

基于多用户检测的 Ad hoc 网络吞吐量研究

钱小聪^① 郑宝玉^② 赵贤敬^②
^①(上海交通大学 电子工程系 上海 200030)
^②(南京邮电学院 信息工程系 南京 210003)

摘要 对于基于 CDMA 的移动 Ad hoc 网络,传统方案下其终端对接收到的数据用匹配滤波器进行检测,该文则将多用户检测器引入到 Ad hoc 网络的终端中,通过抑制多址干扰来提高网络的整体性能。基于全连接有限元模型,并在介质访问子层采用时隙 ALOHA 协议的基础上,详细推导了 Ad hoc 网络的吞吐量。理论分析和实验仿真都说明多用户检测可以显著地提高 Ad hoc 网络的吞吐量。

关键词 Ad hoc 网络,多用户检测,吞吐量,干扰抑制

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1429-06

Throughput Study for Ad hoc Network with Multiuser Detection

Qian Xiao-cong^① Zheng Bao-yu^② Zhao Xian-jing^②
^①(Dept. of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)
^②(Dept. of Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract The importance of multiuser detection for CDMA-based mobile Ad hoc network is addressed in this paper. Different from conventional scheme, each terminal of the Ad hoc network in this paper is equipped with an adaptive blind linear multiuser detector. Employing slotted-Aloha protocol in MAC layer, and following full-connected network model, the throughput of Ad hoc network is studied. Theoretic analysis and simulation results show that multiuser detection can remarkably improve throughput performance of Ad hoc network.

Key words Ad hoc networks, Multiuser detection, Throughput, Interference suppression

1 引言

相比于 TDMA 和 FDMA 系统, CDMA 系统具备大容量、抗噪声、抗多径等性能优势,更适合众多无线网络使用,移动 Ad hoc 网络也不例外。最近, Bao 对采用时隙 ALOHA 协议的基于 CDMA 的 Ad hoc 网络的吞吐量进行了分析^[1]。不过他的研究中假设了两个前提:不仅 Ad hoc 网络的节点可以同时分辨并接收多个数据包,且认为远近效应是可以忽略的。这种理想化的假设和实际 Ad hoc 网络相差很大。首先,与具备基站的蜂窝 CDMA 网络不同,对分布式的 Ad hoc 网络,需要专门设计扩频码协议。扩频码协议大致有“基于发方”、“基于收方”和“混合式”等几类^[2]。其中基于收方的扩频码协议最为简单,且接收机无需对所有可能的扩频码进行遍历,不过,此时若有两个或两个以上具备相同目的节点的数据包同时被发送,它们势必在接收端发生冲突并被丢弃。另外,考虑到 Ad hoc 网络中没有专门进行集中控制的设施,且节点的位置因移动而不断变化,用传统的功率控制办法来克服远近效应是不行的。文献[2]通过在每次收发数据前交互当前功率信息的办法来辅助功率控制的实施,这不仅多占了带宽,还使节点间的控制和协作变得复杂。我们知道远近效应是由多址干扰(MAI)引起的,而多用户检测技术可以有效地抑制 MAI。目前已有一些论文专门研究多用户检测在 Ad hoc 网络中的应

用,如文献[3-6]。不过,尽管吞吐量是衡量一个网络性能的关键指标,目前尚未见到有论文对应用多用户检测的 Ad hoc 网络的吞吐量进行研究。因此,本文致力于对结合多用户检测的 Ad hoc 网络数据链路层的吞吐量进行研究。

本论文的贡献主要有 2 点:(1)它是首篇研究多址干扰对全连接有限元 Ad hoc 网络(物理层采用基于收方扩频码协议的 CDMA 模式)吞吐量的影响的文章,并揭示了多用户检测对提高吞吐量的显著作用。(2)论文同时研究了编码速率、信噪比和节点密度等系统参数对吞吐量的影响。

论文的结构如下:第 2 节给出系统模型;第 3 节对多用户检测器的选择和误码性能进行分析;第 4 节则详细推导了 Ad hoc 网络的吞吐量;第 5 节为计算机仿真结果和分析;第 6 节进行全文总结。

2 系统模型

在 Ad hoc 网络的整体建模上,本文采用文献[1]提出的“全连接有限元”模型。即假定网络的节点数目是有限的,并且任意两个节点都可以建立直接相连的链路。该模型适用于有限空间(如办公室、家庭)场合里的 Ad hoc 网络。假定网络工作在 2.4GHz 的 ISM 频段,则发射功率为 100mW 时节点的传输距离可达 100m;即使发射功率为 1mW 节点的传输距离也有 10m。因此,对于建立在办公室、家庭里的 Ad hoc 网络,任一节点都处于其它节点的无线覆盖范围内,此时进行“全连接有限元”建模是符合实际情况的。

在物理层, 我们的 Ad hoc 网络采用 DS-CDMA 制式。每个终端都分配有唯一确定的伪随机噪声(PN)码。终端采用全向天线, 并是半双工的, 即不是处于“发”状态就是处于“收”状态。我们采用基于收方的扩频码协议: 当终端 A 欲把数据包发给 B 时, 它使用 B 的 PN 码对 A 的数据进行扩频调制并发送出去(此时 A 处于发状态); 当 A 没有数据包要发送时, 就守候在 A 自己的 PN 码上, 接收或者准备接收来自其它节点的数据(此时 A 处于收状态)。在介质访问子层上, 我们采用时隙 ALOHA 协议, 并假定整个网络是时隙同步的。

在本文的研究分析中, 我们对 Ad hoc 网络还进行了下列假设:

假设 1 在一个时隙里, 一个终端只能发送或接收一个数据包。数据包的长度是固定的。

假设 2 任一终端在任一时刻里发送数据包的概率均为 p 。

假设 3 当一个终端发送数据时, 网络中的其它终端以相等的概率成为该数据包的目标终端。

3 多用户检测的方案选择及性能分析

我们的方案里, 网络的每个终端采用多用户检测器对接收到的数据包进行处理。由于终端只知道它自身对应的扩频码, 且没有使用训练序列, 所以需采用盲多用户检测。从实用角度考虑, 为了节约硬件资源, 我们采用自适应直接盲多用户检测算法。设 r 为接收到的混合信号(包含多址干扰和噪声)按扩频码片速率采样所得的向量, 接收终端对应的扩频码序列为 s_1 。传统的检测方案先用 s_1 对 r 进行相关运算再判决; 而自适应直接盲多用户检测算法则根据最小输出能量(MOE)准则, 对检测器的抽头向量 c_1 进行自适应滤波, 并用更新后的 c_1 对 r 进行相关运算并判决。MOE 准则具有全局唯一的最小点, 且等价于最小均方误差(MMSE)准则^[7]。 c_1 的更新可使用 LMS 或 RLS 算法。自适应 LMS 算法^[7]的复杂度为 $O(M)$, 其中 N 为 CDMA 系统的扩频增益。不过它的收敛速度较慢。终端需要配置存储器把算法尚未收敛时接收到的比特暂存起来, 然后用收敛后的 c_1 去检测这些比特。显然, 收敛速度的提高可以节约存储单元并减小时延。自适应 RLS 算法^[8]则具备很快的收敛速度, 不过其复杂度高达 $O(N^2)$ 。对于电池供电的 Ad hoc 网络终端, 过高的运算量会使其能量过早耗尽, 因此 RLS 算法也不适合我们。最近, 文献[9]提出了一种自适应变步长的 LMS 盲检测算法(AS-LMS), 其核心思想是用一个 LMS 算法来更新检测器的抽头系数, 同时用另一个 LMS 算法来调节第一个 LMS 算法的步长因子, 使得步长开始较大, 但随着收敛的进行步长将不断变小。每个 LMS 算法的复杂度均为 $O(M)$, 且 AS-LMS 算法的收敛速度比 LMS 算法有明显的提高。这意味着 AS-LMS 算法可使我

们在存储单元的花费和能耗这两方面取得较好的折衷, 故我们用于 Ad hoc 网络的多用户检测器采用 AS-LMS 算法。

设 p_e 表示多用户检测器的误比特率。计算 p_e 的精确解是相当困难的, 现有方法是通过高斯近似来得出 p_e 的近似解^[10]

$$p_e \approx Q\left(1/\sqrt{\alpha_1 + \sum_{i=2}^k \beta_i}\right) \quad (1)$$

其中

$$\alpha_1 = \sigma^2(1 + \|c_1 - s_1\|^2)/A_1^2 \quad (2)$$

$$\beta_i = (A_i^2 |s_i \cdot c_1|^2)/A_i^2, \quad i=2,3,\dots,k \quad (3)$$

这里 s_i 为干扰数据包的扩频码, A_1 和 A_i 分别为期望数据包和干扰数据包在接收机输入端的幅度, σ^2 为噪声的功率, $Q(\cdot)$ 为 Q 函数。参数 α_1 表征噪声对 p_e 的贡献, 而 β_i 则表征多址干扰对 p_e 的贡献。如果 c_1 等于 s_1 , 则多用户检测器退化为传统检测器。此时即使 $\sigma \rightarrow 0$, 由于扩频码的非正交性, β_i 仍制约着 p_e 。如果 c_1 的选择满足 $(s_i \cdot c_1) = 0, i=2,3,\dots,k$, 则多用户检测器实为解相关检测器。此时虽然多址干扰被完全抑制, 但代价是 $\|c_1 - s_1\|^2$ 变得较大, 导致了背景噪声的放大。基于 MMSE 准则或 MOE 准则的多用户检测器则在抑制多址干扰和避免噪声放大两方面进行了合理的权衡, 其输出 p_e 小于传统检测器和解相关检测器。

4 吞吐量分析

这里我们将对全连接有限元 Ad hoc 网络的吞吐量进行分析。设网络中共有 M 个节点(终端)。同时, 我们定义如下随机变量: L 为当前时隙里网络中发出的数据包总数(亦即处于“发”状态的终端的个数)。 X 为上面 L 个数据包中, 其目标节点正处于“收”状态的数据包的总数。 Y 为上面 X 个数据包中, 不遭遇多包冲突的数据包的总数。 N 为当前时隙里, 最终被成功接收的数据包的总数。显然, $0 \leq N \leq Y \leq X \leq L \leq M$ 。

4.1 接收矩阵的计算

为了便于统计全连接有限元 Ad hoc 网络的吞吐量, 我们定义如下接收矩阵 R :

$$R = \begin{pmatrix} r_{10} & r_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{M0} & r_{M1} & r_{M2} & \cdots & r_{MM} \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 r_{ij} 表示在整个网络于一个时隙中发送 i 个包的情况下成功接收到 j 个包的概率。显然, 当 $j > i$ 时, $r_{ij} = 0$ 。同时, 考虑到终端的半双工特性, 当 $i = M$ 时没有节点处于“收”状态, 故 $r_{M0} = 1$, 且 $r_{Mj} = 0 (j=1,2,\dots,M)$ 。

下面我们计算 R 中的非零元素 $r_{in} (1 \leq i \leq M-1 \text{ 且 } 0 \leq n \leq i)$ 。该概率可以表示为

$$\begin{aligned}
r_m &= \sum_{x=n}^l \text{Prob}\{N=n, X=x | L=l\} \\
&= \sum_{x=n}^l \text{Prob}\{N=n | L=l, X=x\} \text{Prob}\{X=x | L=l\} \quad (5)
\end{aligned}$$

根据假设 3, 有

$$\text{Prob}\{X=x | L=l\} = C_l^x \left(\frac{M-l}{M-1} \right)^x \left(\frac{l-1}{M-1} \right)^{l-x} \quad (6)$$

余下的工作就是分析 $\text{Prob}\{N=n | L=l, X=x\}$ 。由于我们的扩频码协议是基于收方的, 当有两个或两个以上的数据包的目标节点是同一个终端时, 该目标终端将无法分辨这些包, 从而导致这些包被丢失。在当前时隙里, 网络中因多包冲突而被丢弃的包的总数为 $(X-Y)$, 显然, 此时有 $X-Y \geq 2$ 。故

$$\begin{aligned}
&\text{Prob}\{N=n | L=l, X=x\} \\
&= \sum_{\substack{y=n \\ y \leq (x-1)}}^x \text{Prob}\{N=n, Y=y | L=l, X=x\} \\
&= \sum_{\substack{y=n \\ y \leq (x-1)}}^x \text{Prob}\{N=n | L=l, X=x, Y=y\} \\
&\quad \cdot \text{Prob}\{Y=y | X=x, L=l\} \quad (7)
\end{aligned}$$

4.1.1 $\text{Prob}\{Y=y | X=x, L=l\}$ 的分析 我们想要分析的是: 在一个时隙里有 l 个包 ($0 \leq l \leq M-1$) 被一齐发送(这同时意味着只能有 $(M-l)$ 个节点处于“收”状态), 且其中 x 个包的目标终端正好处于“收”状态的情况下, 有 y 个包没遭遇冲突的概率。它可以等效为这样一个问题: 把 x 个球放入 $(M-l)$ 个盒子, 使得 y 个盒子刚好各装有一个球, 而其余盒子或者为空, 或者其装入的球数大于等于 2。分 3 种情况, 我们求解该问题:

(1) 情况 1 球的总数小于盒子的总数, 即 $x < M-l$ 。我们把这个问题的分析拆成 3 步:

第 1 步 我们从 x 个球中选出 y 个(共有 C_x^y 种选法), 将这 y 个球逐个放入空的盒子中。该方法对应的概率为 $p_0 = \prod_{i=0}^{y-1} \frac{M-l-i}{M-l}$, 所以第 1 步对应的概率为 $p_1 = C_x^y p_0 = \frac{C_x^y C_{M-l}^y y!}{(M-l)^y}$ 。

第 2 步 第 1 步结束后, 剩余 $(x-y)$ 个球和 $(M-l-y)$ 个空盒。我们把剩下的 $(M-l-y)$ 个空盒看成一个集合 U , 让剩余的 $(x-y)$ 个球都落入集合 U 中, 其对应的概率为: $p_2 = \left(\frac{M-l-y}{M-l} \right)^{x-y}$ 。

第 3 步 我们考虑如何将剩余的 $(x-y)$ 个球在集合 U 中进行分配, 保证 U 里的每个盒子或者为空, 或者装入两个及两个以上数目的球。对于符合要求的分配方案, 设共有 m 个盒子装入了两个或两个以上数目的球, 显然, $1 \leq m \leq \min \left(M-l-y, \left\lfloor \frac{x-y}{2} \right\rfloor \right)$, 其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 下取整。设这 m 个盒子所装球的数目分别为 $j_i (i=1, 2, \dots, m)$, 则 j_i 满足: $j_i \geq 2$ 且 $\sum_{i=1}^m j_i = (x-y)$ 。于是, 我们得到第 3 步对应的概率:

$$p_3 = \left(\frac{1}{K} \right)^{x-y} \sum_{m=1}^{\min \left(K, \left\lfloor \frac{x-y}{2} \right\rfloor \right)} \left[C_K^m \sum_{\substack{j_1+j_2+\dots+j_m=x-y \\ j_i \geq 2 (i=1, 2, \dots, m)}} C_{x-y}^{j_1} C_{x-y-j_1}^{j_2} C_{x-y-(j_1+j_2)}^{j_3} \dots C_{x-y-\sum_{i=1}^{m-1} j_i}^{j_m} \right] \quad (8)$$

其中 $K \square M-l-y$ 。

p_1, p_2, p_3 者的乘积即为我们所求的概率。即当 $x < M-l$ 时,

$$\text{Prob}\{Y=y | X=x, L=l\} = \frac{C_x^y C_{M-l}^y y!}{(M-l)^y} \left(\frac{M-l-y}{M-l} \right)^{x-y} p_3 \quad (9a)$$

(2) 情况 2 球的总数等于盒子的总数, 即 $x=M-l$ 。显然此时 y 的取值只能为 $1, 2, \dots, (x-2)$ 和 x 。当 $y \leq x-2$ 时, 分析过程等同于情况 1; 当 $y=x$ 时, 问题简化为将 $(M-l)$ 个球放入 $(M-l)$ 个盒子, 使得每个盒中装有一个球。于是, 当 $x=M-l$ 时,

$$\begin{aligned}
&\text{Prob}\{Y=y | X=x, L=l\} \\
&= \begin{cases} \frac{C_x^y C_{M-l}^y y!}{(M-l)^y} \left(\frac{M-l-y}{M-l} \right)^{x-y} p_3, & y \leq M-l-2 \\ \frac{(M-l)!}{(M-l)^{M-l}}, & y = M-l \end{cases} \quad (9b)
\end{aligned}$$

(3) 情况 3 球的总数大于盒子的总数, 即 $x > M-l$ 。此时, 若 $y \leq M-l-1$, 分析过程等同于情况 1; 若 $y > M-l$, 意味着所需盒子的数目超过所提供盒子的数目, 故概率为 0; 若 $y=M-l$, 当所有 $(M-l)$ 个盒子各装有 1 个球后, 剩下的 $(x-y)$ 个球则没有盒子可装, 故概率亦为 0。于是, 当 $x > M-l$ 时,

$$\begin{aligned}
&\text{Prob}\{Y=y | X=x, L=l\} \\
&= \begin{cases} \frac{C_x^y C_{M-l}^y y!}{(M-l)^y} \left(\frac{M-l-y}{M-l} \right)^{x-y} p_3, & y \leq M-l-1 \\ 0, & y \geq M-l \end{cases} \quad (9c)
\end{aligned}$$

至此, 由式(9a), (9b), (9c)和式(8), 我们解决了 $\text{Prob}\{Y=y | X=x, L=l\}$ 。

4.1.2 $\text{Prob}\{N=n | L=l, X=x, Y=y\}$ 的分析 这个概率与物理层的误比特率 p_e 有关, 而 p_e 又与多址干扰的分布有关。假定我们的终端均匀分布在一个 $2x_0 \times 2x_0$ m² 的方形空间内。设终端天线的最大线性尺寸 $D \approx 1$ cm, 工作频率为 2.4GHz(对应波长 $\lambda = 0.125$ m), 则 Fraunhofer 距离^[11]为: $d_f = (2D^2)/\lambda = 1.6$ mm。设 d 表示网络中任意两个终端天线间的距离, 考虑到器件的物理体积, 即使两个终端紧挨在一起, d 也会大于 d_f 。也就是说, 对网络中的任一终端 A , 网络中的另一终端 B 肯定处于 A 的远场区。用 P_t 表示 A 的发射功率, 那么 A 的信号在终端 B 处的接收功率 P_r 为^[11]

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_t \quad (10)$$

定义随机变量 $\psi \square d^2/x_0^2$ 。设 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 为任意两个节点的对 x_0 归一化的坐标, x_1, y_1, x_2, y_2 为 4 个独立同分布的随机变量, 其概率密度分布函数(pdf)为

$$f(x) = \begin{cases} 1/2, & -1 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

记 $X=x_1-x_2, Y=y_1-y_2$, 则 X 和 Y 为一对独立同分布的随机变量, 对应的pdf为

$$f_X(x) = \begin{cases} (2+x)/4, & -2 \leq x < 0 \\ (2-x)/4, & 0 \leq x \leq 2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

再令 $Z_1=X^2, Z_2=Y^2$, 则 Z_1 和 Z_2 为一对独立同分布的随机变量, 对应的pdf为

$$f_Z(z) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{z}} [f_X(\sqrt{z}) + f_X(-\sqrt{z})] & \\ 0 & \\ \frac{1}{2\sqrt{z}} - \frac{1}{4}, & 0 < z \leq 4 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

根据 $\psi = Z_1 + Z_2$, 得到随机变量 ψ 的pdf为

$$f_\psi(\varphi) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_Z(\varphi-z)f_Z(z)dz = \begin{cases} \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{16} - \frac{\sqrt{\varphi}}{2}, & 0 < \varphi \leq 4 \\ \frac{\pi - 2\cos^{-1}(\frac{8}{\varphi} - 1)}{4} + \frac{\sqrt{\varphi-4}}{2} - \frac{\varphi}{16} - \frac{1}{2}, & 4 < \varphi < 8 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

规定Ad hoc网络中各个终端的发射功率均等于 P_t 。我们研究在一个时隙里有 k 个数据包被同时发送的情况下, 终端检测输出的平均误比特率。不失一般性, 我们对数据包 1 对应的目标接收机进行考虑。由于此时其它 $(k-1)$ 个数据包对该接收机来说是干扰, 根据式(1)-式(3)和式(10), 终端检测输出的平均误比特率可以用下面的积分表示:

$$p_e(k) = \int_{\varphi_1} \int_{\varphi_2} \dots \int_{\varphi_k} \mathcal{Q} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{(4\pi x_0 \sigma)^2 (1 + \|c_1 - s_1\|^2) \varphi_1}{\lambda^2 P_t} + \sum_{i=2}^k \frac{\varphi_i |s_i, c_1|^2}{\varphi_i}}} \right) \cdot f_\psi(\varphi_1) f_\psi(\varphi_2) \dots f_\psi(\varphi_k) d\varphi_1 d\varphi_2 \dots d\varphi_k \quad (12)$$

从式(12)可看到, 对于不同的多用户检测器(即不同的 c_1), 得到的 $p_e(k)$ 将不同。这将导致 $\text{Prob}\{N=n | L=l, X=x\}$ 的差异, 并最终导致吞吐量上的差异。

当数据包的长度固定为 L_{pkt} 个比特, 并设一个数据包里, 最多 t 个错误比特可以由纠错编码得到改正, 那么在有 k 个多址干扰的情况下, 成功接收一个数据包的平均概率为

$$P_c(k) = \sum_{i=0}^t C_{L_{\text{pkt}}}^i p_e(k)^i (1 - p_e(k))^{L_{\text{pkt}}-i} \quad (13)$$

当一个时隙里发送的数据包总数为 l 时, 由于网络的全连接特性, MAI 的数目为 $(l-1)$, 故有

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{N=n | L=l, X=x, Y=y\} \\ = C_y^n P_c(l-1)^n (1 - P_c(l-1))^{y-n} \end{aligned} \quad (14)$$

至此, 把式(9)和式(14)代回式(7), 则可得出 $\text{Prob}\{N=n | L=l, X=x\}$ 。再代回式(5), 则接收矩阵 \mathbf{R} 的每一个非零元素

都可得到确定。

4.2 吞吐量的定义和计算

由第 2 节中的假设 2, 在一个时隙内同时有 l 个节点发送数据包的概率为

$$p_l = C_M^l p^l (1-p)^{M-l}, \quad l=0,1,2,\dots,M \quad (15)$$

我们定义 Ad hoc 网络的吞吐量 T 为一个时隙内网络中平均成功接收到的数据包数目。即

$$T = \sum_{l=1}^M p_l \sum_{n=0}^l n r_{ln} \quad (16)$$

其中 r_{ln} 即为矩阵 \mathbf{R} 的相应元素, 其对应的计算已在 4.1 节中得到了解决。

式(16)定义的吞吐量隐藏着与系统资源(如带宽)的关系。公平起见, 再定义“归一化吞吐量”如下^[1]:

$$\bar{T} = r_c T / N \quad (17)$$

这里 N 为CDMA系统的扩频增益, r_c 为信道编码的码率。采用的是分组码, 据文献[12], 用由Gilber-Varsharmov下界得出最大码率来代表 r_c , 有

$$r_c = 1 + \alpha \log_2 \alpha + (1 - \alpha) \log_2 (1 - \alpha) \quad (18)$$

其中

$$\alpha = (2t + 1) / L_{\text{pkt}} \quad (19)$$

5 仿真结果与分析

基于本文在第 2 节建立的系统模型, 我们进行计算机仿真。仿真中的固定参数如下: 所有节点均匀分布于一个 20m×20m 的方形区域并随机移动, 移动速率均匀分布于 $(0, v_{\text{max}})$, $v_{\text{max}}=1\text{m/s}$ 。系统工作频率为 2.4GHz, 扩频增益 $N=31$, 天线的最大物理尺寸为 1cm, 发射功率固定为 20dBm, 一个时隙内, 数据包的长度固定为 100Byte。仿真中的可变参数有: 节点的总数 M , 任一终端在任一时隙发送数据包的概率 p , 一个数据包中可纠的错误比特总数 t , 噪声功率 P_n 。值得说明的是: 由于区域的面积已固定, 故参数 M 反映了网络节点的密度; 由于数据包长已固定, 故参数 t 反映了编码的码率; 由于发送功率已固定, 且随机变量 ψ 的均值可以根据式(11)计算出来, 故参数 P_n 反映了数据包的接收信噪比。仿真的目标是为了验证采用文中第 3 节介绍的多用户检测器的Ad hoc网络较采用传统检测器的Ad hoc网络在吞吐量性能上的提高。

图 1—图 4 为计算机仿真的结果。仿真时我们让 p 在 0 到 1 之间每隔 0.05 均匀取值。对采用多用户检测的 Ad hoc 网络(下面简称为 MUD 方案), 我们用实线把不同 p 下的仿真结果连接起来; 对采用传统检测器的 Ad hoc 网络(下面简称为 CD 方案), 则用虚线把不同 p 下的仿真结果连接起来。从图 1—图 4 中可以看出, 起初, 由于有更多的数据包被发送, 吞吐量随 p 近似线性地迅速增加。不过 p 的增大也意味着处于收状态的节点数目的下降, 同时意味着几个数据包在目的节点发生冲突的概率的增大, 所以吞吐量增长的速度随

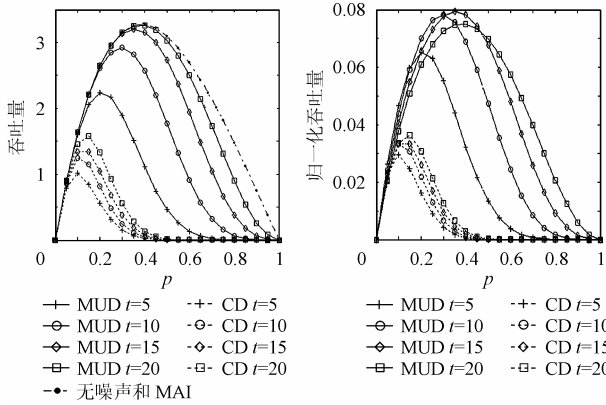


图 1 吞吐量 vs. p (t 不同, $M=20$, $P_n=-60\text{dBm}$)

图 2 归一化吞吐量 vs. p (t 不同, $M=20$, $P_n=-60\text{dBm}$)

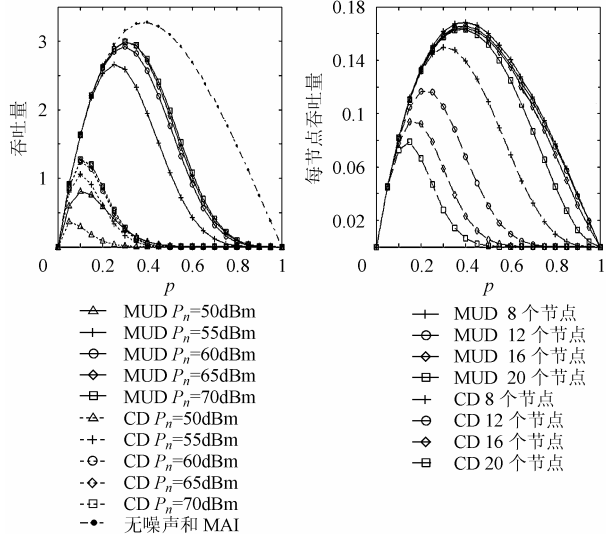


图 3 吞吐量 vs. p (P_n 不同, $M=20$, $t=10$)

图 4 每节点吞吐量 vs. p (M 不同, $t=20$, $P_n=-60\text{dBm}$)

p 的增大而逐步下降,并导致其峰值的出现。在经过峰值后,随着 p 继续增大,数据包因目的节点处于发状态或因多包冲突而被丢弃的比率将持续增大,因此吞吐量将不断减小至零。

从图 1—图 4 还可以看出,不管在什么情况下, MUD 方案均明显优于 CD 方案。这个优越性具体表现于两个方面:其一, MUD 方案的吞吐量要高于 CD 方案;其二,当吞吐量达到其峰值时, MUD 方案下对应的 p 值要大于 CD 方案下的 p 值(以图 1 中 $t=20$ 为例, MUD 方案下当 p 为 0.4 时吞吐量才达到其峰值 3.25packet/slot;而 CD 方案下,当 p 仅为 0.15 时吞吐量便达到了其峰值 1.58packet/slot)。我们知道多址干扰是劣化接收机误比特性能的主要原因,在 p 增大或网络节点变密时尤为显著。能有效地抑制多址干扰,正是 MUD 方案具备这两个优越性的原因。

图 1—图 2 分别给出的是当 $t=5,10,15,20$, $M=20$, $P_n=-60\text{dBm}$ 的时候,吞吐量及归一化吞吐量随 p 的变化曲线。图 1 显示无论哪一种方案, t 的增大都可提高吞吐量。图 1 还用点划线给出了理想情况(即没有噪声和多址干扰的情况)下的吞吐量曲线,它是当 $M=20$ 时吞吐量的上界。我们看到, $t=20$ 时 MUD 方案的吞吐量性能已非常接近于该上界。但对于考

虑了带宽因素的归一化吞吐量, t 并非越大越好;图 2 中 MUD 方案下最佳归一化吞吐量就是在 $t=15$ 时取得的。

图 3 给出的是当 $P_n=-50, -55, -60, -65, -70\text{dBm}$, $M=20$, $t=10$ 的时候,吞吐量随 p 的变化曲线。不出所料,噪声的增大会使吞吐量下降。不过我们发现,对应于 $P_n=-60, -65, -70\text{dBm}$ 的 3 条曲线挨得很近,这是因为在低噪声环境下,影响吞吐量的主要因素是多址干扰而非噪声。

最后讨论网络节点密度和吞吐量的关系。若 M 增大,由于有更多的节点收发数据包,网络吞吐量自然会上升。为了合理反映节点密度对吞吐量的影响,我们让网络吞吐量除以节点总数 M ,把得到的商定义为“每节点吞吐量”。图 4 给出了当 $M=8,12,16,20$, $t=20$, $P_n=-60\text{dBm}$ 情况下的每节点吞吐量曲线。仿真表明每节点吞吐量随着 M 的增大呈下降趋势。这是因为节点变密后,终端遭受的多址干扰之和在变强。同时我们看到,因为 MUD 可以抑制多址干扰,所以随 M 增大时, MUD 方案下每节点吞吐量的下降相对较小,而 CD 方案下每节点吞吐量的下降则非常明显。

6 结束语

从吞吐量性能的角度,本文分析了多用户检测对基于 CDMA 的 Ad hoc 网络的重要意义。针对室内应用的情形,论文采用全连接有限元 Ad hoc 网络模型,并采取时隙ALOHA 协议。从实用性考虑,我们选择了快速收敛且相对简单的 AS-LMS 盲算法对接收的数据包进行多用户检测。论文的重点是对 Ad hoc 网络的吞吐量进行推导和分析,并进行计算机仿真。对比采用传统检测器的方案,我们看到多用户检测器可以显著提高 Ad hoc 网络的吞吐量性能。同时,我们通过仿真研究了码率、信噪比和网络节点密度等参数对吞吐量的影响。

参考文献

- [1] Bao J Q, Tong L. A performance comparison between Ad hoc and centrally controlled CDMA wireless LANs. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2002, 1(4): 829-841.
- [2] Muqattash A, et al.. Solving the near-far problem in CDMA-based Ad hoc networks. *Ad hoc Networks Journal*, 2003, 1(4): 435-453.
- [3] Shrader B, Giles T. Scheduling and performance of multihop radio networks with multiuser detection. http://www.s3.kth.se/radio/Publication/Pub2002/Shrader2002_1.pdf, 2002.5.
- [4] Sankaran C, Ephremides A. The use of multiuser detectors for multicasting in wireless Ad hoc CDMA networks. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2002, 48(11): 2873-2887.
- [5] Cai Z, et al.. Minimum average transmission power routing in CDMA Ad hoc networks utilizing the blind multiuser detection. *Proceedings of Parallel and Distributed Processing Symposium.*, IEEE, Fort Lauderdale, FL, USA, 2002: 428-433.

- [6] De S, *et al.*. An intergrated cross-layer study of wireless CDMA sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(7): 1271–1284.
- [7] Honing M, *et al.*. Adaptive blind multiuser detection. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1995, 41(4): 944–960.
- [8] Poor H V, Wang X D. Code-aided interference suppression for DS/CDMA communications—Part II: parallel blind adaptive implementations. *IEEE Trans. on Commun.*, 1997, 45(9): 1112–1122.
- [9] Krishnamurthy V, *et al.*. Adaptive step-size algorithm for blind interference suppression in DS/CDMA systems. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2001, 49(1): 190–201.
- [10] Burnashev M V, Poor H V. On the probability of error in linear multiuser detection. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2003, 49(8): 1922–1941.
- [11] Rappaport T S. *Wireless Communications Principles and Practice*. NJ: Prentice-Hall, 1996, Section 3.1.
- [12] Morrow Jr R K, Lehnert J S. Packet throughput in slotted aloha DS/SSMA radio systems with random signature sequences. *IEEE Trans. on Commun.* 1992, 40(7): 1223–1230.
- 钱小聪: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为现代通信中的智能信息处理、Ad hoc 网络.
- 郑宝玉: 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 上海交通大学兼职教授, 研究方向为通信信号处理、Ad hoc 网络等.
- 赵贤敬: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为统计信号处理及在移动通信中的应用.