

车载时延容忍网络路由协议研究

姜海涛, 张宏, 李千目

(南京理工大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于移动模型相似度评价机制 (MMSE, movement model similarity evaluation scheme), 提出一种面向移动范围转发动态多副本车载时延容忍网络路由协议 (MROFDM, movement range oriented forwarding and dynamic multi-copies routing protocol)。该协议利用移动模型间的相似度和车辆的本地实时信息, 将数据向目的节点的移动范围转发, 同时采用副本均衡策略, 动态调整不同类型数据分组的副本数目。通过仿真实验对比现有多副本协议, 验证了 MROFDM 在性能上的优越性以及在不同比例移动模型下的适应性。

关键词: 时延容忍网络; 车载网络; 移动模型; 多副本路由

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)03-0076-09

Research on routing protocol of vehicular delay-tolerant networks

JIANG Hai-tao, ZHANG Hong, LI Qian-mu

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

Abstract: Based on the movement model similarity evaluation scheme (MMSE), a movement range oriented forwarding and dynamic multi-copies routing protocol (MROFDM) was proposed in vehicular delay-tolerant networks. With the similarity among the movement models and the local real-time information of vehicles, this protocol sent packets to the movement scope of destination node. At the same time, the copy equilibrium strategy was used to dynamically adjust copy number of different types of packets. MROFDM with some existing multi-copies routing protocols were compare in simulation. The simulation results verify the performance advantage of MROFDM, and show the adaptability of MROFDM with different proportions of movement models.

Key words: delay-tolerant networks; vehicular networks; movement model; multi-copies routing

1 引言

车载网络是一种依靠安装有无线通信设备的车辆实现数据传输的无线自组织网络^[1]。近年来, 随着无线通信技术以及车辆 GPS 系统的发展, 车载网络得到了广泛的应用。例如将车流量信息通过车载网络广播给公路上的车辆, 司机可以提前更改行车路线, 避开拥塞路段; 将交通事故信息传递给最

近的警察局和急救中心, 事故可以得到及时的处理; 司机通过车载网络查询附近的加油站、餐馆等信息, 方便出行。

将传统的 MANET (mobile ad hoc network) 路由协议直接应用于车载网络, 并不能取得令人满意的性能^[2]。其主要原因有以下 2 点: 1) MANET 中总是在源和目的间寻求一条代价最低的链路传输数据, 将链路的中断视为短暂的异常情况。但是在

收稿日期: 2011-09-15; 修回日期: 2013-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60903027, 61272419); 江苏省基础研究计划基金资助项目(BK2011023); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011370); 中国博士后基金资助项目(2012M521089); 江苏省博士后科研资助计划基金资助项目(1201044C); 连云港科技基金资助项目(CG1124)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60903027, 61272419); The Basic Research Program of Jiangsu Province (BK2011023); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2011370); China Postdoctoral Science Foundation (2012M521089); Postdoctoral Subsidy Scheme of Jiangsu Province (1201044C); Lianyungang Scientific and Technological Project (CG1124)

车载网络中, 车辆的高移动性致使车辆间的连接经常中断, 难以保证持续稳定的连接。2) 在车辆密度较低的情况下, 车辆很可能处于孤立的状态, 不存在可通信的邻居车辆, 导致数据分组的丢弃。车载网络具有间歇连通性和低密度性使其更加符合时延容忍网络^[3](DTN, delay-tolerant networks)的特点。时延容忍网络是一种在源节点和目的节点之间不存在端到端链路的条件下, 依靠存储转发的异步通信方式实现数据交换的无线自组网络。目前已经有相关工作采用时延容忍的思想设计车载路由协议, 并取得了一些研究成果。文献[4]中提出了MDDV协议, 利用车辆携带数据到目标区域, 并将数据分组扩散给区域内的车辆。文献[5]中提出的VADD路由协议, 基于历史交通流量信息, 车辆可以在路口选择一个合适的传递方向, 最终将数据传递到目的地。但是在这2种方法中, 数据的目的地或目的区域都是固定的, 无法适用于移动节点的情况。文献[6]中基于对中国上海市区出租车移动路线的研究, 引入车载网络(SUVnet)的概念, 并对传染路由进行了改进, 提出DAER路由协议。但是文章假设节点知道目的节点的当前位置, 这种假设在一定条件下是无法满足的。文献[7]引入固定基础设施辅助数据的传输, 当车辆发现自己的移动方向背离数据分组的目的地时, 则将数据分组转发给固定设施, 由后继的车辆从固定设施获取数据分组继续传递过程。这种方法可以保证数据传递的准确性, 但需要额外增加一些基础设施。

针对车载时延容忍网络中数据传递的问题, 本文首先分析了车辆的移动模型, 定义不同移动模型之间的关系, 并提出一种模型相似度评价机制(MMSE, movement model similarity evaluation scheme); 然后基于MMSE提出了一种面向移动范围转发动态多副本(MROFDM, movement range oriented forwarding and dynamic multi-copyies)路由协议。该协议利用移动模型间的相似度和车辆的本地实时信息, 将数据向目的节点的移动范围内转发, 同时采用副本均衡策略, 动态调整不同类型数据分组的副本数目。实验结果显示, MROFDM协议与传统的多副本路由协议相比, 在车载网络环境下具有很好的可行性和适应性。

2 车载网络模型

假设网络的规模限定在一个范围内, 其中部分

车辆安装有无线通信设备(例如在某个拥有数十万辆汽车的城市中, 只有千余辆汽车安装有无线通信设备), 在这些车辆之间需要实现消息的传递。目前大部分车辆还不具备无线通信能力, 同时所有车辆上安装通信设备, 并不是很现实, 因此本文的这种假设是合理的。本文中的车辆均指安装无线通信设备的车辆。

车载网络中存在3种重要的实体: 车辆、路口和路段, 其中前者处于运动当中, 而后两者相对固定。那么路口和路段构成了网络的静态结构, 可以用平面图 $G = \{V, E\}$ 表示, 每个的路口为一个顶点, 即 V 中一个元素, 如果路段连接2个路口, 那么 E 中增加一条边。目前很多大城市路网逐步发展成由隧道、立交桥构成的立体图。本文从平面路网的情况入手, 研究基础的车载时延容忍网络路由协议^[5,7,8], 在以后的工作中会考虑立体城市路网的情况。

如果消息的目的地是固定的, 那么可以计算出从源节点到目的固定传输路线, 消息经过若干路段和路口之后, 到达目的节点^[5]。在本文中, 源和目的车辆都处于运动之中, 使得路由过程不可预先确定, 而是中继车辆逐跳决定消息的传输, 不过这正迎合了时延容忍网络异步通信的特点。车辆在行驶的过程中, 大部分时间内不存在邻居车辆, 只有当2个车辆相遇时, 消息交换才可能发生, 这满足时延容忍网络间歇性连接的特点。车辆会携带消息移动, 增加了消息传递的时延, 这更体现出时延容忍网络的本质特点。但是车辆作为网络中的节点, 被限定在图 G 上运动, 这是普通时延容忍网络所不具有的, 因此可以将车载网络视为时延网络的一个特定实例。下一节会结合节点的移动模型和车载网络的特点, 给出MMSE。

3 车辆移动模型相似度评价机制

时延容忍网络相比较于传统的MANET网络的显著特点, 很大程度上是由于节点的频繁运动造成的。在以往的研究中, 提出并使用了多种移动模型, 例如: 随机移动模型中节点之间的相遇概率符合指数分布^[9]; 摆渡路由中信使具有固定运行轨迹^[10]; 基于区域的移动模型中, 节点的移动倾向于回到自己的区域^[11]。本文认为单纯的使用一种模型很难描述出所有车辆的移动特点, 因此定义3类模型描述不同车辆的移动。

定义1 固定模型(FM, fixed model), 车辆

按照固定的路线移动。例如公交、企业的班车等停靠固定的站点，符合 FM 移动模型。使用移动路线中经过的路口描述该移动模型。

定义 2 规律模型 (RM, regular model)，车辆的移动遵循一定的统计规律，例如人们开车往返于家庭和单位之间。通过 2 个参数描述此类的移动模型：车辆经常出没的地点和随机移动的概率。前者使用车辆经常出没的路口（称为固定路口）表示，而后者反应了车辆不在固定路口或者不向固定路口移动的概率。

定义 3 不确定模型 (UM, uncertainty model)，车辆随机移动，不具备稳定性因素。例如出租车根据乘客的需求决定目的地，而每个乘客的需求通常是无关的。

车载网络中主要融合了上述 3 种不同的移动模型，但实际应用中车辆的移动方式肯定更为复杂，车辆的移动模型也值得在以后的工作中进一步的研究。本文统一使用如下的结构描述节点的移动模型：

$$M = \{vehicleid, rnd, vertexs[]\}$$

其中，vehicleid 表示标识了的车辆。rnd 表示车辆随机移动的概率，FM 模型固定为 0，UM 模型固定为 1，而 RM 模型为实际的随机概率，介于 0 到 1 之间。vertexs 是一个数组，且 $vertexs[i] \in V$ ，如果是 FM 模型，那么表示车辆移动路线上的路口，如果是 RM 模型，表示车辆的固定路口，如果是 UM 模型，那么为空。通过 rnd 可以计算出移动模型的类型：

$$type(M) = \begin{cases} FM, & rnd = 0 \\ RM, & 0 < rnd < 1 \\ UM, & rnd = 1 \end{cases} \quad (1)$$

假设移动模型 $M_1 = \{vehicleid_1, rnd_1, vertexs_1[]\}$ 和 $M_2 = \{vehicleid_2, rnd_2, vertexs_2[]\}$ ，且 $vehicleid_1 \neq vehicleid_2$ 。为了衡量移动模型之间的相似度，本文定义 M_1 和 M_2 存在以下 5 种关系。

定义 4 等价关系。2 个固定模型，遵循同样的移动线路。例如同一条公交线路上的车辆。

$$\{type(M_1) = type(M_2) = FM, vertexs_1 = vertexs_2\} \quad (2)$$

定义 5 相似关系。2 个规律模型，2 个固定模型，一个固定模型与一个规律模型的固定路口或者移动线存在交集。例如 2 条公交线路具有相同的站点，那么这 2 条线路上的车辆会经过一段重叠的路段。

$$\begin{aligned} &\{type(M_1) = type(M_2) = FM \\ &\text{或 } type(M_1) = type(M_2) = RM \\ &\text{或 } type(M_1) = FM, type(M_2) = RM \\ &\text{或 } type(M_1) = RM, type(M_2) = FM, \\ &vertexs_1 \cap vertexs_2 \neq \varnothing, a = |vertexs_1 \cap vertexs_2| \geq 1\} \end{aligned} \quad (3)$$

定义 6 独立关系。2 个规律模型或者一个规律模型和一个固定模型的固定路口或者移动线路不存在交集。例如两私家车车辆经常出没于不同的地点，它们的运动范围相对独立，故称为独立关系。

$$\begin{aligned} &\{type(M_1) = type(M_2) = RM \\ &\text{或 } type(M_1) = FM, type(M_2) = RM \\ &\text{或 } type(M_1) = RM, type(M_2) = FM, \\ &vertexs_1 \cap vertexs_2 = \varnothing\} \end{aligned} \quad (4)$$

定义 7 平行关系。2 个固定模型的移动线路不存在交集。例如 2 条不存在相同站点的公交线路上的 2 个车辆，它们基本不会相遇，类似于同一平面中永不相交的 2 条平行直线，故称为平行关系。

$$\{type(M_1) = type(M_2) = FM, vertexs_1 \cap vertexs_2 = \varnothing\} \quad (5)$$

定义 8 默认关系。不属于以上 4 种情况，都归为默认关系。这 5 种关系可以反映出 2 个节点移动模型之间的相似度，如图 1 所示。

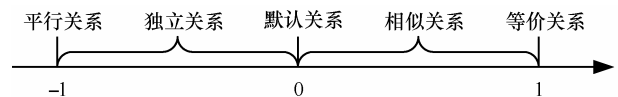


图 1 移动模型之间的相似度

本文将默认关系相似度定义为 0，UM 模型不存在固定的路口或移动线路，因此与其他任何模型之间的相似度都为 0。相似关系中，相似度随着重叠路口数目的增加而增加，极限情况下，2 个模型的移动路线完全一致，就形成了等价关系，相似度定义为 1。独立关系中，相似度随着节点运动随机性的减少而减少，极限情况下，2 个模型的线路都是固定的，就形成了平行关系，相似度定义为 -1。移动模型相似度反应了节点移动范围的重合程度。正的相似度说明节点的移动范围固定且重合，从而增加节点间的相遇概率，因此有助于数据的传输。同理负的相似度会阻碍数据的传输。根据移动模型 M_1 和 M_2 间的不同关系，本文使用式 (6) 计算 M_1 和 M_2 之间的相似度

$$Sim(M_1, M_2) = \begin{cases} 2a/|vertex_{s_1}| + |vertex_{s_2}|, & \text{等价/相似系} \\ 0, & \text{默认关系} \\ -(1-rnd_1) \cdot (1-rnd_2), & \text{独立/平行系} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $|vertex_s|$ 表示数组中元素的个数, a 为 2 个模型的 $vertex_s$ 交集中元素的个数, 值越大说明相似度越高。等价关系中, 路线完全重叠, $|vertex_{s_1}| = |vertex_{s_2}| = a$, 计算结果为 1。默认关系的相似度为 0。 $(1-rnd_1) \cdot (1-rnd_2)$ 表示 2 个节点都不随机移动的概率, 这个值越大, 取反后越接近 -1, 相似度越低, 平行关系的计算结果为 -1。

4 MROFDM 路由协议

时延容忍网络中, 通常采用基于受限副本数的路由协议, 这是一种性能与能耗之间的折中方案, 目前已经得到了广泛的认可^[9,12]。基于 MMSE 本文提出 MROFDM 路由协议, 其基本过程是: 源节点产生数据分组后通过副本均衡策略产生 L 个副本并进行可缩减的分发, 之后每个副本独立地执行转发过程, 直到其中一个副本到达目的节点。

假设路段和路口是固定不变的, 并且每个车辆具有所有路段和路口的信息。车辆的移动模型是确定的信息, 对移动模型信息执行一次全局的洪泛过程, 不会占用过多的网络资源, 就可以让每个车辆保存所有车辆的移动模型。此外每个车辆知道自己的当前目的地。下面从数据转发和副本分发与均衡 2 个方面详细介绍路由协议的实现过程。

4.1 面向移动范围转发策略

在介绍转发策略之前, 先定义某个顶点 $v_d \in V$ 与移动模型 M 之间的距离 MD :

$$MD = \begin{cases} \min\{\text{dis}(v_d, v_i^m)\}, & v_i^m \in M.\text{vertex}_s, \text{type}(M) \neq \text{UM} \\ \text{undefined}, & \text{type}(M) = \text{UM} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\text{dis}(v_1, v_2)$ 函数用于计算顶点 v_1 和 v_2 之间的距离, MD 表示 v_d 与 $vertex_{s_m}$ 顶点中最近顶点的距离。

时延容忍网络路由协议的转发过程可以描述为: 当 2 个节点 n_1 和 n_2 相遇后, 对于 n_1 缓冲区内的数据分组 p_i , 其目的节点为 n_d , 副本数目为 1 (副本数目大于 1 的情况将在 4.2 节中介绍), 若 n_2 更适合做 p_i 中继节点, 则 n_1 将数据分组转发给 n_2 , n_2 缓冲区内的数据分组亦然。因此转发的过程实为寻找

合适中继节点的过程。

本文使用 MMSE 分别评价 n_d 与 n_1 移动模型以及 n_d 与 n_2 移动模型的相似度, 由相似度高的节点持有 p_i , 如果相似度相同, 则根据节点的实时信息, 分别计算 n_1 和 n_2 的当前目的地与 n_d 的移动模型之间的距离, 由距离短的节点持有 p_i 。如果距离为 undefined , 由原来的节点继续持有 p_i 。

数据分组转发过程中分别利用了模型相似度和实时目的地转发策略, 其目的就在于让数据分组向着目的节点的移动范围发送, 故称之为面向移动范围的转发策略。

4.2 副本均衡策略

根据数据分组目的节点的移动模型, 可以将数据分组分为 3 类: FM 数据分组、RM 数据分组和 UM 数据分组。4.1 节中的转发策略存在一个盲区, 对于 UM 数据分组, 其目的节点与其余节点移动模型的相似度均为 0, 同时与所有顶点的距离均为 undefined 。这是由于很难挖掘 UM 模型规律所造成的。

现有研究已证明增加副本数目可以提高路由的性能, 并且给出了副本数的计算方式^[12], 因此对于 UM 数据分组, 可以通过适当增加副本数目的策略提高路由性能。然而凭空增加副本数目会带来加剧网络负载, 所以本文使用副本均衡的策略, 在副本的分发阶段, 保证传输成功率的前提下, 动态地缩减 FM 和 RM 数据分组的副本数, 并将缩减的副本数补充给 UM 数据分组。

分发是指源节点将数据分组的 L 个副本传递给 $L-1$ 个不同的节点, 自己保留一个副本, 每个节点拒绝多次接收同一个数据分组的副本。当 2 个节点 n_1 和 n_2 相遇后, 传统的副本分发执行过程为: 对于节点 n_1 缓冲区内的数据分组 p_i , 其目的节点为 n_d , 副本数目为 $l > 1$, 且 n_2 缓冲区内没有 p_i 的副本, 那么 n_1 将 l_2 个副本发送给 n_2 , 自己保留 l_1 个, 需要确定 l_1 与 l_2 的值, 使得 $l_1 + l_2 = l$, n_2 缓冲区内的数据分组亦然。

基于 MMSE 可以得到, 如果 n_2 与 n_d 移动模型的相似度大于 0, 那么它们具有较高的相遇概况, 可以将 n_2 视为 p_i 的合适中继节点。在确定 l_1 与 l_2 值时, 让 $l_1 + l_2 \leq l$, 达到动态缩减副本并且保证传输成功率的目的。本文使用式 (8) 计算 l_1 与 l_2 值

$$\begin{cases} l_1 = [(l-1) \cdot (1 - Sim(Mn_2, Mn_d))], l_2 = 1 \\ Sim(Mn_2, Mn_d) > 0 \\ l_1 = \lceil l/2 \rceil, l_2 = \lfloor l/2 \rfloor \\ Sim(Mn_2, Mn_d) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

这种动态缩减分发策略，在发现合适中继节点时，根据中继节点和目的节点移动模型之间的相似度，动态缩减副本的数目，同时未遇到合适中继节点时，使用二元分发策略^[12]快速分发副本。每个节点使用变量 *bal* 累计缩减的副本数

$$bal = bal + (l - l_1 - l_2) \quad (9)$$

当节点创建新的 UM 数据分组的时候，如果其 *bal* 的值大于 0，则可以适当为其补充 *ex* 个副本，同时相应减少 *bal* 的值。节点数据分组的产生速率为 λ_1 ，其中 UM 数据分组占 γ ，那么 UM 数据分组的产生率为 $\lambda = \lambda_1 \cdot \gamma$ 。假设动态缩减速率为 *redu*，为了保持副本的缩减速率与补充速率之间的平衡，*ex* 需要满足

$$\begin{cases} \lambda \cdot ex = redu \\ bal = bal - ex \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

节点使用递推的方式计算 *redu*

$$\begin{cases} redu_1 = \frac{\Delta l_1}{t_1} \\ redu_n = redu_{n-1} \cdot \frac{t_{n-1}}{t_{n-1} + t_n} + \frac{\Delta l_n}{\Delta t_n} \cdot \frac{t_n}{t_{n-1} + t_n} \end{cases} \quad (11)$$

其中， Δl_i 表示第 *i* 次缩减的副本数目， Δt_i 表示第 *i*-1 次缩减和第 *i* 次缩减之间经历的时间， t_i 表示第 *i* 次缩减的时间戳。在计算缩减速率时使用时间戳作为权重，可以保证估计的实时性，同时兼顾历史数据。节点在每次分发之后更新缩减速率并累计 *bal* 值，在每次产生 UM 数据分组后计算 *ex* 值，确定副本数目并减少 *bal* 值。

4.3 路由协议完整描述

结合 4.1 节与 4.2 节的内容，算法 1 描述了完整的 MROFDM 路由协议。其中，*n.mm* 表示节点 *n* 的移动模型，*n.des* 表示节点 *n* 的当前目的地，*n.bal* 用于累计动态减少的副本数目。*msg* 表示数据分组，*msg.to* 为该数据分组的节点，*msg.copies* 为数据分组的副本数目，*msg.new()* 方法用于判断数据分组是否为新创建的，*msg.clone()* 方法用于复制一个相同的数据分组。*calex()* 函数用于计算动态增加的副本数目，并减少 *n.bal* 的值。*sim()* 函数用于计算 2 个移动模型之间的相似度。*dis()* 函数用于计

算分发的副本数目。*md()* 函数用于计算 *n.des* 与移动模型之间的距离。*udredu()* 函数用于更新缩减速率。算法的第 2)~4)行描述了源节点动态增加副本数目的过程；第 5)~7)行表示如果遇到目的节点，直接完成数据的传递；第 10)~14)行描述了分发过程；第 16)~20)行描述了转发过程。

算法 1 节点 *n1* 和 *n2* 接触后的路由过程

```

1) for(every msg in n1 cache){
2)   if(msg.new() && msg.to.mm == UM){
3)     msg.copies += calex();
//使用式(10)计算 ex 的值，同时更新 bal 的值
4)   }
5)   if(msg.to == n2){
//遇到目的节点完成数据传递
6)     send msg to n2; countinue;
7)   }
8)   s1 = sim(msg.to.mm, n1.mm); s2 = sim
(msg.to.mm, n2.mm)
//使用式(6)计算移动模型之间相似度
9)   if(msg.copies > 1){
10)    msg1 = msg.clone();
11)    dis(l1,l2);
//使用式(8)计算分发副本数
12)    n1.bal += (msg.copies - l1 - l2);
//使用式(9)更新 bal 的值
13)    msg.copies = l1; msg1.copies = l2;
send msg1 to n2;
14)    udredu(n1);
//使用式(11)更新缩减速率
15)   }else{
16)     if(s2 > s1){
17)       send msg to n2;
18)     }else if(to.mm != UM &&
md(n2.des, to.mm) < md(n1.des, to.mm) ){
//使用式(7)计算目的地与移动模型之间的距离
19)       send msg to n2;
20)     }
21)   }
22) }
23) //n2 do the same process as n1

```

5 仿真实验及结果分析

在机会网络的 ONE (opportunistic network en-

vironment) 平台上^[13]编写仿真程序, 实现了 MROFDM 路由协议, 并设计一个场景, 检验协议的性能。该场景中设置 1 104 个路口和 1 200 条路段, 并且设定 3 种移动节点: bus 节点遵从固定的移动模型, 沿着预定的路线往返运动, 设置 5 条由路口连成的固定线路, 平均分配 bus 到这 5 条线路; car 节点遵从规律移动模型, 初始设定 3 个路口作为固定路口, 并且以 20%~30%的概率随机选取任意一个路口作为目的地, 以 70%~80%的概率选择固定路口为目的地; taxi 节点遵从不确定移动模型, 随机选择任意路口作为目的地。默认情况下仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	值
场景大小	40 000m×40 000m
仿真时间	12h
节点数目	90 个
3 种节点(bus:car:taxi)比例	1:1:1
单个节点每小时产生的数据分组数目	3 个
数据分组的副本数目	6 个
数据分组产生时间	0~10h
节点移动速度	5~15m/s
通信半径	100m
car 节点随机移动概率	20%~30%

实验过程中, 平均每个节点大约会产生 30 个数据分组, 数据分组的节点在全局范围内随机选择。在上述环境中, 模拟了本文提出的 MROFDM 协议, 以及只支持转发策略的固定副本 (MROFSM) 路由协议, 同时作为比较, 实现了传统的喷雾等待路由^[12] (SW) 和 PROPHET 路由^[14] (PROP)。

5.1 移动模型的相似度

本文基于车辆移动模型的相似度实现路由策略, 在路由前会首先计算所有节点移动模型之间的相似度。由于遵从随机移动模型的 taxi 节点与其余节点移动模型的相似度均为 0, 因此图 2 只显示出 bus 节点之间、car 节点之间、bus 节点与 car 节点之间的移动模型相似度分布情况。

图 2 中显示, bus 节点之间的移动模型相似度呈现 3 种情况: 同一条公交线路上的 bus 节点之间相似度为 1, 不同公交线路但是存在部分重合站点的 bus 节点之间相似度在 0.25 左右, 不同公交线路且不存在重合站点的 bus 节点之间相似度为-1。car

节点之间的移动模型相似度也呈现 3 种情况: 极少部分固定路口完全相同的 car 节点之间相似度接近 0.5, 少部分存在相同固定路口的 car 节点之间相似度在 0.1 左右, 大部分 car 节点不存在相同的固定路口, 它们之间相似度在-0.45 左右。bus 节点和 car 节点之间的移动模型相似度存在 2 种情况: 一些 car 节点的固定路口与 bus 节点的线路存在交集, 它们之间相似度在 0.05 左右, 否则节点之间相似度大约在-0.75。从整体的相似度分布可以看出, 存在共同路口的移动模型之间, 满足等价或相似关系, 计算得到的相似度值为正数, 否则移动模型之间形成独立或平行关系, 计算得到的相似度值为负数, 这与第 3 节中定义是吻合的。

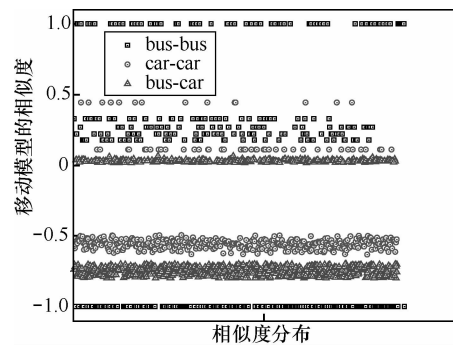


图 2 移动模型相似度分布

5.2 路由协议的性能比较

所有协议的副本数目是相同的, 因此各个协议对节点缓冲区资源的需求也在同一数量级, 本文会在 5.3 节中对此进行比较。本节先从传输成功率和延时 2 个方面对 4 种路由协议的整体性能进行对比和分析。在实验中, 分别改变节点数目以及数据分组的副本数目, 比较不同路由协议的性能。图 3 和图 4 分别显示了节点数目为 45 至 150 时 (每次递增 15 个, 每种节点增加 5 个), 4 种路由协议的成功率和延时。

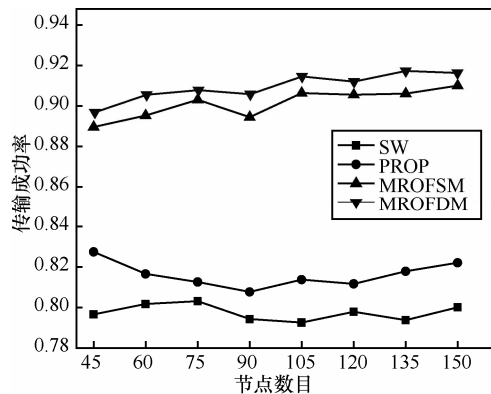


图 3 不同节点数目条件下的传输成功率

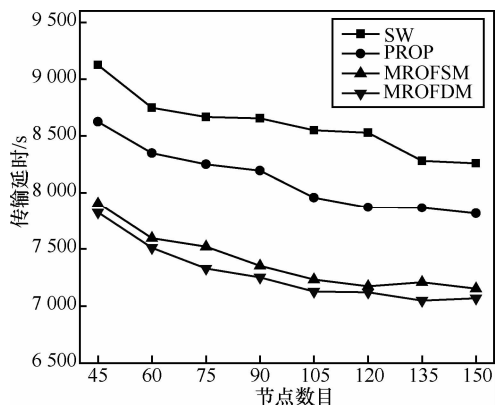


图 4 不同节点数目条件下的传输延时

从图 3 中可以看出，路由协议的性能基本不受节点数目的影响。与喷雾等待路由和 PROPHET 路由相比，本文提出的转发策略可以明显地提高传输成功率，这说明利用移动模型相似度和实时转发策略是有效的。模型相似度高的节点具有较高的相遇概率，而实时策略将数据分组带往目的节点的移动范围，让数据分组在未来有较高的概率遇到目的节点或者合适的中继节点。MROFDM 协议在 MROFSM 的基础上，可以再提升 1%~2% 的传输成功率。这说明副本均衡策略是有效的。PROPHET 路由根据历史信息做出转发决定，为数据传输提供一定的帮助，因此性能略高于喷雾等待路由。从延时的角度分析，也可以得到相同的结论，MROFDM 协议在提高成功率的同时，有效地降低了端到端的延时。随着节点数目的增加，各协议的延时均呈现略微下降趋势，这主要是因为增加节点数目会减少节点的平均相遇间隔，有助于降低传输延时。

图 5 和图 6 分别显示了数据分组的副本为 2~14 个时（每次递增 1 个），4 种路由协议的成功率和延时。总体看来，随着副本数目的增加，各个协议的性能都有所提升，这与经典理论是吻合的^[12]。4 种协议性能之间的相对关系与图 3 和图 4 的结果一致的。此外图中还说明：1) 随着副本数目的增加，各个路由协议之间的性能差距在缩小，这是因为高副本数已经为喷雾等待路由性能带来较为优秀的性能，因此性能的提升空间有限；2) 在副本数目较低的时候，难以从原本就有限的副本数中缩减副本，基本没有执行副本均衡过程，因此 MROFDM 与 MROFSM 的性能是相同；3) 在副本数目较高的时候，增加副本数目对协议性能的提升不再明显，MROFDM 与 MROFSM 的性能趋于一致。

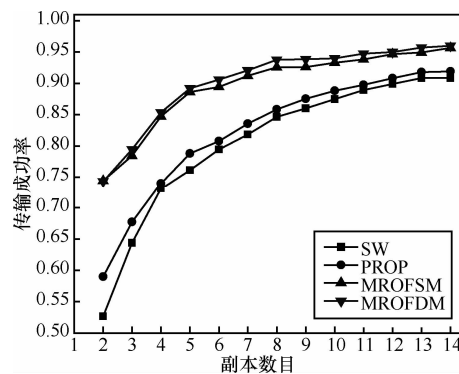


图 5 不同副本数目条件下的传输成功率

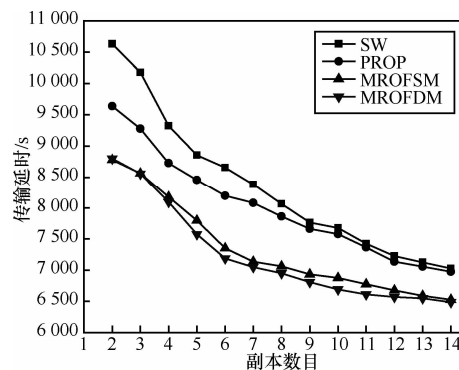


图 6 不同副本数目条件下的传输延时

上面 2 组实验结果已经说明 MROFDM 协议具有比传统路由更加优秀的性能，但是 MROFDM 协议与 MROFSM 协议相比，性能并没有显著提升。在本次的实验中，分别统计目的节点为 bus 节点的数据分组 (bus 数据分组)，目的节点为 car 节点的数据分组 (car 数据分组)，目的节点为 taxi 移动模型的数据分组 (taxi 数据分组)，3 种数据分组的传输成功率和延时，以详细分析面向移动范围转发与副本均衡策略的作用。由于节点数目对协议的性能影响不大，并且成功率的提升与延时的减少是相互印证的，因此下面主要考察不同副本数目条件下，协议的传输成功率。

图 7~图 9 分别显示了 3 种数据分组的传输成功率。图 7 显示与喷雾等待路由相比，本文提出的转发策略可以提升 bus 数据分组的传输成功率，且 MROFDM 协议与 MROFSM 协议 bus 数据分组的传输成功率是一致的，并没有因为动态缩减副本数目而减少。图 8 显示 car 数据分组的传输成功率在本文转发策略的帮助下，也有较为显著的提升。图 9 显示 MROFDM 协议是唯一可以提升 taxi 数据分组传输成功率的协议，尽管效果并不是很明显。实验过程中，每次动态增加的副本数大约为 1~2 个，因此 n 个副本时 MROFDM 协议的 taxi 数据分组传输成

功率与 $n+2$ 个副本时喷雾等待协议的 taxi 数据分组传输成功率基本一致的。比较 3 组实验结果，PROPHET 协议仅能提升 bus 数据分组的成功率，其综合性能略高于喷雾等待路由；MROFSM 可以显著提升 bus 数据分组与 car 数据分组的成功率，因此其性能大幅优于喷雾等待路由；MROFDM 通过副本均衡策略，可以在不降低其他数据分组成功率的前提下，提升 taxi 数据分组的成功率。综合以上分析，不难得出上一节中的结论。

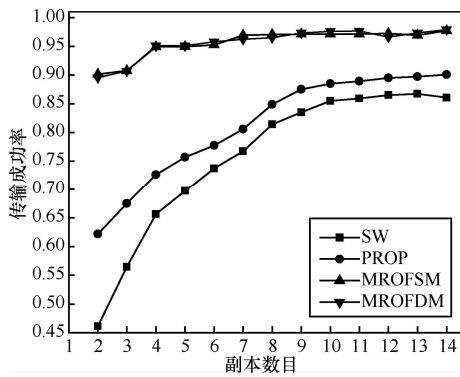


图 7 bus 数据分组的传输成功率

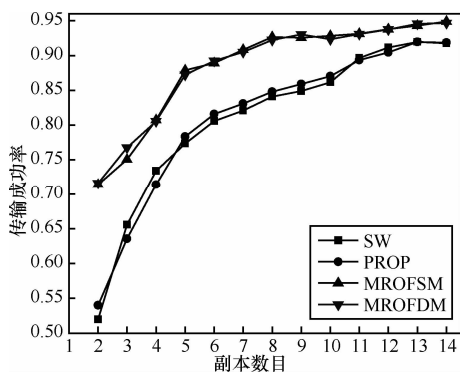


图 8 car 数据分组的传输成功率

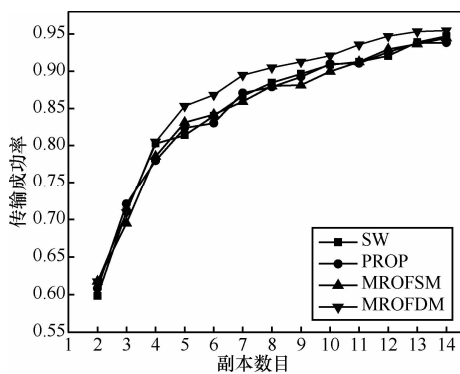


图 9 taxi 数据分组的传输成功率

上述实验都是在 3 种节点数目相等的条件下进行的。在本次实验中，有意增加某种节点的数目并减少另外 2 种节点的数目，检测 MROFDM 协议在

不均衡节点类型环境下的性能。实验中保持节点总数为 90 个，将某种节点的个数设置为 50，其余 2 种设置为 20。图 10 给出实验结果，为了便于比较，在图 10 中加入 3 种节点数目相同时的数据。

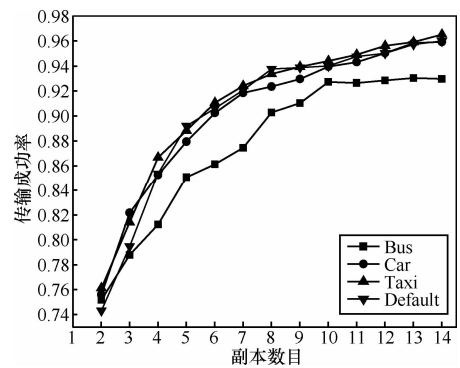


图 10 不同节点比例条件下传输成功率

实验结果显示，在 bus 节点比例较高的情况下，协议的性能有所下降，这主要是由于在源和目的节点的相似度小于 0 时，缺乏随机节点将数据分组带往目的节点的运动区域，导致部分数据分组无法完成传递。其余情况下协议的性能与缺省情况基本一致，这说明本文提出的协议在 3 种移动模型的节点比例不均衡的环境下基本可以正常运行。

5.3 实时性及随机误差分析

上节中的结果均为仿真结束后统计得出，并不能实时反映协议的执行情况。除了延时与成功率，网络负载是一个衡量路由性能的实时指标。每隔 1h 统计所有节点缓冲区内的数据分组总数，作为网络负载。图 11 显示了默认情况下（6 个副本，90 个节点），网络的实时负载信息。

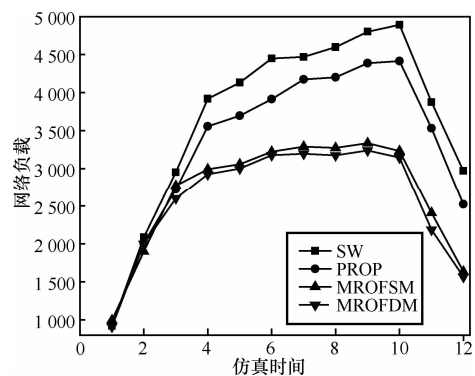


图 11 网络的实时负载

实验开始后，随着数据分组的不断产生，网络负载呈上升趋势。实验运行 4h 后，新数据分组的产生的同时已有数据分组传递完成，网络负载逐渐趋于平稳。在实验的最后 2h 内不再产生新的数据

分组, 网络负载呈下降趋势。MROFDM 协议可以更快地传递缓冲区内的数据分组, 因此具有最小的网络负载。其余情况下的网络负载也呈现相似的趋势, 本文就不再一一表述。

由于实验中的许多元素都是随机产生的, 例如随机为数据分组选择目的节点, taxi 节点随机选择目的地等, 所以随机误差是难以避免的。本节最后通过 90 个节点时, 喷雾等待和 MROFDM 协议的传输成功率, 衡量实验中的随机误差, 图 12 显示了实验的具体结果。随机因素在带来结果波动的同时, 也造成了副本数为 $n + 1$ 时的实验结果不一定优于副本数为 n 时的情况。可见实验中的随机因素确实会导致实验结果中存在随机误差。但是随着副本数目的增加, 统计得到的平均传输成功率还是呈现上升趋势, 这体现了求取多次实验结果的平均值作为仿真结果以消除随机误差的必要性。

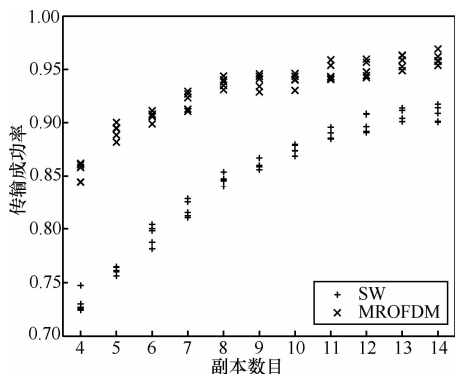


图 12 每次实验的传输成功率

6 结束语

本文通过对车载网络中节点移动模型的分析, 提出 MMSE 评价移动模型相似度。基于节点模型的相似度, 从副本转发与均衡 2 个方面, 设计了 MROFDM 路由协议。实验结果显示, 与传统协议相比, MROFDM 协议可以有效地提升路由性能。同时对实验执行过程中的实时性及随机误差进行了分析。以后的工作中将在以下方面进行进一步研究: 1) 研究针对于固定移动模型的路由方法, 优化固定移动模型节点比例高时协议的性能。2) 考虑立体路网、复杂车辆移动模型、交通信号灯等因素, 使路由过程更符合实际情况。

参考文献:

[1] GERLA M, KLEINROCK L. Vehicular networks and the future of the mobile Internet [J]. Computer Networks, 2011, 55(2):457-469.

[2] CHOFFNES D R, BUSTAMANTE F E. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks[A]. Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks[C]. New York: ACM, 2005.69-78.

[3] 王博, 黄传河, 杨文忠. 时延容忍网络中基于效用转发的自适应机会路由算法[J]. 通信学报, 2010, 31(10): 36-47.

WANG B, HUANG C H, YANG W Z. Adaptive opportunistic routing protocol based on forwarding-utility for delay tolerant networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(10): 36-47.

[4] WU H, FUJIMOTO R M, GUENSLER R, et al. MDDV: a mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks[A]. Proc of the 1st ACM Int Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)[C]. New York: ACM, 2004. 47-56.

[5] ZHAO J, CAO G. VADD: vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks[A]. Proc of the INFOCOM 2006[C]. New York: IEEE Communications Society, 2006. 1-12.

[6] HUANG H Y, LUO P E, LI M, et al. Performance evaluation of SUVnet with real-time traffic data[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2007,56(6):3381-3396.

[7] DING Y, WANG C, XIAO L. A static-node assisted adaptive routing protocol in vehicular networks[A]. Proc of the 4th ACM Int Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks[C]. New York: ACM Press, 2007. 59-68.

[8] 李陟, 查玄阔, 刘凤玉等. 公交时延容忍网络中基于索引的多级分组路由算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(3): 407-414.

LI Z, ZHA X Y, LIU F Y, et al. Indexing based multi-level clustering routing algorithm in public transportation delay tolerant networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(3): 407-414.

[9] 徐佳, 李千目, 张宏等. 机会网络中的自适应喷雾路由及其性能评估[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(9): 1622-1632.

XU J, LI Q M, ZHANG H, et al. Performance evaluation of adaptive spray routing for opportunistic networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(9): 1622-1632.

[10] ZHANG Z, FEI Z M. Route design for multiple ferries in delay tolerant networks[A]. Wireless Communications and Networking Conference. IEEE[C]. 2007.3460-3465.

[11] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Performance analysis of mobility-assisted routing[A]. Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. New York: ACM, 2006. 49-60.

[12] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[A]. Proc of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking[C]. New York: ACM, 2005. 252-259.

[13] KER NEN A, OTT J, K RKK INEN T. The One simulator for DTN protocol evaluation[A]. Proc of the ACM Int Conf on Simulation Tools and Techniques[C]. New York: ACM, 2009.1-10.

[14] LINDGRENY A, DORIA A, SCHEL N O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[A]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review[C]. New York: ACM, 2003.19-20.

作者简介:



姜海涛 (1985-), 男, 河北清河人, 南京理工大学博士生, 主要研究方向为无线网络路由协议。

张宏 (1956-), 男, 上海人, 南京理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络性能和信息安全。

李千目 (1979-), 男, 安徽宿州人, 南京理工大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为信息安全和网络性能诊断。