

一种基于价格感知的 Ad Hoc 网络按需路由协议

韩冰青^{1,2} 张 宏¹ 陈 伟²

(南京理工大学计算机学院 南京 210094)¹ (南京审计学院信息科学学院 南京 210029)²

摘 要 在无线 Ad Hoc 网中,判断路径优劣的度量参数主要有跳数、延迟、能量等,常常导致过度使用中心节点,引起网络拥塞。针对这一问题,提出了一种基于价格感知的多目标优化按需路由协议。该协议以价格为主要度量指标,采用分层的体系结构以获得全网一致的拓扑视图,消除分布式预测带来的不一致性。仿真结果表明,该协议提高了分组投递率并降低了端到端平均时延,在动态移动环境下具有较好的稳定性。

关键词 Ad Hoc 网络, 价格, 按需路由

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

On-demand Routing Protocol in Ad Hoc Networks Based on Price Awareness

HAN Bing-qing^{1,2} ZHANG Hong¹ CHEN Wei²

(School of Computer Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)¹

(School of Information and Science, Nanjing Audit University, Nanjing 210029, China)²

Abstract In wireless Ad Hoc networks main routing protocol parameters are hops, delay and energy etc, which lead to overload of central nodes and can cause network congestion. An on-demand routing protocol based on price awareness was proposed to deal with the problem. This protocol chooses price as the main parameter and uses cross-layer architecture. The method can obtain the same view of the whole network and can eliminate inconsistency of distributed prediction. The simulation results show that it improves the packet delivery fraction and reduces the average end-to-end delay and has good stability.

Keywords Ad Hoc network, Price, On-demand routing

1 引言

移动 Ad Hoc 网络由一组带有无线收发装置的移动节点组成,无须基站支持的动态可重构的多跳自组织网络,具有较强的容错性、鲁棒性和抗毁性,能够在战场、救灾等场合快速部署^[1]。由于单个节点的通信覆盖范围有限,自组网节点之间采用多跳转发策略进行通信。而节点的频繁移动,使网络拓扑不断变化,传输数据的路由会由于节点的移动而需要不断的重建或更新。因此,路由协议的设计是 Ad Hoc 网络中最有挑战性的问题之一。

多跳路由是目前移动 Ad Hoc 网络中的研究热点。在源节点和目标节点间采用多跳而不是一跳的方式来传输数据,可以增加网络容量和降低传输能量的消耗。现有的路由协议可分为按需(on-demand)和表驱动(table-driven)两大类。按需路由协议(on-demand routing protocol)又称为反应式路由协议,节点并不保存及时准确的路由信息。这类协议的主要代表有 AODV(ad hoc on-demand distance vector)^[2,3], DSR(dynamic source routing)^[4,5], DYMO(dynamic MANET on-demand routing)^[6]和 TORA(temporally-ordered routing al-

gorithm)^[7]等。当源节点需要向目的节点发送报文时,源节点在网络中发起路由查找过程,找到相应的路由后才开始发送报文。其拓扑结构和路由表内容是按需建立的,可能仅仅是整个网络拓扑结构的一部分。其优点是不需要周期性地广播路由信息,节省了一定的网络资源。其缺点是发送数据分组时,如果没有去往目的节点的路由,则分组需要等待建立路由所需要的时间。表驱动路由协议又称为先应式路由协议,是基于路由表周期性交换的协议。典型的表驱动路由协议有 OLSR^[8,9], TBRR^[10], DSDV^[11]等。先应式路由协议的路由发现策略与传统路由协议类似,节点通过周期性广播来交换路由信息。先应式路由的优点是,当节点需要发送数据分组时,只要存在去往目的节点的路由,就可直接发送,延时小。缺点是需花费较大的开销来建立全网的拓扑结构。

常用的判断路径优劣的度量参数主要有跳数、延迟、能量或者鲁棒性等,常常导致过度使用中心节点,更快耗尽其能量,或者数据流集中于某些路段,引起网络拥塞,最终导致网络被分割和目标节点不可达。

本文提出一种新的基于价格感知的多目标优化按需路由协议 PAORP(Price-Aware Ad-Hoc On-Demand Routing Pro-

到稿日期:2008-07-24 返修日期:2008-10-10 本文受国家自然科学基金资助项目(编号:70701018),江苏省自然科学基金项目(BK2007593, 07KJB520052)资助。

韩冰青(1979—),男,博士生,讲师,研究方向为 Ad Hoc 网络、网络抗毁, E-mail: h bq_2000@sina.com; 张 宏(1956—),男,教授,研究方向为网络安全等; 陈 伟(1976—),男,博士,博士后,副教授,研究方向为审计信息化。

toocol)。PAORP 协议是一个以价格为主要度量指标的按需路由协议,采用分层的体系结构,以获得全网一致的拓扑视图,消除分布式预测带来的不一致性。通过路由发现时的价格查询,在路由响应中获得该路由路径最新的价格信息,选择路由总价格最小的路径,使路由价格与用户节点的资源相联系。当用户的转发价格低时,数据流速率高;当转发价格高时,数据流速率就低。这样,通过价格参数自适应地调节端到端用户的数据传输速率需求,有效地避免中心节点或主干链路资源的过度消耗。此外,采用分布式迭代的价格更新机制,在网络开销受限制的情况下保证价格信息的实时性和准确性。PAORP 采用自适应按需调节机制,将链路的价格查询与路由发现过程相结合,将路径的价格反馈与路由响应消息相联系,实现对节点、链路价格信息的动态跟踪,提高了带宽利用率及路由性能。

2 Ad Hoc 网络的价格相关概念

对于一个由 n 个用户构成的 Ad Hoc 网络,定义用户集 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。假定每个用户 $i \in N$ 沿单一的固定路径 r_i 发送数据流,这里 r_i 代表转发数据流的节点集合(不包括用户 i)。令 $G(i)$ 为用户 i 转发数据的用户集合,且令 $H(i) = G(i) \cup \{i\}$,则 $H(i)$ 是为用户 i 发送及转发流量的所有用户集(包括用户 i)。定义 $A = (A_{ij}, i, j \in N)$ 为路由矩阵,则:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若 } i \in H(j) \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

对于用户 n 对应传输容量 C_n ,令 $x_n \geq 0$ 为用户 n 传输自己的流量所分配的传输速率, $y_n \geq 0$ 定义为其他用户转发流量所分配的数据传输速率。显然,有如下的约束:

$$x_n + y_n \leq C_n$$

此外,假定每个用户 $n \in N$ 对其他用户收取价格为 μ_n 的费用(单位流量)来转发他们的数据流量。用户 n 给其他用户(转发了用户 n 的数据流量)所需支付的聚集价格 λ_n 于是可表示为

$$\lambda_n = \sum_{m \in r_n} \mu_m$$

2.1 用户效用函数

令每一个用户 n 分配给自己的数据流速率为 x_n ,则用户 n 相应的效用函数为 $U_n(x_n)^{[12]}$ 。做如下假设。

假设 1 对于每一用户 $n \in N$,其效用函数 $U_n: \mathcal{R}_+ \rightarrow \mathcal{R}_+$ 为两次可微函数,并且有一个有界可导函数 $U_n'(x_n)$ 。此外, $U_n(x_n)$ 在 $[0, C_n]$ 上严格凹,因此有:

$$U_n(0) = 0 \quad (1)$$

$$U_n(x_n) = U_n(C_n), \text{ 当 } x_n \geq C_n \quad (2)$$

文献[13,14]描述了具有上述特征的效用函数。式(2)实际表明了数据发送速率 $x_n \leq C_n$ 的无线网络容量限制条件。假设 1 并不要求所有用户都有相同的效用函数,本文假定效用函数是用户 n 的私有信息,对其他用户不适用。

2.2 用户需求函数

定义用户 n 的需求函数 $D_n(\lambda_n)$,其中 $D_n(\lambda_n)$ 是下述最大化问题的最优解:

$$D_n(\lambda_n) = \arg \max_{0 \leq x_n \leq C_n} \{U_n(x_n) - \lambda_n x_n\}, \lambda_n \geq 0$$

$D_n(\lambda_n)$ 的值与传输速率 x_n 相等。当速率为 x_n 时,能最大化用户 n 的网络效益;当用户 n 不需要转发其他用户的数

据流量时,单位流量的成本等于 λ_n 。根据假设 1,可得

$$D_n(\lambda_n) = \begin{cases} C_n, & \lambda_n = 0 \\ U_n'^{-1}(\lambda_n), & 0 < \lambda_n < U_n'(0) \\ 0, & \lambda_n \geq U_n'(0) \end{cases}$$

既然 $D_n(\lambda_n)$ 在 C_n 上是有界的,进一步有如下引理。

引理 1 需求函数 $D_n(\lambda_n)$ 是连续的并且含有一阶可导函数 $D_n'(\lambda_n)$,同时存在一常量 $B_n > 0$,使得

$$D_n'(\lambda_n) \geq B_n, \text{ 当 } 0 \leq \lambda_n \leq U_n'(0) \text{ 时}$$

引理 1 可以由假设 1 很快推导出来,此处省去详细的证明。引理 1 表明,需求函数 $D_n(\lambda_n)$ 在区间 $[0, U_n'(0)]$ 上是严格递减的^[14]。

2.3 外部需求函数

将外部需求函数定义为在用户 n 处为其他用户转发的数据流量。外部需求取决于收费价格 μ_n (节点 n 对其中继服务的收费),比如:用户 n 收费低价格 μ_n ,但是其他所有节点对他们的中继服务收费价格高,于是在节点 n 上的外部需求就可能仍然维持低价收费,反之亦然。

令 $I_n(\mu_n, \mu_{-n})$ 表示在用户 n 处的外部需求,其中 $\mu_{-n} \in \mathcal{R}_+^{N-1}$ 是其他用户而不是用户 n 的收费价格向量集。注意到 $I_n(\mu_n, \mu_{-n})$ 对于 $\sum_{m \in G(n)} D_m(\lambda_m)$ 是有上界的,当用户 n 在网络中中继流量且无丢包现象发生时,总的需求是理想化的。由此,得到如下引理。

引理 2 对于任意一价格向量 $\mu_{-n} \in \mathcal{R}_+^{N-1}$,外部需求函数 $I_n(\mu_n, \mu_{-n})$ 在 μ_n 处是递减且连续的。此外,对于任意一个价格向量 $\mu_{-n} \in \mathcal{R}_+^{N-1}$, $I_n(\mu_n, \mu_{-n})$ 对于 μ_n 是可微的,除了一组固定点集 $\mu_n \in \mathcal{R}_+$ 。

引理 2 表明 $I_n(\mu_n, \mu_{-n})$ 在 μ_n 处存在右导数。

当价格 μ_n 使得 $I_n(\mu_n, \mu_{-n}) > 0$ 时,定义弹性外部需求函数 $l_n(\mu_n, \mu_{-n})$ 如下:

$$l_n(\mu_n, \mu_{-n}) = \left| \frac{I_n(\mu_n, \mu_{-n})}{d_n^+(\mu_n, \mu_{-n})} \right|$$

其中, $d_n^+(\mu_n, \mu_{-n})$ 是 $I_n(\mu_n, \mu_{-n})$ 关于 μ_n 的右导数。当存在一常量 L_n 使得 $l_n(\mu_n, \mu_{-n}) \leq L_n$,对于任意 $\mu_n \in \mathcal{R}_+$ 以及 $\mu_{-n} \in \mathcal{R}_+^{N-1}$ 使得 $I_n(\mu_n, \mu_{-n}) > 0$,就认为在 μ_n 处的外部需求是弹性的。若外部需求是弹性的,对于当前需求 $I_n(\mu_n, \mu_{-n})$ 而言,在价格 μ_n 上的一点微小变化能引起外部需求较大的变化。本文假定外部需求是弹性的。特别是当 $L_n \rightarrow 0$ 时为极限情况^[14]。

3 基于价格的按需路由协议实现

PAORP 路由协议是一个按需路由协议,与 AODV 有很多相似之处,但在路由生成、路由选择和路由维护上有本质不同。AODV 采用最短跳数优先的路由算法,而 PAORP 采用基于价格感知的路由思想,以价格为主要度量指标,采用分层的体系结构以获得全网一致的拓扑视图,消除分布式预测带来的不一致性,对价格、用户效用、可用带宽进行了均衡及有效优化。

3.1 路由生成过程

当源节点有数据要发送给目标节点时,它首先在自己的路由表中查寻到目标节点的路由。如果路由存在并且有效,则立刻开始发送数据;如果相应的路由不存在或者路由存在但已经标明为无效时,源节点就开启一个泛洪路由发现过程。

源节点创建一个路由请求包 RREQ,并向其邻居节点广播。为了避免 RREQ 不必要的大范围广播,PAORP 采用和 AODV 相似的扩展环搜索技术,设置路由请求的生存时间 TTL(time to live)值。一次请求没有响应,即没有收到相应的回答 RREP,则再次广播一个路由请求 RREQ,并增加 TTL 值和广播号。这一过程持续到发现路由或者 TTL 值达到允许的最大值为止。广播号是为了减小对广播分组的重复转发和处理,节点直接丢弃收到的重复广播。

与 AODV 采用最短跳数优先算法不同,PAORP 使用了基于价格感知的路由选择机制,以提高网络效用、降低数据发送成本。以 AODV 路由协议为基础进行了如下改进:

(1) 在路由请求 RREQ 分组中增加“PRICE”价格字段及效用信息字段。源节点首先创建一个路由请求包 RREQ,并向其邻居节点广播,这样源节点就可以通过路由发现来进行价格查询,而不必通过周期性的“HELLO”消息查询价格,减少了网络负荷。

(2) 当中间节点收到路由请求后,对 RREQ 分组中的价格及效用信息进行计算,并生成到邻居节点的局部梯度(价格的变化)。

(3) 在路由响应 RREP 分组中增设“PRICE_CHANGE”字段。目的节点收到 RREQ 分组后,建立反向路径,产生 RREP 应答分组,将路径上数据流各跳的价格相加,从而得到总的聚集价格。一旦发现总的聚焦价格变化,则置“PRICE_CHANGE”字段为 TRUE,通知源节点路由价格发生了改变。

(4) 源节点接收到“PRICE_CHANGE”信息后,数据发送组件根据新的价格,通过速率更新算法调整源节点的发送速率。PAORP 路由层描述示意图如图 1 所示。

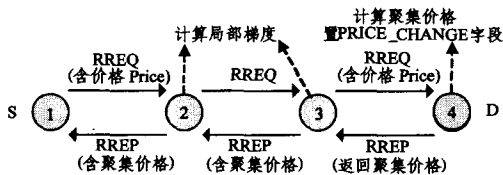


图 1 路由层示意图

3.2 路由选择机制

当目的节点收到第 1 个 RREQ 分组后,立即应答 RREP,因为这是目前已知的价格最短路径。此后,目的节点可能会收到更多的 RREQ 分组。目的节点等待 $T_{ROUTEWAIT}$ 时间,目的节点从 $T_{ROUTEWAIT}$ 时间内获得的到达源节点的路由集合中选择具有最短聚集价格的并且具有较高网络效用的可行路径作为最优路径。如果价格、效用都相同,则选择跳数最短的路径。如果该路径不是第 1 次应答的路径,则重新向源节点发送一个 RREP 分组;否则什么也不做。

PAORP 使用如下公式来计算各条路径的权重:

$$W = \sum_{i=1}^n (\alpha \times W_{PRICE}^i + \beta \times W_{UTILITY}^i + \gamma \times W_{HOP}^i) \quad (3)$$

W 是路径权重, W_{PRICE}^i , $W_{UTILITY}^i$ 和 W_{HOP}^i 分别是节点 i 考虑价格、效用和跳数所得的权重。 α, β, γ 是用来平衡 W_{PRICE}^i , $W_{UTILITY}^i$ 和 W_{HOP}^i 的权重因子。 W_{PRICE}^i, W_{HOP}^i 越小, $W_{UTILITY}^i$ 越高,则该路径被使用的可能性越大。

如图 2 所示,连线表示无线链路,连线的数值表示该无线链路的价格。

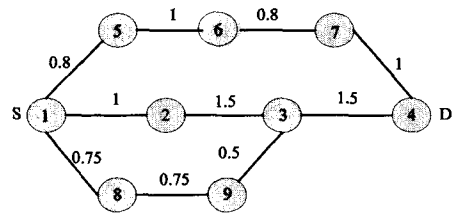


图 2 网络拓扑示例

在图 2 中,节点 1 要发送数据给节点 4。如果没有可用的有效路由,就发起一个路由发现过程,节点 1 广播一个 RREQ 分组,分组中含有“PRICE”价格信息。广播可以沿不同的路径转发到节点 4。比如 RREQ 率先沿 1-2-3-4 传播到节点 4,节点 4 收到第一个 RREQ 后,便建立反向路径 4-3-2-1,并沿反向路径发送一个路由应答包 RREP。其中该路由应答 RREP 中包括了 1-2-3-4 路径的聚集价格,即 $W_{PRICE} = 1 + 1.5 + 1.5 = 4$ 。当 RREP 回传到节点 1 后,节点 1 到节点 4 的路由就建立起来并开始传输数据。RREQ 接着沿路径 1-5-6-7-4 传播到节点 4,节点 4 计算该路径的聚集价格为 $W_{PRICE} = 0.8 + 1 + 0.8 + 1 = 3.6$ 。当相应的 RREP 应答分组回传给节点 1,节点 1 将在第 1 组路径与第 2 组路径之间作出选择。当只考虑价格权重时,节点 1 将选择新的路由路径 1-5-6-7-4;第 3 组 RREQ 沿路径 1-8-9-3-4 到达目的节点 4,第 3 组路径的价格为 $W_{PRICE} = 0.75 + 0.75 + 0.5 + 1.5 = 3.5$ 。第 3 组路径与第 2 组路径的跳数相同(都为 4 跳),但其聚集价格更低,所以节点 1 最终将选择第 3 组路径 1-8-9-3-4 进行数据传输。

上例给出了价格权重 W_{PRICE} 的一个简单计算方法,其权重因子 $\alpha = 1$ 。同样, $W_{UTILITY}$ 及 W_{HOP} 也可计算出来。根据式(3),将各自的权重与权重因子相乘后,即可得到该路径总的权重。考虑到 W_{PRICE}, W_{HOP} 越小, $W_{UTILITY}$ 越高,则该路径被使用的可能性越大。为了简化运算,往往令 α, γ 为一负值, β 为一正值,这样源节点根据权重 W 选择路径时,选择 W 最大的路径即可。

3.3 路由维护策略

由于在移动 Ad Hoc 网络中,关于节点位置、价格、用户效用和可用带宽的信息始终在变化着,为了实现价格、用户效用、可用带宽间的均衡,PAORP 路由协议需要了解最新的而不是过时的节点信息。

PAORP 协议采用跨层的体系结构以获得全网一致的拓扑视图,PAORP 在 MAC 层集成了可用带宽测量、用户效用计算组件,在路由层进行价格计算。当主机的移动或通信干扰等原因导致链路断开,而导致路由无效时,PAORP 协议采用局部修复的方式进行路由维护。断裂链路的两端离源节点较近的节点向目的节点发送 RREQ 分组,同时缓存源节点发来的分组。当目的节点或其他下游节点收到 RREQ 分组时,重新应答 RREP,以建立新的路由。该修复过程与源节点建立路由的方式相似。同样,PAORP 协议通过价格判断和路由的局部修复,可以充分利用现有的有效路由信息,节省路由维护的开销。

4 PAORP 协议性能评估

4.1 效用函数及仿真环境

采用针对无线移动网络环境的 NS-2.32^[15] 为仿真平台,

采用 IEEE 802.11 DCF 作为 MAC 层协议,无线信号衰减服从 Two-ray ground reflection 模型,效用函数 $U(x_f) = \ln(x_f)$,如图 3 所示。仿真场景设置为 50 个节点随机分布在 $1000 \times 1000 \text{m}^2$ 的矩形区域内,每个节点的无线传输半径为 250m,信道容量为 2Mbps,CBR 数据源为 20 个连接,业务分组为 1024bit,选择随机行走模型作为节点的移动模型,单个直线运动的速率服从 $0\text{m/s} - v_{\max}$ ($v_{\max}$ 为节点的最大移动速度)的均匀分布,仿真时间为 300s,运动场景分别对应暂停时间为 0,50,100,150,200,300s 共 6 个场景。图表中所有结果均为多次不同随机种子(seed)仿真的平均值。

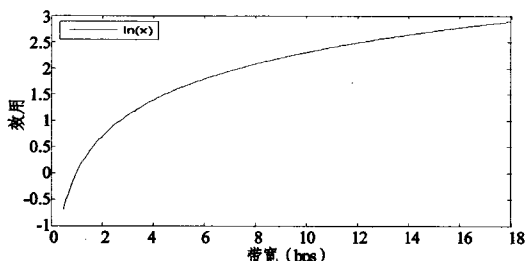


图 3 效用函数 U

4.2 网络性能对比

为了评价 PAORP 路由协议的性能,我们对归一化路由开销、分组投递率、平均端到端时延这 3 项指标进行了性能分析和比较。将 PAORP 协议与 AODV 及 AODV-UU^[16] 协议进行了对比实验。各指标说明如下。

(1) 分组投递率:目的节点接收分组的个数与源节点发送分组的个数的比值。该参数综合反映了数据分组传输过程中路径中断修复、发送缓冲区溢出、接口队列溢出、MAC 分组冲突等因素对端到端分组投递率的影响。

(2) 平均端到端时延:目的节点的分组接收时间与源节点的相应分组发送时间的平均差值。该参数包括了所有可能的时延:源节点路由发现时延、路径中断修复时延、多跳转发时延、接口排队时延、MAC 层分组重传时延、链路传播时延等。

(3) 归一化路由开销:为成功发送一个数据分组到目的节点而发送的路由控制分组的个数。该参数用于评估路由控制开销,并间接反映动态环境下的路径稳定性。

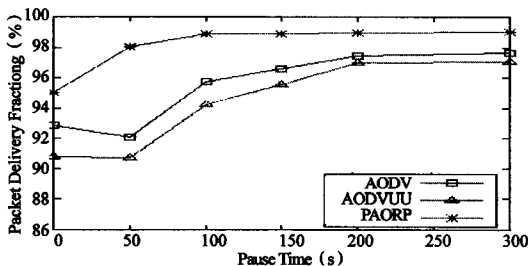


图 4 分组投递率比较

由图 4 可以看到,暂停时间越长,3 种路由协议的分组投递率越高。在各种暂停时间的运动场景中,PAORP 协议的分组投递率均高出 AODV 协议和 AODV-UU 协议的分组投递率。暂停时间为 0s 时,节点移动较频繁,PAORP 的分组投递率比 AODV-UU 协议高出 4.7%,比 AODV 协议高出 2.1%,说明 PAORP 协议在移动较频繁的情况下表现出较好的性能。当暂停时间增大到 100s 以后,PAORP 与 AODV

及 AODV-UU 协议的分组投递率逐步趋于稳定,PAORP 的分组投递率高于 AODV-UU 及 AODV 协议 1.4%~4.9%。

由图 5 可以看到,当节点运动速度降低时,3 种协议的平均端到端时延都会随之降低。个别尖峰值的出现是由于该场景的随机分布不理想。随着移动的减少,链路断开的几率下降,时延也随之降低。相对于 AODV 及 AODV-UU 协议,PAORP 协议有效地降低了端到端的平均时延。

由图 6 可以看出,AODV 协议和 AODV-UU 协议的归一化路由开销基本相同,而 PAORP 协议的归一化路由开销要大于 AODV 和 AODV-UU 的路由开销。这是因为 PAORP 协议是一种基于价格感知的路由协议,在路由发现及路由维护过程中需要发送价格、效用等额外的控制信息,因此 PAORP 协议的路由开销要大于 AODV 协议及 AODV-UU 协议。当暂停时间为 0s 时,PAORP 协议的路由开销要远大于 AODV 及 AODV-UU 协议的路由开销,这是因为此时节点移动速度快,链路断开及重组频繁,PAORP 需要发送较多的控制信息来建立和维护路由。随着节点移动速度的降低,PAORP 的路由开销显著下降并逐步趋稳,此时链路较稳定,维护路由的开销下降。

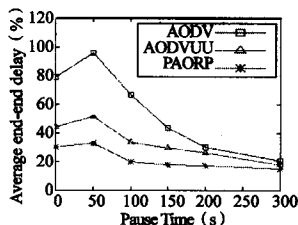


图 5 平均端到端时延比较

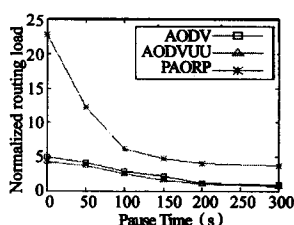


图 6 归一化路由开销比较

4.3 节点移动性仿真

为了评估 PAORP 协议在不同的节点移动速度下的性能,节点的最大移动速度 $v_{\max}$ 分别取 5m/s,10m/s,15m/s 和 20m/s 这 4 个值,仿真时间设为 300s。对 4 种不同速度下的分组投递率和端到端平均时延进行了对比实验。

图 7 给出了 PAORP, AODV, AODV-UU 3 种路由协议分组投递率的仿真结果。可以看到,随节点移动速度的增大,3 种协议的分种投递率随之下降。在各种移动速度下,PAORP 协议的分组投递率均高于 AODV 和 AODV-UU 协议。即使在 20m/s 的移动速度下,PAORP 的分组投递率下降也不明显,能够适合节点移动速度高的场景。

从图 8 可以看出,随节点移动速度增大,3 种协议的端到端平均时延随之增大。在不同的移动速度下,PAORP 的端到端平均时延均低于 AODV 和 AODV-UU 协议的时延。

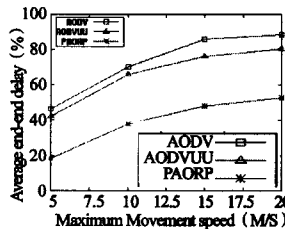
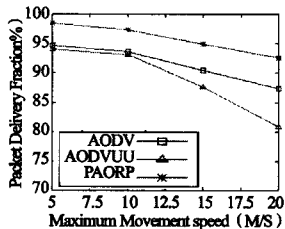


图 7 不同移动速度下分组投递率 图 8 不同移动速度下平均端到端时延

结束语 本文提出一种新的基于价格感知的 Ad Hoc 网

络按需路由协议 PAORP。PAORP 协议以价格为主要度量指标,采用分层的体系结构以获得全网一致的拓扑视图,消除分布式预测带来的不一致性,对价格、用户效用、可用带宽进行了均衡及有效优化。仿真结果表明:该协议不仅拥有传统的按需路由协议的优点,而且能感知链路价格和需求,提高了分组投递率并降低了端到端平均时延,在动态移动环境下具有较好的稳定性。在下一阶段的工作中,我们希望进一步研究节点移动模型对 PAORP 协议的影响,使得 PAORP 协议具有更好的扩展性。

参考文献

- [1] Chlamtac I, Conti M, Liu J. Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges[J]. *Ad hoc Networks*, 2003, 1(1): 13-64
- [2] Perkins C E, Royer E M. Ad - Hoc on - demand distance vector routing[C]// Kristine K, ed. *IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA)*. 1999: 90-100
- [3] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. RFC 3561, 2003
- [4] Johnson D B, Maltz D A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks[M]// Imielinski T, Korth H. eds. *Mobile Computing*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996: 153-181
- [5] Johnson D B, Maltz D A, Hu Y C. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR). Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-10. txt. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-10.txt> [OL]. IETF MANET Working Group, 2004
- [6] Chakeres I, Perkins C. Dynamic MANET on-demand (DYMO) routing. Internet Draft, draft-ietf-manet-dymo-04. txt [OL]. <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-dymo-04>, IETF MANET Working Group, 2006

- [7] Park V D, Scott Corson M. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks[C]// Hasegawa T, Pickholtz R L, eds. *Proc. of the IEEE INFOCOM'97*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1997: 1405-1413
- [8] Jacquet P, Muhlethaler P, Clausen T, et al. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks[C]// Hassan S Z, Mirza H R, eds. *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Technology for the 21st Century*. Pakistan: Freedom Art Press, 2001: 62-68
- [9] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol (OLSR). RFC 3626, 2003. [OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- [10] Ogier R, Templin F, Lewis M. Topology dissemination based on reverse-path forwarding (TBRPF). RFC 3684, 2004. [OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3684.txt>
- [11] Perkins C E, Bhagwat P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1994, 24(4): 234-244
- [12] Shenker S. Fundamental design issues for the future internet [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 1995, 13(7): 1176-1188
- [13] Kelly F, Maulloo A, Tan D. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability [J]. *Journal of Operational Research Society*, 1998, 49(3): 237-252
- [14] Qiu Ying, Marbach P. Bandwidth allocation in Ad Hoc Networks: A Price-Based Approach [C]// *Proc. INFOCOM Conf.* 2003: 797-807
- [15] NS-2 [EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [16] AODV-UU [EB/OL]. <http://core.it.uu.se/core/index.php/AODV-UU>

(上接第 43 页)

同时,侦察卫星成像质量受许多因素的影响,如太阳高度角、气象条件、光照、对比度、卫星的稳定性等,因此卫星发现目标概率还需用这些因素来修正。所以,成像侦察卫星发现目标的概率为

$$P = \rho P_f P_r$$

其中, ρ 为影响卫星发现目标概率的因子。

因此,侦察卫星系统能力为 $C(0, t) = P = \rho P_f * P_r$

综上,侦察卫星完成侦察任务的效能为

$$E(t) = A(t) D(t) C(t) = AG(t) \cdot (D[0, t_1] * D[t_1, t_2]) \cdot \rho P_f P_r$$

结束语 本文对侦察卫星系统自身特点进行分析,以 WSEIAC 提出的 ADC 模型为基本框架,建立了侦察卫星系统 ADC 效能评估模型。

系统效能评估反映了系统的静态效能。本文以系统效能评估模型为基础,建立了引入卫星老化率的侦察卫星动态 ADC 效能评估模型。

卫星老化过程是一个复杂的过程,卫星老化率对卫星效能有着一定的影响,是卫星效能评估中不可或缺的一环。考

虑卫星运行环境及内部结构复杂性,应用随机过程对其老化进行了建模。

参考文献

- [1] Guo Kai, Xu Cheng, Yan Wenchuan. Stochastic mathematic model of the fighting personnel and its application in effectiveness evaluation for small arm system[C]// *Communications and Information Technology*. IEEE International Symposium, 2005
- [2] Lam Y, Zhang yuanlin. A geometric-process maintenance model for a deteriorating system under a random environment[J]. *Reliability*, IEEE Transactions on, 2003
- [3] Paolo S. Extremal noise events, intermittency and Log-Poisson statistics in non-equilibrium aging of complex systems[J]. *arXiv:cond-mat/0503108v1 [cond-mat. dis-nn]*, 2005
- [4] 关成启, 杨淼, 关世义. 导弹武器系统效能评估方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2000
- [5] Picinbono B, Bendjaballah C. Poisson Processes with Integrable Density[J]. *Information Theory*, IEEE Transactions on, 2006
- [6] Usynin A, Hines J W, Urmanov A. Formulation of Prognostics Requirements[C]// *IEEE Aerospace Conference*. 2007