

基础设施增强的 DTN 路由协议

于振, 徐敬东, 张建忠, 张玉

(南开大学 信息技术科学学院, 天津 300071)

摘要: 针对间歇性连通的移动网络环境, 提出了一种新的 DTN 路由协议 IEDR。其整合以往 DTN 路由算法中的设计经验, 充分利用节点间相遇的机会交换数据, 提高数据传达率并降低传输延迟, 同时将资源开销控制在可接受的范围内。IEDR 还尝试将无线接入点作为辅助数据传播的有效途径, 利用接入点间高速互联的特性为数据在广大地域内的高效传播提供便利。仿真结果表明, 与一些经典路由协议相比, IEDR 达到了更好的效能。

关键词: 移动网络; 容迟网络; 基础设施; 基于效用的路由

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)08-0044-09

IEDR: an infrastructure enhanced DTN routing protocol

YU Zhen, XU Jing-dong, ZHANG Jian-zhong, ZHANG Yu

(College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: To cope with un-ideal conditions in mobile network where connectivity is only intermittent, a novel DTN (delay tolerant network) routing protocol, IEDR, was proposed, which incorporates experiences gained before and strives to fully utilize node contacts for data exchange, in order to maximize delivery ratio and minimize delivery delay, while still with controlled overhead. Additionally, IEDR attempted to use wireless access points for data propagation, as access points were supposed to be widely deployed and interconnected with high speed, providing an opportunity to efficiently distribute data in large areas. The evaluation proves that IEDR is better than many classic DTN routing protocols.

Key words: mobile network; delay tolerant network; infrastructure; utility-based routing

1 引言

移动网络要面对各种实际环境, 如何在移动网络中高效路由是研究的热点也是难点。当移动网络中节点密度低、移动性高时, 节点之间的路由路径可能大部分时间都不存在, 即便出现也仅能维持很短的时间。这是因为稀疏的节点无法组成拓扑稳定且完全连通的网络, 节点间在相遇, 即进入相互的传输范围时, 通信机会才会出现。在这种不理想的环境中, 传统的移动自组网(MANET)路由协议会因为无法建立路由路径而失效。为此, 研究者借鉴了容迟网络(DTN)^[1]的概念, 希望利用节点间有限的通信机会完成数据的

传递。本质上, DTN 与传统分组交换网络在路由方面最大的区别在于: DTN 要求节点具有持久的存储能力, 当无法为数据分组找到合适的下一跳时, 不同于传统网络中简单地丢弃数据分组, 而是保存该数据分组, 等待下一次转发的机会。具体到移动网络中, 节点会存储无法立即转发的数据分组, 携带数据分组进行移动, 当遇到目的节点或可以作为中继的节点时再发送。这样, 数据不仅通过无线链路上的传输而从一个节点跳到另一个节点, 还可以随着保存该数据的节点做物理移动。也正因为如此, 这种机制又常被称为“移动辅助的”或“存储—携带—转发”。本文中, DTN 将专指这种间歇性连通移动网络。

收稿日期: 2012-05-21; 修回日期: 2013-03-22

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110031110026, 20120031110035); 国家自然科学基金资助项目(61103214)

Foundation Items: Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20110031110026, 20120031110035); The National Natural Science Foundation of China (61103214)

经过近些年的发展，学术界提出了众多 DTN 路由协议。最简单的 Direct Transmission^[2]仅允许源节点在遇到目的节点时直接传输，节省网络资源的同时也造成了高延迟和低数据传达率。而在另一个极端，基于洪泛思想的 epidemic routing^[3]试图将数据分组“传染”给每一个节点，理论上在资源不受限时可以达到最佳的性能；不过实践表明，在资源有限的情况下，过度的复制数据分组反而会降低网络性能。为了实现高效的路由，以往的研究采取了多种策略。首先，基于复制的方法有助于网络性能的提升，但数据分组的拷贝数量应该得到控制。例如，spray and wait^[4]在数据分组生成时就设定复制的上限，避免过多的数据分组堵塞网络。其次，节点的移动是有规律的，过去经常相遇的节点将来更可能相遇。基于这一观察，PROPHET^[5]利用历史相遇信息预测节点间在近期相遇的可能性，仅将数据分组复制给更有可能完成数据传递的节点。另外，每次传输机会的容量和节点的存储空间是有限的，至在排定传输顺序和选择要丢弃的数据分组时，好的策略有助于性能的提升。作为典型代表，RAPID^[6]将 DTN 路由看作资源分配问题，为每个数据分组计算效用值来决定数据分组应如何在系统中复制。模拟仿真和实际部署（如 DieselNet^[7]）表明，这些方法效果明显，为 DTN 路由算法的设计提供了宝贵经验。

DTN 的性能受到所处环境的影响，当网络所在区域的直径相对于节点的典型移动速度很大时，高延迟的出现是不可避免的。尽管大部分 DTN 是为无基础设施的环境而设计的，但是如果在区域内合理地分布着一些无线接入点，则数据可以被快速地分发到区域中。实际上，Wi-Fi 热点近些年来得到了大范围的部署，即便受限于 WLAN 技术的传输范围而无法覆盖整个区域，但利用热点间可以高速互联的特性，只要将数据分组上传到一个热点，就可以将其分发到访问任意热点的节点上，无疑提高了数据分发效率。由此观点出发，一些学者提出可以将无线接入点纳入到 DTN 中，用以提高网络性能。图 1 给出了 Hybrid Epidemic^[8]中的一个典型案例。假设节点 P_1 要发消息 m 给 P_5 ，一条路径是当 P_1 在接入点 AP_1 的传输范围内时，将 m 上传给 AP_1 ，由 AP_1 广播至其他接入点，包括 AP_2 ，接下来 AP_2 将 m 转发给访问自己的 P_4 ，并由后者完成最终的传递；另一条路径是节点间通过 epidemic 方式进行消息传

递，经由 P_2 和 P_3 到达 P_5 。相比纯 ad hoc 方式，Wi-Fi 接入点的加入有望降低传输延迟，提高传达率。

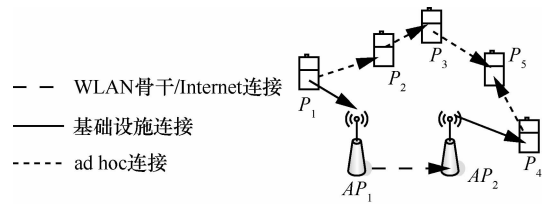


图 1 Hybrid Epidemic 协议的网络模型

本文提出一种新的基础设施增强的 DTN 路由协议 IEDR (infrastructure enhanced DTN routing)，总结吸收以往 DTN 路由协议设计中的经验，并利用分布在区域内的无线接入点来辅助数据的传播，提高网络性能。其主要特点包括：根据节点间以往的相遇频率和时长来计算转发效用值，用于预测将来再次相遇并完成数据传递的可能性；合理设计转发效用的传递性为多跳路径提供可能，同时避免了不必要的数据传输；为节点上的数据分组建立责任因子，表明该节点对数据分组传递所要承担的责任；责任因子会向着更可能完成传递的节点流动，而责任因子过低的节点会停止复制数据分组，减小资源开销；传输调度时对应转发效用和责任因子高的数据分组优先，让网络资源的使用更有价值；在存储管理中优先丢弃转发效用和责任因子低的数据分组，使高价值的数据分组获得更多的转发机会；在对基础设施的利用方面，当数据分组经任一 Wi-Fi 接入点上传后，其将被广播到离目的节点较近的接入点（通过转发效用做出判断），由这些接入点向合适的到访节点复制数据分组。

在仿真实验中，本文使用模拟器建立接近真实的场景，在无接入点和有接入点的情况下对 IEDR 的性能进行评估。结果表明，在无基础设施场景中，IEDR 有着较高的数据分组传达率和较小的资源开销，同时传输延迟也控制在较好的水平；在有基础设施场景中，IEDR 获得性能提升，且相比简单的 epidemic 方式优势更为明显。

2 相关工作

现有 DTN 路由协议可粗略分为基于转发和基于复制 2 类。基于转发的协议在网络中只为每个数据分组保存一份拷贝，并尝试利用节点间相遇的机会将这份拷贝朝着目的节点的方向转发。相对地，基于复制的协议为每个数据分组在网络中注入多

份拷贝,用于提高成功传递的机率。本质上,这种协议试图在资源开销和数据传达率之间寻求一个平衡。根据创建拷贝的数量,基于复制的协议又可做进一步细分:基于洪泛的协议给尽可能多的节点发送拷贝,追求最好的性能;基于限额的协议控制网络中拷贝的数量,保证资源不会被过度消耗。

文献[2]和文献[9]提出了针对 DTN 的基于转发的路由方法,但因为节点间的通信机会难以预计,只使用一份拷贝无法保证传输的有效性。文献[10]提出的路由方法同样基于转发,但利用了有关节点未来移动和相遇的信息来提高性能。这种方法实际上使用了谕示器(oracle),对于大部分 DTN 来说难以实现。

在 epidemic routing^[3]中,节点会复制并发送数据分组给所有遇到的其他节点,因此其属于典型的基于洪泛的协议,在该协议下网络中拷贝的数量与节点数量直接相关。MaxProp^[7]的核心是对节点保存的数据分组依据传达可能性进行排序,在通信机会出现时,先传输优先级高的数据分组;在存储空间溢出时,低优先级的数据分组最先被丢弃。MaxProp 也是基于洪泛,因为只要资源和节点移动性允许,网络中的所有节点都可能获得一份拷贝。其他基于洪泛的例子还有 PROPHET^[5]、RAPID^[6]和 PREP^[11]。PROPHET 利用历史信息预测节点间相遇的可能性,优化数据交换。RAPID 使用效用函数将数据分组排序,目的是优化某一个特定的指标,例如延迟。PREP 是 epidemic routing 的一个变种,它根据传达开销和过期时间为数据分组赋予优先级,在资源受限的情况下使用优先级来决定哪些数据分组应该被发送或丢弃。

基于洪泛协议的主要问题是网络资源的高要求,包括传输带宽和节点存储。这导致了基于限额的协议被提出。Spray and wait^[4]在数据分组创建时就指定复制数量的上限,并将路由分为 2 个阶段:在 spray 阶段,一定数量的拷贝被注入到网络中;在 wait 阶段,带有一份拷贝的节点等待与目的节点相遇的机会并完成传递。后续的 spray and focus^[12]有着相似的 spray 阶段,而在进入 focus 阶段后,允许单份拷贝在效用值的指导下进行转发。观察到节点与其他节点相遇的速率可以用过去的的数据大致估算,EBR^[13]采用和 spray and wait 类似的方式,但在复制数据分组时考虑节点的相遇速率情况,相遇速率高的节点将获得更多拷贝。

DTN 与基础设施的结合也是值得关注的研究方向。文献[8]的作者收集分析校园环境中手机通过蓝牙互相通信和访问 Wi-Fi 接入点的情况,发现同时使用接入点和 ad hoc 方式转发数据是切实可行的,并提出 Hybrid Epidemic 协议。测试表明,Wi-Fi 接入点的加入显著地降低了传输延迟,并在测试场景中保证所有数据都被送达。

3 IEDR 协议

DTN 概念本身意味着允许较大且不可预测的延迟,但低延迟仍是研究者追求的目标。一个理想的 DTN 路由协议应能最大化数据传达率、最小化传输延迟,同时保证网络资源不会被无限制地消耗。面对间歇性连通的网络特性,要做到这一点就必须充分利用节点间有限的通信机会,高质量地交换数据和管理存储空间,让网络资源得到有效的利用。

本文提出基础设施增强的 DTN 路由协议 IEDR。该协议基于历史信息计算转发效用值,预测节点间相遇的可能性,并且合理利用转发效用的传递性,为多跳路径的建立提供可能。同时,IEDR 还为节点上的数据分组建立责任因子,明确节点应为其携带的数据分组所承担的责任,在资源使用中起到指导性作用。另外,IEDR 针对区域中可能存在部分基础设施的情况进行了优化,利用基础设施高速互联的特点将数据快速分发到区域中,提高网络性能。IEDR 本质上是基于限额的协议,责任因子的使用控制了复制的程度,而 IEDR 在传输调度和存储管理方面的设计也让资源的使用更加高效。

3.1 转发效用

在真实场景中,网络中节点的移动并非是完全随机的,而是遵循某种重复行为模式。也就是说,一个节点更可能访问它过去经常访问的地点;一对经常相遇的节点在不久后再次相遇的可能性更高。基于这种观察,PROPHET 提出可以使用节点间过去的相遇情况来预测一个节点可以把数据分组转发给某个节点的可能性。与之做法类似,IEDR 引入转发效用值 $U_{(a,b)} \in [0, 1]$,用以描述将数据分组从节点 a 转发到节点 b 的可行性。

当 2 个节点相遇时,对应的转发效用值需要增加,这样经常相遇的节点会有较高的转发效用值。具体计算方法如下。

$$U_{(a,b)} = U_{(a,b)\text{old}} + (1 - U_{(a,b)\text{old}})U_{\text{init}} \quad (1)$$

其中, $U_{\text{init}} \in [0, 1]$ 是一个提前设定好的常量。

如果 2 个节点长时间在一起, 通常表明它们之间有某种紧密的联系, 在这种情况下也应该更新转发效用值, 如下式所示。

$$U_{(a,b)} = 1 - (1 - U_{(a,b)\text{old}}) \gamma^k \quad (2)$$

其中, $\gamma \in [0, 1)$ 是衰减因子, k 是距离上次更新所经历的单位时间间隔, 其值为实际时间间隔除以常量 T_{unit} 。

相反地, 当一对节点很久没有相遇时, 它们将不再适合为彼此转发数据分组, 所以转发效用值在节点分开时按时间衰减是必要的, 如式(3)所示。

$$U_{(a,b)} = U_{(a,b)\text{old}} \gamma^k \quad (3)$$

其中, γ 和 k 的定义与前面相同。

3.2 多跳路径

如果节点 a 经常遇到节点 b, 而节点 b 经常遇到节点 c, 那么节点 a 和节点 c 可以通过节点 b 互相转发数据分组, 即便它们之间很少有机会直接通信。这暗示转发效用值是有传递性的。PROPHET 使用了传递性并由常数因子 β 控制其作用, 然而在大量仿真实验中, 往往在 $\beta = 0$ 时 (即不考虑传递性), 才能取得最好的结果。文献[14]指出, 传递性的引入可能对性能有不利影响, 特别是在网络负载较高的情况下。

考虑一个场景, 节点 a 遇到节点 b, $U_{(b,a)}$ 的值增加; 节点 b 又遇到节点 c, 由传递性, $U_{(c,a)}$ 的值也增加; 之后, 节点 b 和节点 c 频繁相遇, $U_{(b,a)}$ 和 $U_{(c,a)}$ 因传递性获得相应的增加量。环路的存在使得 $U_{(b,a)}$ 和 $U_{(c,a)}$ 已经不能准确地反映真实情况, 造成不必要的数据分组传输。

为了合理利用多跳路径, IEDR 除了上面介绍的转发效用值外, 还独立维护一个间接转发效用值, 其计算方法如下

$$U'_{(a,c)} = \max(U'_{(a,c)\text{old}}, \beta U_{(a,b)} \cdot \max(U_{(b,c)}, U'_{(b,c)})) \quad (4)$$

其中, $\beta \in [0, 1)$ 是常数因子。当节点 a 遇到节点 b 时, 前者根据后者对节点 c 的转发效用值以及间接转发效用值, 计算通过节点 b 对节点 c 的间接转发效用值。如果该值比原先的值更高, 则节点 a 更新自己对节点 c 的间接转发效用值。不难看出, 如果 2 个节点间存在多跳路径, 而路径的效用值表示为每一跳的效用值的乘积再乘以 β 的跳数减一次方, 则间接转发效用值对应于利用现有信息该节点可

发现的效用值最高的路径。另外, 间接转发效用值也会随时间衰减, 而将直接和间接转发效用值综合起来, 就代表了节点的实际转发效用。节点的综合转发效用值按下式计算。

$$CU_{(a,b)} = U_{(a,b)} + (1 - U_{(a,b)}) U'_{(a,b)} \quad (5)$$

需要指出的是, IEDR 并非尝试确定一条节点间的多跳路径, 并沿着该路径转发数据分组, 而只是评价节点的转发能力, 数据分组在向高转发效用节点移动的过程中, 逐渐接近目的节点, 并完成最终的传递。

3.3 责任因子

在传统路由协议和基于转发的 DTN 路由协议中, 节点对所持数据分组拥有完全的责任, 一旦丢弃, 则该数据分组将无法完成传递。然而, 对基于复制的 DTN 路由协议来说, 网络中可能散布着数据分组的多个拷贝, 节点有理由对携带的数据分组区别对待: 对于还没有充分散发或估计网络中其他拷贝没有很好转发机会的数据分组, 节点应优先处理, 因为节点对该数据分组的传递有较大的责任; 对于已经在网络中有效转发的数据分组, 节点可以降低其优先级, 甚至完全停止复制该数据分组, 这是因为即便继续投入资源也难以获得相应的回报。

为了体现节点对所持数据分组的责任, IEDR 为节点上的数据分组建立责任因子, 其计算规则如下所示。

- 1) 数据分组在源节点生成时, 其责任因子为 1。
- 2) 进行数据分组复制时, 发送节点的责任因子在 2 个节点间按照综合转发效用值的比例进行分配。节点 a 转发目的节点为 c 的数据分组给节点 b 时, 节点 a 将责任因子

$$r'_a \cdot \frac{CU_{(b,c)}}{CU_{(a,c)} + CU_{(b,c)}} \quad (6)$$

转给节点 b, 其中, r'_a 是节点 a 原先持有的责任因子。

- 3) 持有相同数据分组的节点相遇时, 2 个节点上该数据分组的责任因子之和将按照综合转发效用值的比例重新分配。

- 4) 数据分组因存储空间不足等原因被丢弃时, 其责任因子将被记录下来, 在遇到持有该数据分组的节点时, 将责任因子赋予这个节点。

数据分组的责任因子在初始时为 1, 随着复制的进行, 责任因子在节点中分发, 总和维持在 1, 并且综合转发效用值高的节点将得到更大的责任

因子。而最后一条规则需和 ACK 机制配合使用,保证了在数据分组被丢弃时,其责任因子能被回收利用。责任因子对网络资源的使用具有指导意义,在路由决策中起到重要作用。

3.4 转发策略

数据分组到达一个节点时,该节点也许无法找到好的下一跳,此时数据分组将被保存在节点存储空间中,在遇到其他节点时再判断是否应该转发数据分组。另外,为了保证数据分组能被目的节点收到,向多个节点复制数据分组是合理的选择,而这也意味着节点在转发数据分组后并不将其直接丢弃。

当节点 a 遇到节点 b 时,节点 a 上目的节点为节点 b 的数据分组将优先发送,这些数据分组会直接完成传递;目的节点为某节点 c 的数据分组在满足下述条件时转发给节点 b。

1) 节点 b 没有该数据分组。

2) 节点 b 没有收到过该数据分组。这是依据数据分组的 hop list 以及节点本身的转发记录来做出判断的,MaxProp 使用同样的方法控制转发。

3) 数据分组的责任因子高于阈值 r_{th} 。如果节点所持某数据分组的责任因子过低,则说明该数据分组还有多份拷贝在网络中,或者已经有转发效用更高的节点获得了该数据分组,因此无需为该数据分组投入额外的资源。

4) 下面的不等式成立:

$$CU_{(b,c)} > CU_{(a,c)} + \Delta \quad (7)$$

其中, Δ 是一个非负常量,表明节点 b 要比节点 a 好多少才能获得数据分组。该数值越大,节点在做判断时越谨慎,减少了传输次数,但也有可能影响性能。

目的节点在收到数据分组后会生成 ACK,并以洪泛方式在网络中传播。ACK 机制可以用很小的代价将旧数据从网络中清除,避免了资源的浪费。

3.5 传输调度和存储管理

2 个节点相遇后,通信可以持续的时间通常是无法预知的。如果本次通信机会的容量不能满足数据的完全交换,后传输的数据分组将发送失败。因此,对传输队列中的数据分组进行排序是很有必要的。一方面,相应综合转发效用值高的数据分组应先发送,发送这些数据分组更可能导致数据分组的传达;另一方面,高责任因子的数据分组应先发送,因为在网络中这样的数据分组还没有被很好地散

播,节点有责任将它们在网络中充分转发。

另外,对于移动设备来说,存储空间是有限的。当数据分组到达存储空间已满的节点时,数据分组的丢弃不可避免。从性能角度出发,应对数据分组进行评定,将宝贵的存储空间留给高价值的数据分组,让它们有机会被继续转发。

综上,为了满足传输调度和存储管理的需要,IEDR 为节点上的数据分组设定优先级,高优先级的数据分组在传输机会出现时优先发送,而低优先级的数据分组会先被丢弃来为新数据分组腾出空间。IEDR 使用下面的公式计算数据分组的优先级。

$$P = CU \cdot r \quad (8)$$

其中, CU 和 r 分别为数据分组对应的综合转发效用值和责任因子。对于优先级相同的数据分组,按到来的先后顺序排列。

作为优化,当发现要接收数据分组的节点剩余存储空间不足时,IEDR 会检测在该节点上新数据分组的优先级是否高过预计要被替换的现有数据分组。如果此条件不满足,则数据传输不会发生。

不难发现,在数据分组刚生成时,其具有较大的责任因子,因此会优先发送,使得没传远的数据分组有更高的优先级;而对于节点上的数据分组来说,在多次转发后,其责任因子会大幅降低(每次至少降低 $\frac{1}{2}$),转发过多次的数据分组更可能被新数据分组替代。

3.6 基础设施的利用

DTN 的网络性能和节点的移动模式有很大关系。当网络所在区域的直径较大且节点的典型移动速度相对较低时,节点将无法携带数据分组在短时间内进行大范围的移动。一旦源节点和目的节点相距较远,传输延迟就会变得很大。为了弥补这一缺陷,IEDR 尝试使用在区域内分布的有限基础设施来辅助数据分发。

DTN 通常为不便于建立基础设施的环境而设计,但如果能够在区域内合理地部署一些无线接入点,并且将它们互联起来,那么即便其信号只能覆盖很小的面积,也能为网络带来可观的性能提升。IEDR 的思路是,无线接入点一般是固定的,如果一个节点经常直接或间接地(通过其他节点)访问某个接入点,说明它经常在附近出现,而访问这个接入点的其他节点也更有机会将数据分组转发给该节点。这是因为,1) 该节点可能就在附近;2) 到

访的其他节点和该节点都在同一地点出现，地理位置的相关性暗示它们可能有某种联系。在 IEDR 中，节点在将数据分组向着目的节点转发的同时，也寻找机会将数据分组上传到任一无线接入点；收到数据分组的接入点将其广播到距离目的节点较近的其他接入点，这些接入点在遇到和目的节点关系紧密的到访节点时复制数据分组，希望它们能帮助实现数据分组的传递。另外，节点访问接入点时可下载属于自己的数据分组，不论其存放在哪个接入点上。

具体来说，无线接入点存在时，它们和普通节点一样，也参与到直接和间接转发效用的计算中。因此，接入点也拥有针对节点的转发效用值，该值越高表明其距离节点越近。IEDR 设定阈值 CU_{th} ，一个接入点的综合转发效用值大于 CU_{th} ，表明其适合用于数据分组转发。

当移动节点访问接入点时，节点检查自己的数据分组接入点是否已经拥有；对于还没有上传的数据分组，检查是否有接入点的综合转发效用值大于 CU_{th} ，如果有，则上传数据分组；数据分组在上传后，将被广播到所有综合转发效用值大于 CU_{th} 的接入点，并且按照综合转发效用值的比例分配责任因子。

接入点在有节点到访时，查看其综合转发效用值是否大于 CU_{th} ，如果是，则以和节点间转发类似的规则转发数据分组。

需要注意的是，接入点的转发效用值会随时间变化，在其增大并超出 CU_{th} 时，应从其他接入点下载对应的数据分组。

4 性能评估

为了对比评价 IEDR 的性能，本文使用专为 DTN 环境而设计的模拟器 ONE^[15]进行仿真实验。

4.1 仿真环境

仿真环境的设定直接影响到实验结果的客观和公正。出于希望接近现实情况的考虑，此处使用基于地图的移动模型。在取自芬兰城市 Helsinki 的地图上，所有节点只能沿着街道以车速移动。仿真运行中，节点会随机选择某个地点作为目的地，使用最短路径算法选择路线，朝着该地点以设定范围内随机选取的速度移动。在到达目的地后，节点会逗留一段时间，接着选择下一目的地，如此反复。

为了体现网络的社会属性，地图上放置了 5 组兴趣点 (POI)，节点相应分为 5 组，每组中的节点以高概率选择对应 POI 组中的地点作为下一目的

地，否则选择地图上的任意地点作为目的地。通过这种方式，同组中的节点因为频繁访问相同的地点而经常相遇；不同组的节点相遇的机率会小很多。这正符合社会网络中对社区的定义，且和现实中的情形相似。除此之外，网络中还有大约 24% 的节点隶属于多个社区，它们穿梭于不同的社区，能够作为社区间沟通的桥梁。

本文将分别实验不同节点密度下无基础设施和有基础设施的场景。在有基础设施的场景，地图上放置 3 个接入点，其中 1 个在某个社区内，而另外 2 个在社区之间的道路上。现实中，Wi-Fi 热点也往往部署在人流密集的场所。

仿真运行 3 h，模拟节点间发送数据分组的场景。大小在 1~5 MB 的数据分组按每节点每小时约 13 个的速率生成，并随机选择源节点和目的节点。节点和接入点均使用速率为 10 Mbit/s、传输范围为 100 m 的无线链路进行通信，且每个节点有 50 MB 存储空间，每个接入点有 200 MB 存储空间。

4.2 实验结果

IEDR 在实验中的参数设置如表 1 所示。需要特别说明的是，测试中责任因子的回收机制能够提高数据分组传达率，但以传输延迟和开销增加为代价。因在本文的场景中效果不明显，后面的测试将关闭该特性。

表 1 IEDR 的参数设置

参数	参数值
U_{init}	0.75
γ	0.98
T_{unit}	15 s
β	0.25
r_{th}	0.1
Δ	0.01
CU_{th}	0.5

4.2.1 无基础设施场景

此场景评估 IEDR 在转发策略、传输调度和存储管理方面的性能。作为对比，epidemic routing、PROPHET、MaxProp 和 spray and wait 也将参与测试。公平起见，所有协议使用 ACK 清除网络中已经完成传送的数据分组。

图 2 为此场景下各协议的数据分组传达率。凭借合理的设计和全面的考虑，IEDR 毫无争议拥有

最高的性能，在节点数较少时，其传达率达到 80%。至于 PROPHET，参数 β 的设定对性能影响很大。在 $\beta=0$ ，即不考虑传递性时，其传达率排在第 2 位，除了节点密度较高的场景，均保持在 60% 以上；而当 β 为默认的 0.25 时，它的性能大幅下降。这个结果符合本文先前所做的分析，PROPHET 对传递性的简单设计往往带来负面的效果。MaxProp 和 spray and wait 传达率大致相当。其中，MaxProp 似乎没能有效利用多跳路径，传达数据分组所用平均跳数仅在 1.6 左右；spray and wait 性能不佳则和场景设置有关，社区的存在使得其在 spray 阶段将数据分组大多分发给同社区的节点，造成传播不畅。尽管理论上在资源充裕时，epidemic routing 将有最好的性能，但在本文设定的资源严重受限场景中，其性能反而是最差的，传达率不超过 40%。这充分说明了在资源有限的真实环境中，做出更多传输尝试未必能收到相应的回报，也有可能适得其反。

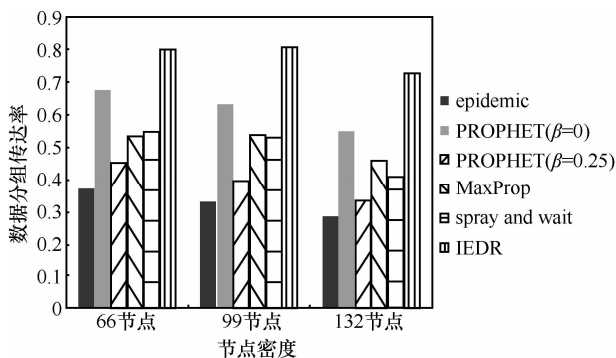


图 2 无基础设施场景中数据分组传达率

即便在 DTN 中，传输延迟也是重要的指标。图 3 给出了在不同节点密度下，传输延迟的累积分布函数。IEDR 仍然表现出了极佳的性能，在保持高传达率的同时，将传输延迟控制在较好的水平。在 $\beta=0$ 时，PROPHET 的传输延迟也较低，历史信息的利用使数据分组能有效地朝着目的节点移动。Spray and wait 的平均延迟很低，这是因为其完成传递的数据分组大多以邻近节点为目的节点，需要长途发送的数据分组（目的节点在其他社区）因通常没有传递成功而不在计算范围之内。Epidemic routing 在延迟方面同样表现最差，无所顾忌地传输将使网络完全拥塞。

网络中最消耗资源的操作是无线数据传输，因此图 4 给出了传递数据分组所需的平均传输次数，用以评价路由协议的网络开销情况。与直觉相反，拥有最好性能的 IEDR 网络开销却是最低的。尽管

理论上可能复制大量拷贝，但实际应用中 IEDR 还是很好地控制了数据分组的复制，对重复传输的避免以及责任因子阈值的使用都是其成功的关键。与预想一致，epidemic routing 消耗最多的网络资源，而 PROPHET 和 MaxProp 同样属于基于洪范的协议，较高的网络开销不可避免。PROPHET 在 β 为 0 时可降低一半以上的开销，再次说明对传递性的使用必须谨慎。Spray and wait 开销和参数设定有关，在不同节点密度下其拷贝数依次设为 6、9 和 12，因此其开销也相应呈上升趋势。

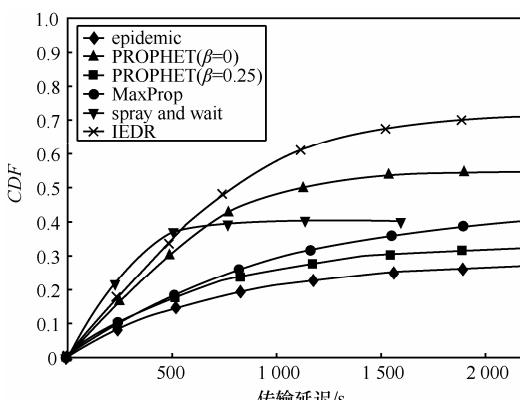
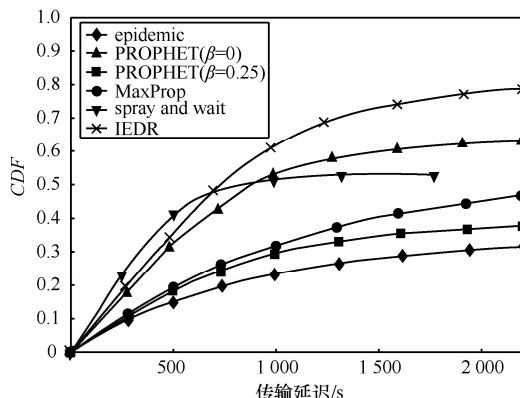
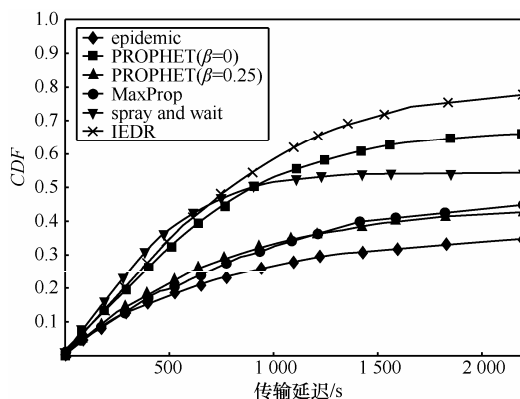


图 3 无基础设施场景中传输延迟的累积分布函数

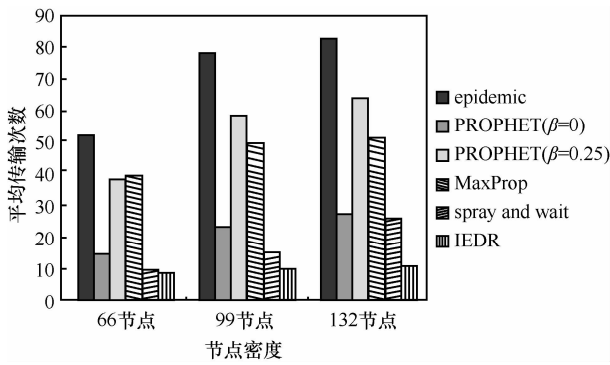


图 4 无基础设施场景中数据分组的平均传输次数

4.2.2 有基础设施场景

在有基础设施的场景中，本文将比较 epidemic routing (也即 Hybrid Epidemic 协议) 和 IEDR 的性能。其他路由协议在设计中没有考虑基础设施的作用，因此本文选取 PROPHET 进行扩展，使其提供对基础设施的支持。主要改动体现在移动节点访问接入点时，会查询是否有接入点的 Delivery Predictability 高于本节点；如果有，则将数据分组直接复制到那些接入点上。另外， β 被设置为 0 以获得最好的性能。

引入无线接入点后，网络的性能理应得到加强，而测试结果也证实了有限基础设施的作用。图 5 和图 6 分别给出了有基础设施场景中数据分组的传达率和传输延迟。无论哪种路由协议，数据分组传达率较无基础设施时都有所提高，幅度提高了近 5%。而 epidemic routing 和 IEDR 之间的差距仍然巨大，前者只能实现不到后者一半的性能。PROPHET 的性能介于两者之间。在延迟方面，IEDR 同 epidemic routing 相比优势明显，但平均延迟略低于 PROPHET。另一方面，和无基础设施的场景比较，IEDR 仅在节点数较少时体现出些许的改进，平均传输延迟降低不到 4%。这可能和测试场景的设置有关，地图空间有限，而节点又以车速高速移动，部分抵消了基础设施的作用。

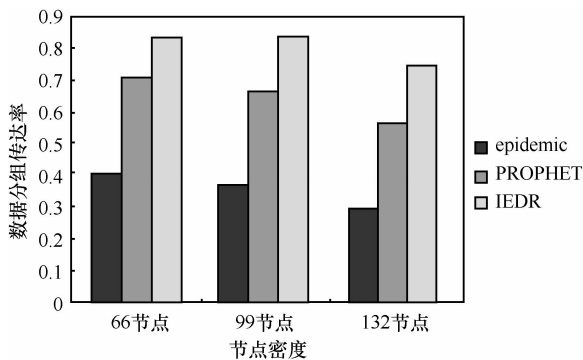


图 5 有基础设施场景中数据分组传达率

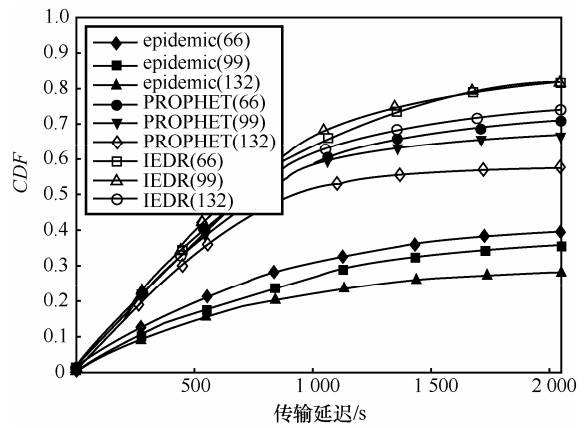


图 6 有基础设施场景中传输延迟的累积分布函数

图 7 描述了此场景下的平均传输次数。有趣的是，较无基础设施的场景，IEDR 的平均传输次数有所上升，而 epidemic routing 的该项指标却有一定的下降。平均传输次数的计算方法是用总传输次数除以传达数据分组的数量，因此，对于传达率提升相对明显的 epidemic routing 来说，尽管总传输次数增加，其平均传输次数反而降低了。PROPHET 的平均传输次数则在 2 个场景中基本没有变化。

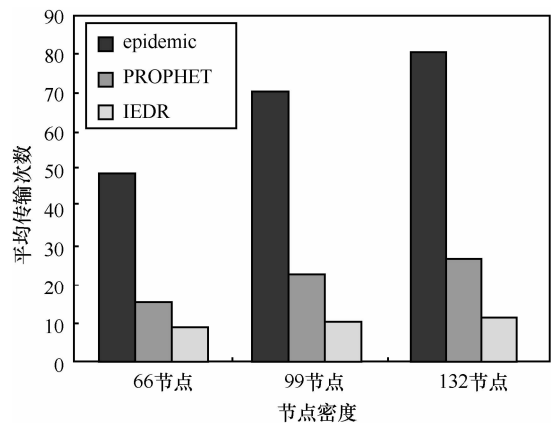


图 7 有基础设施场景中数据分组的平均传输次数

5 结束语

DTN 路由协议要面对苛刻的网络环境，其设计颇具挑战性。总结过往的设计经验，本文提出新的 DTN 路由协议 IEDR。该协议利用历史相遇信息估算节点转发效用，合理考虑多跳路径并使用责任因子控制数据分组的复制，同时，其在传输调度和存储管理方面也做出了优化。在性能评估中，IEDR 使用较少的网络资源实现了较高的数据分组传达率，并且传输延迟也控制在较好的水平。

鉴于 Wi-Fi 热点已经获得广泛的部署，IEDR

尝试利用这种有限的基础设施来提高网络性能。Wi-Fi 接入点通常分布在区域中的各个地点且可以高速互联，它们无疑成为了数据高效分发的有效途径，而本文的实验结果也证实了使用少量接入点即可实现性能提升。

参考文献:

[1] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged inter-nets[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM'03[C]. Karlsruhe, Germany, 2003. 27-34.

[2] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the single-copy case[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1):63-76.

[3] VAHDATA,BECKER D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks, CS-2000-06[D]. Durham, NC: Duke University, 2000.

[4] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Spray and wait:an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[A]. Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking(WDTN'05)[C]. Philadelphia, PA, USA, 2005. 252-259.

[5] LINDGREN A, DORIA A, SCHELÉN O. Probabilistic routing in inter-mittently connected networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review, 2003, 7(3):19-20.

[6] BALASUBRAMANIAN A, LEVINE B N, VENKATARAMANI A. DTN routing as a resource allocation problem[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM'07[C]. Kyoto, Japan, 2007. 373-384.

[7] BURGESS J, GALLAGHER B, JENSEN D, *et al.* MaxProp: routing for vehicle-based disruption-tolerant networks[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM'06[C]. Barcelona, Spain, 2006. 1-11.

[8] VU L, NAHRSTEDT K,RETIKA S, *et al.* Joint bluetooth/Wi-Fi scanning framework for characterizing and leveraging people movement on university campus[A]. Proceedings of the 13th ACM International Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems(MSWiM'10)[C]. Bodrum, Turkey, 2010. 257-265.

[9] HENRIKSSON D, ABDELZAHER T F, GANTI R K. A caching based approach to routing in delay-tolerant networks[A]. Proceedings of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN'07)[C]. Honolulu, Hawaii, USA, 2007.69-74.

[10] JAIN S, FALL K, PATRA R. Routing in a delay tolerant network[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM'04[C]. Portland, OR, USA, 2004. 145-158.

[11] RAMANATHAN R, HANSEN R, BASU P, *et al.* Prioritized epidemic routing for opportunistic networks[A]. Proceedings of the 1st International MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking(MobiOpp'07)[C]. San Juan, Puerto Rico, 2007. 62-66.

[12] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Spray and focus: efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and corre-

lated mobility[A]. Proceedings of the 5th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'07)[C]. White Plains, NY, USA, 2007. 79-85.

[13] NELSONS C,BAKHT M, KRAVETS R. Encounter-based routing in DTNs[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM'09[C]. 2009. 846-854.

[14] KARVO J, OTT J. Time scales and delay-tolerant routing protocols[A]. Proceedings of the Third ACM Workshop on Challenged Networks (CHANTS'08)[C]. San Francisco, CA, USA, 2008. 33-40.

[15] KERANEN A, OTT J, KARKKAINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUtools)[C]. Rome, Italy, 2009. 1-10.

作者简介:



于振 (1982-), 男, 天津人, 南开大学博士生, 主要研究方向为无线网络与移动计算。



徐敬东 (1965-), 女, 辽宁兴城人, 南开大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络与移动计算、车载无线自组网络。



张建忠 (1964-), 男, 河北石家庄人, 南开大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络与移动计算、对等计算、网络安全。



张玉 (1981-), 男, 浙江德清人, 南开大学讲师, 主要研究方向为网络与信息安全、数据流挖掘。