

一个基于图邻接矩阵模型的多跳 Ad Hoc 网络路由协议及网络性能分析^{*}

余根坚^{1,2} 郑宝玉¹

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)¹ (福州大学数学与计算机科学学院 福州 350002)²

摘要 在无线网络数学图论模型的基础上,提出了一个基于多跳邻接矩阵的无线 Ad Hoc 网络的路由选择协议(MRP)并和 DSBR 协议作了比较仿真分析,分析了信息传输的误比特率问题并提出了控制方案,以及分析了节点移动性对无线网络信干比(SINR)期望性能的影响并得出信干比期望性能随节点移动速度的增大而增大、随发射距离的增大而减小的结论。

关键词 无线 Ad Hoc 网络,路由算法,信息传播,网络性能,信干比,仿真

A Multi-Hop Graph Adjacent Matrix Model Based Routing Protocol for Wireless Ad Hoc Networks and Capacity Analysis

YU Gen-Jian^{1,2} ZHENG Bao-Yu¹

(Department of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003)¹

(Department of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350002)²

Abstract A multi-hop graph adjacent matrix based routing selective protocol(MRP) for wireless Ad Hoc networks was studied and compared with the DSBR protocol by simulating and analyzing. The Error Bit Ratio problem and its controllable scheme were presented and analyzed, additionally, the impact of node mobility on the expected capacity of SINR of the wireless networks was analyzed and resulted in the conclusions that the expected capacity of SINR would increase when the mobile node accelerated, and decrease when the transmission range extended.

Keywords Wireless ad hoc networks, Routing algorithm, Information transmission, Networks capacity, SINR, Simulation

1 引言

无线 Ad Hoc 网络是一个自组织、自启动的无线移动网络,它不需要中心基站的支持,没有固定的网络架构,是一种特殊的无线网络,其历史可追溯到 20 世纪 70 年代 DARPR 的无线分组网络研究计划,该计划的主要目的是在没有基础通信设施的军事对敌环境中为移动通信终端之间建立一个分组交换网络。随着无线技术的快速发展和无线设备价格的不断下调,以及信息家电的发展,无线 Ad Hoc 网络在民用通信领域有了巨大的应用空间,随着 IEEE 802.11 委员会正式采用该名称,使 Ad Hoc 网络有了商用的概念并使其进入了一个全新的研究发展阶段。无线移动 Ad Hoc 网络的一个重要特征是其无线信道的时变性,由于高大建筑物或远处高山等阻挡体的存在,常常会导致源节点发出的信号经过不同的传播路径而到达宿节点,即多径传播,加上节点的随机移动等原因,使得 Ad Hoc 网络的信道变得十分复杂,无线信道的时变性和复杂性对 Ad Hoc 无线网络的设计影响巨大,影响可从物理层的信号编码和能量控制到网络层的信号覆盖范围和蜂窝自动转接。分集是解决信道时变性的一个重要方法,其主要思想是通过在源节点和宿节点之间建立若干个独立的信号传输路径,从而提高网络性能。分集可通过下列方法而得到:时间上,在不同的时刻对源数字信号交错地插入字节码;频率上,如码分多址(CDMA)系统中的多路径整合;空间上,采用

多天线或多基站。不管使用何种方法的分集,都是基于点对点的通信链路,另外一种分集形式是多用户分集^[1],即在时变性衰落信道模型中的上行链路,多用户节点与主节点的通信中,始终将公共信道资源分配给能物尽其用的用户节点使用,以此途径来提高其总的系统吞吐量性能。

无线移动 Ad Hoc 网络有许多亟待解决的关键技术,其主要集中于路由协议、QoS(Quality of Service)服务体系、MAC(Medium Access Control)、安全问题、网络吞吐量性能等。其中路由协议的研究较早,由于 Ad Hoc 网络拓扑频繁变化的特点,已有的有线网络的路由协议并不适合 Ad Hoc 网络,因此,必须针对 Ad Hoc 网络的特点,研究新的路由协议。已有的 Ad Hoc 网络路由协议主要有三种:第一种是表驱动路由协议,它通过周期性地向网络中节点广播路由信息,如 DSDR(Destination Sequenced-Distance Distance-Vector Routing)^[2]、CHGSR(Cluster Head Gateway Switch Routing)^[3]、WRP(Wireless Routing Protocol)^[4]等。第二种是随选路由协议,它是在源节点需要的时候,临时搜索路由信息,如 AODVR(Ad Hoc On-demand Distance Vector Routing)^[5]、DSR(Dynamic Source Routing)^[6]等。第三种是基于支配集的路由算法 DSBR(Dominating Set Based Routing)^[7,8],不管使用哪种路由协议,都是在两个移动的可连接的主节点间寻找一条路由,由于 Ad Hoc 网络节点的移动性和网络拓扑频繁变化的特性,节点间的无线连接变得易于断

^{*}国家自然科学基金资助项目(No. 60372107)、江苏省博士创新基金项目(46666001)。余根坚 在职博士,主要研究方向,网络智能信息处理、无线网络、复杂网络;郑宝玉 教授、博士生导师,主要研究方向,网络智能信息处理、通信信号处理和无线网络。

裂,从而导致一些节点处于非连接状态,即导致整个网络的可达路径数目 CPN(Connective Path Number)减少,特别随着节点信息传输跳数(Hop)的增加,将使得 CPN 急剧减少,从而严重影响到 Ad Hoc 网络性能的提高。基于上述考虑,提出一个新的基于多跳图邻接矩阵模型的路由选择发现协议(MRP),通过仿真比较分析发现该协议和 DSBR 协议有大致相当的 CPN,但是当网络平均节点度(节点度指的是网络中与该节点相关联的边数)增大时,MRP 协议的循环次数优于 DSBR 协议,同时提出并分析了无线 Ad Hoc 网络的误比特率控制方案和节点移动性对单播会话(Unicast Session)信干比 SINR(Signal Interference Noise Ratio)的影响并得出简要结论。

2 无线 Ad Hoc 网络的数学模型

如图 1。假设所有的主节点的无线发射器的发射范围是一样的,一个移动的主节点 C 是在主节点 A 的无线发射器的范围之外(我们用以 A 为中心的一个圆形区域来表示),同样 A 也在 C 的发射范围之外,那么 A,C 之间要交换信息包的话,就可以通过主节点 B 转接和转发来实现。

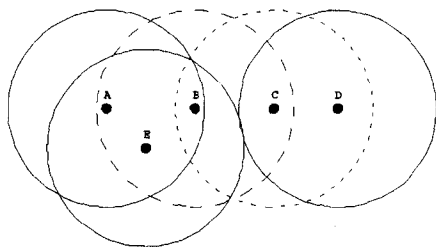


图 1 当移动节点为 5 个时的无线 Ad Hoc 网络

可用一个无向图 $G=(V,E)$ 来表示一个 n 个节点的 Ad Hoc 无线网络,其中 V 是无线的移动主节点, E 是边集。若 $\{u,v\} \in E$,则说明 u 和 v 分别落在 v 和 u 的发射范围之内,即他们可以相互通信和交换信息包, v 和 u 互称为临近节点。A 是用以描述 Ad Hoc 网络拓扑的邻接阵,则无线 Ad Hoc 网络拓扑可表示为图 $G=(V,E,A)$,其中

$$A=(a_{ij}), a_{ij} = \begin{cases} 1 & i, j \text{ 为邻近节点} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

不妨设 $a_{ii}=1$,易知邻接阵为对角线元素全为 1 的对称阵,(1)式中的 A 中只包含节点的单跳通信路径,故其表示的是单跳邻接阵,如图 1 中五个节点的单跳邻接阵(对称阵,只写下三角)为

$$A = \begin{matrix} a & \begin{pmatrix} 1 \\ b & 1 \\ c & 0 & 1 \\ d & 0 & 0 & 1 \\ e & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

由于 Ad Hoc 网络节点多跳(multi-hop)的存在,故我们在矩阵计算^[9]的基础上引入多跳邻接阵的概念,设邻接阵 A 的 k 次幂为

$$A^k=(a_{ij}^{(k)}), k=2,3,\dots \quad (3)$$

这里 $a_{ij}^{(k)}$ 表示的是图直径为 L 的 Ad Hoc 网络图 G 中,从节点 i 到节点 j 的距离(跳数),由此我们定义

$$a_{ij}^{(k)} = \begin{cases} k & \text{若 } a_{ij}^{(k-1)} = 0 \text{ 且 } \sum_{i=1}^n a_{ij}^{(k-1)} a_{ij} > 0, \\ a_{ij}^{(k-1)} & \text{若 } a_{ij}^{(k-1)} > 0 \quad k=2,3,\dots,L \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

由(4)式知图 1 中的 2 跳和 3 跳邻接阵(均为对称阵,只写下三角)分别为

$$A^2 = \begin{matrix} a & \begin{pmatrix} 1 \\ b & 1 \\ c & 2 & 1 \\ d & 0 & 2 & 1 \\ e & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}, A^3 = \begin{matrix} a & \begin{pmatrix} 1 \\ b & 1 \\ c & 2 & 1 \\ d & 3 & 2 & 1 \\ e & 1 & 1 & 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

由于图 1 中的图直径为 $L=3$,故只有 A, A^2, A^3 。

3 基于多跳邻接矩阵的路由选择协议(MRP)

假设一个由 n 个节点组成平面无线 Ad Hoc 网络图模型 $G=(V,E,A)$,其网络图直径为 L, N_i^k 表示节点 i 的 k 跳临近节点集合, M 为 CPN 路径集合。路由选择协议由以下步骤组成:

- 1) 输入 n, L
- 2) 初始化 $k=L, M=\phi$
- 3) 计算邻接阵 A^k ,从节点集 V 中任意挑选一个节点 i ,使得 i 满足:对任意的 $v \in V, v \neq i$,有 $|N_i^{(k)}| \geq |N_i^{(k-1)}|$,这里 $|\cdot|$ 表示节点数。从节点集 $N_i^{(k)}$ 中任意挑选一个节点 j ,使得 j 满足:对任意的 $v \in V, v \neq j$,有 $|N_j^{(k)}| \geq |N_j^{(k-1)}|$
- 4) 计算节点 i 到 j 的路径集合,设为 π_{ij}
- 5) $M=M \cup \pi_{ij}$
- 6) 将矩阵 A^k 中的第 i 行第 j 列删除后得到的新矩阵赋给 A ,重新计算 L
- 7) $n=n-2$,若 $n>0$,转 2),否则转 8)
- 8) 输出 M ,结束

无线 Ad Hoc 网络的路由协议算法复杂度主要取决于每个节点的计算复杂度和节点间的通信复杂度,而通信复杂度又主要取决于路由协议的循环次数和信息交换的总量。易见 MRP 协议的循环次数和信息交换总量分别为 $O(Ln/2), O(Ln)$,而协议 DSBR 则分别为 $O(d^2 n), O(dn)$ ^[2,7],其中 d 为 $G=(V,E)$ 的最大节点度。

假设了 50 个和 70 个节点的无线 Ad Hoc 网络,MRP 和 DSBR 协议进行仿真比较,平均节点度为 3,仿真结果见图 2、3。

容易看出,MRP 协议和 DSBR 协议的 CPN 大致相当,但是随着无线 Ad Hoc 网络的平均节点度的增大,MRP 协议的循环次数明显优于 DSBR 协议。

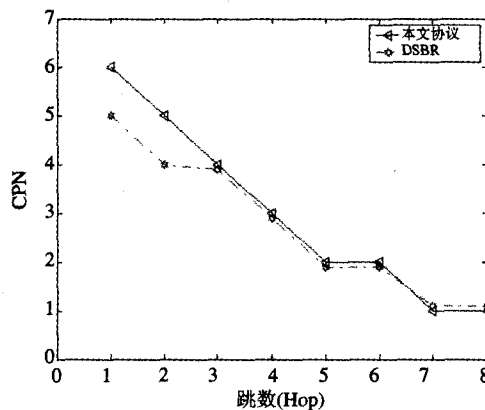


图 2 节点数为 50 时的 CPN 比较图

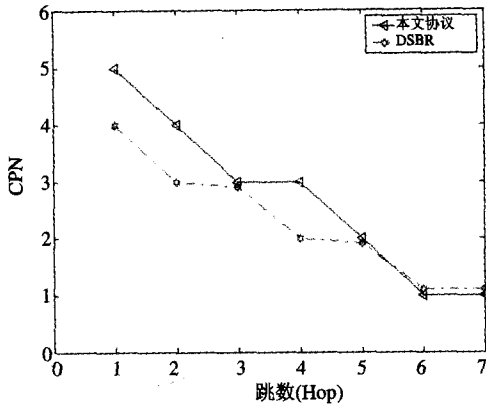


图3 节点数为70时的CPN比较

4 无线 Ad Hoc 网络性能分析

在无线 Ad Hoc 网络的节点信息传输中,每个节点源宿对之间的信息并发传送将导致多址干扰,这是影响无线 Ad Hoc 网络性能的主要因素之一。无线链路 $i \rightarrow j$ 取自上一节中的 CPN 路径集合 M , 即 $i \rightarrow j \in M$, 其上的单播会话 (Unicast Session) 记为 $\mathfrak{S} \cong \langle (i, j), \rho_i \rangle$, 其中 ρ_i (bps) 为发射速率。无线链路和单播会话是一一对应关系, 现在考虑一个具有 n 个节点的无线 Ad Hoc 网络图模型 $G = (V, E)$, 节点在平面上随机分布, 并用 $i (1 \leq i \leq n)$ 来表示节点, r_{ij} 表示节点 i 与 j 之间的距离, 每个节点都装备有无线收发装置, 使用全方位天线, 其每个节点 i 的无线收发距离为 R_i 、节点间干扰距离为 R'_i 。受 802.11 MAC 启发, 给出下面传输协议模型, 节点 i 成功实现向 j 的无线信息传输的条件为:

- 1) $r_{ij} \leq R_i$;
- 2) 任意的节点 k , 只要 $r_{kj} \leq R'_k$ 时, 它就不能进行无线收发信息;
- 3) 每个节点的最大传输功率为 P_0 ;
- 4) 无线 Ad Hoc 系统的最大带宽为 W_0 。

4.1 信息传输的误比特率控制问题分析

在上述信息传输协议和 MRP 路由选择协议模型下, 令 P_{ij} 为节点 i 的信息传向节点 j 的发射功率, 在无线链路 $i \rightarrow j$ (即从 i 到 j 的多跳路径选择依据 MRP) 上, 节点最大功率 P_0 意味着 $P_i \equiv \sum_j P_{ij} \leq P_0$, 假设路径损耗为 g_{ij} , 则 $g_{ij} = 1/r_{ij}^\alpha$, 这里 α 为路径损耗常数, 且不妨设 $g_{ii} \equiv 1$, 发射速率为 $\rho_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。受文 [10, 13, 14] 启发, 在无线链路 $i \rightarrow j$ 上的信干比 SINR 为

$$SINR_{ij} = \frac{W}{\rho_i \sum_{l=1, l \neq i, j}^n P_l g_{il} + v_i} P_i g_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其中 W 为带宽, v_i 为均值为零, 方差为 1 的环境噪声变量。则由式 (6), 有

$$P_i = \frac{SINR_{ij} \rho_i v_i}{W g_{ij}} + \sum_{l=1, l \neq i, j}^n \frac{SINR_{ij} \rho_i g_{il}}{W g_{ij}} P_l \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

令发射功率向量为 $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)^T$, $A = [a_{il}]_{i,l=1}^n$, $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$, 其中

$$a_{il} = \begin{cases} \frac{SINR_{ij} \rho_i g_{il}}{W g_{ij}} & \text{当 } l \neq i, l \neq j \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } l = i \text{ 或 } l = j \text{ 时} \end{cases} \quad (8)$$

且

$$b_l = \frac{SINR_{ij} \rho_i v_i}{W g_{ij}} \quad (l=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

则 (7) 式可写矩阵形式

$$P = B + AP \quad (10)$$

或

$$(I - A)P = B \quad (11)$$

其中 I 为 n 阶单位阵。

当发射速率 ρ_i 已知时, 通过方程 (11) 调节发射功率向量 P , 就可以用于控制传输误比特率 (Bit Error Rate), 从方程 (6) 可以看出, 当发送速率 ρ_i 增大或第 l 条链路 ($l=1, 2, \dots, n$ 且 $l \neq i, j$) 的传输功率 P_l 增长时, 其对无线链路 $i \rightarrow j$ 形成的干扰就相应增加, 从而就必须增大发射功率 P_i 或增加带宽 W 来控制误比特率。但另一方面, 由于 $P_i \equiv \sum_j P_{ij} \leq P_0$, 所以 P_i 的增大虽然可以使得无线链路 $X_i \rightarrow X_j$ 上的发送功率 P_{ij} 增大, 但同时也导致 $\sum_{l=1, l \neq i, j}^n P_l$ 的增大。因此, 对于发射功率和系统带宽受限的无线 Ad Hoc 网络, 其系统吞吐量必然受到较大的制约。但随着 3G 通信网络的进展, 以及高数据率传输的要求, 使得 UWB (Ultra-wide Band) 高速无线接入技术可应用于无线 Ad Hoc 网络, 从上面分析可以看出, 在限制条件 $W \leq W_0$ 放宽的条件下, 可以在发射功率受限的情况下, 通过增加带宽 W 来控制误比特率, 由于 UWB 通信系统有足够大的带宽 W , 所以系统可以在低功率的情况下达到较高的系统吞吐量性能。

4.2 无线节点移动性对网络信干比期望性能的影响

作为无线 Ad Hoc 网络的一个重要应用, 无线传感器网络近期得到了极大的关注 [11]。对于一些特殊环境, 如野生动物的保护往往需要预先将传感器节点固定于动物身上, 进行海上作业时需在海洋平面上飞播网络节点等, 这些情况下的网络节点都可近似看作是在随机游动, 这就需要考虑到节点随机移动性对 Ad Hoc 网络通信性能的影响。

在上述一个具有 n 个节点的无线 Ad Hoc 网络图模型 $G = (V, E)$ 假设下, 节点在平面上随机分布且随机游动, 节点路径的选择依据 MRP 路由选择协议。不失一般性, 考虑一源宿节点对的情况, 即考虑无线链路 $i \rightarrow j$ 所对应的单播会话 $\mathfrak{S} \cong \langle (i, j), \rho_i \rangle$ 的源宿节点对 (i, j) 。

设在一个笛卡儿坐标系下 (见图 4), 在 t 时刻宿节点 j 的位置坐标为原点 $(0, 0)$ 且移动方向为 x 轴正方向, 源节点 i 的位置坐标设为 $(x_i(t), y_i(t))$, 无线发射距离为 R_i , 且节点 i 和 j 的移动速度分别设为 u, v 。当 i 与 j 的距离 $r_{ij} \leq R_i$ 时, 可以进行信息交换, 否则 i 与 j 的通信连接中断。假设 x 轴正向到节点 i 和 j 所连线段的角度为 θ , x 轴正向到节点 i 的运动方向的角度为 φ 。

不妨设在 t 时刻节点 i 与 j 刚好可以开始通信和信息传输, 即 $r_{ij}^{(t)} = R_i$, 从而易知 Δt 时刻之后, 节点 i 与 j 在图 4 的坐标系中的坐标分别为:

$$(x_i(t + \Delta t), y_i(t + \Delta t)) = (R_i \cos \theta + \Delta t u \cos \varphi, R_i \sin \theta + \Delta t u \sin \varphi) \quad (12)$$

$$(x_j(t + \Delta t), y_j(t + \Delta t)) = (\Delta t \cdot v, 0) \quad (13)$$

从而 Δt 时刻之后,

$$r_{ij}^{(t + \Delta t)} = \sqrt{(R_i \cos \theta + \Delta t(u \cos \varphi - v))^2 + (R_i \sin \theta + \Delta t u \sin \varphi)^2} \quad (14)$$

因为 Δt 时刻之后, 节点 i 与 j 还处于通信状态的充要条件为 $r_{ij}^{(t + \Delta t)} \leq R_i$, 经过简单计算得到:

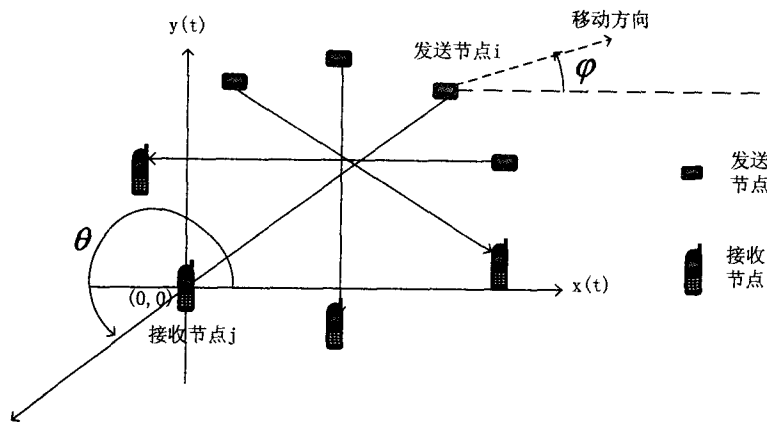


图4 无线节点在坐标系下的移动示意图

$$\Delta t \leq 2R_i (v \cos \theta - u \cos(\theta - \varphi)) / (v^2 + u^2 - 2vu \cos \varphi) \quad (15)$$

上面不等式右边记为 T , 则 T 可理解为节点 i 与 j 还可以通信的时间上限, 即

$$T = 2R_i (v \cos \theta - u \cos(\theta - \varphi)) / (v^2 + u^2 - 2vu \cos \varphi) \quad (16)$$

此时上述讨论的无线链路 $i \rightarrow j$ 上的信干比 $SINR_{ij}$ 就应该看成是一个随机过程 $SINR_{ij}(t)$, 它时刻都在发生变化, 当然关注的是在节点 i 和 j 有效通信的时间段 T 内, $SINR_{ij}(t)$ 的平均变化情况。由于 T 也是一个随机变量, 所以需要考察的是节点移动性对 $\Theta = E(SINR_{ij}(t)) / E(T)$ 的影响, 我们称之为信干比期望性能。为方便分析问题, 假定节点 i 的移动是匀速直线运动, 速度 u 为常量, 节点 j 在时间段 $(0, T)$ 内设为静止的, 即 $v=0$ 。

由于节点的移动方向是随机的, 所以随机变量 θ, φ 是服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布, 则由(16)式, 易知 T 的数学期望为

$$E[T] = \iint \frac{1 - 2R_i \cos(\theta - \varphi)}{4\pi^2 u} d\theta d\varphi \quad (17)$$

显然(17)式中的积分区域满足 $\cos(\theta - \varphi) \leq 0$, 所以有

$$E[T] = \frac{-1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_{\theta - \frac{\pi}{2}}^{\theta - \frac{3\pi}{2}} \frac{R_i \cos(\theta - \varphi)}{u} d\varphi d\theta = \frac{2R_i}{\pi u} \quad (18)$$

从而

$$\Theta = \frac{\pi u}{2R_i} E(SINR_{ij}(t)) \quad (19)$$

从(19)式可以看出, 无线链路 $i \rightarrow j$ 上的 Θ 是随着节点 i 移动速度 u 的增大而变大, 而随着无线发射距离 R_i 的增大而变小, 而系数 $\pi/2$ 可认为是由于无线信道的时变性和复杂性、由电池供电的节点能量消耗等因素对 Θ 的影响因子。

结束语 首先在一个图论拓扑模型的基础上, 提出一个多跳无线 Ad Hoc 网络的路由选择协议, 该协议具体考虑到无线 Ad Hoc 网络的节点多跳特征, 通过多跳矩阵的更新进行相应的路由选择, 和 DSR 协议比较和仿真分析, 在节点路径大于两跳时具有几乎相同的 CPN, 但网络平均节点度较大时, 本文协议较优。其次, 分析了无线 Ad Hoc 网络的信息传输误比特率问题并提出控制方案, 在最新的超宽带技术背景下, 具有很好的现实意义和应用价值。最后侧重于分析节点的移动性对网络信干比期望性能的影响, 在一定的条件下, 节点移动速度的增大会加大无线链路上的信干比期望性能, 这一点与文[12]有相似之处, 而节点信息发射距离的增大将导致信干比期望的减小。

进一步需要做的工作是在上述路由选择协议下, 信息传输误比特率的控制优化、当节点移动为变速运动但符合某种运动规律(如服从半马尔可夫移动跟踪模型等)时对无线 Ad Hoc 网络性能的影响, 以及结合考虑节点能量约束等因素时的网络性能。

参考文献

- Knopp R, Humblet P A. Information Capacity and Power Control in Single-cell Multiuser Communications [C]. In: Proc Int Conf Communications. vol. 1. Seattle, WA, 1995. 254~335
- Perkins C E, Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing for Ad Hoc Networks [J]. Mobile Computing, 1994, 24(4): 234~244
- Hollerung T D. The Cluster-Based Routing Protocol [R]. In: Winter Seminar of University of Paterborn, 2003. 53~68
- Murthy S, Garcia L A J. An Efficiency Routing Protocol for Wireless Networks [J]. Beltazer Journals, 2001, 31(4): 246~255
- Garcia B, Perkins E. Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing [J]. Mobile System and Applications, 1999, 24(3): 59~81
- Johnson D B, Maltz D A. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks [J]. Mobile Computing, 1996, 12(6): 10~23
- Alzoubi K M. Distributed Algorithms for Connected Dominating Set in Wireless Ad Hoc Networks [A]. In: Illinois Institute of Technology, 2002. 561~587
- Bijoy D, Bhargavan V. Routing in Ad-Hoc Networks Using Minimum Connected Dominating Sets [A]. In: ICC'97(C), 1997. 123~135
- Golub G H, Van Loan C F. Matrix Computations [M]. 见: 袁亚湘译. 科学出版社, 2004. 319~347
- Cover T M, Thomas A. Elements of Information Theory [M]. John Wiley, 1991. 186~225
- Akyildiz I, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. A Survey on Sensor Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40: 102~114
- Grossglauer M, Tse D. Mobility Increases the Capacity of Wireless Ad Hoc Networks [J]. IEEE/ACM Trans Networks, 2002, 10(4): 477~486
- Xue F, Xie L L, Kumar P R. The transport capacity of wireless networks over fading channels [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2005, 51(3): 834~847
- Xie L, Kumar P R. A network information theory for wireless communication: Scaling laws and optimal operation [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2004, 50: 748~767