

一种综合 IP 层和 WDM 层资源的光网络动态路由优化模型及其性能研究*

苏扬^{1,2} 徐展琦¹ 刘增基¹

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)¹

(西安科技大学通信与信息工程学院 西安 710054)²

摘要 在分层图模型的基础上,本文提出一种以最小化全网光路总代价为优化目标的 IP over WDM 光网络动态路由优化模型,设计了一种针对该模型的在线综合路由算法—MCTLP (Minimizing the Cost of Total Lightpaths), MCTLP 通过综合考虑 IP 逻辑层带宽资源分配和 WDM 光物理层波长链路资源的占用以优化网络资源。与两种有代表性的 IP over WDM 光网络路由算法的性能仿真对比表明: MCTLP 能够在 IP 逻辑层和 WDM 光物理层都使用较少的链路以承载 IP 业务流,接纳更多的 IP 业务连接请求,有效地降低网络阻塞率。

关键词 动态路由优化模型,在线综合路由算法,IP over WDM

Performance Analysis of a Dynamic Routing Optimal Model Integrally Allocating Resources on IP and WDM Layers in Optical Networks

SU Yang^{1,2} XU Zhan-Qi¹ LIU Zeng-Ji¹

(National Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071)¹

(School of Communications & Information Eng., Xi'an Univ. of Sci. & Tech., Xi'an 710054)²

Abstract This paper proposes a dynamic routing optimal model in IP over WDM optical networks, on which the layered graph is based and the cost of total lightpaths could be minimized. Therefore, a corresponding on-line integrated routing algorithm minimizing the Cost of Total Lightpaths (MCTLP) is designed accordingly. MCTLP optimizes the network resource utilization by integrally assigning bandwidth allocations on both IP logic layer and wavelength links usage on WDM optical physical layer. The performance comparison of MCTLP with two representative routing algorithms used in IP over WDM networks via simulation shows that MCTLP can use less links on IP logic layer and WDM physical layer to carry IP traffic flows, resulting in accepting more connection requests and reducing the traffic blocking probability efficiently.

Keywords Dynamic routing optimal model, On-line integrated routing algorithm, IP over WDM

IP over WDM 在网络层次上被划分为 IP 逻辑层和 WDM 光物理层, IP 逻辑层包括电域的 IP/MPLS 路由器和连接这些路由器的光路, WDM 光物理层包括 OXC 结点和能提供多个波长的光纤链路^[1]。当前 IP over WDM 的一个研究热点是业务流疏导,这是一个 NP-hard 问题^[2],和 IP over WDM 光互联网的路由算法密切相关,不少研究者先后就这一问题提出了一些启发式路由算法^[3~6]。其中比较有代表性的是文[6]归纳的两种算法——MinTH (Minimizing the number of Traffic Hops)和 MinLP (Minimizing the number of Lightpaths), MinTH 力求使 IP 业务流跨越的光路跳数最小, MinLP 力求使承载 IP 业务流所要新建的光路数最少。已有的 IP over WDM 光网络路由算法在设定 IP 逻辑层上光路的链路代价函数时,基本上没有考虑光路代价值和 WDM 光物理层上波长链路代价值之间的映射,因此不能很好反映 IP 逻辑层上不同光路对 WDM 光物理层波长链路的消耗情况。

笔者结合分层图,提出一种新的 IP over WDM 光互联网的动态路由优化模型,并给出基于该模型的一种启发式在线综合路由算法——MCTLP (Minimizing the Cost of Total

Lightpaths),笔者最后对 MCTLP、MinTH 和 MinLP 三种路由算法进行了性能仿真比较。

1 分层图

给定一个 IP over WDM 光网络的物理拓扑 $G(N, E, W)$, N 表示结点集(包括路由器和 OXC 结点,路由器本身也可能集成 OXC 功能), E 表示双向光纤链路集, W 表示波长集合,每条光纤链路提供 $|W|$ 个波长,分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|W|}$ 。假设 OXC 结点没有波长变换能力,分层图模型将 G 转化成 $|W|$ 个互不相邻的波长平面,分别对应一个特定的波长 λ_i ($i=1, 2, \dots, |W|$)。 G 中的每个结点 $N_k \in N$ 在分层图中被复制 $|W|$ 次,对应 $|W|$ 个波长平面上的结点 N_k^i ($i=1, 2, \dots, |W|$)。 G 中的光纤链路 $l_{ab} \in L$ 映射为 λ_i 波长平面上的波长链路 l_{ab}^i 。如果在 λ_i 波长平面上新建一条光路,这条光路占用的波长链路将从 λ_i 波长平面上被删除,而一旦这条光路被拆除,它占用的波长链路将在 λ_i 波长平面上被恢复^[7,8]。

图 1 是分层图模型的一个实例,图 1(a)是网络的原始物

* 基金项目:华为高校科技基金资助项目(YJCB2005040SW),陕西省自然科学基金资助项目(2004F04)。苏扬 副教授,在职博士研究生,主要研究方向为下一代网络。徐展琦 教授,主要研究方向为宽带通信网络。刘增基 教授,博士生导师,主要研究方向为通信网。

理拓扑,4个结点都是集成 OXC 功能的路由器,每条光纤链路提供两个波长 λ_1 和 λ_2 。假设结点对(1,4)之间存在一条光路,该光路占用结点对(1,2)、(2,4)之间波长为 λ_1 的波长链路,此时分层图的 λ_1 波长平面和 λ_2 波长平面分别如图 1(b)和(c)所示。

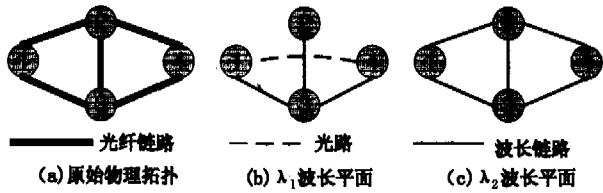


图 1 IP over WDM 光网络的分层图模型

由于 IP 业务流总是由一跳或多跳光路承载,因此网络中承载 IP 业务流的所有光路的总代价在一定程度上反映了当前网络资源的使用状况。

2 动态路由优化模型

在描述本文所设计的基于分层图的动态路由优化模型之前,我们对相关的参数和变量定义如下:

B : 波长链路的容量。

b_y : 一个 IP 业务流 y 占用的带宽。

p_{mn}^k : λ_k 波长平面上结点对 (m, n) 之间的波长链路。

l_{ij}^q : λ_k 波长平面上结点对 (i, j) 之间的第 q 条光路,结点对 (i, j) 在同一波长平面上可以存在多条光路,这些光路占用同一波长平面上不同的波长链路。

$b(l_{ij}^q)$: 光路 l_{ij}^q 的可用带宽。

V_{ij}^q : λ_k 波长平面上结点对 (i, j) 之间的光路数。

$S_{ij,k,q}^y$: 布尔变量, $S_{ij,k,q}^y = 1$ 表示 IP 业务流 y 由 λ_k 波长平面上的光路 l_{ij}^q 承载,否则 $S_{ij,k,q}^y = 0$ 。 $f_{mn}^{i,k,q}$: 布尔变量, $f_{mn}^{i,k,q} = 1$ 表示波长链路 p_{mn}^k 被光路 l_{ij}^q 占用,否则 $f_{mn}^{i,k,q} = 0$ 。

$C(l_{ij}^q)$: 光路 l_{ij}^q 的链路代价。

动态路由优化模型的优化目标和约束条件为:

• 优化目标: 最小化承载所有 IP 业务流的全网光路总代价。

$$\text{Minimize: } \sum_i \sum_j \sum_k \sum_q C(l_{ij}^q) \quad (1)$$

• 约束条件:

$$\forall i, j, p, k \quad \sum_m \sum_q f_{mp}^{i,k,q} = \sum_n \sum_q f_{mn}^{i,k,q} \quad (p \neq i, j) \quad (2)$$

$$\forall i, j, k \quad \sum_m \sum_q f_{im}^{j,k,q} = V_{ij}^q \quad (3)$$

$$\forall i, j, k \quad \sum_n \sum_q f_{jn}^{i,k,q} = V_{ij}^q \quad (4)$$

$$\forall m, n, k \quad \sum_i \sum_j \sum_q f_{mn}^{i,k,q} \leq 1 \quad (5)$$

$$\forall i, j, y \quad \sum_k \sum_q S_{ij,k,q}^y \leq 1 \quad (6)$$

$$\forall i, j, k, q \quad \sum_y (b_y \times S_{ij,k,q}^y) \leq B \quad (7)$$

约束条件中,等式(2)保证任何一条光路 l_{ij}^q 在经过 λ_k 波长平面上的一个中间结点 p 时,其占用的入波长链路数等于其占用的出波长链路数;等式(3)保证 λ_k 波长平面上 (i, j) 之间的所有光路在光路源点 i 占用的出波长链路数等于 i 到 j 的光路数;等式(4)保证 λ_k 波长平面上 (i, j) 之间的所有光路在光路宿点 j 占用的入波长链路数等于 i 到 j 的光路数;不等式(5)保证一条波长链路最多只能被一条光路占用;不等式(6)保证承载 IP 业务流 y 的光路路径在经过结点对 (i, j) 时, y 只能被 (i, j) 之间的一条光路承载;不等式(7)保证一条光路

的最大可用带宽不超过波长链路的容量。

在预知网络流量的情况下,上述动态路由优化模型可以被作为一个 ILP 问题来求解,但 IP 业务流的随机性使得网络精确流量矩阵的获得几乎不可能,而且随着网络规模增大,约束条件和约束变量都急剧增加,ILP 问题求解的计算复杂度将呈指数级增长。因此,我们给出一种启发式在线综合路由算法——MCTLP (Minimizing the Cost of Total Lightpaths) 来解决 IP over WDM 光互联网中 IP 业务流的路由问题。

3 在线综合路由算法——MCTLP

上述动态路由优化模型中的目标函数可以被直观地理解为:当利用已有的光路而非新建光路来承载尽可能多的 IP 业务流时,全网的光路总代价不会增大,有可能达到最小。因此 MCTLP 算法的路由策略是:对于一个请求带宽为 b_q 的连接请求,尽可能在 IP 逻辑层上利用已建的光路为其寻径。在寻径过程中,优先选择占用波长链路代价值之和为最小且可用带宽最贴近 b_q 的光路,其目的是最大限度地使用光路的带宽资源,避免产生过多“带宽碎片”,从而接纳更多的后续 IP 业务连接请求。

对于分层图模型中波长链路和光路两种类型的链路, MCTLP 对其链路代价函数作如下设定。

(a) 波长链路代价函数

$$\forall m, n, k \quad C(p_{mn}^k) = \begin{cases} \Delta_{mn} & (\sum_i \sum_j \sum_q f_{mn}^{i,k,q} = 0) \\ +\infty & (\sum_i \sum_j \sum_q f_{mn}^{i,k,q} = 1) \end{cases} \quad (8)$$

波长链路 p_{mn}^k 未被任何光路占用时,其链路代价值 Δ_{mn} 主要由其所在光纤链路的物理长度、建设费用等因素综合决定。在后面的仿真试验中,为了便于讨论,我们假设 $\Delta_{mn} = 1$ 。

(b) 光路代价函数

$$\forall i, j, k, q \quad C(l_{ij}^q) = \begin{cases} \left[\alpha + (1-\alpha) \frac{b(l_{ij}^q)}{B} \right] \times \frac{\sum_m \sum_n (\Delta_{mn} \cdot f_{mn}^{i,k,q})}{N \cdot \sum_m \sum_n \Delta_{mn}} \times \text{Min}(\Delta_{mn}) & (\sum_y S_{ij,k,q}^y > 0) \\ +\infty & (\sum_y S_{ij,k,q}^y = 0) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 N 是网络结点数, $\sum_m \sum_n \Delta_{mn}$ 是一个常数,等于 IP over WDM 光网络原始物理拓扑(网络中没有光路)中所有波长链路的代价值总和, $\text{Min}(\Delta_{mn})$ 是最小波长链路代价值。对于一条光路 l_{ij}^q ,其链路代价由 l_{ij}^q 在 IP 逻辑层上的可用带宽 $b(l_{ij}^q)$ 和 l_{ij}^q 在 WDM 光物理层占用的波长链路总代价值 $\sum_m \sum_n (\Delta_{mn} \cdot f_{mn}^{i,k,q})$ 两个因素共同决定。 α 作为一个权值因子 ($0 < \alpha < 1$),用于调整这两个因素在光路代价值中所占的权重。当光路 l_{ij}^q 不再承载任何 IP 业务流 ($\sum_y S_{ij,k,q}^y = 0$), l_{ij}^q 将被拆除,其代价值为 $+\infty$ 。从光路的代价函数可以看出,一条光路承载的 IP 业务流越多,其可用带宽将越少,其链路代价也越小。从全网的角度来看,利用网络中已建光路接纳的 IP 业务连接请求越多,按式(9)定义的光路代价函数能使全网光路总代价值更小,因此 MCTLP 算法的光路代价函数设定符合前面动态路由优化模型的优化目标,式(9)给出的光路代价函数也满足以下引理。

引理:如果一个 IP 业务连接请求 R 的源、宿结点在分层

图的某个波长平面上存在由已建光路构成的路径集合 P , 利用式(9)的光路代价函数, 通过 Dijkstra 最短路算法在该波长平面上为 R 寻径所得到的代价值最小路径 P_{opt} 必定包含在 P 中。

证明: $\forall i, j, k, q$

$$C(l_{ij}^{k,q}) = \left[\alpha + (1-\alpha) \frac{b(l_{ij}^{k,q})}{B} \right] \times \frac{\sum_m \sum_n (\Delta_{mn} \cdot f_{mn}^{k,q})}{N \cdot \sum_m \sum_n \Delta_{mn}} \times$$

$$\text{Min}(\Delta_{mn}) < \left[\alpha + (1-\alpha) \frac{b(l_{ij}^{k,q})}{B} \right] \times \frac{\sum_m \sum_n \Delta_{mn}}{N \cdot \sum_m \sum_n \Delta_{mn}}$$

$$\times \text{Min}(\Delta_{mn}) \leq \frac{1}{N} \cdot \text{Min}(\Delta_{mn})$$

对于 N 个结点的网络, P 中的任何一条路径 P_k 最多跨越 $N-1$ 跳光路, 如果以 $C(P_k)$ 表示 P_k 的代价值, 那么

$$C(P_k) = \sum_{l_{ij}^{k,q} \in P_k} C(l_{ij}^{k,q}) < \frac{N-1}{N} \cdot \text{Min}(\Delta_{mn}) < \text{Min}(\Delta_{mn})$$

在分层图的某个波长平面上, 源、宿结点间的任何路径 P_i 所包含的链路只可能对应三种情况: (1) 全部是已建光路; (2) 全部是波长链路; (3) 由已建光路和波长链路混合构成, 而后两种情况下 $C(P_i) \geq \text{Min}(\Delta_{mn})$, 因此 P_{opt} 只可能存在于 P 中, 引理得证。

在设定了波长链路和光路的代价后, MCTLP 的具体实现过程描述如下:

算法输入: IP over WDM 光网络的原始物理拓扑 $G(N, E, W)$; IP 业务连接请求 $R(s, d, b_q)$, s, d 分别是连接请求的源宿结点, b_q 是请求带宽。

算法输出: R 的最优路径 P_{opt} ; 如果 P_{opt} 不存在, 则返回空值。

算法步骤:

Step 1: 将输入的网络拓扑 $G(N, E, W)$ 转换成分层图;
Step 2: 等待 IP 业务请求。如果是连接请求, 执行 Step 3; 如果是释放请求, 执行 Step 5;

Step 3: 对 $|W|$ 个波长平面上可用带宽小于 b_q 的光路进行剪枝, 在各波长平面上运行 Dijkstra 最短路算法找到各自的最小代价值路径 P_i , 要求 $0 < C(P_i) < +\infty$, 然后作以下处理:

(1) 如果一条路径都未找到, 拒绝 IP 业务连接请求, 返回空值, 算法返回 Step 2;

(2) 如果找到 $k(k \leq |W|)$ 条最小代价值路径 P_i , 选择其中代价值最小的 P_i 作为 IP 业务连接请求的最优路径 P_{opt} ; 如果有多条这样的路径, 将已建光路数最多的波长平面上的路径作为最优路径 P_{opt} ; 而如果已建光路数也相同, 按 First-Fit 准则^[9]选择波长并将对应波长平面上的路径作为最优路径 P_{opt} 。算法转至 Step 4;

Step 4: 在分层图上删除最优路径 P_{opt} 经过的波长链路, 新建相应的光路, 再修改 P_{opt} 经过的新建和已建光路的可用带宽, 返回 Step 2;

Step 5: 释放 IP 业务流占用的带宽, 修改承载业务流的光路的可用带宽, 如果某条光路的可用带宽等于波长链路的容量, 拆除该光路, 在分层图上恢复该光路占用的波长链路, 然后返回 Step 2;

MCTLP 需要在 $|W|$ 个波长平面上分别运行 Dijkstra 最短路算法, Dijkstra 最短路算法的计算复杂度为 $O(N^2)$, 这样对于 N 个结点的 IP over WDM 光互联网络, MCTLP 算法的计算复杂度为 $O(|W|N^2)$ 。

4 仿真与性能分析

为了验证 MCTLP 算法的有效性, 我们选用 14 结点、21 条双向光纤链路的 NSFNET 网络对 MCTLP 和文[6]中的 MinTH、MinLP 进行了性能仿真比较, NSFNET 的网络拓扑如图 2 所示。

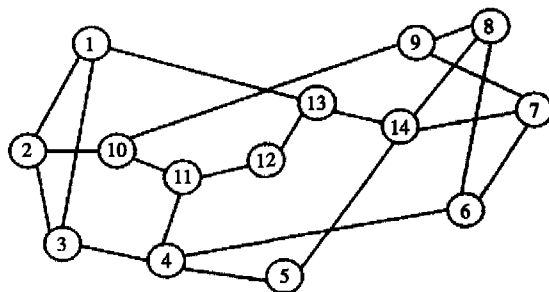


图 2 NSFNET 的网络拓扑

仿真试验中假设图 2 中的每个结点都是集成 OXC 功能的路由器, 每条双向光纤链路提供 4 个波长, 不失一般性, 将每个波长的容量都归一化为 1。IP 业务连接请求的到达是到达率为 β 的泊松过程, 连接请求的源结点在 14 个结点中随机产生, 宿结点在除去源结点的剩余结点中随机产生。请求带宽在 $(0, 1)$ 之间均匀分布, 连接的持续时间服从参数为 $1/\mu$ 的负指数分布, 这样网络的负载为 β/μ (Erlang)。一旦连接请求被拒绝, 则立即丢弃。MCTLP 算法中光路代价函数表达式里的参数 $\alpha=0.5$, 模拟 IP 业务连接请求产生次数为 10^5 次。

我们对以下三个性能参数进行仿真: (1) 网络阻塞率(被接纳的连接请求总带宽与所有连接请求总带宽的比值); (2) IP 逻辑层建立的光路数; (3) WDM 光物理层占用的波长链路数。后两个参数反映不同算法在 IP 逻辑层和 WDM 光物理层对链路资源的使用情况。

图 3 是三种算法的阻塞率比较, 可以看出, 在网络负载较轻时, MCTLP 的阻塞率和 MinLP 接近, 优于 MinTH。随着负载加重, MCTLP 的阻塞率小于 MinLP 和 MinTH。

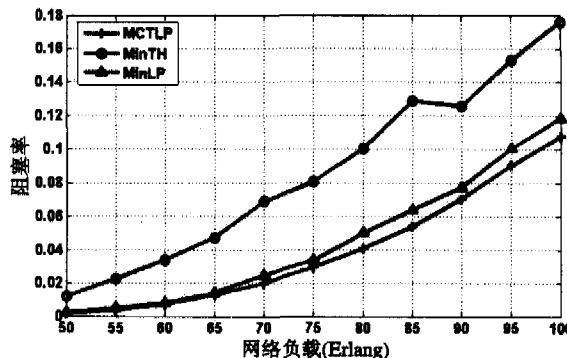


图 3 不同负载下的网络阻塞率

图 4 和图 5 分别是三种算法在不同网络负载下在 IP 逻辑层建立的光路数和 WDM 光物理层占用的波长链路数的比较, 结合图 3 的仿真结果, 可以看出, 在不同网络负载下, 在 IP 逻辑层和 WDM 光物理层, MCTLP 都使用更少的链路来承载更多的 IP 业务流, 这说明 MCTLP 对网络中链路资源的利用更优。

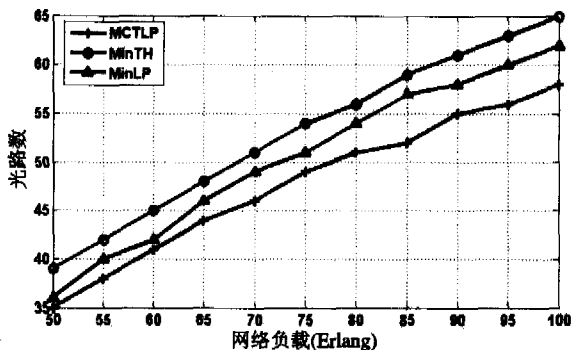


图4 不同负载下IP逻辑层上建立的光路数

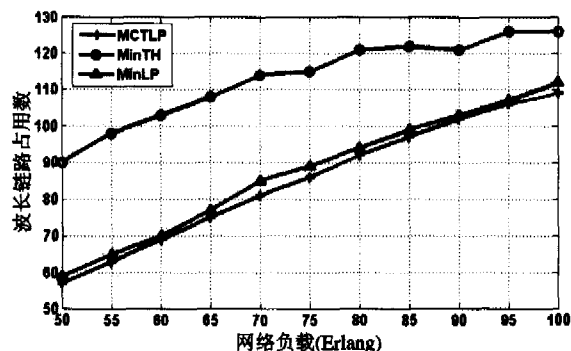


图5 不同负载下WDM光物理层上占用的波长链路数

MCTLP算法的性能优于MinLP和MinTH是因为MCTLP的光路代价函数对WDM光物理层波长链路资源和IP逻辑层带宽资源的分配作了综合考虑,也精确体现了IP逻辑层和WDM光物理层这两层链路之间的实际映射关系。当IP业务连接请求只在IP逻辑层上被路由时,MCTLP使光路尽可能多地复用IP业务流,从而提高了光路的带宽利用率,当IP业务连接请求需要在WDM光物理层被路由,或在IP逻辑层和WDM光物理层被综合路由时,通过对不同波长平面上路径代价值的比较,MCTLP保证了IP业务流占用的WDM光物理层波长链路的代价值为最小。MCTLP在路由

当前IP业务连接请求时对网络资源的优化利用保证了它能接纳更多的后续连接请求,从而降低了网络阻塞率。

结论 本文提出一种最小化全网光路总代价的IP over WDM光互联网动态路由优化模型,并设计了针对该模型的在线启发式路由算法——MCTLP,MCTLP综合考虑IP层带宽资源和WDM层波长链路资源以优化网络资源利用。仿真结果表明,无论在IP逻辑层还是WDM光物理层,MCTLP都使用较少的链路来承载更多的IP业务流,从而使网络的阻塞率性能得到明显改善。

参考文献

- 1 Wei J Y. Advances in the Management and Control of Optical Internet. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20 (4):768~785
- 2 Zang H, Jue J, Mukherjee B. A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks. Optical Networks Magazine, 2000, 1 (1):47~60
- 3 Modiano E, Lin P. Traffic grooming in WDM networks. IEEE Communications Magazine, 2001, 39 (7):124~129
- 4 Zhu KeYao, Mukherjee B. Traffic Grooming in an Optical WDM Mesh Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20 (1):122~133
- 5 Cinkler T, Marx D. Heuristic Algorithms for Joint Configuration of the Optical and Electrical Layer in Multi-Hop Wavelength Routing Networks. IEEE INFOCOM, Tel-Aviv, Israel, March 2000
- 6 Zhu H Y, Zang H, Zhu K Y, et al. A Novel Generic Graph Model for Traffic Grooming in Heterogeneous WDM Mesh Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11 (2): 285~299
- 7 Chen C. A New Model for Optimal Routing and Wavelength Assignment in Wavelength Division Multiplexed Optical Networks. IEEE INFOCOM, San Francisco, April 1996
- 8 Kodialam M, Lakshman T V. Integrated dynamic IP and wavelength routing in IP over WDM networks. IEEE INFOCOM, Anchorage, Alaska, April 2001
- 9 秦浩,刘增基,张爽. 基于遗传算法求解全光网络路由和波长分配问题. 西安电子科技大学学报,2003,30 (4):463~468

(上接第45页)

HPARP. HPARP对k跳邻居节点的能量和拓扑信息进行监控,以节点剩余能量为标准,有效地延长了网络寿命,提高了网络吞吐量,但也存在延迟稍长的问题。实验结果表明,HPARP的hello包广播周期(T秒)是影响网络性能的关键参数之一。较长的广播周期适合于稠密、静态网络场景,较短的广播周期适合于稀疏、动态网络场景。本文实现的HPARP没有考虑hello包广播周期的自适应性。在进一步研究中,可以考虑根据网络局部密度大小来自动调整hello包的广播周期,在最小化路由控制开销与获取网络局部能量及拓扑信息的周期间寻找一个折衷,以提高网络的节能性能。

参考文献

- 1 Internet Engineering Task Force. Manet working group charter. http://www.ietf.org/html_charters/manet-charter.html
- 2 Perkins C E, Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. Computer Communications Review, 1994, 234~244
- 3 Park V D, Corson M S. A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks. Proceedings of INFOCOM '97, April 1997

- 4 Johnson D B, Maltz D A, Hu Y C, et al. Dynamic Source Routing in Ad-Hoc Wireless Networks. IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-07.txt, February 2002 (Work in Progress)
- 5 Perkins C E, Royer E M. Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-11.txt, June 2002 (Work in Progress)
- 6 Feeney L, Nilsson M. Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment. In: Proc. of IEEE INFOCOM, Anchorage, AK, 2001
- 7 Scott K, Bambos N. Routing and channel assignment for low power transmission in PCS. ICUPC '96, Cambridge, MA, 1996
- 8 Singh S, Woo M, Raghavendra C S. Power-aware routing in mobile ad hoc network. In: Proc. ACM/IEEE Int Conf. on Mobile computing and networking, October 1998. 181~190
- 9 Toh C-K. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks. IEEE Communications Magazine, June 2001. 138~147
- 10 Misra A, Banerjee S. MRPC, Maximizing network lifetime for reliable routing in wireless environments. In: WCNC, 2002. 800~806
- 11 Kim D, Garcia-Luna-Aceves J J, Obraczka K, et al. Power-aware routing based on energy drain rate for mobile ad hoc networks. In: Proc. of Computer Communication and Networks, 2002. 565~569
- 12 <http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>