

非辅助无线移动自组织网络定向邻居发现算法^①赵瑞琴^② 岳 明 申晓红 王海燕

(西北工业大学 西安 710072)

摘 要 考虑到在无线移动自组织网络中采用智能天线或定向天线能够有效增加网络容量与网络安全性,减小能量消耗,针对采用定向天线进行数据收发的无线移动自组织网提出了一种非辅助的邻居发现算法。该算法能够独立地发现那些只有通过定向收发才能到达的邻结点,且不需依赖时间同步或者结点位置等信息。该算法利用结点定向发全向收与定向收定向发时的射程之间的关系,通过容易发现的定向发全向收范围内的邻结点去发现定向收定向发范围内的邻结点。该算法将邻居发现与路由机制结合起来,减小了进行邻居发现所带来的开销和能耗。最后通过仿真验证了所提算法的有效性。

关键词 邻居,发现,移动,自组织,网络

0 引 言

研究发现,无线移动自组织网(mobile ad hoc networks, MANET)的网络容量的提高受到其物理层使用全向天线进行数据收发的限制。这种全向传输不仅给邻结点带来干扰,使得信号更容易被干扰和窃听^[1],而且减小了一跳距离。在 MANET 中使用定向天线能克服全向天线所带来的不足^[1,2],能有效增加单跳传输的距离、减小能耗和干扰、提高空间复用度,从而能显著增大 MANET 网络容量。然而,那些适应于采用全向天线的传统 MANET 的各层机制必须作相应的修改^[1-8]。本文对邻居发现的机制及算法进行了研究,因为这种机制是采用定向天线的 MANET 能够正常工作的前提。为了进行有效通信,在采用定向天线的网络中,结点必须依赖定向邻居发现(directional neighbor discovery, DND)算法获取其邻结点的 ID 以及每个邻结点相对于该结点的方位。为此,本文为采用定向天线的 MANET 提出了一种新的非辅助定向邻居发现(unaided DND, UDND)算法。该算法不依赖网络以外的任何辅助信息,其独立性和抗毁性大大优于 DND 算法。

1 相关知识

当收发结点的天线分别采用定向和全向两种不同的工作方式时,可以得到 4 种不同通信模式^[2]:定向发全向收(directional transmission and omni-directional reception, DTOR)模式、全向发定向收(omni-directional transmission and directional reception, OTDR)模式、定向发定向收(directional transmission and reception, DTR)模式以及全向发全向收(omni-directional transmission and reception, OTR)模式。令不同通信模式下收发结点之间可以进行有效通信的最大距离为该模式下的通信射程 r 。在某一种通信模式下,以结点为圆心、以通信射程 r 为半径的圆形区域内的所有结点组成该结点在该模式下的邻结点集合。通信射程 r 不同,每个结点的邻结点集合就不同。这 4 种模式下, DTR 模式的通信射程最大,因而 DTR 模式下的邻居发现难度也最大。

依据对 GPS 或其它信息的依赖性, DND 可分为辅助 DND 和非辅助 DND。文献[2]提出了一种称为收发波束形成(transmission and receiving beam-forming, TR-BF)的 DTR 邻居发现算法,该算法利用 GPS 时间来获得 MANET 全网同步,在全网同步的

① 国家自然科学基金(51249005),国家重大科技专项(2008ZX050206-001-06),高等学校博士学科点专项科研基金(20106102120013)和西北工业大学基础研究基金(NPU-FFR-JCY20130107)资助项目。

② 女,1981 年生,博士,讲师;研究方向:无线 ad hoc 与 sensor 网络;联系人, E-mail: rqinzhao@gmail.com (收稿日期:2012-07-12)

条件下发现 DTR 邻结点,通过周期性发送控制信息来克服结点移动带来的影响。基于轮询的 DTR 邻居发现算法^[3]也要求结点之间的精确同步,通过将时间分成连续的帧,每一帧中分配专门的时隙用于邻居发现。文献[4]给出了在一个与基于轮询的 DTR 邻居发现算法类似的基于时分多址接入(TDMA)的 DTR 邻居发现算法。一方面,现已提出的 MANET 的定向邻居发现算法大都仅支持 DTOR 通信模式;另一方面鉴于 DTR 邻居发现的难度较大,现存的 DTR 邻居发现算法均需依赖诸如来自 GPS 或其他设备的结点位置或者时间同步等辅助信息,都属于辅助 DND。

上述这些邻居发现机制在没有辅助信息的特定应用环境下就会瘫痪,特别是在军事应用环境下。为此,我们针对 DTR 模式提出了非辅助 DND 算法——UDND 算法。UDND 算法不依赖网络以外的任何辅助信息,其独立性和抗毁性大大优于辅助 DND。另外由于 DTR 模式具有比 DT 模式更远的射程,UDND 算法能发现那些不能被 DTOR 邻居发现算法发现的更远的邻结点,因此,UDND 算法比一般的 DTOR 邻居发现算法更有意义。

2 问题描述

一个 MANET 网络可以用 $G = (V, E)$ 表示, V 是网络中所有结点的集合, E 为网络中所有定向链路的集合。 $\forall l \in E, l = (s_l, d_l, o_l)$, 其中 s_l 和 d_l 分别是定向链路 l 的头和尾结点, o_l 表示该链路相对于 s_l 的方向。定向天线通过 K 个互不重叠的波束去覆盖结点周围 360° 范围的区域, 设 $j \in [1, K]$ 为结点的某一波束, 分别用 $N_{DTOR}^{i,j}$ 和 $N_{DTR}^{i,j}$ 表示网络中的任意一个结点 i 在 DTOR 和 DTR 模式下 j 波束范围内邻结点的集合。令 N_{DTOR}^i 和 N_{DTR}^i 分别为结点 i 在 DTOR 和 DTR 模式下所有邻结点的集合, 则有:

$$\bigcup_{j \in [1, K]} N_{DTR}^{i,j} = N_{DTR}^i \quad (1)$$

$$\bigcup_{j \in [1, K]} N_{DTOR}^{i,j} = N_{DTOR}^i$$

在发射功率相等时有 $N_{DTOR}^i \subseteq N_{DTR}^i$ 。发现 N_{DTOR}^i 或完成 DTOR 邻居发现是比容易的, 可以通过让结点 i 全向的接收和其他结点定向广播 HELLO 分组来实现。故完成 DTR 邻居发现的难点在于发现属于 $N_{DTR}^i - N_{DTOR}^i$ 的结点。

3 非辅助定向邻居发现算法

非辅助定向邻居发现(UDND)算法首先通过利用 DTR 与 DTOR 两种通信模式射程之间的关系, 通过容易发现的 DTOR 邻结点去发现 DTR 邻结点, 这保证了 UDND 的非辅助性。其次采用跨层设计的思想将邻居发现与路由结合在一起, 邻居发现在路由协议执行的过程中同时完成。UDND 可以与各种 MANET 路由机制结合, 由于不同的路由机制具有各自适应的不同的应用场景, 这使 UDND 成为一个场景自适应的 DTR 邻居发现算法。

3.1 系统模型

定向天线采用如图 1 所示的波束切换天线^[9], 天线可以在 K 个不同波束之间随意切换, 但同一时间结点只能使用其中的一个波束进行定向发送或接收。

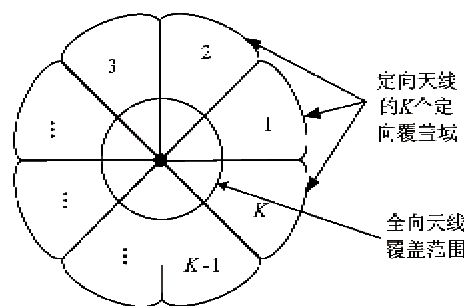


图 1 天线模型

收。定义 G_o 与 G_d 分别为全向天线和定向天线的增益; P_T^{DTOR} 和 P_T^{DTR} 分别是 DTOR 和 DTR 模式下的发射功率; d_{DTOR} 与 d_{DTR} 分别为 DTOR 和 DTR 通信模式下的最大射程; λ 是信号的波长。当信号的发射功率为 P_T , 传播距离 d 后到达接收端的功率 P 可表示为

$$P = \frac{P_T G_T G_R}{(4\pi d)^2 \lambda^2} \quad (2)$$

其中 G_T 是发射天线增益, G_R 是接收天线增益。当接收功率 P 等于最小接收功率 P_R 时, d 为收发结点之间的最大射程, 用式

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_T}{P_R}} \sqrt{G_T G_R} \quad (3)$$

表示。

利用式(3)我们可以得出 DTOR 和 DTR 两种模式下各自的最大射程:

$$d_{DTOR} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_T^{DTOR}}{P_R}} \sqrt{G_D G_O} \quad (4)$$

$$d_{DTR} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_T^{DTR}}{P_R}} \sqrt{G_D G_D}$$

用 d_{DTR} 与 d_{DTOR} 的比值反映两者的关系:

$$\frac{d_{DTR}}{d_{DT}} = \sqrt{\frac{P_T^{DTR} G_D}{P_T^{DTOR} G_O}} \quad (5)$$

令 $n = d_{DTR}/d_{DTOR}$ 。若 n 为正整数,则结点的 1, 2, ..., n 跳 DTOR 邻结点均为该结点的 DTR 邻结点。UDND 利用 d_{DTR} 与 d_{DTOR} 之间的关系通过已经发现的 DTOR 邻结点去发现更重要和更难以发现的 DTR 邻结点。由式(5)可得,在 G_O 和 G_D 确定的条件下,通过调整 DTOR 和 DTR 两种模式下的发射功率可使得 n 为正整数。

3.2 利用分组搭载完成定向邻居发现

定理:给定一个链路,结点在该链路上分别发送两个分组的所需能量大于结点将这两个分组一次发送出去所需的能量。

证明:采用式(3)所示的能量模型^[10],结点发送长度为 D 个字节的分组所需的能量 $E(D)$ 为

$$E(D) = K_1 D + K_2, (K_1 > 0, K_2 > 0) \quad (6)$$

其中 K_1 与 K_2 取决于 MAC 层与物理层的一些参数(如 MAC 头长度、信道基本速率等),与分组长度 D 无有关。

令 D_1 和 D_2 分别为这两个分组的长度,由式(6)可得

$$E(D_1 + D_2) < E(D_1) + E(D_2)$$

证毕。

在采用定向天线的 MANET 中,邻居发现是为每个结点发现和维持到其所有邻节点的“路径”,邻节点之间仅有一跳,这里的“路径”指邻节点之间通信所占用的波束方向;而 MANET 路由机制是为节点发现和维持到网络中所有其他节点之间的路由。因此从发现和维持路径的意义上讲,邻居发现与路由选择的工作机理是相似的,都是为结点间正确的数据通信服务的。为此,UDND 通过将用于邻居发现的 HELLO 分组搭载到 MANET 路由控制分组中,将定向邻居发现与 MANET 路由结合起来,使邻居发现在获取和维持路由的过程中完成。鉴于不同的 MANET 路由适用不同的场景,UDND 中定向邻居发现可以与各种不同的路由机制结合起来,这使得 UDND 成为一个场景自适应的邻居发现算法。由定

理可知搭载会减小网络总能耗,这种利用搭载和跨层设计的思想使 UDND 成为一个节能、高效的邻居发现算法。

3.3 UDND 算法描述

在邻居发现算法执行过程中,结点空闲时,进行全向接收;有控制分组要发送时,结点定向地将其发送出去。每个结点通过 K 个互不重叠的波束覆盖其定向影响区域,波束编号分别为 1, 2, ..., K 。在广播分组时,结点用其定向天线依次在各个波束方向上发送广播分组。

UDND 可以与任意一种 MANET 路由结合,在下文中,我们以按需距离向量(AODV)路由为例,结合图 1 对 n 为 2、 K 为 6 时的 UDND 进行描述。UDND 仅为有数据要发送的结点及其所选路径上结点维护所需 DTOR 和 DTR 邻居结点信息,这使得 UDND 具有少的能耗和控制开销。

UDND 中用于邻居发现的 HELLO 分组可以表示为 $(j, s, N_{DTOR}^{s,k})$, 其中 j 为该分组被定向发送出去时采用的波束方向, s 是发送结点的 ID, $N_{DTOR}^{s,k}$ 为结点 s 在波束方向 k 上所有 DTOR 邻结点组成的集合,波束方向 k 为方向 j 的相反方向。

假定在图 2 所示的网络中结点 S 有数据发往结点 D,并且没有到达 D 的有效路径,这时 S 会通过泛洪一个路由请求(RREQ)分组来触发路由发现过程,这里的 RREQ 中携带有 HELLO 分组。结点 A 在 S 的编号为 1 的波束方向上,当它收到来自 S 的 HELLO 分组(包含在 RREQ 中)时,结点 A 认为其发现了一个在波束方向 4 上的 DTOR 邻结点 S。同时, A 将邻结点 S 和 $N_{DTOR}^{S,4}$ 内所有结点列入其波束方向 4 上的 DTR 邻居列表,其中 $N_{DTOR}^{S,4}$ 取自 A 收到的 S 的 HELLO 分组 $(1, S, N_{DTOR}^{S,4})$, 在图 2 所示拓扑中 $N_{DTOR}^{S,4}$ 为空集。按照 AODV 路由发现的要求,在 A 没有到达 D 的路由的情况下对 RREQ 进行转播(收到分组后对其进行广播),在转播之前 A 按照上述

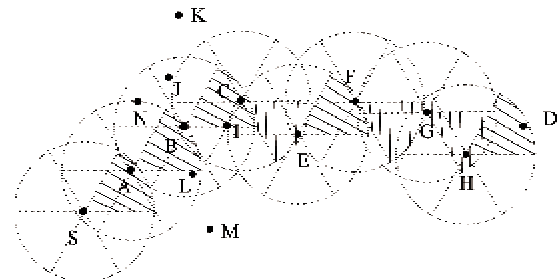


图 2 路由发现获取的 S 到 D 之间的路径

对 $(j, s, N_{DTR}^{s,k})$ 内各个变量的定义对其中的 HELLO 分组进行相应修改。

结点 A 在转播 RREQ 的过程中, 当其天线指向波束方向 1 时 HELLO 分组为 $(1, A, N_{DTR}^{A,1})$, $N_{DTR}^{A,1}$ 为结点 A 在波束方向 1 (波束方向 1 的反方向) 上的所有 DTR 邻结点的集合, 这里 $N_{DTR}^{A,1} = \{S\}$ 。这样收到 A 转播来的 RREQ 时结点 B 不仅发现了 DTR 邻结点 A (即 $A \in N_{DTR}^{B,4}$), 而且发现了 DTR 邻结点 S, 且 $S \in N_{DTR}^{B,4} - N_{DTR}^{A,1}$ 。由于在路由发现过程中, 在没有获取到达 D 的路径之前, MANET 中的所有收到 RREQ 的结点都要对 RREQ 转播, 对 RREQ 的泛洪结束后这些结点均发现了其 DTR 邻结点和该结点上游方向 (到源结点 S 的方向) 的 DTR 邻结点。

当目的结点 D 或者其他有到 D 的路径的结点收到 RREQ 后, 会向 S 发送一个路由回应 (RREP) 分组并将 HELLO 分组搭载其中。RREP 到达 S 时, S 获得了一条到达目的 D 的最新路由如图 2 所示, 且该路径上所有结点均获得了下游方向 (到目的结点 D 的方向) 的 DTR 邻结点。为此当邻居发现结束时, 不仅获取了最新的源到目的路径, 该路径上所有结点均获取了完成该路径上分组传输所需的所有 DTR 与 DTR 邻结点信息, 即同时完成了按需的路由和按需的定向 DTR 与 DTR 邻居发现。

在上述的路由发现过程中获取的 DTR 和 DTR 邻居信息会在路由维护的过程中得到更新。另外鉴于 d_{DTR} 大于 d_{DTOR} , 利用 DTR 邻结点可以实现 MANET 路由维护过程中的本地修复, 增加网络连通性减小路由维护的开销。若图 2 中由于结点 G 的移动使得 S 到 D 的路径断开, 这时结点 H 和 F 会发现其到 G 的链路断开, 它们将 G 从其 DTOR 和 DTR 邻结点列表中删除然后进行本地修复。在本地修复过程中, H 和 F 察看各自的 DTOR 和 DTR 邻居列表发现它们通过 DTR 传输模式可以直接到达对方, 接着它们分别将其天线定向指向对方建立其

间的 DTR 链路继续进行数据传输, 进而完成路由中断的本地修复。如果 H 和 F 之间不存在 DTR 或 DTOR 链路, 本地修复就会失败, 这时 RERR 被发送出去以进行路由维护和更新, UDND 将路由断开而引起的邻居信息的变化包含在 RERR 中实现对邻居信息的维护和更新。

4 性能分析

笔者通过 OPNET 对 UDND 进行了大量的仿真试验。仿真中用 AODV 作为 MANET 路由协议, MAC 层采用 IEEE802.11 协议。让 50 个 MANET 结点在 $1500\text{ m} \times 1500\text{ m}$ 的仿真区域内随机的移动, 移动过程中的停留时间 (pause time) 取为 0s, 50s, 100s 或者 200s, 其中停留时间反映结点的移动性, 其值越小结点的移动性就越强。仿真中, 在网络中最大源宿连接数 (MaxCon; max connections) 分别为 5, 10, 15 和 20; 每个业务源的分组产生速率 (PktRt; packet rate) 为 4 packets/s 或 8 packets/s, 仿真持续时间为 500s。仿真的目的是为了研究邻居发现算法的开销和能耗。开销是指完成定向邻居发现过程中产生的控制分组的总数目, 能耗是指完成邻居发现的所消耗的总的电量。考虑到 TB-BF^[2] 算法是目前经过试验验证且性能优越的经典 DTR 定向邻居发现算法, 笔者选择将 UDND 与 TB-BF 进行性能对比。TB-BF 通过让每个结点周期性的发送信标来实现 DTR 邻居发现, 仿真中其发送周期设为 5s (周期固定使得 TB-BF 的开销与能耗均固定)。图 3 给出了不同移动性和不同网络负荷的条件下邻居发现算法的开销, 可以看出, 在各种情形下 UDND 的开销要低于 TB-BF。因为 UDND 仅为有数据要传输的结点及其路径上相关结点发现和维持邻居信息, 而 TB-BF 却要网络中每个结点周期性的发现和维持邻居信息。

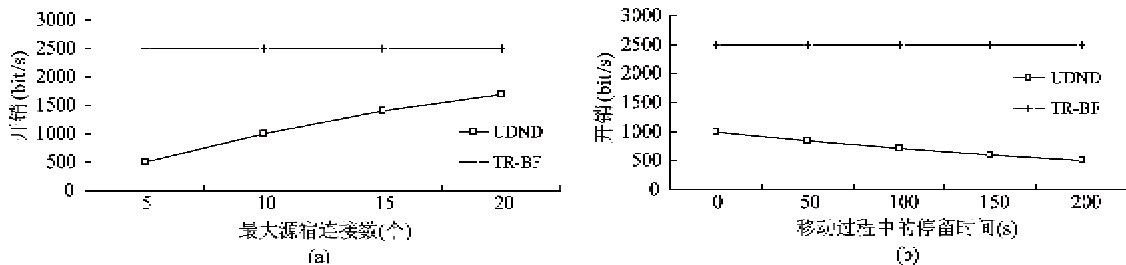


图 3 控制开销对比图

图4给出了不同移动性与不同网络负荷时 UDND 与 TR-BF 的能耗对比关系图,很显然在各种情形下 UDND 的能耗均小于 TR-BF。一方面,UDND 算法的简单性和少的控制分组会减小其能量消耗;另一方面,将邻居发现与 MANET 路由结合的设计也减小了 UDND 的能耗,因为邻居发现控制分组被搭载到路由控制分组中,定理已证明了这种搭载对减小能耗的意义。UDND 是第一种利用搭载

思想的 MANET DTR 邻居发现算法,其他算法如 TR-BF、基于轮询的 DTR DND、基于 TDMA 的 DTR 邻居发现等,均将邻居发现控制分组周期性单独发送,进而能比 UDND 给 MANET 带来更多的开销和能耗。需要指出的是图4中纵坐标为相同条件下 UDND 所消耗的能量与 TR-BF 所消耗能量的比值,为此并没有显式地给出 TR-BF 的曲线。

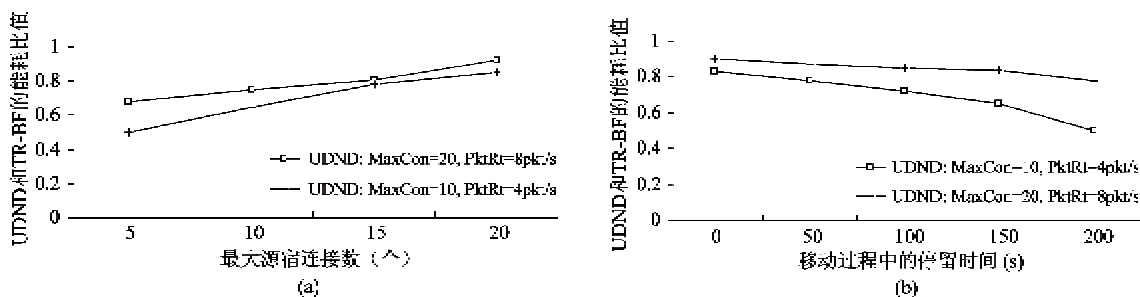


图4 能耗对比图

5 结论

研究发现,在 MANET 中使用定向天线能有效增加单跳传输的距离、减小干扰、提高空间复用度,从而能显著增大无线多跳网络的网络容量。本文为采用定向天线的 MANET 提出了一种新的定向邻居发现算法——UDND 算法,该算法能够在不依赖 GPS、时间同步等措施的条件下为 MANET 发现 DTOR 和 DTR 邻结点。UDND 首先利用 DTR 与 DTOR 两种通信模式射程之间的几何关系,通过容易发现的 DTOR 邻结点去发现 DTR 邻结点,这保证了 UDND 的非辅助性。其次采用跨层设计的思想将邻居发现控制分组搭载到路由控制分组,邻居发现在路由协议执行的过程中同时完成。仿真结果表明在移动结点大都靠电池供电的环境下,相比较其他定向邻居发现算法,UDND 算法能够以较小的控制开销和较低的能耗完成 MANET 的定向邻居发现。本文提出的方法充分利用定向天线为 MANET 带来的优势,在独立完成定向邻居发现的同时,能够与各种 MANET 路由机制结合起来,由于不同的路由机制具有各自适应的不同的应用场景,这使 UDND 算法成为一个场景自适应的 DTR 邻居发现算法。

参考文献

- [1] Xiong W, Liu B, Gui L. Neighbor discovery with directional antennas in mobile ad-hoc networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Global Communications, Houston, USA, 2011. 1-5
- [2] Ramanathan R, Redi J, Santivanez C, et al. Ad hoc networking with directional antennas: a complete system solution. *IEEE Journal on Selected Area in Communication*, 2005, 23(3): 496-506
- [3] Jakllari G, Luo W, Krishnamurthy S. An integrated neighbor discovery and MAC protocol for ad hoc networks using directional antennas. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, Taormina, Italy, 2005. 11-21
- [4] Zhang Z. Pure directional transmission and reception algorithm in wireless ad hoc network with directional antennas. In: Proceedings of the International Conference on Communication, Seoul, Korea, 2005. 3386-3390
- [5] Gossain H, Joshi T, Cordeiro C, et al. A cross-layer approach for designing directional routing protocol in MANETs. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans, USA, 2005, 1976-1981
- [6] Park J, Cho S, Sanadidi M Y. An analytical framework for neighbor discovery strategies in ad hoc networks with sectorized antennas. *IEEE Communications letters*, 2009, 13(11): 832-834
- [7] Zhao R, Wen A, Liu Z, et al. A trustworthy neighbor

- discovery algorithm for pure directional transmission and reception in MANET. In: Proceedings of the International Conference on Advancements in Computing Technology, Seoul, Korea, 2007. 926-930
- [8] 赵瑞琴,文爱军,刘增基等. 有效支持智能天线的 MANET 邻结点发现算法与分析. 西安电子科技大学学报,2007,34(3): 342-347
- [9] Chryssomallis M. Smart antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000, 42(3): 129-138
- [10] Doshi S, Brown T X. Minimum energy routing schemes for a wireless ad hoc network. In: Proceedings of the International Conference on Computer Communications, New York, USA, 2002. 1-11

An unaided directional neighbor discovery algorithm for mobile ad hoc networks

Zhao Ruiqin, Yue Ming, Shen Xiaohong, Wang Haiyan
(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract

Considering that in mobile ad hoc networks, smart antennas or directional antennas can be utilized to improve the networks' capacity and security and achieve the energy consumption reduction, this paper presents an unaided directional neighbor discovery (UDND) algorithm for the mobile ad hoc networks with the directional antennas being used for data transmission and reception. With the UDND algorithm, the neighbors that can be reached only when both the transmission and reception are directional can be discovered independently without the requirement of synchronization or position information of the networks. Based on the relation of the communication range of the directional transmission and omni-directional reception (DTOR) mode to that of the directional transmission and reception (DTR) mode, the new algorithm can discover neighbors of the directional transmission and reception (DTR) mode by using the DTOR mode neighbors that can be discovered very easily. It integrates directional neighbor discovery with routing, thus reducing the overhead and energy consumption. The proposed algorithm is verified through simulations.

Key words: neighbor, discovery, mobile, ad hoc, network