线信道中传播的衰减受距离的影响比在有线信道中大得多、无线信道中存在的多径衰落以及信道参数随时间动态变化等问题.当设计无线网络各层协议时,这些问题都必须考虑到,或者说无线网络中各层之间是密切相关的^[9],物理层、链路层以及网络层相互制约,影响了各自对网络资源的充分利用.因此,跨层设计最近被广泛应用在无线网络算法和协议的设计中.简单地说,跨层设计就是通过对无线网络协议栈进行整体设计,而不是对每一层协议单独设计,使得网络各层能够共享与其他层相关的信息.

跨层设计能提高无线网络的性能,是目前无线通信领域的一个研究热点^[10-11].例如:文献[2]提出了基于自适应信号处理技术的网络跨层设计方法;文献[12]提出了基于多包接收的 MAC 协议,如动态队列协议;文献[13]在动态队列协议的基础上进一步提出了 BMDQ 协议;文献[14]探讨了一种无线 mesh 网络中基于协同通信的多包接收方法,并通过理论分析和仿真结果表明该方法能有效提高系统吞吐量;文献[15]提出了一种主要用于媒体介入控制层的基于预约调度的多包接收方法.以上这些工作有的分析了采

用多包接收后网络性能的提高情况,有的针对特定情况适合特定网络,因此各有侧重点.

为此,本文尝试在一个由若干无线 mesh 路由器和 mesh 终端组成的网络中构建一个具体的分配各个节点发送的跨层优化方案,从而使网络的整体吞吐量达到最优.布置好一个具体的 mesh 网络后,可将本文所设计的方案置于 mesh 路由器中工作.

1 系统模型与预备知识

1.1 系统模型

图1给出了一个典型环境下的无线 mesh 网络系统模型.令无线 mesh 网络包含 n 个 mesh 终端 $s_i (i = 1, \dots, n)$ 和 m 个 mesh 路由器 $b_l (l = 1, \dots, m)$.将终端构成的集合记为 N ,路由器构成的集合记为 M .每个终端都用相同的功率 P 和带宽 W 将数据发送到与它距离最近的一个路由器.假设终端 s_i 要求的最小平均数据传输速率为 $r(i)$, K 为共同尺度因子,则终端 s_i 的实际平均数据传输速率是两者的乘积,即为 $Kr(i)$.问题的目标是最大化因子 K ,从而使每一个节点 s_i 都能以 $Kr(i)$ 的数据传输速率将数据传输到距离最近的路由器.

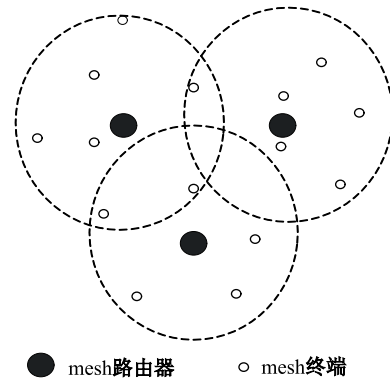


图1 无线 mesh 网络系统模型

Figure 1 System model of the wireless mesh network

1.2 协议-干扰模型

在无线 mesh 网络中,每个 mesh 终端都有自己的传输半径和干扰半径,其大小取决于发送功率.定义 d_{il} 表示终端 s_i 和路由器 b_l 之间的距离, λ 为衰减指数, g_{il} 表示终端 s_i 和路由器 b_l 之间的功率衰减,则有

$$g_{il} = ad_{il}^{-\lambda} \quad (1)$$

式中, a 是与发射天线相关的一个常数.为了便于讨论,将 a 归一化,即 $a = 1$.

当终端 s_i 以功率 P 发出数据时,路由器 b_l 收到的信号功率为 $g_{il}P$.根据协议-干扰模型可知^[16],对

于终端 s_i 来说, 当且仅当 s_i 的信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 满足 $\text{SNR} = \frac{g_{il}P}{N_0} \geq \alpha$ 时, 终端 s_i 发出的数据才能被 b_l 解码; 同样, 当且仅当 $\frac{g_{il}P}{N_0} \geq \beta$ 时, 终端 s_i 发出的数据才会对 b_l 产生干扰. N_0 表示噪声功率. 其中, α 和 β 是无线网络中的相关阈值参数. 定义节点的传输半径为 R_T , 干扰半径为 R_I . 由以上信息可知, $R_T = (\frac{\alpha N_0}{P})^{-1/\lambda}$, $R_I = (\frac{\beta N_0}{P})^{-1/\lambda}$, 此时终端的即时传输速率为 $W \cdot \text{lb}(1 + \frac{\alpha}{N_0})$.

1.3 干扰集

基于 Voronoi 图算法, 可以根据 mesh 路由器将整个网络划分为 m 个区域, 每个区域由 1 个路由器 b_l 和若干个终端组成. 将区域记为 $V_l (l = 1, \dots, m)$, V_l 由 b_l 和若干属于该区域的终端组成.

定义干扰集如下: 终端 s_i 的干扰集包含所有满足以下任何一个条件的终端 s_j 所组成的集合.

1) 若 $s_i \in V_l, s_j \in V_l$, 且 $s_j \neq s_i$, 则 s_j 在 s_i 的干扰集中;

2) 若 $s_i \in V_l, s_j \notin V_l$, 且当 s_j 通信时, 它的通信会被终端 s_i 的传输所干扰, 则 s_j 在 s_i 的干扰集中;

3) 若 $s_i \in V_l, s_j \notin V_l$, 且当 s_i 通信时, 它的通信会被终端 s_j 的传输所干扰, 则 s_j 在 s_i 的干扰集中.

将终端 s_i 的干扰集记为 I_i . 以上描述的 3 种情况如图 2 所示, 其中, 实心圆周表示终端的传输范围, 可由传输半径 R_T 决定, 虚线圆周表示终端的干扰范围, 可由干扰半径 R_I 决定.

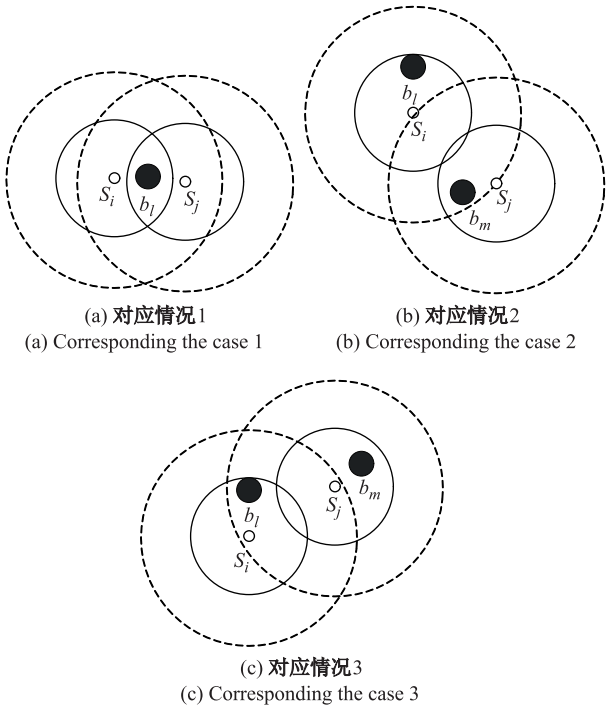


图 2 干扰集中的 3 种情况

Figure 2 Interference set of the three cases

2 传统无线 mesh 网络传输调度方案

为了对多包接收方案进行比较, 本节首先确定传统的 (即不采用多包接收的) 无线 mesh 网络传输调度方案的性能模型. 此时, 1 个 mesh 路由器在同一时刻只能接收 1 个 mesh 终端发来的信息, 如果多个终端同时发送信息, 则会产生冲突, 从而造成丢包和重传.

2.1 物理层模型

在传统方案下, 对于两个终端 s_i 和 s_j , 当且仅当 $s_i \notin I_j$ (或 $s_j \notin I_i$) 时才能同时发送数据.

如果 $s_i (s_i \in V_l)$ 正在发送数据, 那么接收端 b_l 收到的信号功率为 $g_{il}P$, 即时传输速率是 $W \cdot \text{lb}(1 + \frac{\alpha}{N_0})$.

对于同时发送会造成冲突的终端, 应安排在不同的时间片发送. 因此, 在传统方案下, 应根据干扰集来统一安排多时间片传输方案发送数据.

2.2 多时间片调度

根据协议干扰-模型建立的物理层模型, 确立了节点的干扰集和节点的传输速率. 为了避免节点发送冲突的情况, 在链路层应安排节点在不同的时间片发送. 为此, 本小节将讨论链路层的多时间片调度问题, 从而建立传统无线 mesh 网络下的跨层优化方案.

将调度用到的整个时间段 T 等分为 h 个时间片, 每个时间片记为 $t_k (k = 1, \dots, h)$, 即 $t_k = \frac{T}{h}$. 定义二值变量

$$x_i^k = \begin{cases} 1, & \text{终端 } s_i \text{ 在时间片 } t_k \text{ 中发送了数据} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

如果某终端发送数据不成功, 那么此传输不应该进行. 于是不妨假设只有当数据被成功接收时, s_i 才会发送数据. 注意到 s_i 不能与它所在的干扰集中的任一终端同时发送, 亦即如果有 $s_j \in I_i$, 必有 $x_i^k + x_j^k \leq 1$.

由于终端 $s_i (s_i \in V_l)$ 的即时传输速率是 $W \cdot \text{lb}(1 + \frac{\alpha}{N_0})$, 当 s_i 发送数据时, 为了确保在时间片内来自于 s_i 的数据可以被 b_l 解码, 信道容量 $c = \frac{t_k W}{T} \cdot \text{lb}(1 + \frac{\alpha}{N_0})$. s_i 的实际传输速率和信道容量的关系为 $Kr(i) \leq \sum_{k=1, \dots, h} (x_i^k c)$. 由于 $t_k = \frac{T}{h}$, 对 t_k 作归一化处理 (即将 t_k 除以 T) 使得 $t_k = \frac{1}{h}$. 归一化后信道容量为 $c = \frac{W}{h} \cdot \text{lb}(1 + \frac{\alpha}{N_0})$, 从而有

$$Kr(i) \leq \sum_{k=1, \dots, h} x_i^k \cdot \frac{W}{h} \cdot \text{lb}(1 + \frac{\alpha}{N_0}) \quad (2)$$

于是问题目标为

$$\text{Max } K$$

约束条件为

$$\begin{cases} Kr(i) \leq \sum_{k=1, \dots, h} x_i^k \frac{W}{h} \cdot \text{lb}\left(1 + \frac{\alpha}{N_0}\right), & 1 \leq i \leq n \\ x_i^k + \sum_{s_j \notin V_l \wedge s_j \in I_i} x_j^k \leq \gamma, & 1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k \leq h, s_i \in V_l \\ \sum x_i^k \leq 1, & 1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq h, s_i \in V_l \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_i^k 和 K 是变量, 其他为常量或常数.

约束的第2个式子反映了在终端 $s_i (s_i \in V_l)$ 的干扰集 I_i 中, 与 s_i 不在同一区域的其他终端的发送情况. 每个区域在时间片 t_k 中至多只有1个终端发送数据, 因此常数 γ 的值为 I_i 中不在区域 V_l 的终端所属区域的数目.

约束的第3个式子反映了与终端 s_i 在同一区域的其他终端的发送情况. 此时, 最多只有1个终端发送数据.

式(3)中变量的数目为 $(hn+1)$ 个, 约束的数目不超过 $h \cdot \frac{n(n-1)}{2} + n$ 个. 这是一个0-1混合整数线性规划问题 (0-1 mixed-integer linear programming, MILP).

2.3 最优值的上界

对于MILP问题, 在整数变量较多的情况下无法直接求解. 因此, 对式(3)的求解过程中须令 $x_i^k \in [0, 1]$, 即将 x_i^k 作为0和1范围内的实数代入式(3)进行求解, 此时式(3)将被改造为一个线性规划问题 (linear programming, LP), 从而可以直接求解. 并且求解出来的 K 将优于通过MILP求解出来的 K , 亦即可获取最优值 K 的上界.

3 多包接收无线 mesh 网络调度方案

传统方案的缺点是1个路由器在同一时刻只能接收1个终端发送的数据. 采用多包接收后, 多个终端可以在同一时刻向同一路由器传送数据, 从而提高了数据传输速率.

一种有效的实现多包接收技术的方案是采用SIC算法^[3], 其工作过程如下: 接收方通过分析接收数据的信噪比 (signal to interference and noise ratio, SINR), 首先成功接收最强的信号, 然后将已经成功接收的最强的信号从原始信号中滤除掉, 从而提高了次强信号的信噪比, 使得次强信号可能被成功接收.

于是, 接收方可以继续解码第3强的信号、第4强的信号, 以此类推, 直到某个信号无法解码为止.

多包接收属于物理层的方法, 可以让同一节点在同一时刻有可能同时接收多个节点发送来的信息, 但多包接收是有条件的. 因此, 为了充分利用多包接收可以提高网络性能的优点, 在上层也需要设计合适的时间片调度方案. 本节将设计多包接收后的跨层优化方案.

3.1 初步优化方案和求解方法

在传统方案下, 终端 s_i 不能与它干扰集中的任一终端同时发送, 亦即如果有 $s_j \in I_i$, 则必有 $x_i^k + x_j^k \leq 1$. 但采用多包接收后将不存在该限制, 亦即在同一个时间片 t_k 内, 存在 $s_j \in I_i$, 使得 $x_i^k = 1$ 并且 $x_j^k = 1$.

设 $s_i \in V_l$. 当采用SIC算法实现多包接收时, 如果在时间片 t_k 内, 路由器可以对终端 s_i 发送的数据解码, 则比终端 s_i 功率强的信号肯定已被成功解码并从原始信号中滤除, 因此 s_i 的信噪比 (signal to interference and noise ratio, SINR) 可表示为

$$\sigma_{il}^k = \frac{g_{il}P}{N_0 + \sum_{g_{jl} > g_{il}} x_j^k g_{jl}P}, \quad 1 \leq j \leq n \quad (4)$$

如果传输失败, 则此传输不应该进行, 即应有 $\sigma_{il}^k = 0$. 如果传输成功, 根据成功传输的条件应有 $\text{SINR}_{il}^k \geq \alpha$, 由此可对式(4)进行变换

$$\sum_{g_{jl} > g_{il}} x_j^k g_{jl} \leq \frac{g_{il}}{\alpha} - \frac{N_0}{P} \quad (5)$$

根据式(2)和(5)可知: 在多包接收方案下, 本文所讨论的模型可以描述为求

$$\text{Max } K$$

约束条件为

$$\begin{cases} Kr(i) \leq \sum_{k=1, \dots, h} x_i^k \frac{W}{h} \cdot \text{lb}\left(1 + \frac{\alpha}{N_0}\right), & 1 \leq i \leq n \\ \sum_{g_{jl} > g_{il}} x_j^k g_{jl} \leq x_i^k \left(\frac{g_{il}}{\alpha} - \frac{N_0}{P}\right) + (1 - x_i^k) \left(\sum_{s=1, \dots, n} g_{sl}\right), & 1 \leq i, j \leq n, 1 \leq k \leq h \end{cases} \quad (6)$$

式中, x_i^k 和 K 是变量.

对于约束的第2个式子, 如果 $x_i^k = 1$, 则与式(5)的形式一样; 如果 $x_i^k = 0$, 则必有 $\sum_{g_{il} > g_{jl}} x_j^k g_{jl} \leq \sum_{s=1, \dots, n} g_{sl}$, 亦即约束中的第2个式子满足所有情况.

式(6)中变量的数目为 $(hn + 1)$ 个, 约束的数目不超过 $(hn + n)$ 个, 同样是一个 MILP 问题.

3.2 近似最优解

由于 MILP 问题在整数变量较多的情况下无法直接求解, 必须探寻一种能迅速求解 MILP 问题的方法. 文献[17]提出了一种命名为 SF (sequential fixing) 的求解策略来专门求解此类问题. 本节将依据此策略建立一种求解式(6)的近似最优解法, 整个求解分为以下5个步骤:

步骤1 将需要求解的 MILP 问题中的 0-1 整数变量值域松弛到实数域内进行求解. 例如在式(6)中, 令 $x_i^k \in [0, 1]$, 从而得到一个 LP 问题, 此 LP 问题可以直接求解.

步骤2 假设 x_i^k 在步骤1求解后是所有 0-1 整数变量中最接近于1的, 则将 x_i^k 修正为1, 同时修正当 $x_i^k = 1$ 时必须为0的变量.

步骤3 如果所有 0-1 整数变量都已经被修正或被求出的结果是0或1, 则进入步骤5.

步骤4 将已经修正为0或1的整数变量代入原方程组中, 可以得到一个新的 LP 问题, 对此新问题进行求解. 在求解结果中检查所有 0-1 整数变量是否都已经明确为0或1, 如果没有则返回步骤2, 否则进入步骤5.

步骤5 由于所有的 0-1 整数变量都已经明确为0或1, 将这些变量代入原方程组中, 求解其他的非 0-1 变量, 这时是一个纯粹的 LP 问题, 可以直接得到结果.

4 性能分析

下面根据实际数据比较采用多包接收技术和不采用多包接收技术的最优方案的性能.

参数设置如下: 令阈值 $\alpha = \beta = 3$, 衰减系数 $\lambda = 4$, 噪声干扰 $N_0 = 10^{-10}$ W, 功率 $P = 1$ W, 频道带宽 $W = 22$ MHz (采用 802.11 的通信带宽). 终端和路由器在二维空间中随机生成, 其中路由器数目在2到5之间, 终端数目在10到50之间. 时间片数目等于终端数目. 终端的传输速率在 100 kbit/s 到 1 Mbit/s 量级上随机生成, 终端到所在区域的路由器的距离在 10 到 250 m 之间. 每种类型的网络随机生成 20 组不同的数据, 将得到的结果取平均后作为该组网络优化后的 K 值, 结果如表1所示. 需要指出的是,

对于不同的参数取值, 计算结果略有不同, 但不会影响该策略的改进率, 即 K 值的优化结果不变.

图3比较了不同路由器数目下传统方案和多包接收方案的优化性能. 从图3中可以看出, 采用了多包接收技术后, 最优解里共同尺度因子 K 有了明显的提高, 并且网络中终端数目越多, 取得的效果也越好, 其改进率至少提高3倍.

表1 采用和不采用多包接收方案下的优化结果比较

Table 1 Optimal objective value with and without MPR

终端数目	路由器数目	传统方案下的 K 值	采用 MPR 技术下的 K 值	改进率/%
10	2	205.63	533.11	259.25
10	3	263.34	503.10	191.05
10	4	299.62	636.70	212.51
10	5	330.23	598.53	181.25
15	2	149.97	482.20	321.53
15	3	195.28	427.73	219.04
15	4	217.96	623.78	286.19
15	5	261.64	518.89	198.32
20	2	115.27	494.50	428.99
20	3	148.53	568.45	382.71
20	4	174.63	550.84	315.43
20	5	188.84	545.36	288.79
25	2	94.18	477.41	506.90
25	3	129.59	480.33	370.64
25	4	144.70	574.60	397.09
25	5	165.60	492.63	297.48
30	2	82.57	436.76	528.96
30	3	102.86	529.15	514.44
30	4	126.24	482.53	382.23
30	5	134.34	491.02	365.51
35	2	73.78	504.12	683.29
35	3	94.84	401.84	423.72
35	4	107.29	433.50	404.06
35	5	112.03	461.83	412.25
40	2	65.44	531.25	811.79
40	3	79.69	448.49	562.82
40	4	93.88	398.19	424.15
40	5	114.44	470.38	411.03
45	2	57.13	490.58	858.64
45	3	76.10	476.72	626.43
45	4	84.56	427.64	505.71
45	5	94.99	406.23	427.66
50	2	51.31	487.38	949.79
50	3	69.61	489.51	703.18
50	4	78.85	412.32	522.93
50	5	83.60	392.93	470.03

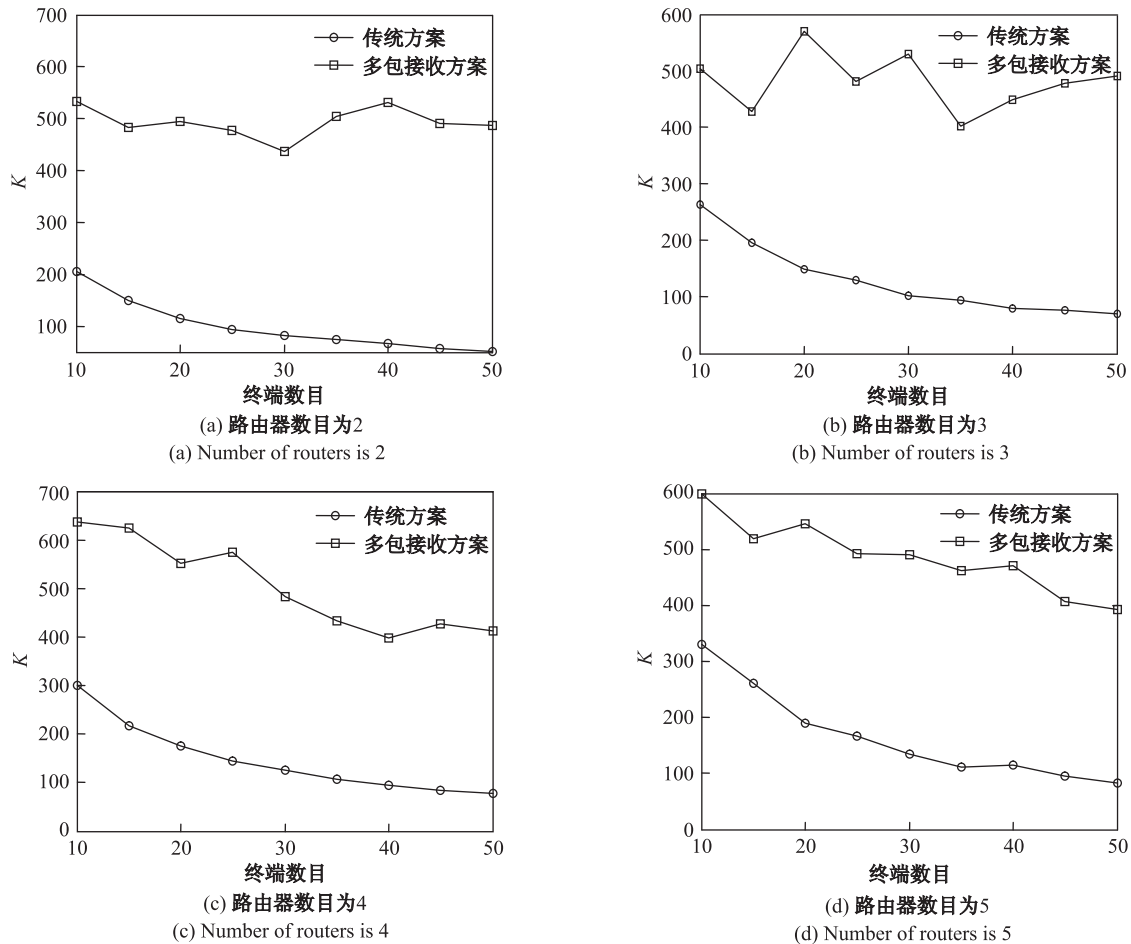


图3 不同路由器下传统方案和多包接收方案的性能比较

Figure 3 Performance between the traditional solution and the MPR solution in the different number of routers

5 结 语

本文根据协议-干扰模型研究了在多包接收条件下可同时传输数据的节点间的关系,建立了包含多个路由器和终端的无线 mesh 网络的跨层传输模型. 该模型是一个 0-1 混合整数线性规划模型,为了能对此模型进行快速求解,设计了一种多项式时间复杂度的近似最优优化策略. 最后给出传统方案下和本文所讨论策略的方案下的实验仿真结果,通过比较说明采用该策略能明显提升网络性能. 在实际运用中,可以让该策略在 mesh 路由器上实现.

本文的优化策略建立在单跳无线 mesh 网络模型的基础上. 多包接收并非只能用于单跳网络,设计可用于多跳无线网络的多包接收跨层优化方案,是下一步研究的工作.

参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, WANG X. A survey on wireless mesh networks [J]. IEEE Communication Magazine, 2005,

43(1): 23-30.

- [2] LANG Tong, QING Zhao. Multipacket reception in random access wireless networks: from signal processing to optimal medium access control [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(11): 108-122.
- [3] COVER T M. Broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1972, 18(1): 2-14.
- [4] ZHANG R, SIDIROPOULOS N D, TSATASNIS M K. Collision resolution in packet radio networks using rotational invariance techniques [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(1): 146-155.
- [5] GHEZ S, VERDU S, SCHWARTZ S. Stability properties of slotted Aloha with multi-packet reception capability [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33(7): 640-649.
- [6] GHEZ S, VERDU S, SCHWARTZ S. Optimal decentralized control in the random access multi-packet channel [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(11): 1153-1163.
- [7] TOUMPIS S, GOLDSMITH A J. Capacity regions for wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003: 736-748.
- [8] SU W, LIM T L. Cross-layer design and optimization for wireless sensor networks [C]//Software Engineer-

- ing, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2006: 278-284.
- [9] SHI Yi, THOMAS H Y. Cross-layer optimization for multi-hop cognitive radio networks [M]//Cognitive Radio Communications and Networks. [S.l.]: Principles and Practice, USA, 2009, 329-331.
- [10] BYOUNGHOON K, SUNGWOOT. A Communication framework supporting cross-layer design for wireless networks [C]//Ubiquitous Multimedia Computing, 2008: 232-237.
- [11] SHAKKOTTAI S, RAPPAPORT T S, KARLSSON P C. Cross-layer design for wireless networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 41(10): 74-80.
- [12] QING Zhao, LANG Tong. A multi-queue service room MAC protocol for wireless networks with multi-packet reception [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 125-137.
- [13] WANG Z, SADJADPOUR H R, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. The capacity and energy efficiency of wireless ad hoc networks with multi-packet reception [C]//Special Interest Group on Mobility of Systems, Users, Data and Computing, ACM, 2008: 179-188.
- [14] 朱赞, 潘成康, 徐友云, 蔡跃明. 一种无线 Mesh 网络中基于协同通信的多包接收方法 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1200-1204.
- ZHU Yun, PAN Chengkang, XU Youyun, CAI Yueming. A multi-packet reception method based on cooperative communication for wireless mesh networks [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 23(5): 1200-1204. (in Chinese)
- [15] 杨双懋, 郭伟. Ad hoc 网络中一种新的基于预约调度和 MPR 的媒体接入控制算法 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(6): 1872-1876.
- YANG Shuangmao, GUO Wei. New reservation scheduling MAC algorithm based on multi-packet reception in Ad hoc networks [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(6): 1872-1876. (in Chinese)
- [16] SHI Yi, THOMAS H Y, KOMPILIA S. How to correctly use the protocol interference model for multi-hop wireless networks [C]//International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, ACM, 2009: 239-248.
- [17] THAI M T, PARDALOS P. The handbook of optimization in complex networks: theory and applications [M]. [S.l.]: Springer Publisher, 2011: 135-150.

(编辑: 管玉娟)