基于节点间信息事件分析的 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能研究

余根坚[1),2)] 郑宝玉[1)]

[1)](南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

[2)](福州大学数学与计算机科学学院 福州 350002)

摘 要 CDMA 无线 Ad Hoc 网络节点间的并发信息传送所造成的节点间相互干扰是影响网络传输性能的主要因素之一. 文中从 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的节点间的信息流量角度研究了 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的传输性能和吞吐量性能,以节点间信息事件图为工具研究了节点间干扰对网络传输性能的影响,并证明了节点间信息流量成功传输的一个充分条件,最后对结果进行了仿真并给出了节点间信息流量的一个拟合方程.

关键词 CDMA 移动 Ad Hoc 网络;信息事件图;信息传输;传输性能;仿真

中图法分类号 TP393

Study on the Transmission Capacity of CDMA Wireless Ad Hoc Networks Based on the Analysis of Information Events Among Nodes

YU Gen-Jian[1),2)] ZHENG Bao-Yu[1)]

[1)](*College of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing* 210003)

[2)](*College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou* 350002)

Abstract The transmission capacity of CDMA Wireless Ad Hoc Networks is constrained by the mutual interference of concurrent transmissions among nodes. This paper studies the transmission capacity and throughput of CDMA Wireless Ad Hoc Networks from the view of the information flux among nodes, and makes a research on the impact of interference among nodes on transmission capacity of networks. The paper concludes and proves a sufficient condition to support the successful transmissions among nodes, and at last, some simulations is given and the validity of the results of paper is testified and a fit equation for information flux among nodes also is proposed.

Keywords CDMA wireless Ad Hoc networks; information event graph; information transmission; transmission capacity; simulation

1 引 言

无线 Ad Hoc 网络的无线节点之间的相互通信是通过无线信道对等的信息包传送和单跳或多跳路由来完成的,这种节点间并发的信息包传送会造成节点间的相互干扰,从而使网络传输性能下降. 近年来有关无线移动 Ad Hoc 网络、Sensor 网络、CDMA 以及综合 Mesh 网络的网络传输性能研究引起了研究人员的极大关注,成了当前的一个研究热点,大量

收稿日期:2005-11-09;修改稿收到日期:2007-01-14. 本课题得到国家自然科学基金(60372107)和江苏省博士创新基金(46666001)资助.
余根坚,男,1969 年生,博士,主要研究方向为网络智能信息处理、无线网络、复杂网络. E-mail: ygj@njupt.edu.cn. **郑宝玉**,男,1945 年生,教授,博士生导师,主要研究领域为网络智能信息处理、通信信号处理和无线网络.

文章涌现，如文献[1-10,13-16].

码分多址 CDMA(Code Division Multiple Access)无线 Ad Hoc 网络的研究始于 20 世纪 80 年代末期，文献[1]研究了扩频 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输的差错概率，并且指出跳频(Frequency Hopping)是解决和提高直接序列 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能的一个重要方法. 扩频也经常用于克服 CDMA 无线 Ad Hoc 网络中不可避免的节点间相互干扰[2]. 文献[3]指出，持续性干扰抵消是提高无线 Ad Hoc 网络性能的关键技术之一，由于远近效应(Near-Far-Effect)的影响，跳扩频技术 FHSS(Frequency Hopped Spread Spectrum)在改进 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能和吞吐量性能方面具有很大优势.

CDMA 无线 Ad Hoc 网络的另一个重要特征是其无线信道的时变性，由于多径传播和网络节点的随机移动等原因，使得 CDMA 无线 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 CDMA 无线 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，从而提高网络传输性能. 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 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[6]，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网络吞吐量和传输性能.

文献[4-6]研究通过各种信息包传送策略(如多包接收)、单跳或多跳路由协议、能量控制、持续性干扰抵消、定向天线、媒体接入控制(MAC)等方法来改善网络传输性能，提高吞吐量. 文献[7]中，在移动节点代替了文献[4]中的固定节点时，网络吞吐量和传输性能得到很大提高. 文献[4,7]均是在单位面积内，当节点间进行会话和信息传送时，平面网络框架下分别假定节点为固定和随机移动的情况下，考虑网络传输性能和吞吐量，其中文献[4]主要考虑固定节点的 Ad Hoc 网络的吞吐量和传输性能，网络中的每一个节点既可作为源节点，又可以作为宿节点，还可以作为中继节点. 其主要结论是随着每个单位面积内的节点数 n 的增大，相应的每个源宿节点对之间的传输吞吐量近似地以 $1/\sqrt{n}$ 的速率递减. 文献[5]考虑用户节点在无线 Ad Hoc 网络中相互独立地随机移动. 其主要结论是其总的平均网络吞吐量趋近于常数，而并不随着每个单位面积内的节点数 n 的增大而递减.

CDMA 无线 Ad Hoc 网络的传输性能细化到节点间时，其实是随着环境、时间、干扰等各种因素变化的随机量. 文献[4]中无线 Ad Hoc 网络传输性能是以无线信道传送的信息流 bit·m/s 来衡量的. 也可以定义为在满足一定的目标节点接收信息概率的条件下，节点间并发传送信息的最大允许密度[8]. 对于跳频和扩频 CDMA 无线 Ad Hoc 网络，文献[8]中给出了网络传输性能的上下界. 文献[9]是在大规模 CDMA 无线 Ad Hoc 网络环境下，将网络传输性能界定为网络在传送信息时，使用网络带宽、时间、频谱、发射功率的效率，这样 CDMA 无线 Ad Hoc 传输性能就结合了通信理论、信息论和编码理论来进行研究，另外文献[9]还研究了在最优码率分配和最优 MAC 路由协议下时，大规模 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的传输性能. 文献[10]研究了如何提高蜂窝式 CDMA 系统的传输性能和网络吞吐量，提出了网络中继协议 RSSP(Relay Station Selection Protocol). 结果表明在上述 RSSP 协议下，蜂窝式 CDMA 系统的传输性能和网络吞吐量得到了提高. 文献[15]是在一个恒定节点密度的无线 Ad Hoc 网络环境下，从信息论角度严格证明了当功率以 $O(1/r^{\alpha})$ 形式衰减时(这里 $\alpha>2$)，网络传输性能上界将随着用户数的增多而趋于零. 文献[16]则在多径衰落信道下，针对四种衰落信道类型：平坦慢衰落、平坦快衰落、频率选择性慢衰落、频率选择性快衰落，并考虑节点能量约束的情况分别研究了无线网络的传输性能.

本文将从 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的节点间信息流量角度研究网络的传输性能，重点在于由节点间并发的信息包传送所造成的节点间相互干扰对 CDMA 无线网络传输性能和吞吐量的影响，通过提出的节点间信息事件图模型研究了它们之间的相互关系，提出并证明了节点间信息流量成功传输的一个充分条件. 本文首先给出 CDMA 无线 Ad Hoc 网络协议模型和网络节点间信息事件图模型；接着分析 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能问题和网络节点间信息流量传输问题；最后给出仿真和一个节点间信息流量拟合方程.

2 CDMA 无线 Ad Hoc 网络协议模型

考虑一个具有 N 个节点的 CDMA 无线 Ad Hoc 网络，节点在平面上随机分布，并用 $X_i(1\leq i\leq N)$来表示节点，r_{ij}表示节点X_i与X_j之间的距离，每个节点都装备有无线收发装置，节点的信息传送通过 CDMA 公用信道，且每个节点 X_i的无线收发距离为R_i、节点间干扰距离为 R'_i，图 1 为两用户节点干扰系统和远近效应示意图. 受文献[4]以及 802.11 MAC 启发，给出下面传输协议模型：节点 X_i成功实现向 X_j 的无线信息传输的条件为：(1) $r_{ij}\leq R_i$；(2)任意的节点 X_k，只要 $r_{kj}\leq R'_k$时，它就不能进行无线收发信息. 另外 X_j收到的信号强度为S_{ij}，其相应的信噪比 SNR_{ij} 必须满足 $SNR_{ij}\geq SNR_0$，X_j 处的噪声 $n_j=n_e+n_I$，其中 n_e为环境噪声，n_I即为节点间干扰，节点对 X_i和 X_j之间的无线信息传播可以是直接的传输，也可以是通过中继节点的转发.

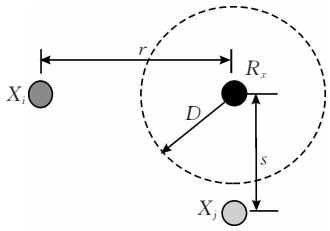


图 1 两用户节点干扰系统示意图(发送节点 X_i初始时刻和接收节点 R_x的距离为 r，干扰节点 X_j距离接收节点的距离为 s，产生远近效应(Near-Far-Effect))

3 节点间信息事件图模型

CDMA 无线 Ad Hoc 网络的节点 $X_i(1\leq i\leq N)$是无线信息发送和接收信息的基本单位，这里称为信息对象. 把信息事件定义为由节点的信息发送和接收操作所组成的一个有限序列集合，信息事件系统 τ 是一组信息事件的集合，即 $\tau=\bigcup_i T_i$，其中 T_i为信息事件，那么 τ 的一个调度策略 S 就是 τ 按照某种互相交错方式的一次信息执行，但在 S 中，每一信息事件必须按照它原来的顺序执行信息发送和信息接收操作，如果一个调度 S 没有交错的信息执行，则称它为顺序的. 一个信息事件 T 对节点X_i进行发送操作记为 $S_T(X_i)$，进行接收操作记为 $R_T(X_i)$. 为了更好地研究问题，先给出下列定义.

定义 1. 如果存在一个 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输调度协议，使得两个无线干扰链路不能在同一时刻 t 同时被激活，那么网络传输流量 $\mu(N)=\sum\mu_{ij}$ 就称为是期望可达的，这里 μ_{ij} 是单对源宿节点之间的信息传输流量.

定义 2. 一个信息事件 T 的所有发送操作称为该信息事件的发送集，记为 $S(T)$；所有接收操作称为该信息事件的接收集，记为 $R(T)$；信息事件 T 的操作集定义为发送集和接收集的并，记为 $C(T)=S(T)\cup R(T)$.

定义 3. 假定有两个信息事件 T_1，T_2均对节点信息对象 X_i进行操作，若在同一时刻存在且只存在一个信息事件对 X_i进行操作，并且没有其它信息事件对 X_i进行操作，则称信息事件 T_1，T_2关于 X_i 是相互冲突的，记为 $T_1\overset{X_i}{\longleftrightarrow}T_2$.

定义 4. 令 $V=\bigcup_{1\leq i\leq N}V(X_i)$，$E=\bigcup_{1\leq i\leq N}E(X_i)$，其中 $V(X_i)$是所有对 X_i进行操作的信息事件，而 $E(X_i)=\{T_k\}$是满足对于 $\forall T_{k_1},T_{k_2}\in E(X_i)(k_1\neq k_2)$，均有 $T_{k_1}\overset{X_1}{\longleftrightarrow}T_{k_2}$ 的所有信息事件 T_k所组成的集合，则以 V 为抽象顶集、E 为抽象边集而构成的图 $G=(V,E)$称为 τ 的一个调度策略 S 的信息事件图.

定理 1. 信息事件系统 τ 的一个调度策略 S 为有序的充分必要条件是其相应的信息事件图是无圈图(证明见文献[11-12])

一般来说，我们需要对 CDMA 无线 Ad Hoc 网络进行分布式式处理和并发控制，如果我们事先知道每一信息事件的发送集和接收集，则可对信息事件间的相互冲突操作进行预定序，从而构成一个无圈的信息事件图，就可将其作为并发控制的工具，这样可保证 CDMA 无线 Ad Hoc 网络信息处理的一致性.

4 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能问题

由于信息事件包含有发送事件和接收事件，故显然信息事件图 G 是一个有向图. 节点间干扰也是上述定义中所说的信息事件，所以由第 3 节知道 CDMA 无线 Ad Hoc 网络系统吞吐量 $\mu(N)$为期望可达的充要条件就可变为是在 CDMA 无线 Ad Hoc 网络中存在这样的一个关于信息事件系统 τ 的一个调度策略 S 的信息事件图 G，在这个意义上我们称信息事件图 G 为该 CDMA 无线 Ad Hoc 网络

的传输性能图. 由于 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的信息传播是由所有的节点对间的单播(unicast)会话所组成的，所以 $G=(V,E)$ 是所有的 $G_k=(V_k,E_k)$ 的准加权平均构成的，即

$$G=\bigcup_{k=1}^{N}\lambda_k G_k,\quad G_k\cap G_l=\varnothing,\ k\neq l,\quad \sum_{k=1}^{N}\lambda_k\leq 1 \tag{1}$$

上式包含两层含义：(1) G 是一个完全 N-分图；(2) 图 G 中所涵括的期望可达网络传输流量 $\mu(N)$ 是其完全信息子图 G_k 所涵括的信息流量的准加权平均. 由第 3 节及上述信息事件图的定义，知道若无线链路 l_{ij}，l_{pq} 具有信息事件 T_{ij}，T_{pq}，则有

$$d_{iq}\leq R'_i \text{ 或 } d_{pj}\leq R'_p \Rightarrow T_{ij}\overset{X_k}{\longleftrightarrow}T_{pq},\ k=i,j,p,q \tag{2}$$

即存在 $e_k\in E_k$，其流量定义为 $f(e_k)$，不妨假定该信息事件所对应的无线链路为 l_{iq}，其容量为 $c(e_k)$，则求信息子图 $G_k=(V_k,E_k)$ 的期望可达网络传输流量就转化为求下述线性约束问题的可行解：

$$0\leq f(e_k)\leq c(e_k),\ k=1,2,\cdots,N \tag{3}$$

$$\sum_{e_k\in S(T)}f(e_k)=\sum_{e_k\in R(T)}f(e_k),\ k=1,2,\cdots,N \tag{4}$$

$$\sum_{e_k\in S(T)\cap E_k}f(e_k)-\sum_{e_k\in R(T)\cap E_k}f(e_k)=a\rho,\ k=1,2,\cdots,N \tag{5}$$

这里 $a>0$ 为常数，ρ 为节点 X_i 发送信息到 X_q 的速率(单位为 bit/s).

一个给定的信息事件图 $G=(V,E)$ 上的期望可达网络传输流量 $\mu(N)$ 可通过求解线性约束问题(3)～(5)的可行解，并将其代入式(1)而得到. 这样就在理论上找到了影响 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能的某些因素，从而找到改进和提高 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能的途径及其理论依据，可以通过控制某些因子来权衡(trade-off)网络传输性能和使用网络带宽、时间、频谱、发射功率等代价.

5　CDMA 无线 Ad Hoc 网络节点间信息流量问题

令 $P(\Delta t)$ 表示单播会话 $\mathfrak{I}\cong\langle(X_i,X_q),\rho,e_k\rangle$ 在 t_0 时刻到 $t_0+\Delta t$ 之间的功率，s_i 表示由节点 X_i 发出的信号强度，S_{iq} 表示由节点 X_i 发出的、节点 X_q 收到的信号强度，由前面信息事件图定义及分析可知，S_{iq} 可表示如下

$$S_{iq}=\frac{\sqrt{P(\Delta t)}}{r_{iq}^{\alpha}(t)}\gamma_{iq}(t)\cdot s_i+n_j=\frac{\sqrt{P(\Delta t)}}{r_{iq}^{\alpha}(t)}\gamma_{iq}(t)\cdot s_i+n_I+n_b \tag{6}$$

这里

$$n_I=\sum_{e_k\in S_T(X_i)\cup R_T(X_q)-E(X_i)\cup E(X_q)}\frac{\sqrt{P(\Delta t)}}{r_{e_k}^{\alpha}(t)}\gamma_{e_k}(t)\cdot s_k \tag{7}$$

其中 α 为路径衰落指数，由于节点移动性，故节点 X_i 和 X_q 之间的距离显然是时间 t 的函数，记为 $r_{iq}(t)$，且 $r_{e_k}(t)$ 亦为时间 t 的函数，表示与信息事件 e_k 相对应的无线链路距离；$\gamma_{iq}(t)$ 和 $\gamma_{e_k}(t)$ 分别表示 l_{iq} 和 e_k 所对应的无线信道处理增益，它们是独立同分布、均值为 0、方差为 1 的高斯过程.

因为 $SNR_{iq}\geq SNR_0$，这里 SNR_0 为信噪比门限，由上述分析，有

$$\frac{\dfrac{\sqrt{P(\Delta t)}}{r_{iq}^{\alpha}(t)}\gamma_{iq}(t)\cdot s_i}{n_I+n_b}\geq SNR_0 \tag{8}$$

引入 $S_{\text{total}}\equiv\sum_{e_k\in S_T(X_i)\cup R_T(X_q)-E(X_i)\cup E(X_q)}s_k$，显然 S_{total} 是信息事件 e_k 所对应的无线链路中的信号总强度，这里 e_k 满足 $e_k\in S_T(X_i)\cup R_T(X_q)-E(X_i)\cup E(X_q)$. 定义传输率 $\rho_{\text{total}}=S_{\text{total}}/\Delta t$，$\omega$ 表示 ρ_{total} 和 ρ 的比率，即 $\omega=\rho_{\text{total}}/\rho$，从而有下面定理成立.

定理 2.　在基于信息事件图 G 的 CDMA 无线 Ad Hoc 网络框架下，在第 2 节中的 CDMA 无线 Ad Hoc 网络协议模型中成功实现从节点 X_i 到节点 X_j 的信息传输的充分条件为

$$\omega\leq\frac{1}{SNR_0}\left(\frac{R'}{R_i}\right)^{\alpha} \tag{9}$$

这里 $R'=\max\{R'_i,R'_q\}$，R'_i 和 R'_q 为节点间干扰距离.

证明.　为简便起见，可以合理假定在时间片 Δt 内信道处理增益指数为常数，且在这期间忽略环境噪声的影响，那么由不等式(8)，有

$$SNR_0\left(\sum_{e_k\in S_T(X_i)\cup R_T(X_q)-E(X_i)\cup E(X_q)}\frac{\sqrt{P(\Delta t)}}{r_{e_k}^{\alpha}(t)}\gamma_{e_k}(t)\cdot s_k\right)\leq\frac{\sqrt{P(\Delta t)}}{r_{iq}^{\alpha}(t)}\gamma_{iq}(t)\cdot s_i \tag{10}$$

又由式(2)和所做的假定，有 $r_{e_k}(t)\geq R'=\max\{R'_i,R'_q\}$，那么要式(10)成立只要

$$SNR_0\left(\sum_{e_k\in S_T(X_i)\cup R_T(X_q)-E(X_i)\cup E(X_q)}\frac{\sqrt{P(\Delta t)}}{R'^{\alpha}}\gamma_{e_k}(t)\cdot s_k\right)\leq\frac{\sqrt{P(\Delta t)}}{r_{iq}^{\alpha}(t)}\gamma_{iq}(t)\cdot s_i \tag{11}$$

相当于

$$SNR_0 \frac{\sum_{e_k \in S_T(X_i) \cup R_T(X_q) - E(X_i) \cup E(X_q)} s_k}{R'^{\alpha}} \leq \frac{s_i}{r_{iq}^{\alpha}(t)} \quad (12)$$

注意到 $\rho = s_i / \Delta t$ 和 $r_{iq}(t) \leq R_i$ 并代入，知若式(12)成立只要

$$SNR_0 \frac{S_{\text{total}}}{\Delta t} \frac{1}{R'^{\alpha}} \leq \frac{\rho}{R_i^{\alpha}} \quad (13)$$

或者

$$SNR_0 \rho_{\text{total}} \frac{1}{R'^{\alpha}} \leq \frac{\rho}{R_i^{\alpha}} \quad (14)$$

因此

$$\omega = \frac{\rho_{\text{total}}}{\rho} \leq \frac{1}{SNR_0} \left(\frac{R'}{R_i} \right)^{\alpha} \quad (15)$$

证毕.

定理 2 表明只要条件(9)成立，就有 $SNR_{iq} \geq SNR_0$，因此给定 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的一些参数，如传输速率比 ω，信噪比 SNR_0 和信道衰落指数 α，为满足条件(9)就可以确定节点通信距离 R_i 和节点干扰距离 R'，从而得到信息事件、信息事件子图和信息事件图，利用第 3，4 节就可以分析和控制 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能.

6 仿 真

仿真结果如下：这里取路径衰落指数 $\alpha = 3$，节点传输距离为 200m. 对不同的信噪比门限 SNR_0，图 2 显示了干扰距离-传输距离比和信噪比门限 SNR_0 之间的关系，图 3 显示了传输速率比和信噪比门限之间的关系，4 条曲线分别相应于 $R' = 200$，210，230，250m. 位于图 3 曲线下方的是 (ω, SNR_0) 的允许域.

现在来考虑信息事件图的期望可达传输流量，为简便起见，假定信息事件 e_k 的最大信息传输流量为 $c(e_k) = 1$，令式(5)中的 $a = 1.0$，并且式(3)～(5)中的 $S(T)$ 和 $R(T)$ 均满足图 2 和图 3 中的允许域要求，为了能直观地看到仿真结果，从允许域中随机地选取一些点，从而得到一系列的 ρ，ρ_{total}，R' 和 SNR_0 值，代入式(3)～(5)求可行解，图 4～图 9 分别是与参数对 (SNR_0, R')，(SNR_0, ρ)，$(SNR_0, \rho_{\text{total}})$，$(\rho, \rho_{\text{total}})$，$(\rho, R')$，$(\rho_{\text{total}}, R')$ 相关联的信息事件图的期望可达传输流量.

从图 4～图 6 可以看出参数 SNR_0 比 R'，ρ，ρ_{total} 对影响期望可达传输流量具有更高的灵敏度；从图 7 和图 8 可以看出节点的移动速度将会提高 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输流量，这和文献[8]中的节点移动性增加网络性能和吞吐量的结论相类似. 从图 9 可以看出，当考虑节点间干扰对 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输流量的影响时，参数 ρ_{total} 具有比 R' 更重要的作用.

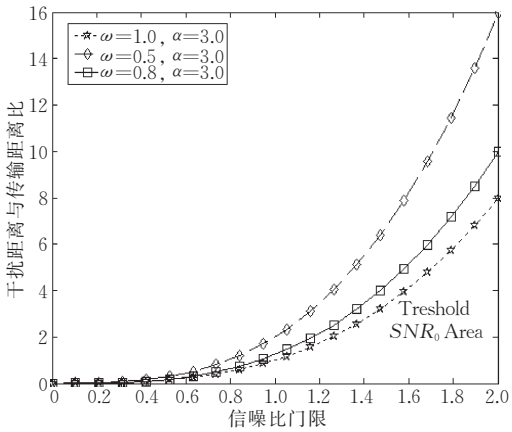


图 2 信噪比门限允许域

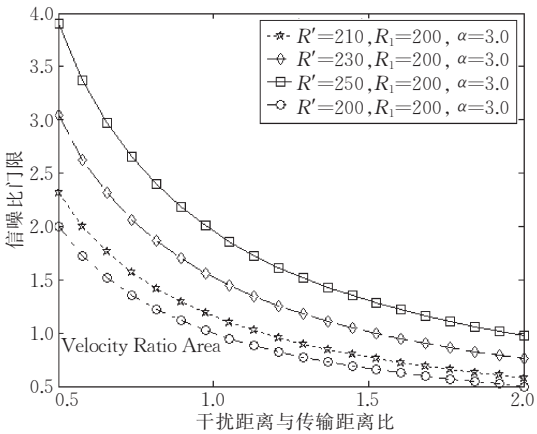


图 3 传输速率比允许域

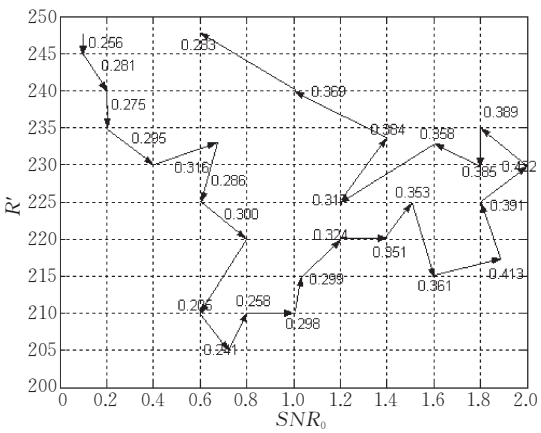


图 4 与 (SNR_0, R') 相关联的信息事件图的期望可达传输流量

从以上分析和仿真结果来看，CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输流量和参数对 (SNR_0, R')，(SNR_0, ρ)，$(SNR_0, \rho_{\text{total}})$，$(\rho, \rho_{\text{total}})$，$(\rho, R')$，$(\rho_{\text{total}}, R')$ 之间

的关系具有非线性关系，利用仿真过程中的一些数据，以三角和指数函数为基本函数进行拟合，可以得到闭合的函数形式. 为节省篇幅，这里只给出 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输流量和参数对 (SNR_0, R') 之间的非线性拟合函数，对于其它参数对的情况，由于方法类似，这里就不再赘述. 从图 4 中可以获得 26 个三维数据对 $(f_{\text{capacity}}, x, y)$，分别为 (0.256,0.1,245)，(0.281,0.2,240)，(0.275,0.2,235)，(0.295,0.4,230)，(0.316,0.7,235)，(0.286,0.6,225)，(0.300, 0.8,220)，(0.205, 0.6,210)，(0.241,0.7,205)，(0.258,0.8,210)，(0.298,1.0,210)，(0.299,1.01,215)，(0.324,1.2,220)，(0.351,1.4,220)，(0.353,1.5,225)，(0.361,1.6,215)，(0.413,1.9,218)，(0.391,1.8,225)，(0.402,2.0,230)，(0.389,1.8,235)，(0.385,1.8,230)，(0.358,1.6,233)，(0.31,1.2,225)，(0.384,1.4,235)，(0.369,1.0,240)，(0.283,0.6,248). 利用最小二乘法，得到拟合函数 f_{capacity} 的闭合形式为

$$f_{\text{capacity}} = 0.326117 - 1.56316 \cdot 10^{-5} e^{-xy} - 193.847 e^{-xy/3} + 0.0255546 \sin(xy) \quad (16)$$

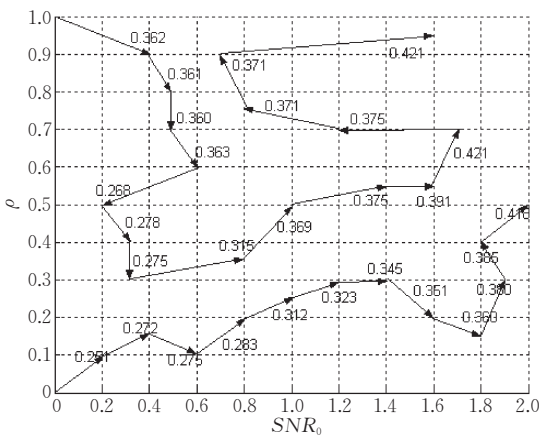


图 5　与 (SNR_0, ρ) 相关联的信息事件图的期望可达传输流量

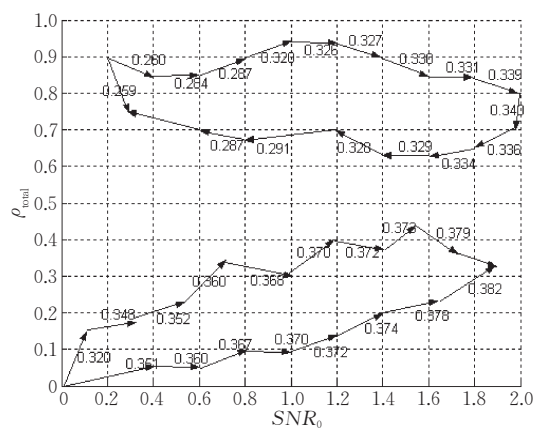


图 6　与 $(SNR_0, \rho_{\text{total}})$ 相关联的信息事件图的期望可达传输流量

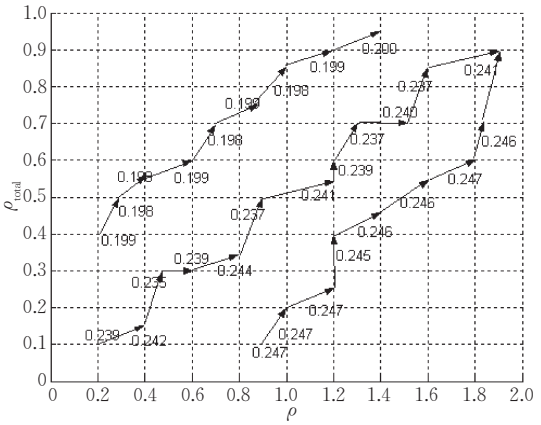


图 7　与 $(\rho, \rho_{\text{total}})$ 相关联的信息事件图的期望可达传输流量

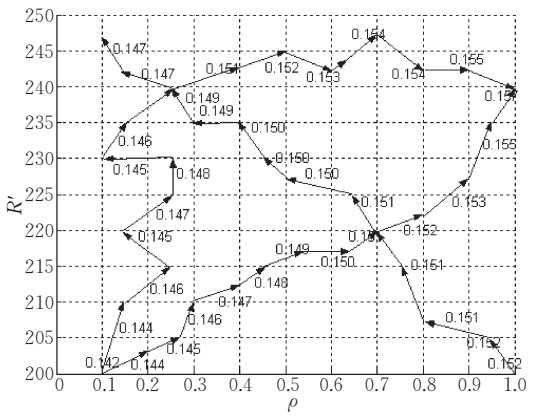


图 8　与 (ρ, R') 相关联的信息事件图的期望可达传输流量

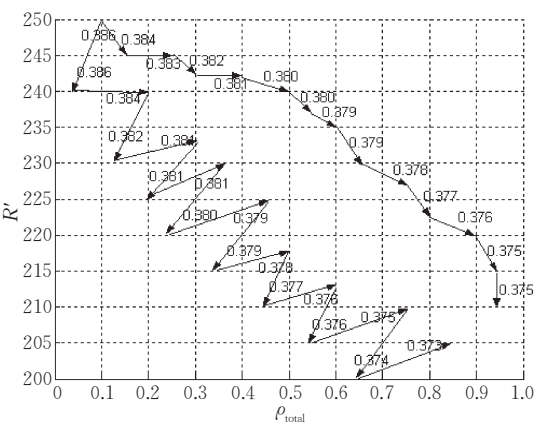


图 9　与 $(\rho_{\text{total}}, R')$ 相关联的信息事件图的期望可达传输流量

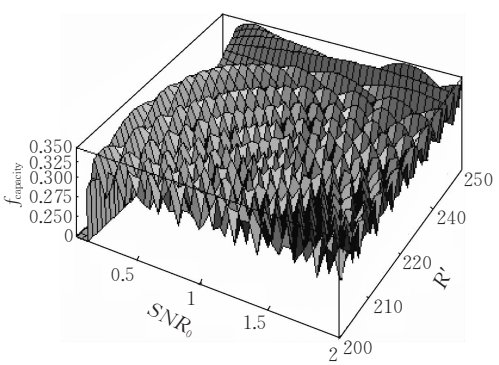


图 10　与 (SNR_0, R') 相关联的信息事件图拟合函数的传输性能

图 10 中显示了用式(16)来拟合 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的传输性能时,随着 SNR_0,R' 等各种因素变化的情况,这也说明了研究 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的传输性能,一般只能给出传输性能的上下界,文献[8,10,13-16]的研究也证实了这一点.

7 结 论

本文首先给出了 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的传输协议模型,详细分析了节点间信息事件模型及与其密切相关的信息事件子图和信息事件图,并在此基础上研究了 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的传输性能,即信息事件图上的期望可达信息传输流量是各个信息事件子图上的信息传输流量的准加权平均,从而在理论上就将问题转化为求线性约束问题的可行解. CDMA 无线 Ad Hoc 网络的传输性能是支撑 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的物理和链路层上的字节率传输的理论依据,本文找到了影响 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能的某些因素,为提高 CDMA 无线 Ad Hoc 网络传输性能,可以通过本文结论来控制某些因子,权衡(trade-off)网络传输性能和网络代价之间的关系. 接着本文提出并证明了 CDMA 无线 Ad Hoc 网络节点间信息流成功传输的充分条件,该充分条件为信息事件图的有效性和仿真提供了理论保障.

最后利用仿真数据,基于二元三角和指数函数并利用最小二乘法拟合了一个关于网络传输流量和信噪比门限与节点干扰距离的非线性闭合函数,给出了它的三维图形,其反映出来的 CDMA 无线 Ad Hoc 网络的传输性能的变化特征这一点与相关文献[8,10,13-16]的研究结论相一致.

参 考 文 献

[1] Pursley M, Taipale D. Error probabilities for spread-spectrum packet radio with convolutional codes and Viterbi decoding. IEEE Transactions on Communications, 1987, 35(1): 1-12

[2] Shepard T J. A channel access scheme for large dense packet radio networks//Proceedings on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. New York, USA, 1996: 219-230

[3] Toumpis S, Goldsmith A J. Capacity regions for wireless Ad Hoc networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 24(5): 736-748

[4] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. IEEE Transaction of Information Theory, 2000, 46(2): 388-404

[5] Diggavi S, Grossglauser M, Tse D. Even one-dimensional mobility increases Ad Hoc wireless networks capacity//Proceeding of the IEEE International Symposium on Information Theory. Lausanne, Switzerland, 2002: 265-278

[6] Knopp R, Humblet P A. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications//Proceeding of the International Conference on Communications. Seattle, WA, 1995: 331-335

[7] Grossglauser M, Tse D. Mobility increases the capacity of wireless Ad Hoc networks. IEEE/ACM Transaction Networks, 2002, 10(4): 477-486

[8] Weber S, Yang X, De Veciana G, Andrews J G. Transmission capacity of CDMA Ad Hoc networks//Proceeding of the IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Sydney, Australia, 2004: 1023-1031

[9] Sun Y. Transport capacity of large wireless CDMA Ad Hoc networks//Proceedings of the IEEE 6th CAS Symposium on Emerging Technologies: Mobile and Wireless Communications. Shanghai, China, 2004: 476-486

[10] Zhao D M, Terence D, Todd. Cellular CDMA capacity improvement using Ad Hoc relaying//Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Wuhan, China, 2004: 719-723

[11] Diestel R. Graph Theory. London: Springer-Verlag, 2000: 178-213

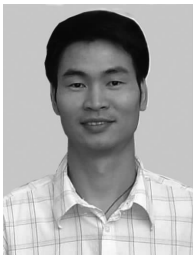
[12] Béla Bollobás. Random Graphs (2nd Edition). Cambridge: Springer-Verlag, 2001: 78-121

[13] Weber S, Andrews J G, Yang X. Transmission capacity of CDMA Ad Hoc networks employing successive interference cancellation//Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM IEEE). Hawaii, USA, 2004: 2838-2842

[14] Sun Y. Capacity of large wireless CDMA Ad Hoc networks with retransmission diversity//Proceedings of the 36th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. New York, USA, 2002: 1508-1512

[15] Leveque O, Telatar I E. Information-theoretic upper bounds on the capacity of large extended Ad Hoc wireless networks Information Theory. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(3): 858-865

[16] Xue F, Xie L L, Kumar P R. The transport capacity of wireless networks over fading channels. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(3): 834-847



YU Gen-Jian, born in 1969, Ph.D.. His research interests include wireless networks, signal processing and complex networks.

ZHENG Bao-Yu, born in 1945, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor. His research interests include signal processing and wireless networks.

Background

This research is partially supported by the National Natural Science Foundation of China under grant No. 60372107 and the Doctoral Innovative Foundation of Jiangsu Province under grant No. 46666001.

Because of complex physical property of wireless channel, power assignment of channel, location of nodes, mathematical processing of information flow and so on, the study of transmission capacity of CDMA wireless Ad Hoc networks has great challenging and practical significance. The researchers use strategies for delivering data, routing protocol, power control, durative interference offset, and directional antenna to study transmission capacity of CDMA wireless Ad Hoc networks.

The research group of authors has entered the field of wireless networks information theory and its applications for many years, and gained a lot of achievements in this field. They have published about 120 high quality papers in the proceeding of international conference and related journals or transactions.

This paper studies the transmission capacity of CDMA wireless Ad Hoc networks by the aspect of information flow between nodes, and lay emphasis upon the problem that the interference resulted from the concurrent transmission of packet between nodes would affect the transmission capacity of MANET. By the model of information event conflict graph, the paper studies the mutual relation between the interference and the transmission capacity of CDMA wireless Ad Hoc networks.