

文章编号: 1001-9081(2005)06-1241-03

基于事件冲突干扰模型的 UWB 无线 Ad Hoc 网络吞吐量性能研究

余根坚^{1,2}

(1. 福州大学 数学与计算机科学学院, 福建 福州 350002;

2. 南京邮电学院 信息工程系, 江苏 南京 210003)

(ygj@njupt.edu.cn)

摘要:研究了 UWB 无线 Ad Hoc 网络的误比特率控制问题和吞吐量性能, 以节点信息发射和接收事件冲突图为理论工具研究节点间的干扰对网络吞吐量性能的影响, 通过求解基于吞吐量图的线性约束问题, 可以得到 UWB 无线 Ad Hoc 网络可达吞吐量的期望数值解, 并对其进行了仿真。

关键词:UWB 无线(Ultra-Wide Band); Ad Hoc 网络; 事件冲突图; 吞吐量; 信息传输; 模型仿真
中图分类号: TP393.15 **文献标识码:** A

Study on throughput capacity of UWB Ad Hoc networks based on events conflict interference model

YU Gen-jian^{1,2}

(1. Department of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350002, China;

2. Department of Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China)

Abstract: The issue of Bit-Error-Rate control and the throughput capacity of UWB(Ultra-Wide Band) Wireless Mobile Ad Hoc Networks were studied in this paper. Based on the theory of conflict graph of information sent and events received, the paper mainly addressed the impact of interference among nodes on networks throughput. The numerical value of expectant achievable throughput capacity of the system was reached by solving the linear constraints problem with the throughput graph. A model simulation was conducted to testify the results.

Key words: UWB Ad Hoc networks; event conflict graph; throughput; information communication; model simulation

0 引言

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。Ad Hoc 网络的节点之间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相互通信, 这种节点间并发的信息包传送会造成节点间的相互干扰, 从而使网络性能和吞吐量下降, 那么如何提高网络吞吐量就成了研究 Ad Hoc 网络的一个重要方向, 在已有的文献中([1~4]), 通过各种信息包传送策略、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)等方法来改善网络性能, 提高吞吐量。文献[5]中, 在移动节点代替了文献[1]中的固定节点时, 网络吞吐量得到很大提高。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, 但是它服从一定的统计模型, 模型可表达为:

$$P(\vec{d}(t)) = |\vec{d}(t)|^{-\alpha} S(\vec{d}(t)) R(\vec{d}(t)) \quad (1)$$

该模型认为, 信号传播的损耗主要由以下三部分构成: 路径损耗 $|\vec{d}(t)|^{-\alpha}$; 阴影衰落 $S(\vec{d}(t))$, 其服从对数正态分布; 多径衰落 $R(\vec{d}(t))$, 其服从瑞利(Rayleigh)分布, 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^[4], 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。

文献[1,5]均考虑的是, 在单位面积内, 当节点进行会话和信息传送时, 在平面网络框架下假定节点为固定和随机移动的条件下, 考虑系统的吞吐量。文献[1]中主要考虑固定的 Ad Hoc 网络的吞吐量性能, 网络节点随机分布但以固定代替了随机移动, 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吞吐量近似地以 $1/\sqrt{n}$ 的速率递减。文献[5]中主要考虑用户节点在 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系统吞吐量趋近于常数, 而并不随着每个单位面积内的节点数 n 的增大而递减。

蜂窝式 GSM 等商用无线网络是采用窄带链路的, 随着 3G 通信网络的进展, 以及高数据率传输的要求, 使得 UWB 无

线接入技术的研究成为热点和关键技术^[7,8],如基于 IEEE 802.15.3.a 的 UWB 技术标准可以支持 100 到 500Mbps 的带宽^[9],由于 UWB 无线接入具有在低节点功率条件下实现的优点,使得它能应用于无线 Ad Hoc 网络。UWB 无线 Ad Hoc 网络(带宽大、功率低)与已经存在的无线网络(带宽小、功率高)有显著的区别,那么关于 Ad Hoc 的网络吞吐量的一些研究结果就很难应用 UWB 无线 Ad Hoc 网络,本文侧重于考虑由于节点间并发的信息包传送所造成的节点间相互干扰对 UWB 无线 Ad Hoc 网络性能的影响,通过提出的事件冲突图干扰模型研究了它们之间的相互关系。

1 UWB 无线 Ad Hoc 网络模型及吞吐量性能

1.1 UWB 网络结构模型特点及分析结果

考虑一个具有 N 个节点的 UWB 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,其每个节点 X_i 的无线收发距离为 R_i ,节点间干扰距离为 R'_i 。受文献[1]以及 802.11MAC 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。

考虑到 UWB 网络的特点,假定:

3) 每个节点的最大传输功率为 P_0 。

4) 通信系统有充分大的带宽 W 。

令 P_{ij} 为节点 X_i 的信息传向节点 X_j 的发射功率,在无线链路 $X_i \rightarrow X_j$ 上,节点最大功率为 P_0 意味着 $P_i = \sum_j P_{ij} \leq P_0$,

假设路径损耗为 g_{ij} ,则 $g_{ij} = \frac{1}{|X_i - X_j|^\alpha}$,这里 α 为路径损耗常数,且不妨设 $g_{ii} = 1$,发射速率为 $\rho_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。受文献[10]启发,在无线链路 $X_i \rightarrow X_j$ 上的信干比为:

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

即:

$$P_i = \frac{SINR_{ij} \rho_i v_i}{W g_{ij}} + \sum_{l=1, l \neq i, j}^N \frac{SINR_{ij} \rho_l g_{il}}{W g_{ij}} P_l, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

令 $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)^T, A = [a_{il}]_{i,l=1}^N, B = (b_1, b_2, \dots, b_N)^T$, 其中:

$$a_{il} = \begin{cases} \frac{SINR_{ij} \rho_l g_{il}}{W g_{ij}} & \text{当 } l \neq i, l \neq j \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } l = i \text{ 或 } l = j \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

且:

$$b_l = \frac{SINR_{ij} \rho_i v_i}{W g_{ij}}, (l = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

则(3)式可写矩阵形式:

$$P = B + AP \quad (6)$$

或:

$$(I - A)P = B \quad (7)$$

其中 I 为 N 阶单位阵。

当发射速率 λ_i 已知时,通过方程(7)调节发射功率 W ,就

可以用于控制传输误比特率(Bit Error Rate),从方程(2)看出,当发送速率 λ_i 增大或第 l 条链路($l = 1, 2, \dots, N, l \neq i, j$)的传输功率增长时,其对无线链路 $X_i \rightarrow X_j$ 形成的干扰就相应增加,从而就必须增大 P_i 或增加带宽 W 来控制误比特率。但另一方面,由于 $P_i = \sum_j P_{ij} \leq P_0$,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,对于以往的发射功率受限的无线 Ad Hoc 网络,其系统吞吐量必然受到较大的制约。但对于 UWB 无线 Ad Hoc 网络来说,从上面分析也可以看出,在发射功率受限的情况下,可以通过增加带宽 W 来控制误比特率,由假设条件 4),通信系统有充分大的带宽 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。

1.2 基于事件冲突图的干扰模型以及吞吐量分析

假定 X_j 收到的信号强度为 S_{ij} ,其相应的信干比 $SINR_{ij}$ 必须满足 $SINR_{ij} \geq SINR_0$, 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,也可以通过中继节点的转发。如果存在一个网络传输调度,使得两个无线干扰链路不能在同一时刻 t 同时被激活,那么网络吞吐量 $\mu(N) = \sum \mu_{ij}$ 就称为是期望可达的,这里 μ_{ij} 是单个源宿节点对之间的吞吐量。下面给出的基于事件冲突图的干扰模型。

UWB 无线 Ad Hoc 网络的节点 $X_i (1 \leq i \leq N)$ 是无线发送和接收信息的基本单位,称为对象,把事件定义为由节点的发送和接收操作所组成的一个有限序列,事件系统 τ 是一组事件的集合,即 $\tau = \cup T_i$,其中 T_i 为事件,那么 τ 的一个调度 S 就是 τ 按照某种互相交错方式的一次执行,但在 S 中,每一事件必须按照它原来的顺序执行发送和接收操作,如果一个调度 S 没有交错执行,则称它为顺序的。一个事件 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 $R_T(X_i)$ 。

定义 1 一个事件 T 的所有发送操作称为该事件的发送集,记为 $S(T)$;所有接收操作称为该事件的接收集,记为 $R(T)$;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 2 假定有两个事件 T_1, T_2 均对节点对象 X_i 进行操作,若在同一时刻存在且只存在一个事件对 X_i 进行操作,并且没有其他事件对 X_i 进行操作,则称事件 T_1, T_2 关于 X_i 是冲突的,记为 $T_1 \xrightarrow{X_i} T_2$ 。

定义 3 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 $T_{k_1} \xrightarrow{X_i} T_{k_2}$ 的所有事件 T_k 所组成的集合,则称图 $G = (V, E)$ 为 τ 的一个调度 S 的事件冲突图。

一般来说,我们需要对 Ad Hoc 网络进行分布式处理和并发控制,如果事先知道每一事件的发送集和接收集,则可对事件间的冲突操作进行预定序,从而构成一个无圈的事件冲突图,就可将其作为并发控制的工具,这样可保证 Ad Hoc 网络处理信息的一致性。

由于事件包含有发送事件和接收事件,故显然冲突图 G 是一个有向图。节点间干扰也是上述定义中所说的事件,所以

由上面知道系统吞吐量 $\mu(N)$ 为期望可达的充要条件就可变为是在 Ad Hoc 网络中存在这样的一个关于事件系统 τ 的一个调度 S 的冲突图 G , 在这个意义上我们称冲突图 G 为该 Ad Hoc 网络的吞吐量图。由于 Ad Hoc 网络的信息传播是由所有的单对节点间的单播对话 $\mathcal{S} = \langle (X_i, X_j), \rho_i, e_k \rangle$ 所组成的, 这里 e_k 是对应于无线链路 $X_i \rightarrow X_j$ 的事件且其最大吞吐量为 $c(e_k)$, 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:

$$G = \bigcup_{k=1}^N \lambda_k G_k, G_k \cap G_l = \emptyset, k \neq l, \sum_{k=1}^N \lambda_k \leq 1 \quad (8)$$

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吞吐量 $\mu(N)$ 是其完全子图 G_k 所涵括的吞吐量的准加权平均。由 1.1 节及上述冲突图的定义, 知道若无线链路 l_{ij}, l_{pq} 具有事件 T_{ij}, T_{pq} , 则有:

$$d_{iq} \leq R'_i \text{ or } d_{mp} \leq R'_p \Rightarrow T_{ij} \xleftrightarrow{X_k} T_{pq}, k = i \text{ or } j \text{ or } p \text{ or } q \quad (9)$$

即存在 $e_k \in E_k$, 其流量定义为 $f(e_k)$, 不妨假定该事件所对应的无线链路为 l_{ij} , 其容量为 $c(e_k)$, 则求图 $G_k = (V_k, E_k)$ 的期望可达吞吐量就转化为求下述线性约束问题的可行解:

$$0 \leq f(e_k) \leq c(e_k), k = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$$\sum_{e_k \in S(T)} f(e_k) = \sum_{e_k \in R(T)} f(e_k), k = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$\sum_{e_k \in S(T) \cap E_k} f(e_k) - \sum_{e_k \in R(T) \cap E_k} f(e_k) = a\rho_i, k = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

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

所以通过求解线性约束问题(10) ~ (12), 然后回代(8)就可求得在一个冲突吞吐量图 $G = (V, E)$ 上的最大期望可达吞吐量 $\mu(N)$ 的数值解。

2 计算机仿真

一些仿真参数如下设置, 信道损耗指数设为 $\alpha = 3$, 节点数 $N = 100$, 节点间信息传输距离设为 200m。为简便起见, 设冲突事件 e_k 的最大吞吐量为 $c(e_k) = 1$, 且(12)式中的参数 $a = 1$, 结合(7)式设定一系列的 $\rho_i, R', SINR_0$ 值, 下面图1和图2分别是关于 $(SINR_0, R')$ 和 $(SINR_0, \rho_i)$ 的相关冲突图的期望可达吞吐量的仿真图。

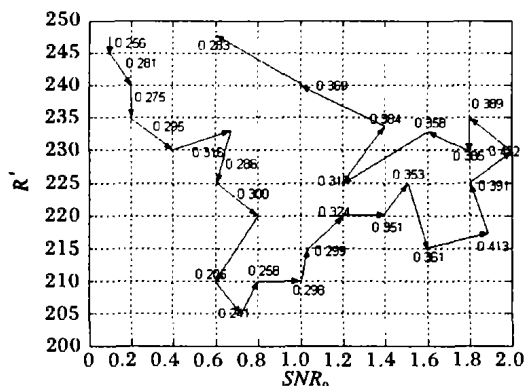


图1 关于 $(SINR_0, R')$ 的相关冲突图的期望可达吞吐量

图1中箭头上的数据表示关于相关参数的期望可达吞吐量, 其最大值约 0.413, 最小值约 0.205。图2中箭头上的数据表示关于相关参数的期望可达吞吐量, 其最大值约 0.421,

最小值约 0.251。

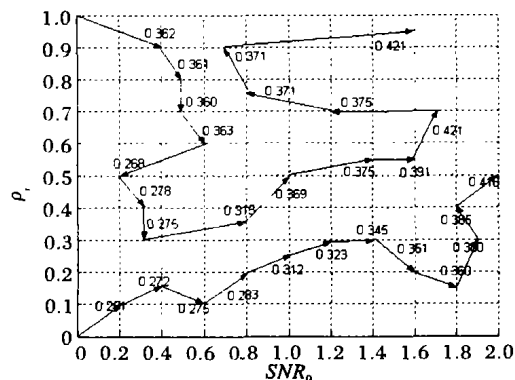


图2 关于 $(SINR_0, \rho_i)$ 的相关冲突图的期望可达吞吐量

3 结语

分析了 UWB 无线 Ad Hoc 网络在多包接收节点间干扰下的误比特率控制问题, 得出在 UWB 网络环境下, 可以通过增加带宽来控制误比特率, 从而系统可以在低功率的情况下达到较高的系统吞吐量的结论。考虑了一个节点信息发射和接收的冲突事件图模型, 包含于冲突图 G 的期望可达吞吐量是包含于其完全子图 G_k 的吞吐量的准加权平均, 通过求解线性约束问题即可求得系统的期望可达吞吐量的数值解。仿真结果显示, 在 UWB 网络环境下, 系统的最高期望可达吞吐量可以达到完全理想状况下的约 40%。

参考文献:

- [1] GUPTA P, KUMAR PR. The Capacity of Wireless Networks[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2000, 46: 388 - 404.
- [2] DIGGAVI SN, GROSSCLAUSER M, TSE D. Even One-dimensional Mobility Increases Ad Hoc Wireless Capacity[J]. Proc IEEE Int Symp Inform Theory, Lausanne, Switzerland, 2002.
- [3] TOUMPIS S, GOLDSMITH AJ. Capacity Region for Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2003, 2(1): 737 - 748.
- [4] KNOPP R, HUMBLET PA. Information Capacity and Power Control in Single-cell Multiuser Communications[J]. Proc Int Conf Communications, Seattle, WA, 1995, 1: 254 - 335.
- [5] GROSSCLAUSER M, TSE D. Mobility Increases the Capacity of Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE/ACM Trans Networks, 2002, 10(4): 477 - 486.
- [6] SUN JZ, SAUVOLA J. Mobility and mobility management: a conceptual framework[A]. networks, 2002, ICON 2002, 10th IEEE International Conference[C].
- [7] RAJESWARAN A, SOMAYAZULU VS, FOERSTER JR. Rake performance for a pulse based UWB system in a realistic UWB indoor channel[J]. Proceedings of IEEE Int Conference on Communications, 2003, (5): 2879 - 2883.
- [8] CASSIOLI D, WIN MZ, VATALARO F. Performance of low complexity rake reception in a realistic UWB channel[J]. Proceedings of IEEE Int Conference on Communications, 2002, (5): 763 - 767, 2004.
- [9] IEEE 802.15 WPAN High Rate Alternative PHY Task Group 3 a [EB/OL]. <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/TC3a.html>, 2005.
- [10] COVER TM, THOMAS A. Elements of Information Theory[M]. John Wiley, 1991, 186 - 225.