

抗干扰自组网路由中定向波束的调度及性能研究

王 杉^{1,2} 庄钊文¹ 王建新² 魏急波¹

摘 要 介绍了一种基于位置信息对定向天线传输方向进行控制与调整的调度策略. 在低算法复杂度的基础上, 利用波束集中特性, 改善了分组递交率、吞吐量、时延以及开销等性能, 提升了自组织网络的抗干扰能力. 仿真结果验证了该调度机制的有效性, 同时表明, 不同的路由协议由此所获得的性能改善存在较大的差异.

关键词 抗干扰自组织网络, 定向天线, 波束形成, 路由调度
中图分类号 TP393

Research on the Scheme and Performance of Anti-jamming *ad hoc* Networks Routing Using Directional Beams

WANG Shan^{1,2} ZHUANG Zhao-Wen¹ WANG Jian-Xin²
WEI Ji-Bo¹

Abstract A scheme by means of position information provided by localizer is presented and used to adjust the directivity of directional antennas with lower realizable complexity. Converged beams can upgrade the anti-jamming capacity of *ad hoc* networks by improving performance of delivery, throughput, delay and overhead. Detailed simulations explain the availability of this mechanism, and also results show that different routings with directional beams have different behavior.

Key words Anti-jamming *ad hoc* networks, directional antenna, beam-forming, routing scheme

1 引言

移动 *Ad hoc* 网络工作在一种信道共享、多跳中继的无线环境中, 使用全向天线传输, 不仅容量受限^[1], 而且在传输过程中, 无线信号易被监听和干扰. 这种干扰来源于两个方面: 外部的恶意干扰以及网络节点间信号的相互干扰 (例如隐终端和暴露终端等问题). 在此情况下, 定向天线的引入可以有效的解决这些问题. 相比于全向天线, 定向天线将能量更多的集中在所期望的传输方向上, 一方面提高了网络的空间复用度, 使得系统吞吐量可以显著的提升, 同时节点的有效覆盖距离也获得了扩展, 链路连通的生存时间得到了延长; 另一方面, 定向天线对来自各个方向的波束进行空间滤波, 调整天线元的输出激励, 将零点或旁瓣波束对准干扰方向, 因此信号被干扰或截获的概率明显降低, 由此节点间产生的相互干扰以及系统的安全性都得到了显著改善, 网络抗干扰能

力增强.

定向天线应用于 *Ad hoc* 网络的早期研究, 较多的集中在物理层上的能量控制与波束形成方面, 在此之后, 链路层协议的邻节点发现机制以及多址接入方式中采用了定向传输控制, 这部分研究工作主要是基于 CSMA/CA 技术在定向天线系统中的扩展^[2~6]. 定向天线应用于路由协议的研究主要集中在可选波束天线应用于反应式路由的情况^[2,7~9], 这些文献中, 天线的方向性计算大多基于 DOA (Direction of arrival) 的方式, 而定向天线调度的复杂性主要体现在波束方向的计算上, 利用位置信息可以有效的降低波束方向计算的复杂度.

2 基于位置的方向性计算

调整定向天线的波束方向一般有两种方式: 一种是通过 DOA 算法对所接收到信号的能量 (幅度)、相位等信息进行处理, 计算出发送天线的方位, 并以此调整天线的波束方向. 其优点在于可以脱离附加硬件的支持, 通过信号处理算法对接收到的信号进行分析和提取. 由于接收天线收到的是空间某一点处所有信号以及噪声能量的叠加与综合, 所以 DOA 算法的实现需要考虑的因素和处理流程都较为复杂, 有时为了提高计算的精确度, 还需要天线阵列的支持. 另一种方式就是利用 GPS 或其他定位技术获取通信节点之间的位置信息, 从而计算出节点之间的相对方位并以此校正天线的收发方向. 不失一般性, 简化起见, 假设系统采用可调波束的定向天线, 并且网络中节点分布于同一平面上, 节点 N_i 与 N_j 是通信链路上相邻的两个节点, 坐标分别为 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) , ϕ 表示发送点天线的方位角, 因此有 $\phi = \arctan\{(y_j - y_i)/(x_j - x_i)\}$.

考虑到节点分布的随机性和移动性, 需要注意两种情况:

- 1) 节点 N_j 与 N_i 位于同一纵向线上;
- 2) 节点 N_j 位于 N_i 左侧时的方位角计算.

对于第一种情况, 在计算方位角前计算 $x_j - x_i$ 的值, 若为 0, 则直接判断 $y_j - y_i$ 的极性: 当 $y_j > y_i$ 时, 天线的方位角调整为 $\frac{\pi}{2}$, 否则为 $\frac{3\pi}{2}$; 当不为 0 时, 在计算方位角 ϕ 后还需判断 $x_j - x_i$ 的极性, 若为负值, 则说明是第二种情况, 此时调整天线的方位角应该为 $(\pi + \phi)$. 因此可调整的天线方位角范围为 $(-\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}]$.

利用节点的位置信息, 不仅可以快速的计算出天线的波束指向, 而且很容易得知链路中相邻节点的距离变化, 并作出相应的预测判断, 这对链路的稳定性以及 QoS 等有着非常重要的影响. 在提出的调度算法中, 将节点之间的距离作为链路有效性的判断依据, 显著提高了链路连通的稳定性和分组递交率, 进一步增强了系统的抗干扰能力.

3 基于定向天线的路由调度

定向通信的基本特征是在正确的方向上功率增大、覆盖范围提高; 在旁瓣方向上耗能较少、空间利用率提高. 利用这个特点, 在 *Ad hoc* 路由机制中通过合理的调整天线的传输方向, 并根据网络地址及所传输报文的类型确定适当的传输方式, 合理调用定向天线, 可以有效的提高系统吞吐量、时延等性能. 天线的波束方向在报文传输开始之前, 可以通过节点的位置信息确定. 考虑到时延性能以及算法实现的复杂度, 仅对单播报文采用定向传输的方式, 而广播报文则采用全向天线发送.

收稿日期 2006-1-4 收修改稿日期 2006-7-1
Received January 4, 2006; in revised form July 1, 2006
国家重点实验室预研基金 (51434160103JB0201), 国防科技重点实验室基金 (51435050105KG0102) 资助
Supported by the Advanced Research Fund of National Key Lab (51434160103JB0201) and the National Key Laboratory Fund of Defense Technology (51435050105KG0102)
1. 国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073 2. 中国电子设备系统工程公司研究所 北京 100039
1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073 2. Institute of China Electronic System Engineering Corporation, Beijing 100039
DOI: 10.1360/aas-007-0775

研究的重点是定向天线在路由机制中的调度和性能影响, 所以对接入控制算法是否采用定向的方式并没有作出具体规定. 为了不受 MAC 及其他层协议的影响, 调度策略中并没有采用文献 [6] 中提出的 DMAC、MMAC 等带有定向传播控制的接入算法, 而是使用 IEEE 802.11 DCF 协议. 设计过程中, 定向波束的调度并没有针对具体的路由策略, 所以可灵活的作为中间件添加于网络层与 MAC 层之间, 算法流程如图 1 所示.

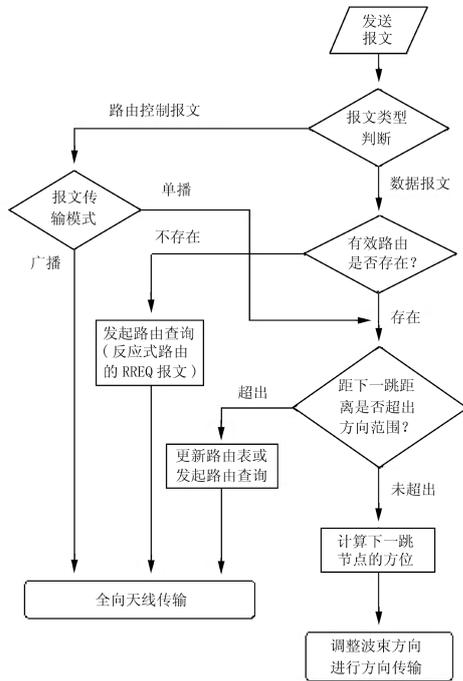


图 1 采用定向波束的调度流程

Fig. 1 The scheme using directional beams

步骤 1. 首先判断所要处理报文的类型, 如果是用户数据, 进入步骤 2; 如果是路由控制报文, 例如路由表更新或查询状态信息等, 则直接分析其传输的目标地址, 如果是广播类型, 就以全向天线模式发送出去, 如果是类似于反应式路由机制中的应答报文 (RREP), 则跳到步骤 3.

步骤 2. 对于要发送的数据报文, 根据其目标地址检查是否存在可用的路径. 如果没有路径可用, 则发起路由查询, 这种情况只会发生在反应式路由中. 由于路由查询是一种广播报文, 所以可直接以全向天线的方式将其发送出去.

步骤 3. 根据已存在的路由路径获取下一跳节点的地址, 同时通过定位设备提供的位置信息, 计算这两个节点之间的相对距离是否位于定向传输的覆盖范围之内, 如果已超出该范围, 说明该条路径信息过期不可用, 需要更新路由表或重新发起路由查询. 这一步骤主要用于验证路径的有效性以及监测由于节点的移动造成的网络拓扑变化情况.

步骤 4. 对于符合传输距离限制的情况, 利用路径中相邻节点的位置信息计算天线波束的方位角, 据此调整现节点天线的发射方向. 对于拓扑结构较稳定的场景应用而言, 可以将该路径上所有节点的天线方向信息添加于报文头中, 这样可以简化后续工作, 进一步降低处理时延. 但是对于拓扑变化较快的情况, 为了不影响路由的分组递交率, 应该在路径中的每一个中间节点处进行相应的判断处理.

4 仿真结果和性能分析

利用 Qualnet 仿真器^[10], 分别对先验式和反应式路由协议在不同移动场景中的网络性能进行评估. 选择了两种典型的路由协议^[11]: 无线路由协议 (WRP) 和动态源路由协议 (DSR), 以此验证该调度机制对 *Ad hoc* 网络相关性能以及抗干扰能力的提升效果.

物理层采用 Two-Ray 传播模型, 载波频率为 2.4 GHz, 信道带宽 2 Mbps. 选择 Random-Waypoint 移动模型, 节点速度不超过 50 km/h, 拓扑变化的快慢程度通过控制移动的暂停时间来实现. 业务流采用 CBR 模型, 报文长度为 1024 字节, 30 个节点随机分布于 1 km×1 km 的地域范围内. 全向天线的有效覆盖半径为 250 m, 定向天线的波束宽度为 60°, 增益约为 10 dB, 传输距离提升了 77.8%. 仿真实验中, 分别对暂停时间为 0, 10, 30, 60, 100, 300 和 600 s 等情况下的吞吐量、传输时延、网络开销、链路稳定性以及分组递交率等性能进行评估, 结果如图 2 和图 3 所示 (见下页).

图 2 和图 3 中 Omni- 和 Dir- 分别表示采用全向天线和定向调度两种传输方式下, 相应路由协议的仿真性能. 结果表明, 无论是先验式还是反应式路由策略, 在定向波束调度的支持下, 其吞吐量以及平均分组递交率都得到了明显的改善, 这是因为定向波束的有限宽度在一定程度上提高了天线的空间复用度, 使得系统不再是单一的信道共享, 而且波束的有向性使得传输过程中节点之间的相互干扰减少, 信道接入的成功率提高, 因此这种方式可以很好的解决网络拥塞干扰问题. 另外由于定向天线的辐射半径增大, 节点的小范围移动仍然使其位于可相互通信的距离之内, 并不会立即造成原有链路的断裂, 这在反应式路由中非常重要, 图 3(c) 的仿真结果有效的说明了这点. 拓扑改变的减缓, 使得所建立的路由更加稳定, 因此在定向传输系统中, 节点移动以及传输距离的限制所造成的影响不再那么明显, 网络的抗干扰性能获得改善.

图 2(a) 和图 3(a) 显示出两类路由协议在开销性能的改进方面存在有较大差异. 在先验式路由中, 周期性的广播报文是其固定的一种开销, 因此 WRP 协议在两种天线模式下, 其网络开销甚至是传输时延并没有太大的改善. 但是对于反应式路由而言, 它的寻路机制是按需发起的, 当使用定向天线传输的时候, 一旦路由确定, 其链路的稳定性相对于全向天线提高了许多, 因此, RREQ 报文的重复概率降低, 网络开销大幅度减少.

仿真表明, 对于 *Ad hoc* 网络中不同的路由协议, 定向天线的应用所产生的性能影响存在有较大的差异, 但是其共性是由于定向波束增加了空间复用度, 可明显的提升网络吞吐量和分组递交率, 而且这种调度可以方便的加载于已有的路由策略中, 有效的提高网络抗干扰能力.

5 结束语

目前应用于无线 *Ad hoc* 网络的定向天线系统有很多种, 极大的提升了网络性能, 考虑到定位设备的普及, 而且路由机制对方向精度的要求并不是很高, 所以可采用基于位置信息的方式调整天线传输的波束方向, 并在网络层的路由中进行合理调度. 仿真结果表明了这种机制的有效性, *Ad hoc* 网络的多项性能得到改善, 抗干扰能力增强.

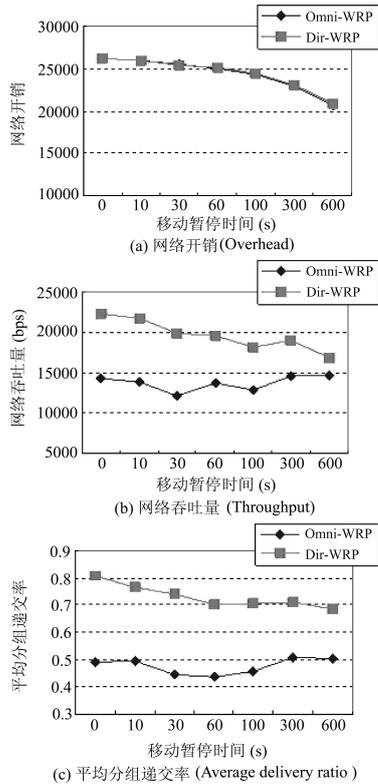


图 2 WRP 性能仿真结果

Fig. 2 Simulation results of WRP

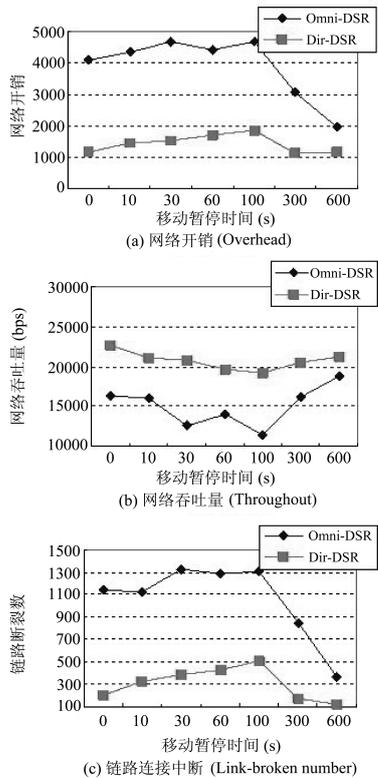


图 3 DSR 性能仿真结果

Fig. 3 Simulation results of DSR

References

- Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, **46**(2): 388~404
- Choudhury R R, Vaidya N H. *Ad Hoc Routing Using Directional Antennas*. University of Illinois at Urbana-Champaign: Coordinated Science Laboratory, 2002
- Ramanathan R, Redi J, Santivanez C, Wiggins D, Polit S. *Ad hoc networking with directional antenna: a complete system solution*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, **23**(3): 496~506
- Fahmy N S, Todd T D, Kezys V. *Ad hoc networks with smart antennas using IEEE 802.11-based protocols*. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2002. 3144~3148
- Takai M, Martin J, Ren A, Bagrodia R. Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile *ad hoc* networks. In: Proceedings of International Symposium on Mobile *Ad Hoc* Networking and Computing. Lausanne, Switzerland, 2002. 39~46
- Choudhury R R, Yang X, Ramanathan R, Vaidya N H. Using directional antennas for medium access control in *ad hoc* networks. In: Proceedings of Eighth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Atlanta, USA, 2002. 59~70
- Nasipuri A, Mandava J, Manchala H, Hiromoto R E. On-demand routing using directional antennas in mobile *ad hoc* networks. In: Proceedings of IEEE Ninth International Conference on Computer Communication and Networks. IEEE, 2000. 535~541
- Saha A K, Johnson D B. Routing improvement using directional antennas in mobile *ad hoc* networks. In: Proceedings of IEEE Global Telecommunication Conference. IEEE, 2004. 2902~2908
- Choudhury R R, Vaidya N H. *Impact of Directional Antennas on Ad Hoc Routing*. Berlin: Springer-Heidelberg, 2003. 590~600
- Scalable Network Technologies. Qualnet simulator [Online], available: <http://www.scalable-networks.com>, 2004
- Royer E M, Toh C K. A review of current routing protocols for *ad hoc* mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications*, 1999, **6**(2): 46~55

王 杉 博士研究生. 主要研究方向为移动自组网, 网络服务质量与无线局域网. 本文通信作者. E-mail: chinafir@nudt.edu.cn
(WANG Shan Ph.D. candidate. His research interest covers mobile *ad hoc* networks, QoS, and WLAN. Corresponding author of this paper.)

庄钊文 教授. 主要研究方向为目标识别, 信号处理与模糊信息系统.
(ZHUANG Zhao-Wen Professor. His research interest covers target recognition, signal process, and fuzzy system.)

王建新 研究员. 主要研究方向为自动化信息与通信系统.
(WANG Jian-Xin Professor. His research interest covers automation systems of information, and communication.)

魏急波 教授. 主要研究方向为移动通信, 信号处理与信息系统.
(WEI Ji-Bo Professor. His research interest covers mobile communication, signal process and information system.)