

自组网中一种可靠的层次路由协议^①

吴 静^{②*} 顾国昌^{*} 季振洲^{**} 侯国照^{***}

(* 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

(** 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

(*** 中国人民解放军陆军航空兵学院 北京 101123)

摘 要 针对自组网中基于多层有中心分级结构(MCHS)的分级状态路由(HSR)协议存在结构稳定性差、结构维护开销大、可靠性不高和丢包问题严重等问题,提出一种可靠的层次路由协议(RHRP)。它基于一种新的多层无中心分级结构(MCLHS),该结构采用无中心策略,有利于提高结构稳定性和降低结构维护开销,并能进一步提高可靠性和降低路由开销。RHRP 采用“高层虚拟链路以群为构成元素”的策略,使高层虚拟链路更稳定,有利于提高可靠性。更稳定的结构和高层虚拟链路可以减少丢包数目和重路由次数,从而降低传输时延和路由开销。通过分析路由可靠度,从理论上证明了 RHRP 的可靠性较高。通过仿真评价 RHRP 和 HSR 的性能,结果表明,RHRP 在投递率、平均端到端时延和路由开销等指标上都优于 HSR。

关键词 自组网,层次路由协议,分级结构,可靠性,稳定性

0 引 言

1999 年,Pei 等人提出了分级状态路由(hierarchical state routing, HSR^[1,2])协议,它是一种基于多层分级结构^[3]的层次化链路状态路由协议,由于多层分级结构是依赖于各层群首的,故本文称它为多层有中心分级结构(multi-layer center hierarchical structure, MCHS)。HSR 基于组移动模型将网络中的节点划分为不同的逻辑子网。HSR 协议不仅根据节点物理位置使用分群思想划分物理分群,动态生成节点分级地址(hierarchical ID, HID),以决定数据包的转发路径,而且还根据节点逻辑地址对其位置进行管理。在每个逻辑子网内至少存在一个归属代理,负责管理本子网内节点逻辑地址与当前 HID 之间的对应关系,并为所管理的节点转发数据包。在 HSR 中,从源节点到目的节点的路由过程分为两个阶段:从源节点到目的节点的归属代理和从目的节点的归属代理到目的节点,每个阶段都是在 HSR 路由表的辅助下根据 HID 将一个数据包从开始节点发送到目标节点。这里,节点的 HSR 路由表保存了 MCHS

底层群内的物理链路信息,群首的 HSR 路由表还保存了 MCHS 高层群内的虚拟链路信息,其中,虚拟链路可以看作一条由低层链路组成的隧道,它是一个群首节点 ID 序列。

HSR 虽然很好地解决了大规模自组网的路由问题,但仍存在如下不足:(1) 在 MCHS 中,结构依赖于一些特殊的易于变化的群首,这使结构的稳定性差;(2) MCHS 网络中所有节点 HID 需要随着各层群首轮换而频繁地变更,这造成了很大的结构维护开销;(3) HSR 在 MCHS 上转发数据包的过程中依赖于各层的虚拟链路,虚拟链路又依赖于一些群首,群首的频繁变更使虚拟链路很不稳定,从而使协议的可靠性不高;同时,节点 HID 频繁地变更也对协议可靠性产生了不利的影响;(4) 虚拟链路的不稳定和节点 HID 的频繁变更都会使路由很容易失效,当上述任何一种情况发生时,只能丢弃数据包,并通知源节点重新路由,由此可知,HSR 中存在着严重的丢包问题。针对上述问题,本文提出一种可靠的层次路由协议(reliable hierarchical routing protocol, RHRP),它基于一种新的多层无中心分级结构(multi-layer centerless hierarchical structure, MCLHS)。MCLHS 采用

① 863 计划(2002AA142020)资助项目。

② 女,1980 年生,博士生;研究方向:移动自组网;联系人, E-mail: 99061632@163.com
(收稿日期:2009-06-08)

的无中心策略有利于结构稳定性的提高和结构维护开销的降低,并能进一步提高协议可靠性和降低路由开销。RHRP 采用“高层虚拟链路以群为构成元素”的策略,使高层虚拟链路更加稳定,有利于协议可靠性的提高。更稳定的结构和高层虚拟链路又可以降低丢包数目,进而减少重路由次数,从而降低传输时延和路由开销。

1 RHRP 的设计

1.1 RHRP 的基本思想

RHRP 将动态、分布式分群思想与有效的位置管理结合起来,维护节点物理的层次拓扑和逻辑上的子网。它使用物理层次拓扑解决数据包的转发路径问题,而使用逻辑子网结构解决节点移动过程中的位置管理问题。RHRP 的物理层次拓扑和在物理层次结构上数据包的转发技术与 HSR 不同,但逻辑子网结构和节点位置管理^[4]与 HSR 相同。

RHRP 基于一种新型结构 MCLHS,它采用了“结构依赖于一些相对稳定的群”的无中心策略,在高层虚拟链路上采用了“高层虚拟链路以一些变更频率相对较低的群为构成元素”的策略。

1.2 RHRP 的关键技术

在下文中,分别对 MCLHS 和在 MCLHS 上转发数据包的技术进行描述。

1.2.1 MCLHS 的描述

针对 MCHS 存在的问题,本文提出一种新型结构 MCLHS。在下文中,分别描述 MCLHS 的基本思想和形成过程。

• 基本思想

MCLHS 采用了“结构不依赖于某些易于变化的中心节点,而是依赖于一些相对稳定的群”的无中心策略,当发生群代表轮换时,只要节点不离开群,它的 HID 就不会变更,这有利于结构稳定性的提高和结构维护开销的降低,并能进一步提高协议可靠性和降低路由开销。为了方便操作,在群内选出一个节点作为群的代表,代表之间相互协调动态完成 MCLHS 的维护,各层群代表都维护一个两跳距离的分群。代表与群首的作用相似,不同的是,在高层群中,代表操作的对象是群,而群首操作的对象是节点。

在 MCLHS 中,节点 HID 是指从次高层群到节点本身的层次化路径上的一系列群号和节点自身 ID 的序列,它的编址方案可以表示为 $\langle cid_{H-1}, \dots,$

$cid_i, \dots, cid_1, nid \rangle$, 其中 H 为分级结构的层数; cid_i 为节点所在第 i 层群的群号,它具有 $x-y-z$ 的形式,其中 x 代表群所处的层号, y 代表高层群创建者的代表 ID 或者底层群的创建者 ID, z 代表群的创建时间; nid 为节点的 ID。

• MCLHS 的形成

在 MCLHS 中,除了底层群的成员是节点之外,其它高层群的成员都是低一层群。首先,进行底层分群,底层群的创建者作为群代表,然后,群作为更高层群的成员参与更高层分群,各个群代表代替群做出创建或者加入更高层群的决策,创建更高层群的低一层群代表作为更高层群的代表。如此反复,形成如图 1 所示的 MCLHS。这里,底层分群和高层分群可以分别按照多种不同的策略^[5-7]来进行划分。在如图 1 所示的 MCLHS 中,中心群是指高层群代表所在的低一层群,网关群是指能同时与多个高层群的中心群连接的低一层群。

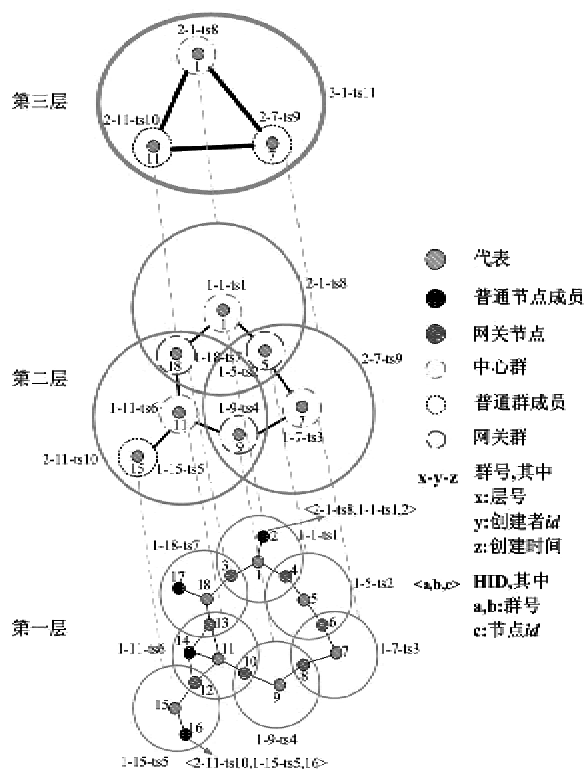


图 1 MCLHS

1.2.2 在 MCLHS 上数据包的转发技术

在 MCLHS 上对数据包的转发可以分解为在若干段不同层次虚拟链路上对数据包的转发。在下文中,分别描述了在虚拟链路上和在 MCLHS 上数据包的转发方法。

• 在虚拟链路上数据包的转发方法

在 RHRP 中,群代表负责维护所代表的群与邻群之间的虚拟链路。两个高层群之间的虚拟链路由两个高层群的中心群和连接两个高层群的网关群构成。两个底层群的虚拟链路由两个底层群的代表和连接两个底层群的网关构成。RHRP 的高层虚拟链路稳定性较高,有利于提高协议的可靠性。

为了完成在 RHRP 高层虚拟链路上数据包的转发,多层群代表相互协作,通过将以群为元素的高层虚拟链路逐层映射为以节点为元素的物理链路来最终实现在高层虚拟链路上数据包的转发。在高层虚拟链路上转发数据包一定是从某个高层群代表开始的,它根据本地各层虚拟链路信息生成高层虚拟链路到物理链路的部分映射图,这个映射图由在映射关系中涉及的高层群序列信息和底层节点序列信息组成。上述两种信息分别被封装成具有相同格式的包,它们又作为一个整体被按序封装到一个无格式包中以反映虚拟链路映射信息,虚拟链路映射信息包最终被封装到要传递的数据包中,将各层的位置索引初始化为 0,然后把数据包传递给第 0 层节点序列在位置索引为 1 处的节点。虚拟链路映射信息包的内容、各高层群序列和底层节点序列信息包的格式分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 虚拟链路映射信息包内容

第 i 层群序列 信息包	第 $i-1$ 层群序列 信息包	...	第 1 层群序列 信息包	底层节点序列 信息包
-------------------	---------------------	-----	-----------------	---------------

表 2 各高层群序列和底层节点序列的信息包格式

层号	群号序列或节点 MAC 地址序列	位置索引
----	------------------	------

收到数据包的节点所做的操作如图 2 所示。

• 在 MCLHS 上数据包的转发方法

以在虚拟链路上数据包的转发方法为基础,本文提出了在 MCLHS 上数据包的转发方法。为了方便描述,首先提出一种“边界层”的概念。

定义 1(边界层):从次高层开始逐层比较两个节点层次路径上的元素,如果从某层开始出现了不相同的元素,则这个层次就被称为边界层。本文不讨论底层群内数据包的转发,故边界层都不小于 1。

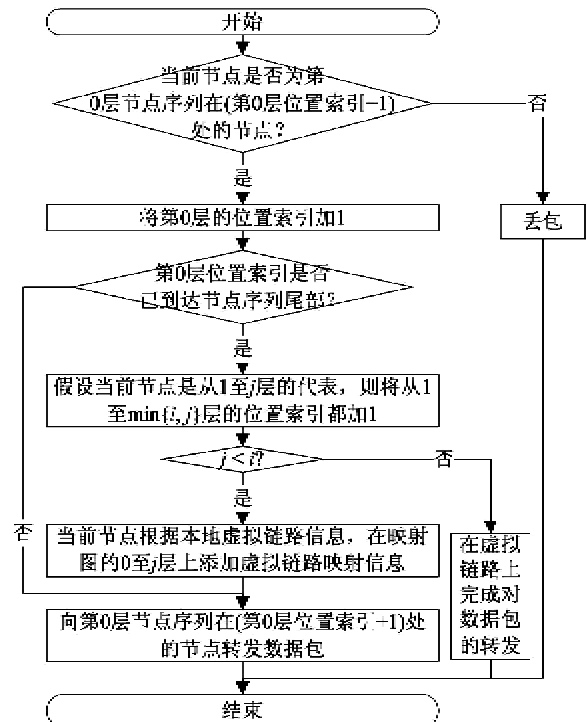


图 2 收到数据包的节点所做的处理流程图

对数据包的格式定义如表 3 所示。

表 3 数据包格式

源节点 逻辑地址	源节点 HID	目的节点 逻辑地址	目的节点 HID	边界层	虚拟链路 映射信息包	真实 数据包
-------------	------------	--------------	-------------	-----	---------------	-----------

在 MCLHS 上,将数据包从源节点 S 转发到目的节点 D 的操作步骤如下:

(1) S 查找 S 与 D 的边界层 L , 在 S 记录的底层群代表信息、各层群代表记录的高层群内中心群信息和虚拟链路信息的辅助下,数据包从 S 依次到达 S 层次路径上从 1 至 L 层的各层群代表;

(2) S 所在的 L 层群 C_A 的代表将数据包转发到 C_A 所在的第 $L+1$ 层群的中心群 C_C 的代表;

(3) C_C 的群代表查找 D 在 L 层上所在的群 C_B , 将数据包发送到 C_B 的群代表;

(4) 数据包从 C_B 的群代表依次到达 D 层次路径上从 $L-1$ 到 1 层的各层群代表,最终到达 D 。

1.3 RHRP 的描述

在下文中,分别描述 RHRP 中一些重要信息的维护过程和路由过程。

1.3.1 一些重要信息的维护过程

下面,分别描述虚拟链路状态和物理层次拓扑等重要信息的维护过程。

• 各层虚拟链路状态信息的维护过程

在底层群内部,每个节点监视与邻节点之间物理链路状态,并在群内广播,底层群代表收集归纳群内节点的物理链路状态信息,并把它和所代表的群通过网关节点传递给邻群代表。这样,每个底层群代表都可以了解所代表的群与邻群的虚拟连接情况,这种连接关系构成了高一层次的分群。在高层群内部,每个群成员代表监视所代表的群与邻群的虚拟链路状态,并在群内广播,高层群代表收集归纳群内成员代表发来的虚拟链路状态信息,并把它和所代表的高层群通过网关群代表传递给邻群代表。这样,每个高层群代表都可以了解所代表的高层群与邻群的虚拟连接情况,这种连接关系构成了更高层次的分群,如此反复,各层群代表动态相互协调来维护各层虚拟链路状态信息。

• 物理层次拓扑的维护过程

在群成员信息和虚拟链路信息的辅助下,高层群代表向高层群成员的代表广播高层群,各群成员代表向低一层群成员代表广播这个高层群,如此反复,直至底层群代表向群内节点广播这个高层群,这样在高层群内的所有节点都能获知在某个层次所处的高层群信息。所有群代表都执行上述操作,最终使得每个底层群中的节点都存储一个层次的拓扑信息。

1.3.2 路由过程

RHRP 与 HSR 的路由过程大体相同,不同的是:RHRP 在路由时采用的是 1.2.2 节描述的“在 MCLHS 上数据包的转发技术”。

2 协议可靠性的理论比较分析

路由可靠度是路由有效的分布函数,路由可靠度越高,协议可靠性越高,反之,路由可靠度越低,协议可靠性越低。本文通过对 HSR 和 RHRP 路由可靠度的比较分析来论证两种协议可靠性的关系。

首先分析虚拟链路可靠度与低一层链路可靠度的关系,其分析过程分为三个步骤,具体描述如下。

第一步:分析“在第 $i+1$ 层虚拟链路 l_{i+1} 的元素都能确定的前提下, l_{i+1} 可靠度与低一层链路 $l_{i,j}$ 可靠度的关系^[8]”。第 $i+1$ 层虚拟链路 l_{i+1} 由两条第 i 层链路构成,设第 i 层链路 $l_{i,j}$ ($i=0,1,\dots,H-1, j=1,2$) 的生命期 $T_{l_{i,j}}$ 为相互独立的均值为 θ_i 的指数分布随机变量,则第 $i+1$ 层虚拟链路 l_{i+1} 的生命期 $T_{l_{i+1}} = \min\{T_{l_{i,1}}, T_{l_{i,2}}\}$ 。显然, $T_{l_{i+1}}$ 为服从指数

分布的随机变量,均值为 $\theta_i/2$ 。

设第 i 层所有链路的有效时间为 t_i , 则在 $T_{l_{i,j}} > t_i$ 时链路 $l_{i,j}$ 有效,则在 $T_{l_{i+1}} > t_i$ 时 l_{i+1} 有效。 $R_{l_{i,j}}(t_i)$ 表示 $l_{i,j}$ 的可靠度,它表示链路 $l_{i,j}$ 有效分布函数, $R_{l_{i+1}}(t_i)$ 表示 l_{i+1} 的可靠度,它表示 l_{i+1} 有效分布函数。 $R_{l_{i,j}}(t_i)$ 和 $R_{l_{i+1}}(t_i)$ 的表达式分别为

$$R_{l_{i,j}}(t_i) = P(T_{l_{i,j}} > t_i) = e^{-\lambda_i t_i} (0 \leq t_i < \infty, \lambda_i = 1/\theta_i) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R_{l_{i+1}}(t_i) &= P(T_{l_{i+1}} > t_i) \\ &= P(\min\{T_{l_{i,1}}, T_{l_{i,2}}\} > t_i) \\ &= P((T_{l_{i,1}} > t_i) \cap (T_{l_{i,2}} > t_i)) \\ &= R_{l_{i,1}}(t_i) \times R_{l_{i,2}}(t_i) \end{aligned} \quad (2)$$

由式(1)可知,第 i 层所有链路的可靠度都相同,所以设第 i 层所有链路的可靠度为 $R_i(t_i)$, 则式(1)和(2)又可以分别表示为

$$R_i(t_i) = e^{-\lambda_i t_i} (0 \leq t_i < \infty, \lambda_i = 1/\theta_i) \quad (3)$$

$$R_{l_{i+1}}(t_i) = R_i^2(t_i) \quad (4)$$

第二步:分析“在第 $i+1$ 层虚拟链路 l_{i+1} 的最后一个元素可变,其它两个元素都固定的前提下, l_{i+1} 可靠度与低一层链路 $l_{i,j}$ 可靠度的关系”。设以 l_{i+1} 的第一个元素为源,最后一个元素为目标,从源路由到目标的过程中,目标不变更概率为 γ_{i+1} , 再设此时 l_{i+1} 的可靠度为 $R'_{l_{i+1}}(t_i)$, 则结合式(4)可得 $R'_{l_{i+1}}(t_i)$ 与 $R_i(t_i)$ 关系为

$$R'_{l_{i+1}}(t_i) = R_{l_{i+1}}(t_i) \times \gamma_{i+1} = R_i^2(t_i) \times \gamma_{i+1} \quad (5)$$

第三步:分析“在第 $i+1$ 层虚拟链路 l_{i+1} 的第一个元素不变,其它两个元素都可变的前提下, l_{i+1} 可靠度与低一层链路 $l_{i,j}$ 可靠度的关系”。因为 l_{i+1} 的第二个元素可变表明在第一个元素到最后一个元素之间存在多种路由方案,设在 l_{i+1} 的第一个元素和最后一个元素之间平均存在 m_{i+1} 种路由方案,再设此时 l_{i+1} 的可靠度为 $R''_{l_{i+1}}(t_i)$, 结合式(5)可得 $R''_{l_{i+1}}(t_i)$ 与 $R_i(t_i)$ 关系为

$$\begin{aligned} R''_{l_{i+1}}(t_i) &= R'_{l_{i+1}}(t_i) \times m_{i+1} \\ &= R_i^2(t_i) \times \gamma_{i+1} \times m_{i+1} \end{aligned} \quad (6)$$

下面,将 HSR 和 RHRP 置于同一场景中,对 HSR 和 RHRP 的路由可靠度进行比较分析。此时, MCHS 与 MCLHS 也处于同一场景中。

• HSR 路由可靠度分析

第一步:分析第 i 层虚拟链路的可靠度。

在第 i 层上,以虚拟链路的第一个元素为源,最后一个元素为目标。设从源群首到目标群首的路由过程中目标群首不变更的平均概率是 α_i , 源和目标之间平均存在 m_i 种路由方案,则由式(6)可得出第 i 层和第 $i-1$ 层虚拟链路可靠度 $R_{l_i}(t_{i-1})$ 和 $R_{l_{i-1}}(t_{i-1})$ 的关系为 $R_{l_i}(t_{i-1}) = R_{l_{i-1}}^2(t_{i-1}) \times \alpha_i \times m_i$ 。经递归分析可知,上述关系中的 $R_{l_i}(t_{i-1})$ 和 $R_{l_{i-1}}(t_{i-1})$ 可以都表示为 t_0 的函数,即 $R_{l_i}(t_0) = R_{l_{i-1}}^2(t_0) \times \alpha_i \times m_i$, 经分析可知, $R_{l_i}(t_0)$ 可进一步用 $R_{l_0}(t_0)$ 表示为

$$R_{l_i}(t_0) = R_{l_0}^2(t_0) \times \prod_{j=1}^i (\alpha_j^{2^{i-j}} \times m_j^{2^{i-j}}) \quad (7)$$

第二步:分析 HSR 路由的可靠度。

在 HSR 中,当源节点 S 已知目的节点 D 的 HID 时,则从 S 直接路由到 D 。设 S 与 D 的边界层为 L , S 和 D 层次路径上第 L 层节点分别为 A 和 B , 则 S 到 D 的路由分为 4 部分:从 S 到 A , 从 A 到第 $L+1$ 层的群首 C , 从 C 到 B , 从 B 到 D 。

设网络中节点 HID 变更的平均频率和平均时间间隔分别为 $\tilde{f}$ 和 $1/\tilde{f}$ 。设从 S 到达 S 层次路径上从 0 至 L 层各节点的时间分别为 $T_{s,0}, T_{s,1}, \dots, T_{s,L}$, 则到达第 i 层节点时,节点 HID 不变更概率为 $P(T_{s,i} < 1/\tilde{f})$ 。设从 S 到达 C 的时间为 T_{L+1} , 则到达 C 时,节点 HID 不变更概率为 $P(T_{L+1} < 1/\tilde{f})$ 。设从 S 到达 D 层次路径上各节点的时间分别为 $T_{d,1}, \dots, T_{d,L}$, 则到达第 i 层节点时,节点 HID 不变更概率为 $P(T_{d,i} < 1/\tilde{f})$ 。设从 S 到 A 、从 A 到 C 、从 C 到 B 、从 B 到 D 的局部路由可靠度分别为 $R_{L_{SA}}(t_0)$ 、 $R_{L_{AC}}(t_0)$ 、 $R_{L_{CB}}(t_0)$ 和 $R_{L_{BD}}(t_0)$, 则它们可分别表示为 $\prod_{i=0}^{L-1} [P(T_{s,i} < 1/\tilde{f}) \times R_{l_i}(t_0)]$, $P(T_{s,L} < 1/\tilde{f}) \times R_{l_L}(t_0)$, $P(T_{L+1} < 1/\tilde{f}) \times R_{l_L}(t_0)$, $\prod_{i=1}^L [P(T_{d,i} < 1/\tilde{f}) \times R_{l_{i-1}}(t_0)]$, 故可得出 HSR 路由的可靠度为

$$R_{HSR}(t_0) = R_{L_{SA}}(t_0) \times R_{L_{AC}}(t_0) \times R_{L_{CB}}(t_0) \times R_{L_{BD}}(t_0) \quad (8)$$

• RHRP 路由可靠度分析

第一步:分析第 i 层虚拟链路的可靠度。

在第 i 层上,以虚拟链路的第一个元素为源,最

后一个元素为目标。设从源中心群代表到目标中心群代表的路由过程中,目标中心群不变更的平均概率是 β_i , 源和目标之间平均存在 n_i 种路由方案, RHRP 与 HSR 的第 i 层虚拟链路可靠度的计算方法类似,它的第 i 层虚拟链路 $R_{l_i}'(t_0)$ 可以用 $R_{l_0}(t_0)$ 表示为

$$R_{l_i}'(t_0) = R_{l_0}^2(t_0) \times \prod_{j=1}^i (\beta_j^{2^{i-j}} \times n_j^{2^{i-j}}) \quad (9)$$

第二步:分析 RHRP 路由的可靠度。

在 RHRP 中,当源节点 S 已知目的节点 D 的 HID 时,则从 S 直接路由到 D 。设 S 与 D 的边界层为 L , S 和 D 层次路径上第 L 层所在群分别为 C_A 和 C_B , 则 S 到 D 的路由分为 4 部分:从 S 到 C_A 群代表,从 C_A 群代表到第 $L+1$ 层中心群 C_C 的代表,从 C_C 群代表到 C_B 群代表,从 C_B 群代表到 D 。

设网络中节点 HID 变更的平均频率和平均时间间隔分别为 f' 和 $1/f'$ 。设 S 到达自身的时间为 $T'_{s,0}$, 则到达 S 时,节点 HID 不变更概率为 $P(T'_{s,0} < 1/f')$; 设 S 到达 S 层次路径 $path_1$ 上从 1 至 L 层各群代表的时间分别为 $T'_{s,1}, \dots, T'_{s,L}$, 则到达第 i 层群代表时,节点 HID 不变更概率为 $P(T'_{s,i} < 1/f')$ 。设从 S 到达 C_C 群代表的时间为 T'_{L+1} , 则到达 C_C 群代表时,节点 HID 不变更概率为 $P(T'_{L+1} < 1/f')$ 。设 S 到达 D 层次路径 $path_2$ 上各群代表的时间分别为 $T'_{d,1}, \dots, T'_{d,L}$, 则到达第 i 层群代表时,节点 HID 不变更概率为 $P(T'_{d,i} < 1/f')$ 。设从 S 到 D 4 段局部路由可靠度分别为 $R_{L_{SA}}(t_0)$ 、 $R_{L_{C_A C_C}}(t_0)$ 、 $R_{L_{C_C C_B}}(t_0)$ 和 $R_{L_{C_B D}}(t_0)$, 它们可分别表示为: $\prod_{i=0}^{L-1} [P(T'_{s,i} < 1/f') \times R_{l_i}'(t_0)]$, $P(T'_{s,L} < 1/f') \times R_{l_L}'(t_0)$, $P(T'_{L+1} < 1/f') \times R_{l_L}'(t_0)$, $\prod_{i=1}^L [P(T'_{d,i} < 1/f') \times R_{l_{i-1}}'(t_0)]$, 故可得 RHRP 路由的可靠度为

$$R_{RHRP}(t_0) = R_{L_{SA}}(t_0) \times R_{L_{C_A C_C}}(t_0) \times R_{L_{C_C C_B}}(t_0) \times R_{L_{C_B D}}(t_0) \quad (10)$$

• HSR 与 RHRP 路由可靠度的比较

首先,对第 i 层虚拟链路可靠度进行比较。设 $\beta_j/\alpha_j = k_j$, 则可知 $k_j \geq 1$, 又因为 $m_j = n_j$, 故结合式(7)和(9)可得

$$R_{l_i}'(t_0)/R_{l_i}(t_0) = \prod_{j=1}^i k_j^{2^{i-j}} \geq 1 \quad (11)$$

然后,对路由可靠度进行比较。因为 $T_{s,i} =$

$T'_{s,i}, T_{d,i} = T'_{d,i}, T_{L+1} = T'_{L+1}, \tilde{f}_{j+1} > \tilde{f}_j > f'_j$, 再结合式(8)、(10)、(11), 可得 $R_{RHRP}(t_0)/R_{HSR}(t_0) > 1$, 即 $R_{RHRP}(t_0) > R_{HSR}(t_0)$ 。

至此, 对 HSR 和 RHRP 协议的可靠性分析比较完毕。结果表明, RHRP 比 HSR 具有较好的可靠性。

3 协议性能的仿真比较分析

本文在 OPNET 平台对 HSR 和 RHRP 的性能进行分析。投递率是目的节点接收包的总数和源节点发送包总数的比率, 本文用投递率来评测协议的可靠性, 仿真所用参数如下: 物理区域为 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$; 传输范围为 150m , 仿真时间为 600s , 移动模型为随机指路模型; 暂停时间为 5s ; 最小速度为 0 ; 最大速度为 $1, 5, 10, 15, 20, 25 \text{ m/s}$; 网络节点数目为 100 ; 数据源为 10 CBR 。包发送速率为 2 包/秒 ; 包大小为 512 bytes , MAC 协议为 IEEE 802.11。通过改变节点最大速度, 来评估 HSR 和 RHRP 的投递率、平均端到端时延和路由开销等性能指标, 其仿真结果如图 3、图 4 和图 5 所示。

从图 3、图 4 和图 5 可以看出, RHRP 比 HSR 表现出较高的投递率、较低的平均端到端时延和较低的路由开销。其主要原因是: 随着节点最大速度的增加, 结构和虚拟链路变得越来越不稳定; 由于 HSR 在结构和虚拟链路上都依赖于节点, 而 RHRP 在结构和虚拟链路上都依赖于群, 故 RHRP 的结构和虚

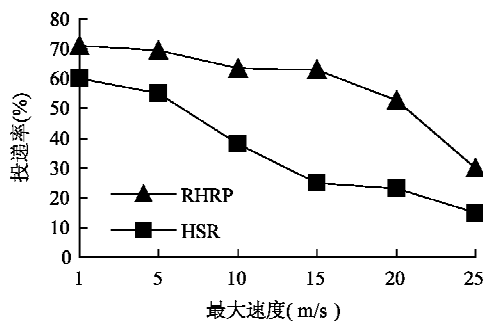


图 3 最大速度对投递率的影响

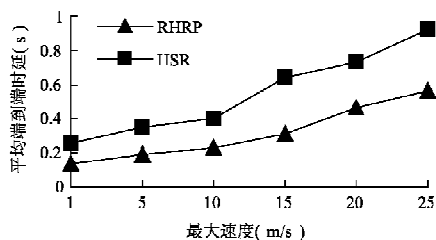


图 4 最大速度对平均端到端时延的影响

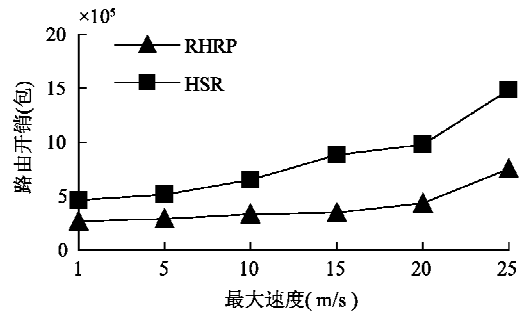


图 5 最大速度对路由开销的影响

拟链路的稳定性受速度的影响较小, 致使丢包概率较低, 重路由次数较少, 使 RHRP 具有较高的投递率、较低的平均端到端时延和较低的路由开销。较高的投递率评测出 RHRP 具有较高的可靠性, 这与理论分析的结论是一致的。仿真结果表明, RHRP 的协议性能要优于 HSR。

4 结 论

本文针对 HSR 中存在的结构稳定性差、结构维护开销大、协议可靠性不高和丢包问题严重等问题, 提出一种可靠的层次路由协议 RHRP。RHRP 基于一种新型的多层无中心分级结构 (MCLHS), MCLHS 采用无中心策略, 提高了结构稳定性, 降低了结构维护开销, 并进一步提高了协议可靠性和降低了路由开销。RHRP 采用“高层虚拟链路以群为构成元素”的策略, 提高了高层虚拟链路的稳定性, 这有利于提高协议可靠性。更稳定的结构和高层虚拟链路可以使丢包数目和重路由次数减少, 从而减少传输时延和路由开销。本文对 RHRP 和 HSR 的路由可靠度进行了分析, 从理论上证明了 RHRP 比 HSR 具有较高的可靠性。最后, 本文在 OPNET 平台上对 RHRP 和 HSR 的性能进行了比较分析, 用投递率来评测协议可靠性。仿真结果表明, RHRP 在投递率、平均端到端时延和路由开销等性能指标上都优于 HSR。

参考文献

- [1] Pei G Y, Gerla M, Hong X Y, et al. A wireless hierarchical routing protocol with group mobility. In: Proceedings of the IEEE Wireless Communication and Networking Conference, New Orleans, LA, USA, 1999. 1538-1542
- [2] Pang K L, Qin Y. The comparison study of flat routing and hierarchical routing in ad hoc wireless networks. In: Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Networks, Singapore, 2006. 1-6

- [3] 于宏毅等. 无线移动自组织网. 北京:人民邮电出版社, 2005. 216-220
- [4] Iwata A, Chiang C C, Pei G Y, et al. Scalable routing strategies for ad hoc wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(8): 1369-1379
- [5] Yu J Y, Chong P H J. A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2005, 7(1): 32-48
- [6] Basu P, Khan N, Little T D C. A mobility based metric for clustering in mobile ad hoc networks. In: *Proceedings of 2001 International Conference on Distributed Computing Systems Workshop*, Washington DC, USA, 2001. 413-418
- [7] 黄卫红, 李仁发, 彭献武. 基于移动保持时间的无线自组网分簇算法. *网络与通信*, 2007, 23(3): 95-96, 119
- [8] 戴树森, 费鹤良等. 可靠性试验及其统计分析. 北京: 国防工业出版社, 1983. 168-170

A reliable hierarchical routing protocol in ad hoc networks

Wu Jing^{*}, Gu Guochang^{*}, Ji Zhenzhou^{**}, Hou Guozhao^{***}

(^{*} College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(^{**} College of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(^{***} Army Aviation Institution of PLA, Beijing 101123)

Abstract

Aiming at the problems of the hierarchical state routing (HSR) protocol based on the multi-layer centered hierarchical structure (MCHS) in ad hoc networks, such as the structure's poor stability, large maintenance overheads, poor reliability and large lost packets, the paper proposes a reliable hierarchical routing protocol (RHRP) based on a new multi-layer centerless hierarchical structure (MCLHS). The MCLHS adopts a centerless scheme that favors the improvement of the structure's stability and the reduction of the structure's maintenance overheads, so the reliability can be well improved and the routing overheads can be well reduced. The RHRP adopts the scheme of "a high-layer virtual link is composed of clusters", which makes a high-layer virtual link more stable and favors improving the reliability. The more stable structure and the high-layer virtual link can reduce the lost packets and the number of rerouting times, and then can reduce the transmission delay and the routing overheads. The analysis of route reliability theoretically proves that the RHRP's reliability is higher. The performance evaluation by a simulation shows that the RHRP outperforms the HSR protocol in delivery ratio, average end-to-end delay and routing overheads.

Key words: ad hoc networks, hierarchical routing protocol, hierarchical structure, reliability, stability