

DART:一种利用有向天线并适用于 高速移动的自组织无线网络路由算法

赵 通,严 伟,李晓明

(北京大学信息科学技术学院网络与信息系统研究所,北京 100871)

摘 要: 本文提出了一个利用有向天线的方位信息路由的 DART 协议. 由于在移动中方位信息比逐跳路由信息更稳定,因此能更好的适应高速移动场景. DART 的控制包开销随网络节点规模线性增长,不随移动场景和网络负载变化. 模拟实验显示 DART 在高速移动场景下具有很好的数据包送达率.

关键词: 移动自组织网络; 路由; 有向天线; 高速移动; 布隆过滤器

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)01-0169-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.01.027

DART: A Directional Antenna Based Routing Protocol for MANETs in Highly Mobile Scenarios

ZHAO Tong, YAN Wei, LI Xiao-ming

(*Institute of Network Computing and Information Systems, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: In this paper, we propose a Directional Antenna based Routing (DART) protocol that utilizes direction information to route packets. The direction information is more robust to mobility than the path information. The overhead scales linearly with the network size and does not vary with mobility and network loads. The simulations show that DART can offer a high packet delivery ratio in scenarios with high mobility.

Key words: mobile ad-hoc network; routing; directional antenna; high mobility; bloom filter

1 引言

传统移动自组织网络的路由协议通常利用节点间路径信息或下一跳信息来路由,即依赖精确的网络拓扑信息. 由于移动造成拓扑变化,这样的路由在移动场景下会变得脆弱. 例如,在高速移动场景下,主动路由协议(如 DSDV^[1], OLSR^[2])会因为路由表更新赶不上拓扑变化而失败;被动路由协议(如 DSR^[3], AODV^[4])会因为经常重新发现路由而退化成接近全网广播的性能. 即使被认为不需要精确拓扑信息的基于地理位置的路由协议(如 GPSR^[5]),因为需要全局的节点位置查询服务,在高速移动性的场景下仍然会有类似的缺陷^[6].

方向信息是一种非精确的位置信息,不像拓扑信息随移动变化剧烈,而且方向信息可以从本地有向天线的朝向获得. 本文工作即基于此观察设计了基于有向天线的路由协议 DART,图 1 是其路由机制的概览. DART 中路由信息通过方向散布传播到网络中,建立节点的方向

信息缓存. 数据包像一个飞镖一样被扔出,途中根据目的节点的方向信息改变转发方向. DART 除了邻居信息外,不再使用逐跳的拓扑信息. 但是,方向信息存在节点之间距离越近,移动对相对方向的改变越显著的问题. 例如同样运动 10 米,相距 100 米的节点相对方向可能改变不大,但是相距 10 米的节点可能会有显著的相对方向的改变. DART 从两方面来解决这个问题. 首先,令方向信息的有效期和节点间的距离成正比,较近节点的方向信息会更快失效;其次,对于非常临近的节点, DART 利用布隆过滤器^[11]构建基于邻居信息的引力结构,吸引非常靠近目标的数据包. 以上两种机制分别在远近距离内发挥主要作用,构成 DART 的路由机制,如图 1 所示. 基于以上机制, DART 具有以下特点: (1) 没有泛洪方式的路由发现过程,路由信息通过方向散布辐射出去; (2) 不依赖逐跳信息,每次转发从相应方向随机选择邻居来完成; (3) 节点间路由路径不固定,能够平衡负载,避免单点失效.

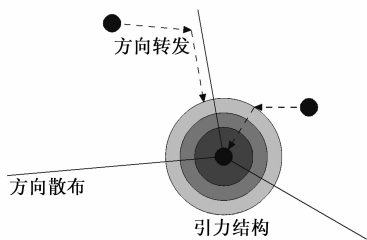


图1 DART路由机制概观

2 相关工作

有向天线的组网研究大多集中在 MAC 协议上,路由协议非常少.在文献[7]中,作者通过估计目标节点的方向来限制路由发现控制包的散布,这一过程只在路由修复中起作用.DRP^[8]是由 DSR 发展来的使用方向的按需路由协议,因此仍然使用了泛洪路由发现过程,并基于逐跳路径,只是在路由过程中记录转发天线 ID 作为方向信息来辅助路由维护和修复.并且,文献[7,8]中的有向天线都是基于单网卡的多个有向天线或使用波速成型技术的特殊硬件.和它们不同的是 DART 使用了多个可以独立收发方向和覆盖角度固定的有向天线,通过将这些网卡毗连成一个圆来获得全向覆盖,如图 2 所示.每个天线有独立的 MAC 层模块,但是使用共同的网络层.ORRP^[9]和 MORRP^[10]也使用了相同的配置模式.ORRP 只适用于拓扑静态的 Mesh 网络.MORRP 是对它的改进以适用于移动场景,但是,MORRP 依然基于路由发现/修复模式,且需要维护一个中间节点来完成转发.在 4.2 中将对 MORRP 和 DART 给出性能比较.

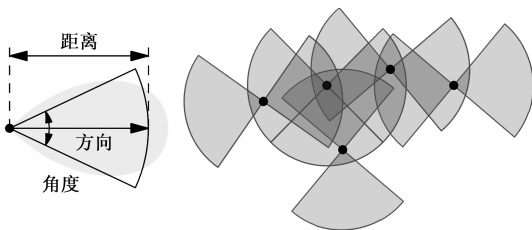


图2 天线模型

3 DART 路由协议的设计

3.1 方向转发

DART 路由需要散布目的节点的方向信息,转发时需要保证数据包在正确的方向上,两者都是基于方向转发来实现,具体是通过向量计算的方式来实现.首先,利用每一跳转发时使用的有向天线来估计每一跳的方向,并以单位长度作为每一跳距离,以此确定一个以天线朝向为方向的一个单位向量 $d_{n,i}$ (n 为节点 id, i 为天线 id).然后,一个包被转发多跳以后的方向和距离就用每一跳的单位向量进行向量加法获得的结果来

估计,即 $d_{\text{path}} = \sum_{n,i \in \text{path}} d_{n,i}$.图 3 是一个对包的转发路径进行向量运算的例子.这样的估计会和实际位置产生偏差,在 4.1 中,我们对角度和距离的偏差做了模拟评估,发现 95% 以上的方向偏差小于 45° ,该计算方法能够保证方向的有效性.

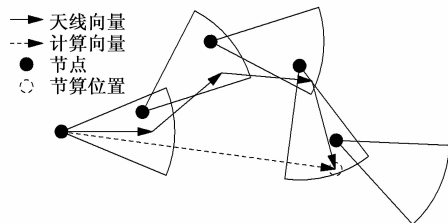


图3 路径方向的向量计算

实现中,针对平面路由,使用位移增量的 x, y 分量来表示一个向量,记为 $\langle x, y \rangle$.约定正东方向为 X 轴方向,正北方向为 Y 轴方向,向量的方向角规定为和 X 轴的夹角,在 $(-\pi, \pi)$ 之间取值,逆时针方向为正.这样的定义方式和传统的向量解析定义一致,方向角也可以通过 x, y 的符号来确定角度范围,并通过计算 \arctg 来获得精确角度.在实际计算中只需做简单的向量内积运算来比较向量之间的偏移角度.

DART 协议在网络包头中记录三个向量,分别为表示目标方向的单位向量和表示上一次转发的天线方向的单位向量以及包所经过的路径的累加向量,如表 1 所示.每次转发都将天线的方向向量记录下来,每次转发成功,天线的向量都会累加到路径向量上,而如何选择转发方向,保持小的角度偏差是通过比较目标向量和天线向量的内积大小来实现的.根据内积定义, $d_1 \cdot d_2 = |d_1| |d_2| \cos\theta$, (θ 为向量之间夹角),夹角越小内积越大.通过计算每个天线向量和目标向量之间的内积,首先排除内积为负的天线,将余下备选天线方向向量加上当前路径向量后获得的备选路径向量和目标方向求内积,将求得内积由大到小排列,选取内积最大并且有邻居的天线作为下一跳的转发天线,下一跳转发节点从邻居中随机选取.

表 1 DART 网络包头中和方向转发相关的功能域

记录项	含义
$\langle x, y \rangle$	网络包经过路径的向量.
$\langle x_{\text{ant}}, y_{\text{ant}} \rangle$	上一跳转发的天线方向向量(单位向量)
$\langle x_{\text{aim}}, y_{\text{aim}} \rangle$	网络包的目标方向(单位向量)

3.2 方向散布

方向散布是将节点的方向信息散布到网络中,作为数据包的路由依据.每个节点在每个周期随机选取一个方向作为目标方向利用 3.1 中的方向转发散布一个申明.不同于传统的泛洪广播散布,该申明每次使用单播的方向转发机制.申明作为路由控制包,其头部除

了记录 3.1 中给出的三个方向信息,还记录一个生成申明时的时间戳,用以区别新旧申明. 当一个节点接收到从节点 A 发出的申明,则将申明包头中的 $\langle \mathbf{x}_{\text{ant}}, \mathbf{y}_{\text{ant}} \rangle$ 和 $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$ 相加,作为新的 $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$ 记录在申明包头中;同时,将 $\langle -\mathbf{x}, -\mathbf{y} \rangle$ 作为接收节点到 A 节点的方向向量记录在节点方向缓存表中;最后,将申明继续根据其目标方向 $\langle \mathbf{x}_{\text{aim}}, \mathbf{y}_{\text{aim}} \rangle$ 往下转发. 方向缓存表的结构如表 2 所示. 由于节点间相距越远,相对方向越稳定,我们希望将节点方向缓存的有效期设置为正比于节点间的距离. 当以某个节点为目的的数据包到来时,需要比较数据包中携带的目的节点方向和本地缓存的目的节点方向,如果有更新的方向,需要更新数据包中携带的目的方向. 基于以上两点需求,我们设计了如下的表明节点方向有效性的指标:

$$\text{Credit} = \delta \left(1 - \frac{T_{\text{current}} - T_{\text{receive}}}{\delta |\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle|} \right).$$

该指标相比直接使用时间戳有如下好处:(1)起始值为 δ ;(2)有效性降低的速度和距离成反比;(3)节点的方向缓存有效期为 $\delta |\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle|$.

表 2 节点方向缓存表结构

记录项	含义
ID	被缓存节点的编号(可以是 IP 地址).
$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$	节点方向向量,包含了方向和距离信息.
T_{aim}	申明生成时候的时间戳.
T_{receive}	申明被接收的时候的时间戳.

性质(1)保证对于刚收到申明的节点来说,都具有相同的起始值 δ ,方便比较. 随着时间推移,由性质(2)使得距离近的节点的方向缓存更快的失效. 最终性质(3)保证满足有效期和距离成正比. 因此,哪个节点方向更有效的问题可以用该指标直接进行大小比较. 而如果用有效期或者时间戳比较,由于涉及距离和时间戳的关系,不能直接比较. 下面例子可以说明这个问题. 假设节点 A 记录的节点 D 在 6 个单位距离外,总有效期是 6δ ,还剩 5δ ;节点 B 记录的 D 在 3 个单位距离外,而且刚收到方向申明,因此有 3δ 的有效期. 虽然 B 比 A 收到 D 的信息晚,但是有效期比 A 短,如果直接比较, B 拥有的更新的信息就会被弃用,而使用 Credit 指标以后, A 拥有的 D 的缓存有效性指标为 0.83δ ,而 B 拥有的为 δ ,比 A 的更有效;当 2δ 时间单位以后, A 拥有的有效期还有 3δ ,而 B 只有 δ 了,换算为 Credit 指标,则分别为 0.5δ 和 0.33δ ,因此 A 拥有的信息比 B 有效. 由此可见, Credit 指标符合设计要求.

3.3 引力结构

在引言中提到,节点的方向信息存在距离越近,对运动越敏感的问题,因此在方向散布中建立的节点方

向信息表较适用于网络包离目标节点较远时候的转发,而引力结构则是设计用来解决网络包接近目标节点时的转发问题. 虽然多跳的邻居信息也能够解决这个问题,但是要维护一个精确的多跳范围内的邻居信息存在更新及时性和控制包的开销问题. 这种情况下采用软状态来维护信息是一种常用的办法. 引力结构就是一种维护了临近范围内节点方向信息的软状态数据结构. 我们利用指数衰减的布隆过滤器 (Exponentially Decay Bloom Filter, EDBF)^[12,13] 建立表示方向信息有效性的连续变化的指标,并随时间和距离衰减,从而在节点周围构建出一个表示节点方向信息强度的梯度结构. 下面介绍引力结构的细节.

首先简介布隆过滤器^[11]判断元素是否属于集合的机制. 最基本的布隆过滤器是一个 m 比特的数组,记为 BF , $\text{BF}[i]$ ($i=0, \dots, m-1$) 表示第 i 位比特值. 设计 k 个独立的哈希函数 h_j ($j=0, \dots, k-1$), 每个哈希函数都将元素的 ID 映射为 0 到 $m-1$ 的整数. BF 初始时全部设为 0. 当一个元素 a 加入该集合,计算 k 个哈希值,并将哈希值对应的 BF 中的比特位设为 1,过程可以表示为 $\text{BF}[h_j(a)] = 1$ ($j=0, \dots, k-1$). 当查询一个元素 b 是否属于该集合,则计算 b 对应的 k 个哈希值,只有当这些哈希值对应的 BF 中的比特位全为 1,才判断 b 属于该集合. 可见,对于两个集合的并,只需对它们的布隆过滤器求按位或的结果,即为结果集合对应的布隆过滤器. 布隆过滤器对于判断大量元素是否存在于某集合的操作不论是存储开销还是计算开销都很小,但是其存在一定的假阳率,根据元素规模设计 m 和 k 的参数能够将假阳率控制在很低的水平^[11]. 另外,布隆过滤器对加入元素很方便,但是删除元素很困难. 针对该困难,有研究者设计了带衰减的布隆过滤器^[12,13]. 因为一个元素需要 k 个哈希函数和对应的比特来表示其从属关系,当对这些比特增加一个衰减操作,即让每个为 1 的比特按一定概率从 1 变为 0,则对应元素如果没有重复加入操作,其对应为 1 的比特将越来越少,最终从布隆过滤器中删除. 在这种机制下,元素对应的为 1 的比特的个数记为 θ 表示了该元素在该集合中的可能性的强度,是一种模糊状态,而且没有维护就会慢慢被清除,很合适作为软状态的数据结构.

有很多利用 θ 的方式^[10,12~14]. 在 DART 中 θ 表示节点在有向天线的方向覆盖下的可能性,并且有距离和时间上的两个衰减过程,具体过程如下. 每个天线都对应一个 DBF,并通过 Hello 消息互相交换. 交换时,将本节点所有天线的 DBF 合并(做比特位或). 邻居的 Hello 消息包含的 DBF 表示了该邻居的邻居的信息. 对其中的 DBF 做概率为 D_d 的衰减(即逐跳衰减,或距离衰减),然后将发送该 DBF 的节点加入 DBF,并和接受

该 DBF 的天线的 DBF 合并. 距离衰减使得相距越远的节点互相记录的信息就越少. 每个 DBF 在经过一个固定的时间周期后, 还进行概率为 D_i 的时间衰减, 使得因移动离开的节点信息也会在数据结构中逐渐消失.

3.4 数据包的转发

数据包的路由和转发过程综合了以上三个机制. 数据包转发的每一步都是利用方向转发机制进行, 但是方向信息的使用有两种模式: 方向追踪模式和方向吸引模式. 在方向追踪模式下, 数据包根据 3.2 节中的方向缓存信息进行转发; 在方向吸引模式下, 数据包由 3.3 节中的吸引结构中的方向信息引导. 数据包在转发中初始状态为方向追踪模式, 当中间节点的吸引结构中存储的目的节点信息强度 θ 足够大时, 则切换为方向吸引模式. 初始时, 通过查询方向缓存中的目的节点信息获得方向信息和有效性指标 (Credit), 将两者记录在数据包头中, 并以此方向为目标方向进行转发. (如果没有目的节点信息, 则随机选择一个方向并将 Credit 设为 0.) 在转发过程中如果遇到方向缓存中目的节点方向信息具有更大的 Credit, 则更新数据包头中的方向和 Credit. 当转发中遇到的吸引结构中的目的节点信息强度 θ 超过一个阈值时, 数据包转发切换为方向吸引模式. 数据包头中存储该 θ 值, 并使用存储该 θ 值的有向天线的方向进行转发. 当遇到有更大的 θ 则更新数据包头中的目标方向和 θ 值. 数据包将最终到达目的节点, 或者由于 TTL 超时而丢弃. 为了防止数据包陷入一个错误的方向, 数据包头中记录的 Credit 和 θ 在每一跳转发中都会衰减一定数值.

3.5 其他问题讨论

3.5.1 节点旋转

DART 的使用场景为高速移动节点的组网, 一般是装有固定的有向天线的车辆节点. 当车辆转弯时, 有向天线随着节点的旋转改变方向, 和有向天线绑定的邻居表和吸引结构如果随之旋转, 会使得信息错误 (方向缓存由于不和有向天线的方向绑定而不受影响). 因此, 需要对邻居表和吸引结构尽量消除旋转的影响, 即当发生旋转时, 邻居表和吸引结构重新绑定到和原方向最接近的有向天线上. 这样虽然不能完全避免信息错误, 但是能减少错误, 而且 DART 本身能够容忍一定的不精确性. 同时, 通过时间流逝, 旧信息将失效, 新的方向信息被更新, 最终消除这些错误. 如果使用了错误邻居而使得发送失败, DART 会使用回调 (Callback) 机制将无效邻居移除并重新选择一个邻居转发, 这是一种在 MAC 层和网络层之间进行跨层协作的机制.

3.5.2 协议开销分析

DART 的主要开销是消息通信开销和存储开销.

DART 的消息开销包括 Hello 消息和方向申明消息, 它们都由每个节点周期性发送, 不受节点的密度、移动速度以及网络负载的影响, 因此开销随着网络节点规模 N 而变化, 为 $\Theta(N)$. 方向吸引结构的存储开销是预先设定的布隆过滤器的大小, 不随网络规模而变化. 方向缓存的大小根据收到的方向申明的数量而变化, 由于方向申明沿一个方向直线传播, 考虑平面网络, 则一个方向传播引起的存储开销为 $\Theta(N^{\frac{1}{2}})$, 因此所有申明消息引起的存储开销为 $\Theta(N^{\frac{3}{2}})$.

4 协议的模拟评估

本节主要介绍利用网络模拟器 NS-2^[15] 对 DART 的性能进行评估的结果. DART 中使用到的相关参数和模拟场景的设定在表 3 中给出. 其中布隆过滤器的相关参数参考了 MORRP^[10] 和 WSR^[14] 中的设置. θ 每次衰减 4, 会在 5 跳内衰减完, 使引力结构只在目标附近起作用, Credit 则在 10 跳内衰减完, 一旦方向错误, 不会偏离太远. 实验发现算法对 $D_i D_d$ 并不敏感. 我们选取了中间值.

表 3 模拟实验参数设置

参数	数值
模拟场景	1000m × 1000m; 节点数目: 50, 100, 150, 200; 速度: 5 - 10m/s, 10 - 20m/s, 20 - 30m/s; 移动模型: Random Way Point; 200s 模拟时间.
网络负载	30 个连接; 300 数据包/连接; CBR; 512 字节/包; 2 包/s; 每个连接随机在 10 - 190 s 间建立
布隆过滤器	大小: 2048 比特; 20 个哈希函数
D_i	0.6
D_d	0.5
衰减间隔	0.5s
Hello 间隔	1s
$\theta_{\text{threshold}}$	4
$\theta_{\text{attenuation}}$	4
Credit _{attenuation}	0.1
天线	每个节点 8 个天线; 每个天线覆盖 45° 的方向范围; 天线通信距离 250m.

4.1 方向和距离的偏差

在 3.1 节中介绍了利用向量计算估计方向和距离的方法, 本节通过模拟来评估其有效性. 我们选取了 100 个节点, 速度 10 - 20m/s 的场景的结果来说明 (其他场景结果相近). 首先, 通过将实际距离除以路径向量的长度, 获得单位长度的距离分布, 如图 4 所示. 可以看到, 大于 78% 的距离都在 100 - 200m 的范围中, 小于 50m 和大于 250m 的距离分布小于 5%. 通过比较节点间实际的方向和通过向量计算所得的方向, 可以获得

方向偏差的结果,如表 4 所示.可见大约 13% 的估计的方向和实际的方向偏差大于 23° . 23° 大约是天线覆盖角度 45° 的一半,因此这个偏差基本不会偏出一个天线的覆盖范围.偏差大于 45° 和 90° 的结果比例更小,表明大部分以方向计算结果进行转发至少能够使得数据包在实际方向上前进.如果去除那些距离很短的路径,只考虑长度大于 3 的路径,偏差的结果更少,表明距离远的节点方向估计更准确.

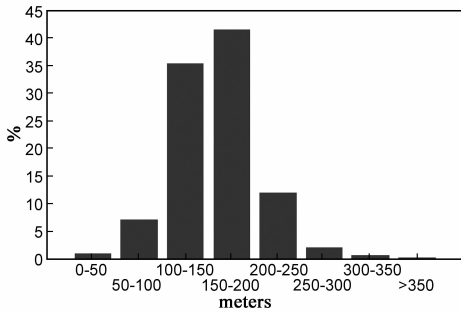


图4 逐跳距离的分布

表 4 方向角度偏差

偏差	路径 > 1 单位长度	路径 > 3 单位长度
$> 23^\circ$	13%	10%
$> 45^\circ$	4.6%	3.7%
$> 90^\circ$	1.4%	1.1%

以上结果表明 3.1 节中利用向量计算估计方向和距离的方法是有效的.

4.2 DART 性能评估

首先评估 DART 性能随着网络规模和节点速度的变化而变化的情况.图 5 是 DART 在不同移动速度下数据包送达率随网络节点规模变化的情况.可见送达率在这些场景下始终能够保持在 95% 以上.不论是节点规模还是移动速度对送达率的影响都不显著,尤其在节点规模大于等于 100 以后的较高密度网络下有更好的送达率.由此可见 DART 在高移动场景下具有很好的数据送达率,且随着网络节点规模的增加,显示出良好的扩展适应性.

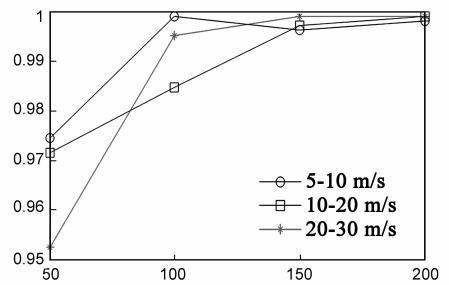


图5 DART 送达率在不同移动速度下随网络节点规模的变化趋势

接着,我们将 DART 和 AODV^[4]以及 MORRP^[10]的性能进行比较.在模拟实验中,AODV 已经被修改为利用有向天线进行工作.AODV 路由发现的广播包在节点的所有有向天线上发送,但是其单播包只在具有所需邻居的一个有向天线上发送.该修改能够使 AODV 也能利用有向天线的空间重用特性.MORRP 已经是一个利用有向天线的路由协议,在模拟实验中我们只需将 MORRP 的天线参数配置设为和 DART 相同即可.MORRP 的其他参数则根据文献[10]中的建议进行设置.我们主要比较了各协议在各个场景设置下的数据包送达率和路径长度.图 6 是各协议送达率的比较结果,可见 DART 比其他两个协议能够有更好的数据包送达率,并且随着节点移动速度的增加 DART 优势更加明显.AODV 随速度增加送达率下降最明显,MORRP 送达率随速度变化没有 AODV 明显,但仍然明显落后于 DART.图 7 是各协议成功送达的数据包路由经过的路径长度比较,可见相比其他两个协议,DART 的路径长度较大.这是由两方面因素导致的:一方面,DART 在没有明确方向信息时使用随机方向的方式可能使得路由路径变长;另一方面,DART 有更高的送达率,一些在其他协议中不能被成功送达的数据包在 DART 下能够经过较曲折的路径送达.由于高速移动场景下网络的连通性和数据包的送达率对网络性能有较大影响,牺牲较少的路径长度性能(平均 1-2 跳)而获得较好的送达率性能是值得的.另外注意到 MORRP 的送达率和路径长度都要比文献[10]中的结果要低,这是由于我们考虑了节点的旋

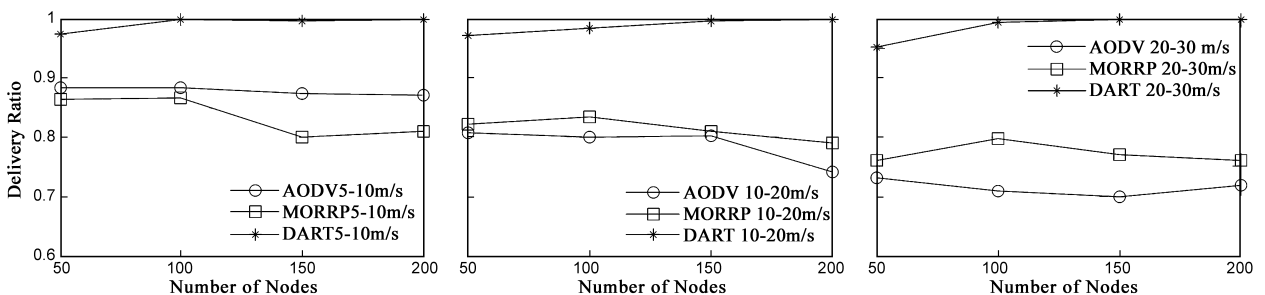


图6 各协议在不同速度下数据包送达率随网络节点规模变化的曲线比较

转效应而 MORRP 没有考虑,因此结果变差.

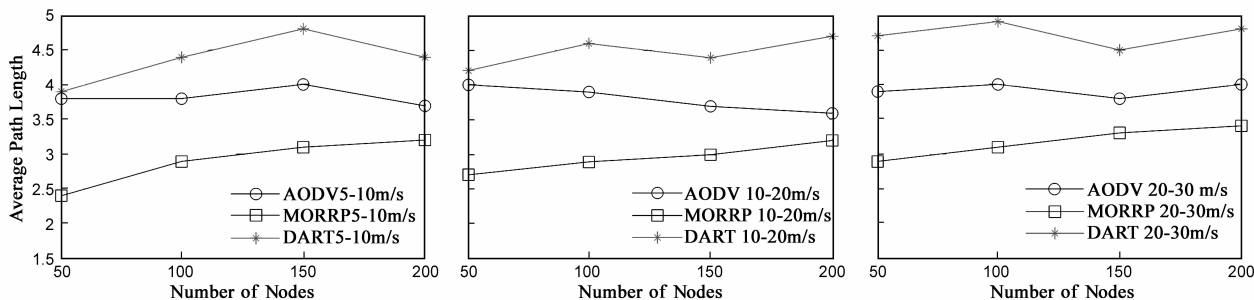


图7 各协议在不同速度下路由路径长度随网络节点规模变化的曲线比较

5 总结和展望

本文介绍了一个适用于高速移动场景的无线自组织网络路由协议——DART.该协议利用有向天线,基于方向信息来路由传递网络包.不同于传统的路由协议,DART不再依赖于源节点和目的节点间的精确路径来传递数据包,无需维护精确的路由,降低了高速移动引起的拓扑变化对性能的影响.在DART协议中,方向缓存信息主要用于数据包离目的节点较远时的路由,而方向吸引结构负责离目的节点较近时的路由,两种机制信息互相协作使得DART能够有效的的工作.DART的控制消息开销为 $\Theta(N)$,路由信息存储开销为 $\Theta(N^{\frac{3}{2}})$,都不随移动速度变化.以上特性使得DART在高速移动场景下有稳定的送达率和良好的扩展性,但是由于其非最短路径路由的特性,使得路由路径长度稍有增加.

参考文献

- [1] E P Charles, B Pravin. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM[C]. New York, USA: ACM, 1994, 24(4): 234 – 244.
- [2] T Clausen, P Jacquet. Optimized link state routing protocol (OLSR)[A/OL]. <http://tools.ietf.org/html/rfc3626>.
- [3] D Johnson, D Maltz, J Broch, et al. DSR: the dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks[J]. Ad hoc networking, 2001, 5: 139 – 172.
- [4] C E Perkins, E M Royer. Ad-hoc on-demand distance vector routing[A]. Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications[C]. New Orleans, LA, USA, 1999. 90 – 100.
- [5] B Karp, H Kung. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[A]. Proceedings of ACM MOBICOM[C]. New York, USA: ACM, 2000. 243 – 254.
- [6] B Nabendra, A A Alhussain. Capacity deficit in mobile wireless ad hoc networks due to geographic routing overheads[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. Anchorage, AK, USA, 2007. 517 – 525.
- [7] A Nasipuri, J Mandava, H Manchala, et al. On-demand routing using directional antennas in mobile ad hoc networks[A]. Pro-

ceedings of the 9th Conference on Computer Communications and Networks[C]. Las Vegas, NV, USA, 2000. 535 – 541.

- [8] H Gossain, T Joshi, et al. A cross-layer approach for designing directional routing protocol in manets[A]. Proceedings of WCNC[C]. New Orleans, LA, USA, 2005. 4: 1976 – 1981.
- [9] BN Cheng, M Yuksel, S Kalyanaraman. Orthogonal rendezvous routing protocol for wireless mesh networks[J]. Transactions on Networking, 2009, 17(2): 542 – 555.
- [10] BN Cheng. Using directionality in wireless routing[D]. Rensselaer Polytechnic Institute, 2008.
- [11] B H Bloom. Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors[J]. Communications of the ACM, 1970, 13(7): 422 – 426.
- [12] S C Rhea, J Kubiawicz. Probabilistic location and routing [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. New York, USA, 2002, 3: 1248 – 1257.
- [13] A Kumar, J Xu, E W Zegura. Efficient and scalable query routing for unstructured peer-to-peer networks[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. Miami, FL, USA, 2005. 2: 1162 – 1173.
- [14] U G Acer, S Kalyanaraman, A A Abouzeid. Weak state routing for large-scale dynamic networks[J]. Transactions on Networking, 2010, 18(5): 1450 – 1463.
- [15] The network simulator: ns – 2[OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

作者简介



赵 通 男, 1977 年生于浙江金华. 北京大学信息科学技术学院博士. 研究方向为网络协议设计、网络性能分析、无线网络和移动计算.

E-mail: zt@net.pku.edu.cn

严 伟 女, 1961 年生于江苏昆山. 北京大学信息科学技术学院副教授. 研究方向为网络体系结构, 网络协议设计和性能分析, 无线网络, 移动计算.

E-mail: yanwei@net.pku.edu.cn