无线局域网 MAC 层协议的性能研究

摘 要

无线局域网是 90 年代计算机网络与无线通信技术相结合的产物，它提供了使用无线多址信道的一种有效方法来支持计算机之间的通信，并为通信的移动化、个人化和多媒体的应用提供了潜在的手段。无线局域网作为当前通信技术发展的一个热点方向，人们在这一领域的研究方兴未艾。本篇论文主要对 802.11 无线局域网中的 MAC 层协议进行了探讨和研究。

在介绍背景知识和比较现有技术的基础上，本文首先相细细阐述了无线传输的特点以及这些特点对于运用在无线网络中的 MAC 协议的影响。然后对现有的各种运用在无线网络环境中的 MAC 协议进行归纳总结，通过仿真，分析了这些随机竞争 MAC 协议的性能和特点，讨论了适用于在无线局域网下的 MAC 协议。对于目前处于主流地位的 802.11 标准中的 MAC 层和物理层的关键技术进行了详细介绍。

在以上研究的基础上，本文对 82.11 的 MAC 层所采用的 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 协议进行了重点分析，建立了基于该协议的仿真模型，搭建了仿真平台，深入地探讨了此协议在 WLAN 中的性能及实用性；重点分析了协议的吞吐量、时延及抗隐藏终端问题的性能，探讨了协议中有关算法的选择和参量的设置对协议性能的影响。

通过对不同条件下的仿真的结果进行分析和比较表明，

CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 协议具有吞吐量大、时延小、抗隐藏终端、带终端能能力强的特点。最后提出了提高协议性能的原则。

关键词： 802.11WLAN ，OFDM， MAC 协议，CSMA/CA

RESEARCH ON MAC PROTOCOLS FOR WLAN

ABSTRACT

Wireless Local Network (WLAN), as the combination of the computer network and the wireless communication technology developed from 90's, provides a effective method in using wireless multiple access channel to support the communication between computers, and also provides a latent method for communication mobilization, individualization and multimedia application. Currently, WLAN, as a hot spot of communication, attracts many researchers discussing and focusing their research on this field. This paper mainly focuses on the MAC protocols in wireless network.

At first, the paper described the characteristics of wireless transition and the influences from those characteristics on the MAC protocols used in wireless network, and then summed up the current MAC protocols used in wireless network environment. Some simulations had been made to evaluate the capacity of MAC protocol: how the system performance will be influenced by different kinds of MAC protocol, and which is the best for WLAN. This paper also introduced the key technology of MAC layer and PHY layer used in the 802.11 in detail.

Based on the former research and deeply analyzing the CSMA/CA+RTS/CTS+ACK protocol, a simulation model was established and implemented. By means of the proposed model, we provided a throughput and delay performance evaluation of both access mechanism of DCF. This paper had also given the simulation result for the efficiency of the protocol to handle the hidden terminal problem. At last, this paper discussed the impacts of different parameters that are chosen on the performance of the protocol.

Simulation results have shown that the CSMA/CA+RTS/CTS+ACK protocol can achieve higher throughput, lower delay and better capacity to solve the hidden terminal problem .At last, we proposed the principles to improve the protocol's capability.

Keywords: 802. 11WLAN , OFDM, MAC protocol, CSMA/CA

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名：　　日期：

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京邮电大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京邮电大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

保密论文注释：本学位论文属于保密在　年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

本人签名：　　日期：

导师签名：　　日期：

第一章 绪论

无线局域网（Wireless LAN,以下简称 WLAN）是 90 年代计算机网络与无线通信技术相结合的产物，它提供了使用无线多址信道的一种有效方法来支持计算机之间的通信，并为通信的移动化、个人化和多媒体应用提供了潜在的手段。随着个人数据通信的发展，功能强大的便携式数据终端以及多媒体终端的广泛应用，为了实现任何人在任何时间、任何地点均能实现数据通信的目标，要求传统的计算机网络由有线向无线，由固定向移动，由单一业务向多媒体发展，更进一步推动了 WLAN 的发展。近年来，随着无线局域网标准、技术的发展，无线局域网产品逐渐成熟，无线局域网得到了业界以及公众的热情关注，无线局域网的应用也逐渐发展起来。相对于蓝牙、3G 等无线技术，无线局域网正成为当前无线领域中一个引人瞩目的热点。

1.1 无线局域网的概念

无线局域网(Wireless LAN)的概念是相对于传统意义上的有线局域网(LAN)而言的。有线局域网就是我们目前常见的采用电缆、光纤和双绞线作为数据传输介质的网络。有线局域网无法实现可移动的网络通信，在某些情况下还存在着布线繁琐、线路容易损坏、对地形要求高、安装复杂等缺陷。无线局域网是指无需布线即采用无线传输介质就可实现计算机之间互联的网络，它是在有线局域网基础上发展起来的，它不仅是有线局域网的补充，而且其适用范围广泛，不但能够替代传统的物理布线，而且在传统布线无法解决的环境或行业，都能够方便地组建无线网络。目前基于 IEEE802.11a 标准，采用正交频分复用（OFDM）编码方案的无线局域网的物理层速率可达 54Mb/s，足以支撑传送广播级的视音频数据。可以预见，无线局域网技术不仅将在广电系统的办公自动化和智能化中发挥积极的作用，而且也将可能在视音频数据的传输中得到应用。此外，无线局域网已能够通过与广域网相结合的形式提供移动互联网的多媒体业务。无疑，在今后的网络发展中，无线局域网将以它的高速传输能力和灵活性发挥重要作用。

1.2 无线局域网的研究现状

1EEE802.11 委员会于 1997 年 6 月制定出全球第一个无线局域网标准 1EEE802.11。相继推出了新的高速标准 802.11b 和 802.11a 两个新标准,而且在前不久又推出了相当于前二者的混合标准 802.11g，使得 WLAN 的速度又向前迈进了一大步。目前的无线局域网技术已经相当成熟，速率也从 1Mbps 增长到了

54Mbps。随着标准的发展与无线网络产品的成熟，未来的无线局域网将会在通信的移动化、个人化和多媒体业务的提供等领域得到进一步的发展。将于2005年夏季完成的802.11e标准，用于定义优先级，并为数据、语音和视频流量提供基本的QoS水平。下面对几种流行的无线局域网标准做个介绍。

1．802.11标准简介

802.11是目前占据主流地位的无线局域网协议。

和其他IEEE802标准一样，802.11协议主要是在ISO协议的最低两层（物理层和数据链路层）进行了一些规定。任何局域网的应用程序、网络操作系统或者是像TCP/IP、Novell Netware都能够在802.11协议上兼容运行。

802.11定义了两种类型的设备，一种是无线终端站（也就是前文中所说的无线用户节点），另一种称为无线接入点（Access Point，AP），其作用是提供无线和有线网络之间的桥接。无线接入点类似于蜂窝无线网络中的基站，可以将多个无线终端站聚合到有线的网络上。

802.11定义了两种模式：infrastructure模式和ad hoc模式。在infrastructure模式中，无线网络至少有一个和有线网络连接的无线接入点，和一系列的无线终端站。这种配置成为一个基本服务集合（Basic Service Set，BSS）。BSS是802.11中最基本的结构模块，一个BSS所覆盖的区域被称为基本服务区域(Basic Service Area，BSA)，BSA与蜂窝移动系统中的蜂窝概念类似。两个或多个BSS构成的子网称之为扩展服务集合（Extended Service Set，ESS），ESS将其中的BSS统一起来组成一个分布系统（Distribution System，DS）。Ad hoc模式（也称为点对点模式peer to peer模式或IBSS Independent Basic Service Set）是一种802.11中的简单的系统构成方式，以这种方式连接的设备之间互相之间可以直接进行通信，而无需经过一个无线接入点来与有线网络进行连接。这种方式对于不需要访问有线网络中的资源，而只需要实现无线设备之间互相通讯的环境中特别有用。

2．HomeRF简介

HomeRF工作组成立于1997年，是由美国家用射频委员会领导的。它成立的技术与商业动机和其他几项技术十分相似，其宗旨是在消费者能够承受的前提下，建设家庭语音、数据内联网。HomeRF工作组于1998年制定了共享无线访问协议（Shared Wireless Access Protocol，SWAP）。该协议主要针对家庭无线局域网，采用简化的IEEE802.11协议标准和DECT。Home RF工作组的工作频率为2.4GHz，支持语音和数据业务的传输。

3．HIPERLAN2简介

HiperLAN2是为集团消费者、公共和家庭环境提供无线接入到因特网和未来多媒体，即实时视频服务。由欧洲电信标准化协会(ETSI)的宽带无线电接入网络(BRAN)小组着手制

定，已推出 HiperLAN1 和 HiperLAN2。有人称 HiperLAN2 代表目前发展阶段的最先进的 WLAN 技术，有人也称其为是下一代高速 WLAN 技术的标准,其工作在 5GHZ，速率可达 54Mbps。而且作为一种标准，特别是在欧洲它得到了业界的广泛支持。

1.3 本论文的主要工作及章节安排

无线局域网是当前通信技术发展的一个重要方向。而其无线的传输方式使运用在无线网络上的 MAC 协议具有许多独特的性质。为了满足未来无线局域网的各种发展需求，需要对当前使用中的 MAC 协议进行细致的分析与改进。本论文的工作主要集中在如下方面：主要研究无线网络的各种随机接入方式，重点研究和分析 IEEE802.11a 无线局域网 MAC 层机制的性能，并且考虑到未来无线网络的发展，提出了能够满足未来实时业务的无线局域网 MAC 的实现方式。

- 详细阐述了无线传输的特点（包括信道特点，传输特点以及运用中出现的独特问题），以及这些特点对于运用在无线网络中的 MAC 协议的各种影响；
- 对现有的无线网络中的多址接入方式进行归纳总结，对它们进行了理论分析和性能仿真，学习对接入协议的研究和分析的方法；
- 详细介绍了目前处于主流地位的 802.11 标准中的物理层和 MAC 协所采用的关键技术；
- 建立仿真模型，搭建仿真平台；在该仿真平台下，研究 IEEE802.11a DCF 机制吞吐量性能和时延特性，研究对象包括 CSMA/CA +ACK 和 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 机制；研究参数对吞吐量性能和时延特性的影响，主要研究隐藏终端、退避算法等对协议性能的影响，最终找到能使网络性能最佳的参量的设置。

章节安排如下：

第二章介绍了无线传输的特点以及这些特点对于运用在无线网络中的 MAC 协议的各种影响；

第三章重点研究了 802.11a 无线局域网的物理层和 MAC 层的关键技术，重点对物理层的 OFDM 技术和 MAC 层的 DCF 接入机制进行了详细阐述；

第四章是本文重点，搭建仿真平台，研究 802.11 无线局域网 MAC 层 DCF 机制的性能，并对 DCF 机制的仿真结果与分析讨论，深刻的探讨了抗隐藏终端的问题。

第五章对全文进行了总结，对以后的工作做了展望。

第二章 无线网络中所使用的接入协议

本章主要介绍无线网络的特点和无线网络中的一些常见的随机接入协议，通过对无线网络环境和无线信道的研究，以及对几种常见的随机接入协议在无线网络环境下性能的仿真分析，来说明在无线环境下对这些协议进行改进的必要性。

2.1 无线局域网中传输媒介特性

无线传输媒介的特性使得对于无线局域网中的 MAC 协议的设计上与有线网络中的 MAC 协议有很大的差别，并且更有挑战性。这些无线传输媒介的特性在于以下方面：

- 半双工操作：与有线通信系统不同，在无线通信系统中，如果一个无线通信节点要在发送数据的同时进行数据接收是非常困难的。因为采用半双工的传输方式，无线节点在发送的时候无法检测到在无线信道上发生的冲突，因此以太网中所使用的冲突检测的方式在这里是不可行的。作为解决办法，所有运用在无线网络中的 MAC 协议都尝试采用冲突避免机制来降低冲突的可能。
- 时变信道：受到发生在无线信道上的反射、衍射和散射现象的影响，无线节点接收到的信号是随时间而变化的，接收信号的能量也会随着时间而发生改变。这种现象称为无线信道上的多径传播。为了优化在时变链路上的传输质量，无线通信广泛采用握手策略。
- 突发信道差错：由于时变信道以及变化的信号能量，无线通信中存在的差错比有线通信中的多得多。由突发性差错引起的差错可以使用以下技术来减少：更小的传输用包结构、前向纠错编码或是重发机制。使用在链路层的重发机制是一种广泛采用的策略。许多协议利用接收节点在接到发送节点发来的信息之后，发送确认消息（ACK）来检测可能出现的数据包差错。
- 载波检测的位置相关性：在自由空间中传输的信号强度是按照所传播的距离的平方进行衰减的。当有无线节点在进行发送时，只有在一定范围内的节点才能检测到正在发送中的节点在无线信道上的信息。这种与节点位置有关的载波检测引起了以下三种情况：
  - 隐藏节点：当一个无线节点在接收节点的检测范围内，而不在发送节点的检测范围内就称该无线节点为发送节点的隐藏节点。

- ✧ 暴露节点：暴露节点现象与隐藏节点现象是相互对应的。当一个无线节点在发送节点的检测范围内，而不在接收节点的检测范围内，就称其为暴露节点。
- ✧ 捕获：当同时有两个无线节点向同一个节点发送信息时，如果接收节点可以无差错地接收其中一个无线节点发来地信息，这种情况就叫做捕获。

2.2 无线媒介通信要考虑的问题

由于在使用目的和使用方法上的差异，无线通信还遇到了一些在有线通信中不存在的问题，这些问题如下：

- ◆ 无线频率分配：无线网络的操作要求所有的用户节点采用相同的频率进行无线通信。合理地为所有的用户节点的各种请求分配可用的无线频率资源是相当耗时的一个过程。
- ◆ 冲突、干扰和可靠性：无线通信中的冲突通常是由于多个无线节点同时在相同的频段上试图进行发送而造成的。这是由于在无线信道被占用的时候，所有拥有数据需要发送的无线节点都在等待无线信道上的传输结束，并且这些无线节点都试图在这个传输结束的时候，在无线信道上开始进行自己的传送。这样如果有多个节点都在进行等待，这些无线节点就有可能在传输结束的时候互相冲突。除此之外，无线信道上的冲突也可能由前面所说的“隐藏节点”现象引起。干扰还可能是多径衰落现象的结果，其明显的表现就是在接收端信号幅度和相位的随机抖动。一般而言，通信信道的可靠性是由平均比特错误率（BER）来衡量的，无线通信可以通过自动重发请求（ARQ）和前向纠错编码（FEC）来提高可靠性。
- ◆ 安全性：在有线网络中，由于传输的媒质可以在物理上被保护起来，这样就能够比较容易地控制对网络的访问。而在无线网络中，因为传输媒质是暴露在公共环境中的，安全性的保证就较为困难。在实际应用中，无线通信通常是采用加密的方法来保证数据传送的私密性的，但这会在增加费用并降低系统的总体性能。但是另一方面，由于无线通信中传输范围的限制，对于传输范围以外的节点而言，无线通信有着独特的安全性保证。
- ◆ 电源消耗：一般而言，连接在有线网络上的设备都可以直接得到电网的电源供应，因此不存在电源不足的问题。而无线设备为了保证可移动性或是可携带性，通常采用电池供电。这样，无线设备就必须考虑如何节省电源消耗，以延长设备的使用时间。

- 电磁辐射与人体健康：关于无线通信中的电波辐射对于人体健康的影响的研究一直在进行当中，虽然目前并没有关于这方面的权威性文章，但是 WLAN 也必须考虑降低电磁辐射的问题。
- 移动性：与处在固定地点使用的有线网络设备相比，无线网络设备的优势就在于其移动的自由性。因此，无线通信系统的设计上要考虑到移动用户在服务区域边界所进行的切换以及路由业务。
- 吞吐量：理想的 WLAN 传输速率应当与有线网络相当，但是由于实际应用上的一些约束以及有限的可用带宽，一般 WLAN 只能支持 1—20Mb/s 的传输速率。另外，为了支持多个传输同时进行，在 WLAN 的实际应用中经常采用扩频技术。

2.3 无线 MAC 协议的作用及其性能标准

在一个由一定数量的无线通信终端所组成的无线系统中，所有终端共享同样的无线媒介向中央基站进行不同业务的传送。这样就需要一个基于媒介控制协议（MAC）的过程来为各个终端分配送使用的无线媒介资源，避免在媒介上发生冲突。

为了评估提出的各种各样的协议，必须理解 MAC 协议的各种标准。延时，吞吐量，公平性，对多媒体的支持，以及稳定性是广泛使用的比较 MAC 协议性能的标准。对衰落的健壮性和电源消耗是比较无线 MAC 协议的额外标准。下面是关于这些标准的简短描述：

- 延时：延时是数据包在 MAC 队列中的数据所用的平均时间，特别是指从进入队列到传送完毕所用的时间。延时与业务特性是决定延时的两个因素，因此在比较不同协议的延时性能时，应该是在同样的业务特性的条件下的。
- 吞吐量：吞吐量是信道容量用于传输的部分。MAC 协议的目的是在尽量小的接入延时的条件下让吞吐量尽量大。如果信息平均 P 比特，传送一个包的平均时间是 T 秒，信道容量是 C 比特每秒，这样吞吐量 η 就为 $\eta = P/TC$。
- 公平性：如果没有任何节点拥有使用媒介的优先权时，我们就称这个 MAC 协议是公平的。注意这里指的是对信道的公平使用，不要与业务本身所含有的优先权相混淆。在支持多媒体业务的情况下，公平性指的是可以在该业务所支派的信道上分配带宽。

- 稳定性：一个稳定的系统是能够在大部分数据流量小于信道容量的条件下，对瞬时超过信道容量的数据流量进行处理的系统。
- 对衰落的健壮性：无线信道是时变和差错传播的。信道衰落会在短时间内引起节点之间线路不稳。对一个健壮的系统来说，这种信道的缺陷不应该引起不稳定的表现。
- 电源消耗：大部分无线设施对电池功率进行了限制，因此对无线 MAC 协议来说，节省功率和提供对节电特性的支持是很重要的。
- 对多媒体的支持：随着语音，视频和数据网络的逐步统一，MAC 协议需要支持多媒体的业务。这样协议就需要一种机制根据不同业务的不同的延时要求，来处理不同的数据包，接入优先权和时序安排是两种常用的方法。接入优先权通过授予某些节点更高的使用媒介的权限来提供不同的服务，时序安排可以提供时延和抖动保证。

2.4 常用的无线 MAC 接入协议

从上面的探讨中，我们可以得到这样的结论。无线传输媒介与有线传输媒介存在着很多的不同之处，这些差异使得在有线网络中使用的 MAC 协议完全不适用于无线网络环境之中。因此无线网络中的 MAC 协议在设计上与有线网络中的 MAC 协议有很大的差别。

无线 MAC 协议可以根据其设计的网络结构分为两大类：分布式 MAC 协议和集中式 MAC 协议，还可以进一步地按节点的操作方式分为随机接入协议，保证接入协议和混和接入协议。所有的分布式 MAC 协议都是随机接入协议，本文主要研究分布式随机接入协议。

2.4.1 分布式 MAC 协议

（1）分布式 MAC 协议中的冲突避免技术

在随机接入协议中，节点相互竞争对媒介的使用权。当只有一个节点试图发送信息时，数据包能够成功地传送出去。当同时有几个节点试图发送数据，就会产生冲突。除了 ALOHA 协议之外，所有的分布式 MAC 协议都是基于载波侦听和冲突避免机制的。载波侦听是指对物理信道进行检测，确定无线信道中是否有正在传送的数据。由于载波侦听的位置相关性，隐藏节点和暴露节点这两种现象在 CSMA 协议中是频繁出现的。发送节点有可能发现不到在接收节点处发生的冲突，因此接收节点需要将冲突信息传送给发送节点。但是由于无线系统是工作在半双工模式下，发送节点在进行传输的同时是接收不到接收节点所发出的冲突信息

的，这就需要使用在发送的频段之外的信道来传输反馈信息，或者是让发送节点停止发送来接收反馈信息。大部分分布式 MAC 协议都采用冲突避免技术来是使冲突的可能性最小化。冲突避免技术在这里可以使用两种机制：一种是带外传输反馈信息，另一种就是握手。

带外信号冲突避免（Collision Avoidance with Out-of-Band Signaling）：忙音多重接入（Busy Tone Multiple Access，BTMA）是一种使用带外忙音信号来解决传输中的隐藏节点问题的一种方式。在这种方式中，任何检测到无线信道上存在传送中的信息的节点都会在传输频段之外的一个特定忙音信道上广播一个忙音信号，任何接收到忙音信号的无线节点都不会尝试进行新的数据发送。这样在以发送节点为圆心，2R 半径的区域内的所有无线节点都不会发送数据（R 是无线节点的发送距离）。可以看到，虽然这种方式解决了了隐藏节点的问题，但同时也增加了暴露节点的数目。

RI-BTMA（Receiver Initiated -Busy Tone Multiple Access，RI-BTMA）方式中，无线节点只有在确认自己是接收节点的情况下才会在忙音信道上广播忙音。这样，只有在接收节点周围 R 半径以内的无线节点才被抑制发送。但在 RI-BTMA 中，节点必须在解码之后才能确认自己是否是接收节点，这样就可能需要一段时间才能产生忙音。在这种情况下就引起了冲突可能性的提高和系统流量的降低。可以看到，收端产生-忙音多重接入方式并没有完全消除隐藏节点，只是使暴露节点的数目最小化了。

握手控制冲突避免（Collision Avoidance with Control Handshaking）：冲突避免多重接入（Multiple Access with Collision Avoidance，MACA）使用三重握手机制来解决隐藏节点问题。有需要发送的无线节点会先发送一个请求发送（Require To Send，RTS）短数据包，所有在该节点传输范围内的无线节点侦听到这个 RTS，就会推迟它们本节点的传输。目的节点在收到这个 RTS 数据包之后，会回复一个清除发送（Clear To Send，CTS）短数据包，所有在目的节点传输范围内的节点侦听到这个 CTS 短数据包后，也会推迟自己的传输。当发送结点收到由目的节点所发出的 CTS 后，就认为已经获得了信道的使用权并开始进行传输。这种握手机制完全消除了隐藏节点现象。下面介绍具体两种分布式 MAC 协议。

（2）DFWNAC

DFWNAC（Distributed Foundation Wireless MAC，DFWNAC）是从冲突避免多重接入机制发展而来的，是运用在 IEEE802.11 无线局域网标准中的基本接入协议。其传输过程是 RTS-CTS-DATA-ACK，本文将在以后的章节中对该协议性能进行重点研究。

（3）EY-NPMA

消除屈服-无先得优先权多重接入（Elimination Yield-Non-preemptive Priority Multiple Access，EY-NPMA）协议是用于欧洲所提出的 HIPERLAN 标准的信道接入协议。

HIPERLAN 是分布式网络的高速（24Mb/s）无线局域网标准。协议的处理如下：无线节点在发送数据之前，先对传输信道侦听相当于其传送 1700 比特的时间。如果在这段时间中，信道上没有发生任何传输，无线节点就认为信道是空闲的并且立即开始发送数据。如果在这段时间中无线节点侦听到信道上有数据正在进行传输，节点就会进行同步，等待到当前传输的最后时刻，再按以下准则竞争无线信道。该协议的随机信道接入分为三个阶段：优先级别阶段（用于确定传输优先级），竞争阶段（同样优先级的无线节点相互进行竞争），传输阶段（在竞争阶段中获胜的无线节点进行数据传输）。其中的竞争阶段分成两个子阶段：消除阶段和屈服阶段。在消除阶段中，每个节点持续会进行持续一段随机 slot 时间（这个持续的随机数是由地理分布来决定）的发送。在消除阶段结束之后，无线节点开始监听信道。如果这个时候信道上有数据进行传输，节点就会放弃其传输尝试。如果这个时候信道是空闲的，节点就进入屈服阶段。在屈服阶段里，节点监听信道一段随机的 slot 时间。如果在这段时间里，信道上没有传输进行，节点就会开始并完成自己的传输。由于么个节点等待的时间都是随机选择的，因此在竞争阶段中有一个节点获胜并进行传输的概率是很大的，其余的无线节点都会等到这个获胜的节点的传输完成之后再对信道进行下一次的竞争。

(4)常见的随机接入协议的性能分析

典型的随机竞争类 MAC 协议有 Aloha、CSMA 及 ISMA 等。本节将对这几种协议进行讨论。

仿真环境和条件：

- ✧ 分组通信系统：假设每个用户的性能都是一样的。而且每个用户终端都有一个FIFO缓冲器。FIFO又分为有限长度和无限长度两种。若缓冲器长度有限，当缓冲器满的时候，新产生的帧就会被丢弃。这可以称为“呼叫拥塞”。和传输错误是不一样的概念。信道模型：信道模型可以分为有线信道和无线信道两种。有线信道可以认为是理想信道。
- ✧ 无线信道，信道质量是时变的。在本文中，传播损耗主要与接入终端和接入点两者之间的距离相关。其他影响的因素还有由于接入终端和接入点之间的障碍物引起的阴影效应。
- ✧ 传播损耗：随着接入终端和接入点之间的距离增加的时候，接收功率减小。这个损耗和α成正比。γ°是当信号大幅度衰落时候的损耗因子。α是固定

损耗因子，一般取2～5。

- ✧ 阴影效应：由于两个通信用户之间的障碍物的影响引起的。一般取6~7dB
- ✧ 帧的产生：帧的产生服从泊松分布，也就是说各帧之间是独立的，而且产生概率不随时间变化。在一个极短的时间内，同时产生两个帧的概率极小，可以忽略。也就是说，每个时间点最多只能产生一个帧。
- ✧ 冲突：当几个帧同时在信道里传输时，就会发生重叠，这种重叠被称为冲突。冲突的帧传输发生错误，必须进行重传。在有线信道中，发生冲突必然丢失数据。但是在无线信道中，接收功率最大的帧可以成功被检测出来。其他的帧则需要重传。 网络负载：包括成功传输的帧和出错重传的帧。数据传输速率是$R(bps)$，一共有T_t(bit)需要传输。则

$$G=\frac{T_t}{R}$$

- ✧ 吞吐量：在一段固定的时间内成功传输的帧成为吞吐量。设一帧的数据速率为$R(bps)$信息量为T(bit)，在单位时间内共有n帧成功传输。则

$$S=\frac{T\times n}{R}$$

- ✧ 平均传输时延：指的是帧从产生进入发送缓冲器的时刻开始，一直到被正确接收为止所需要的平均时间。

仿真结果如下面的图所示：

1）纯ALOHA协议

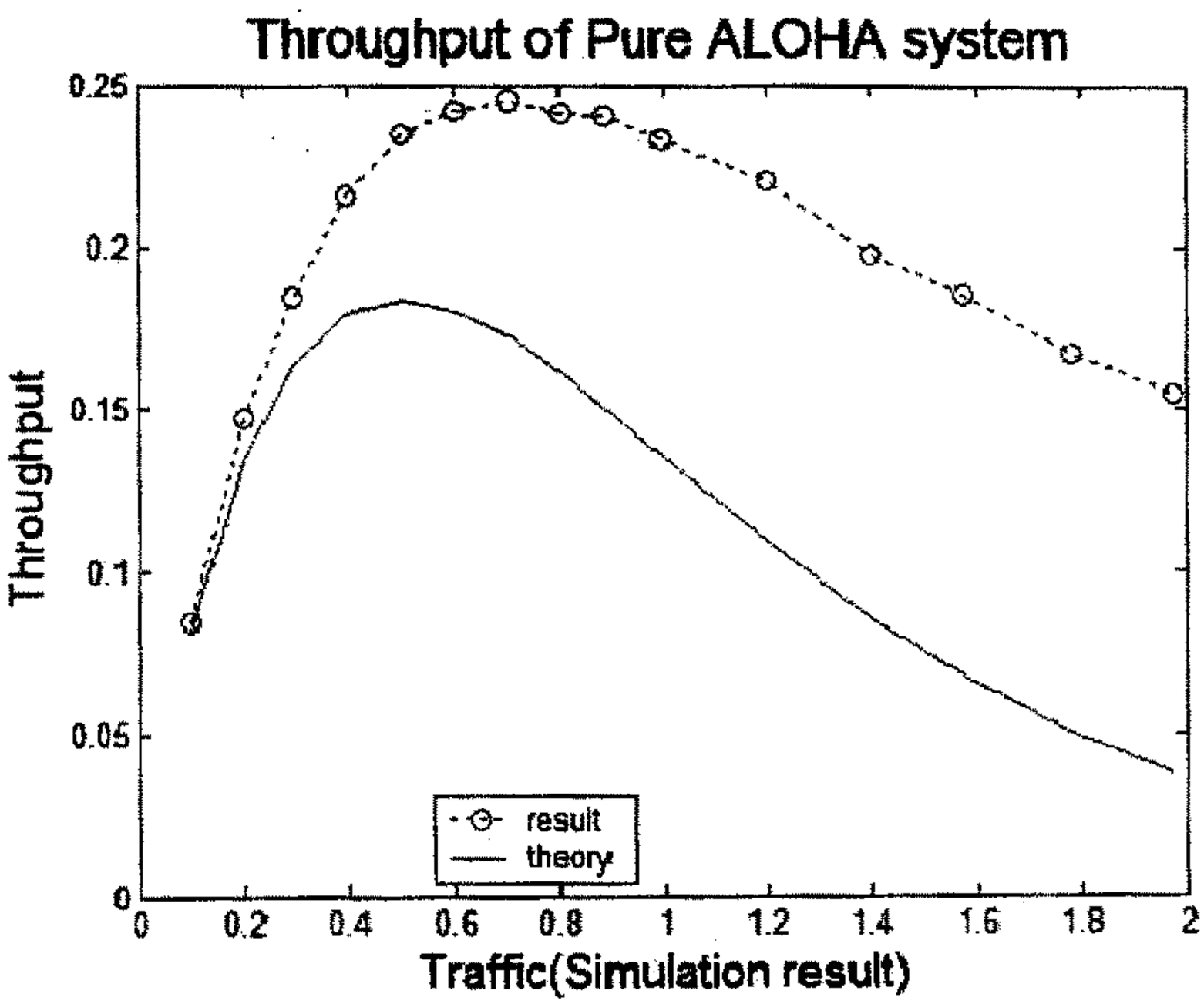

图2-1纯ALOHA协议的吞吐量特性

由图2-1我们可以得知纯Aloha协议的吞吐量特性很差，其最大值在0.18左右。

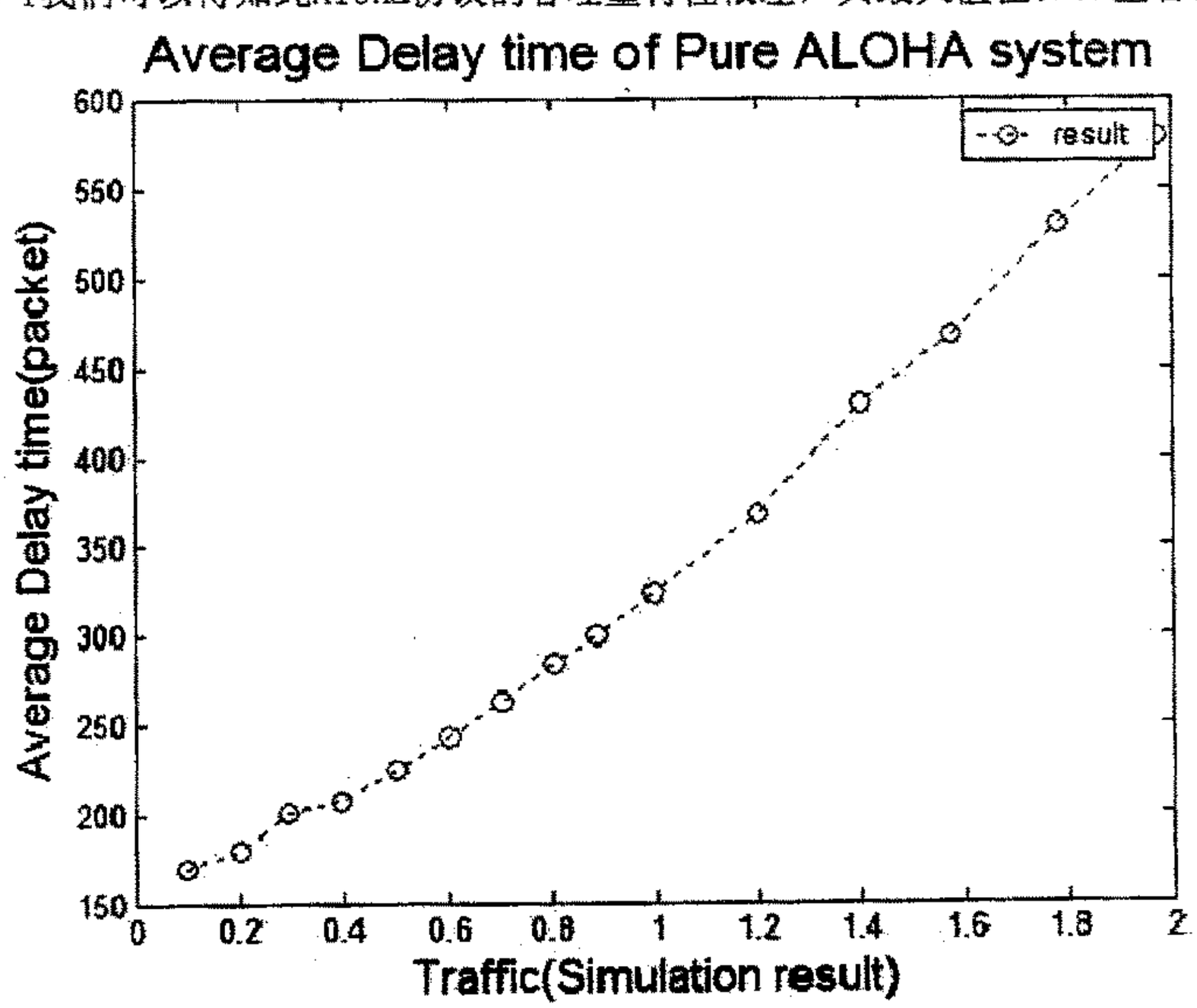

图 2-2 纯 ALOHA 协议的时延特性

2) 时隙ALOHA协议

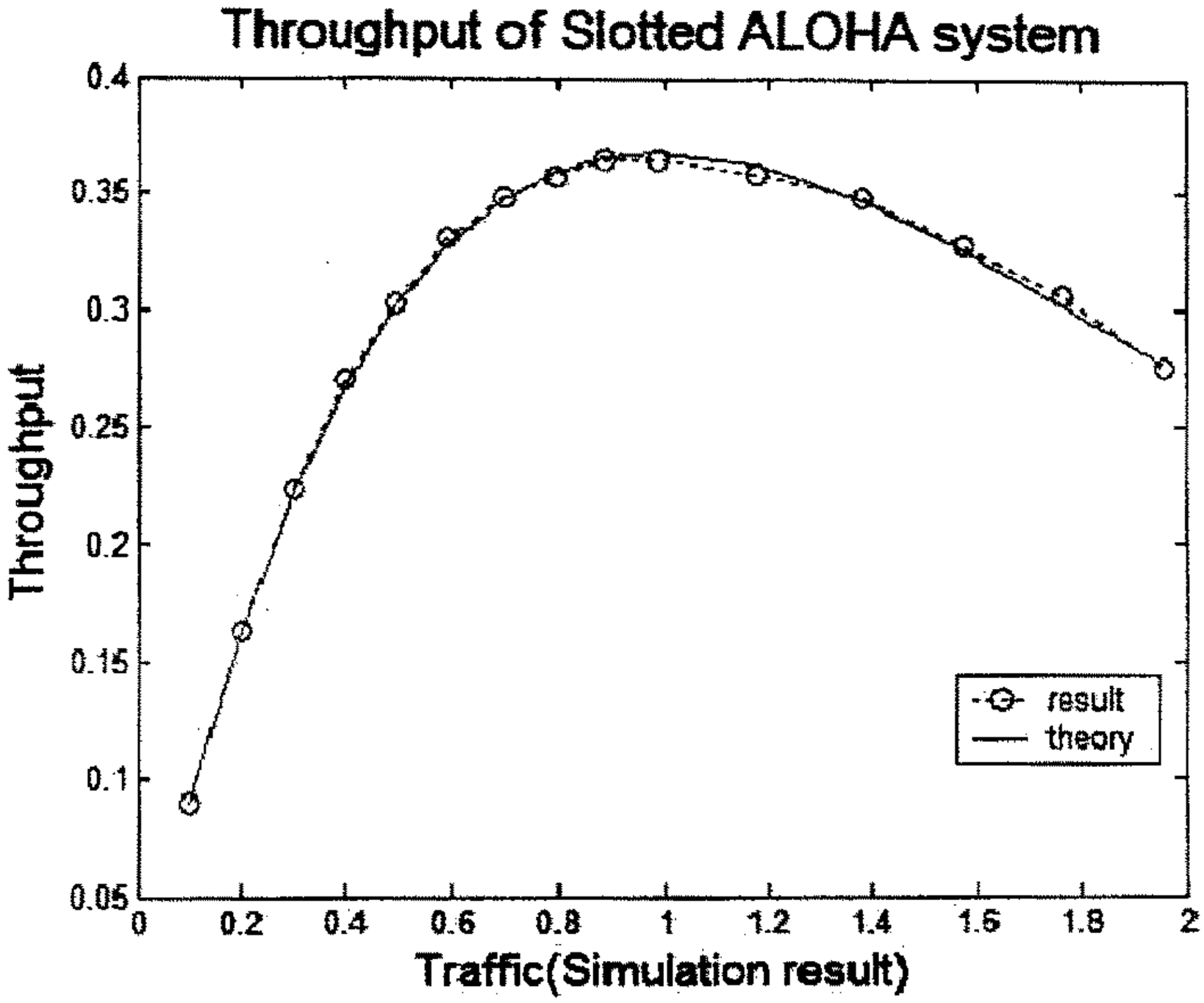

图2-3 时隙ALOHA协议吞吐量特性

由于时隙ALOHA使该碰撞窗口缩小，它的吞吐量特性要比纯ALOHA好，当G＝1的时候，时隙ALOHA的吞吐量达到最大值Smax=0.368。

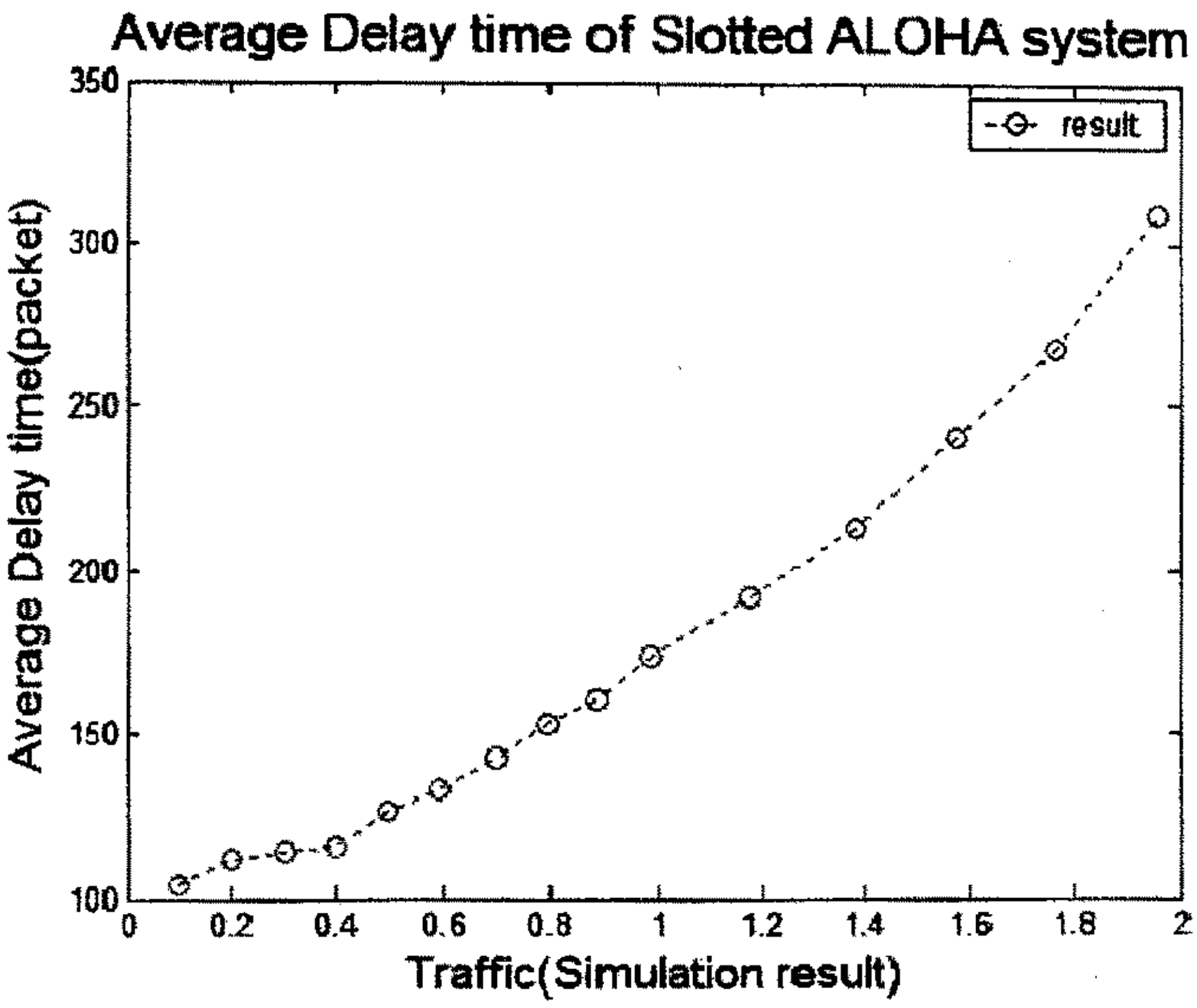

图2-4 时隙ALOHA协议时延特性

通过以上的仿真结果看出，两种ALOHA系统都有一个不稳定的工作区域。当吞吐量超过它们的最大值时，此时若它们的网络负载还在增大，它们的吞吐量特性就急剧下降，从而导致整个系统不能工作

3) 非时隙非坚持CSMA协议

非坚持CSMA协议是在ALOHA基础上提出的，与ALOHA的主要区别就是多了一个载波监听装置，以提供发送前监听信道上其他站是否在发送数据。在这个协议中，每个站点在企图传送数据之前都要先检测信道，如果在它检测的时间内没有人发送数据，则该站自己开始发送数据。之所以称之为非坚持的，是因为它在检测到信道忙之后，会随机延时一个时间，等过了这段时间再来监听信道。

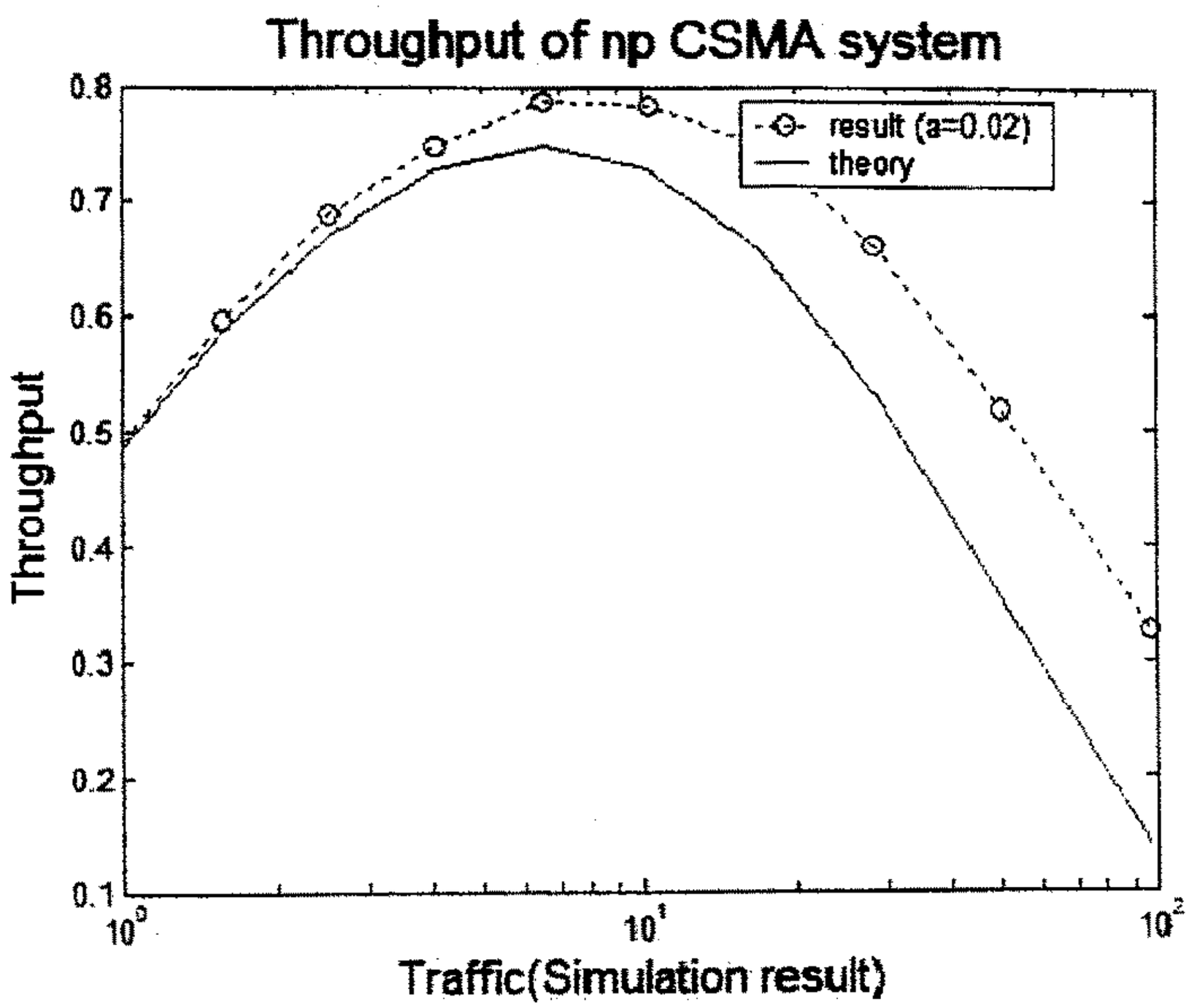

图2-5 非时隙非坚持CSMA协议的吞吐量特性

由于有了载波监听措施，在相当程度上减少了各站发送数据的盲目性。这样就提高了信道的利用率和整个网络的吞吐量。非坚持CSMA存在一个明显的缺点，就是一旦监听到信道忙，马上延迟一个随机时间，等这段时间过去后再重新开始监听信道。但很可能在再次监听信道之前信道就已经空闲下来了，非坚持CSMA不能把信道刚变为空闲的时刻找出，这样就会影响了信道利用率的提高。

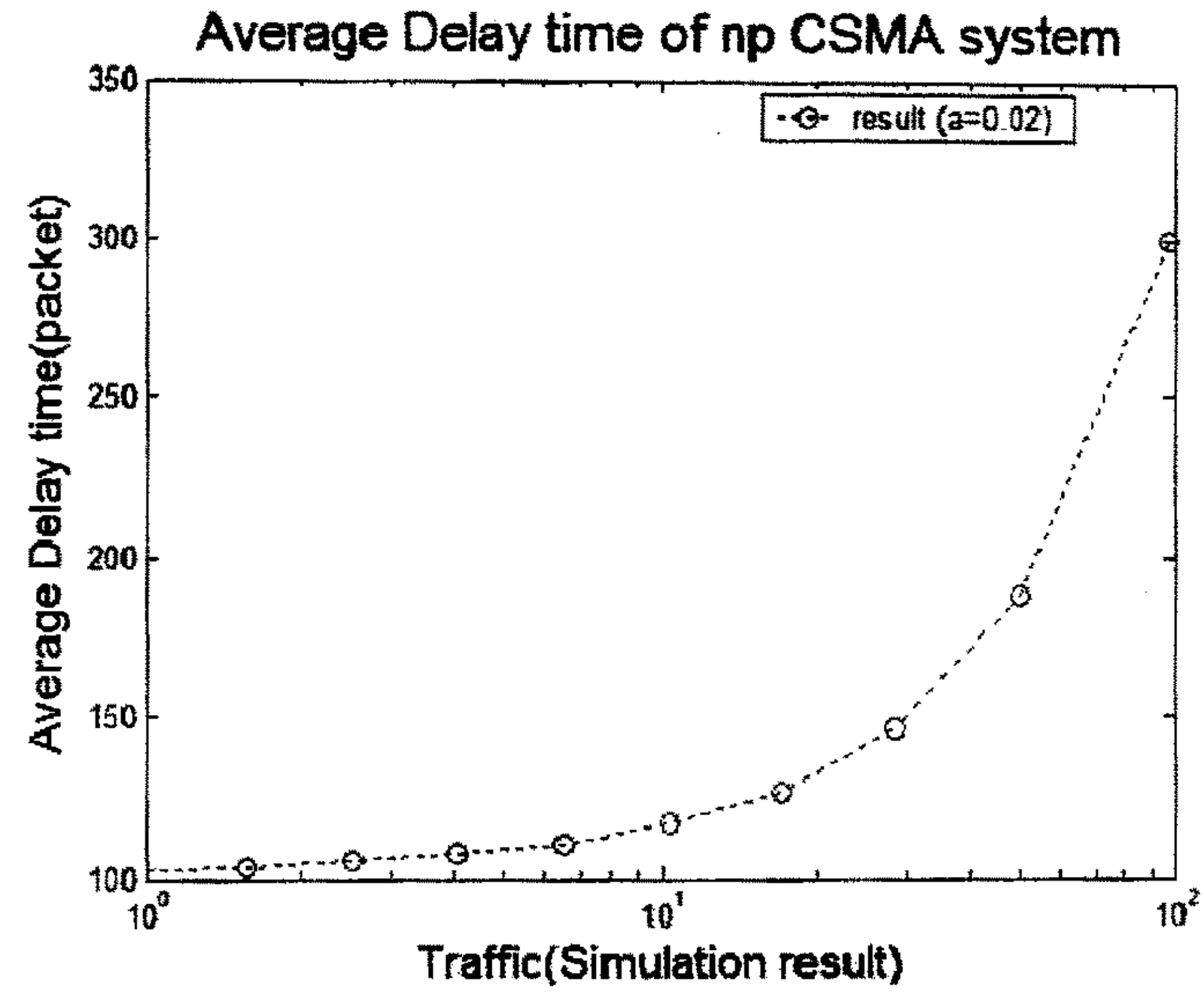

图2-6 非时隙非坚持CSMA协议的平均时延特性特性

4) 时隙非坚持ISMA协议

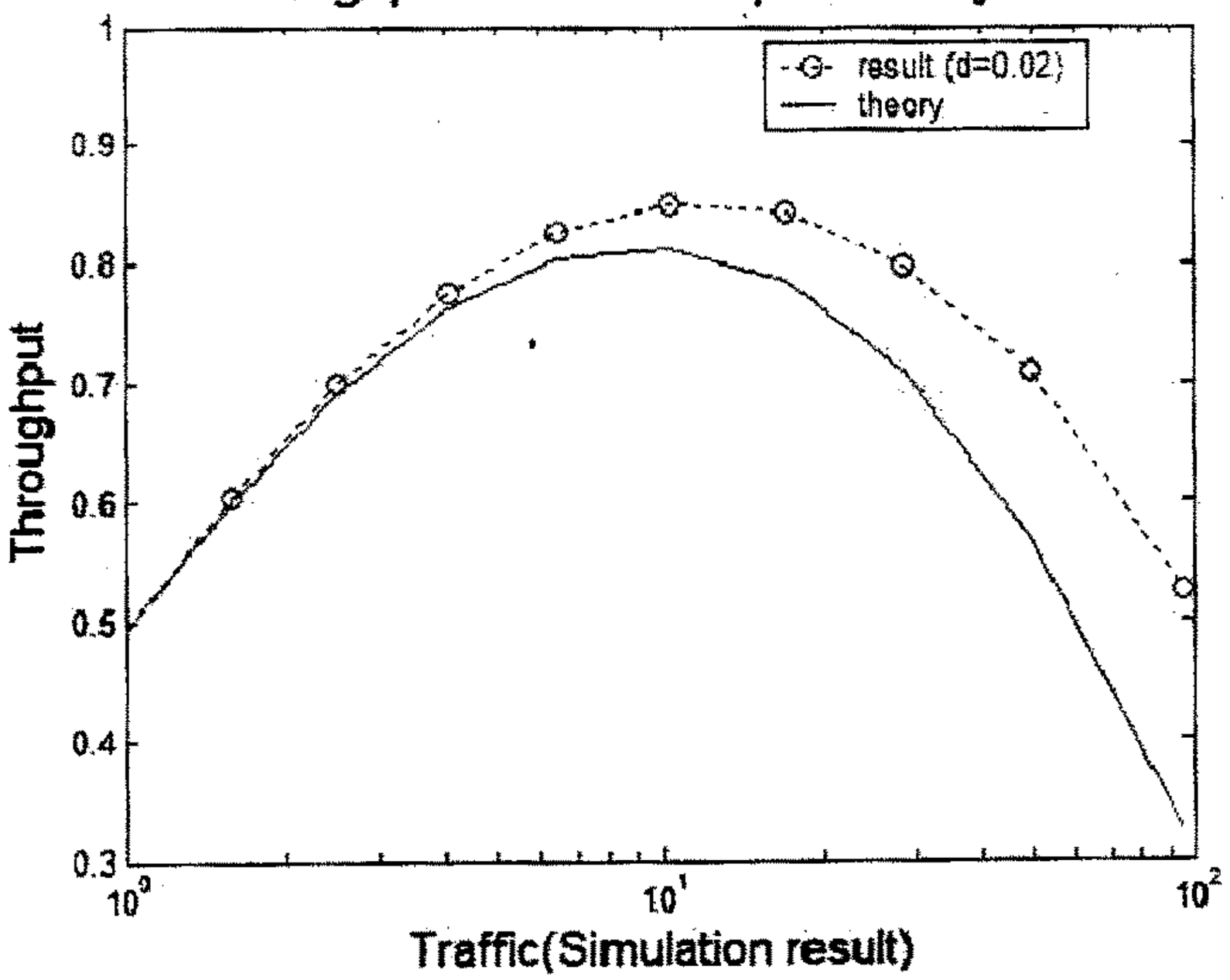

图2-7 时隙非坚持ISMA协议的吞吐量特性

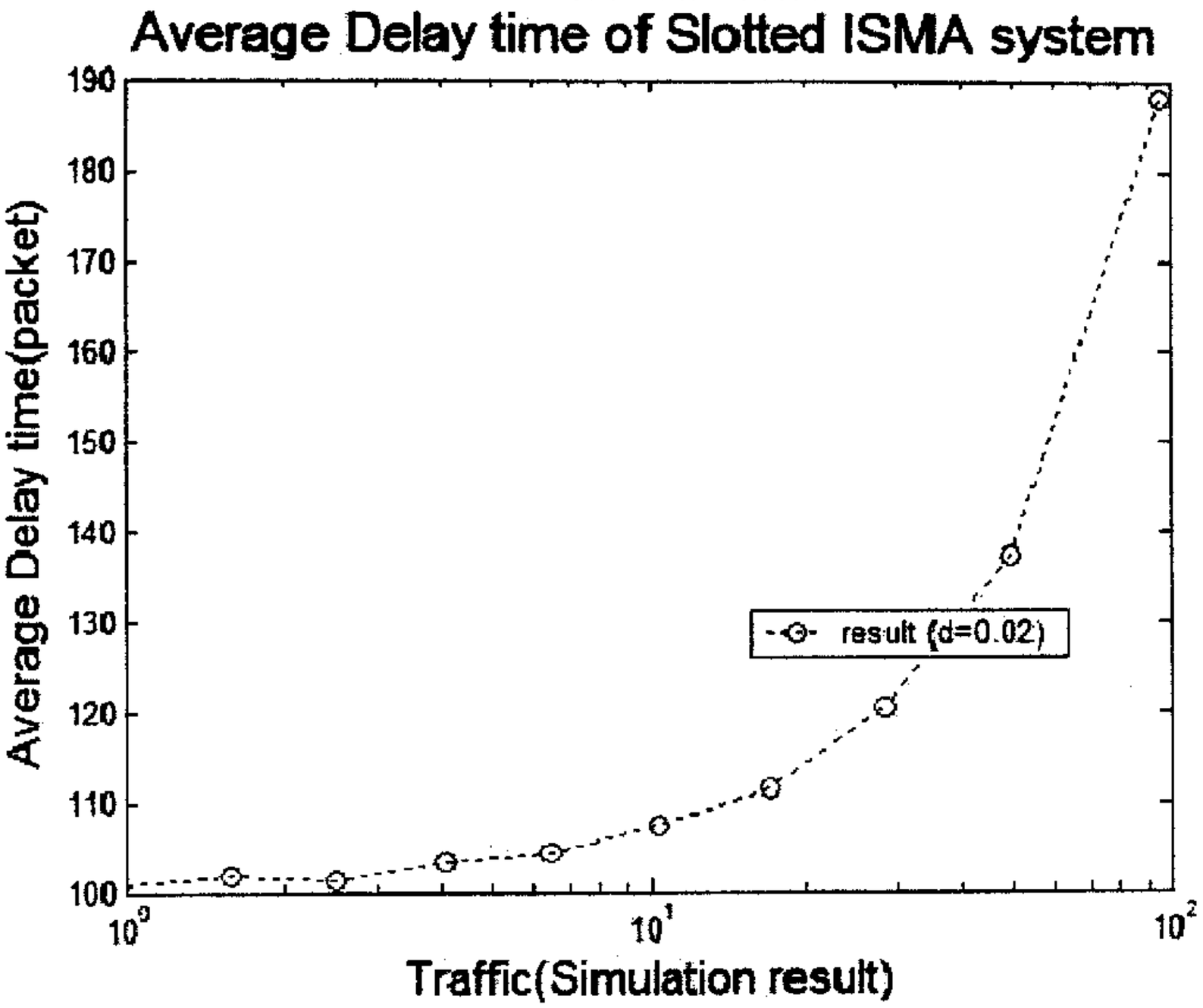

图2-8 时隙非坚持ISMA协议的平均时延特性

由以上仿真结果看出，ISMA协议具有较高的吞吐量，并且时延增长也比较缓慢。

通过以上几种接入协议的分析可以发现，在负载比较大时，它们的吞吐量性能都会急剧下降，而延时则急剧增加，因此已不能适应无线网络的要求，必须对它们做出改进。

2.4.2 集中式 MAC 协议

与分布式 MAC 协议不同，集中式 MAC 协议将所有的权限和复杂性都转移到了中央节点之内，由中央节点来决定什么时候由什么无线节点通过什么方式来占用信道资源。由于在网络规划的时候，中央节点在网络位置上居于 WLAN 的中心，所有的无线节点都能够与之传输信息，因此不会存在隐藏节点和暴露节点。但是，由于所有的传输都必须经过中央节点，在网络规模较大的情况下，对于中央节点的处理能力和处理时延都有较高的要求。

(1)集中式随机接入协议

集中式的网络结构中可以采用随机接入协议，下面是几种集中式随机接入协议的介绍。

1)空闲监听多重接入协议

空闲监听多重接入（Idle Sense Multiple Access，ISMA）协议是一种用于集中式无线网络的基于竞争的随机接入协议。以上也对它进行了一些分析。在这种接入协议中，由中央节点进行载波检测和冲突检测，具体操作如下图所示。当无线信道是空闲的时候，中央节点就会广播一个空闲信号（Idle Signal，IS）。每一个有需要传输的数据的节点都以概率 p 来发送信息，如果有两个或更多的节点同时进行发送，就会再信道上引起冲突，这时中央节点无法对传输的数据进行解码，因此会在网络上再次广播 IS。如果正确地接收到了某个传输，中央节点就会广播 IS 和一个确认信息（Idle Signal & Acknowledgment，ISA），在发送空闲信号的同时对上一次信道上进行的传输进行确认。

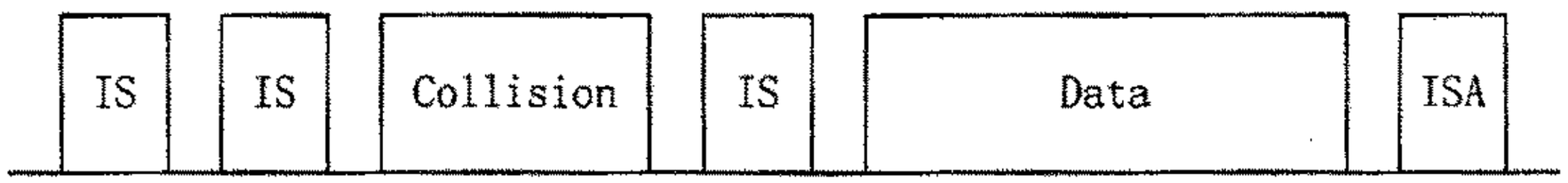

图 2-9 ISMA 协议示意图

当在 ISMA 中发生冲突时，就会丢失整整一个数据包，这就引起了系统效率的降低。R-ISMA（Reservation ISMA）协议通过保留数据包来避免这种效率上的降低。在 R-ISMA 协议中，无线节点通过发送非常短的保留数据包（Reservation Packet，RP）来回应中央节点广播的 IS 信号。如果这时候发生了冲突，只会丢失保留数据包。当中央节点接收到了保留请求后，就向节点发出一个轮询信号（Polling Signal，PS），只有被轮询到的无线点才能发送数据。ISMA 和 R-ISMA 都采用的时分双工。

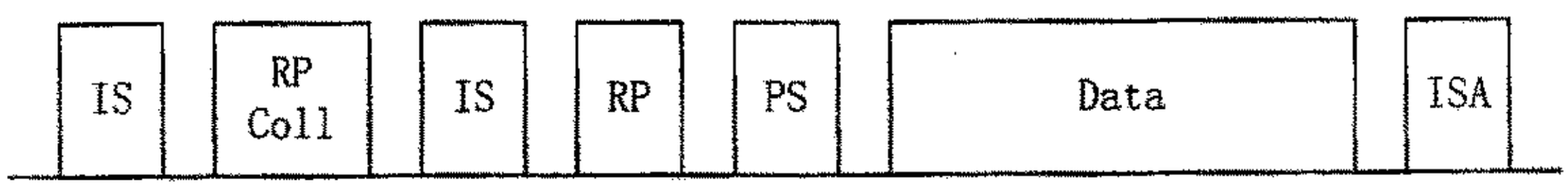

图 2-10 R-ISMA 协议示意图

2) 资源竞买多重接入协议

资源竞买多重接入（Resource Auction Multiple Access，RAMA）协议是通过特定的接入机制来实现资源分配的随机接入协议。如下图所示，每一个无线节点都有一个固定比特长的 ID，冲突的解决正是通过对这个 ID 的逐符号传输来实现的。在竞争阶段，每一个无线节点都逐符号地发送自己的 ID。中央节点把其收到的符号再信道上进行广播。如果无线节点收到的广播的符号与节点自己的符号不一致，节点就退出竞争。例中，节点 A 的 ID 是 110，节点 B 的 ID 是 101。在发送第一个符号时，A 和 B 都发送“1”，中央节点回复“1”。在发送第二个符

号时，A 发送“1”，B 发送“0”，由于无线信道在上面有多个信号叠加的时候，对于“1”和“0”而言是遵从“或”准则的，因此中央节点接收并回复“1”。这样，节点 B 就退出了竞争。该过程一直持续到整个 ID 传送完毕。可以看出，当整个 ID 传输完毕，总是由 ID 值最大的节点赢得竞争。

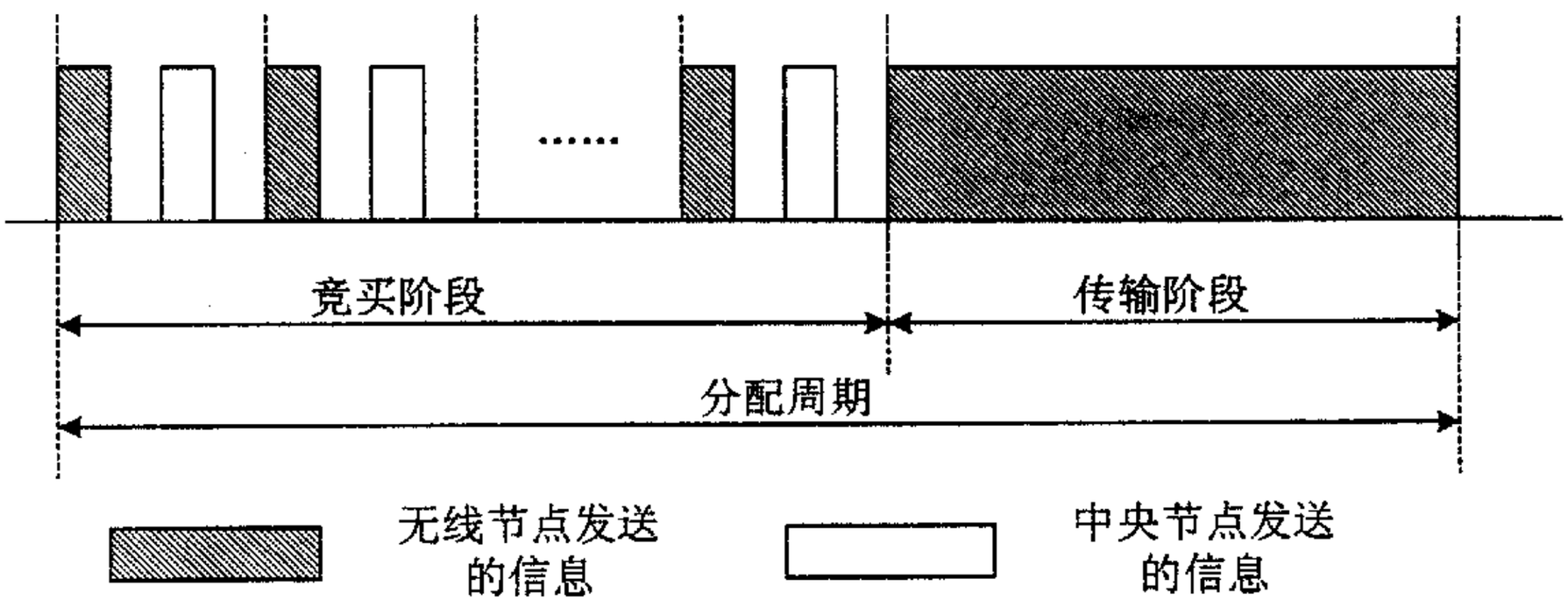

图 2-11 RAMA 协议示意图

在 RAMA 中，如果一个节点有数据要传输的话，通信的每个 slot 都不会是空闲的。这样，如果不考虑开销，RAMA 协议就达到了对信道的最大利用效率。但是，由于中央节点和用户节点在冲突解决中所使用的逐符号的交换，开销是随着数据速率的增长而增长的，因此协议的吞吐量并不高。另一方面，RAMA 协议是不公平的，这是因为 ID 值大的节点总是能够赢得竞争，结果就有可能使别的节点一直获得不到信道。

(2) 保证接入协议

轮询协议是在无线网络文献中唯一研究的一种保证接入协议。轮询协议的主要设计目的是减小由于信道消耗所引起的对带宽的浪费。它利用一个受控握手来测试信道，一次成功的握手就能够保证在节点和基站之间信道质量。下面介绍几种保证接入协议。

1) 可丢弃令牌 MAC 协议

可丢弃令牌 MAC 协议（Disposable Token MAC Protocol，DTMP）使用“轮询—传输”循环来取代“轮询—请求—轮询—传输”循环，这样就减少了轮询所有节点所需的时间 T。协议的操作见下图。

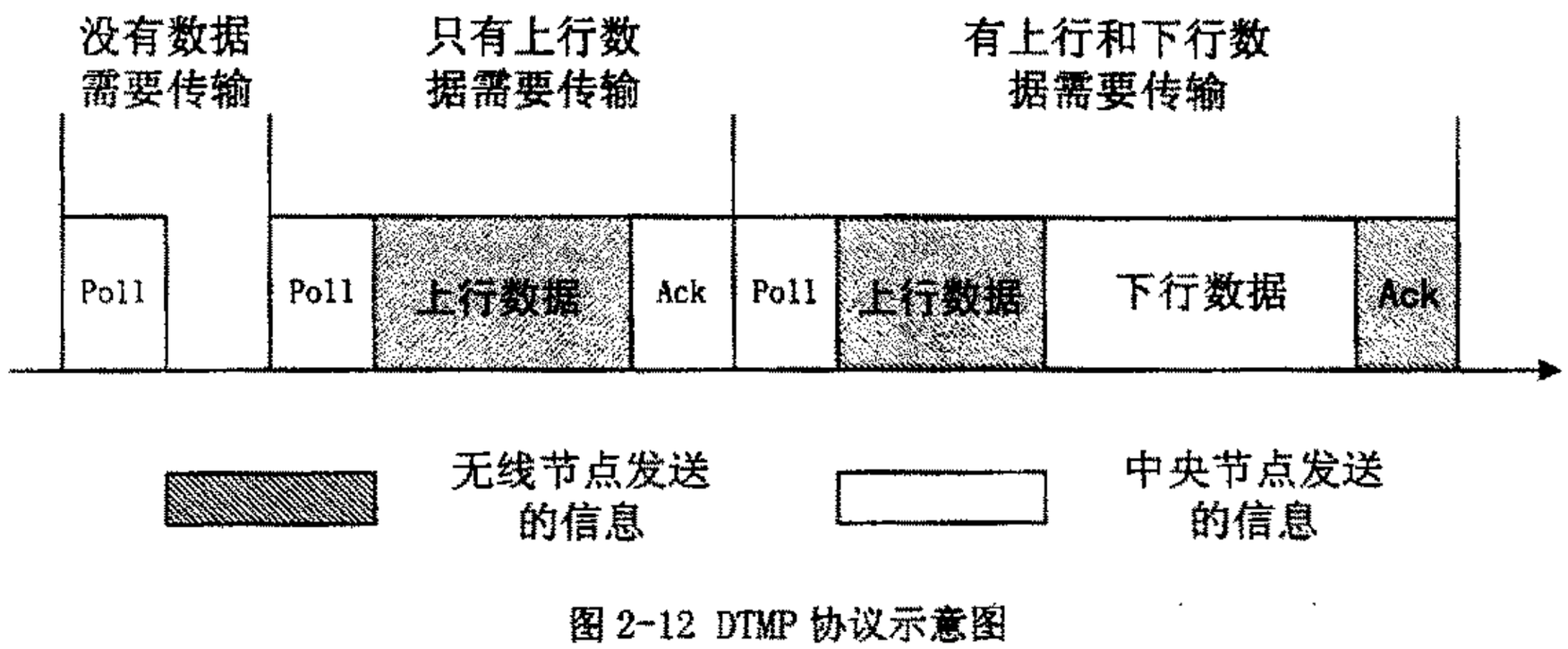

图 2-12 DTMP 协议示意图

在 DTMP 中，当中央节点轮询一个无线用户节点的同时，也告诉了该用户节点中央节点是否有数据传送给它。当中央节点没有传向这个节点的数据同时这个无线节点又没有要发送的数据时，无线节点就保持沉默。当中央节点有传送给用户节点的数据，用户节点就会发送一个短消息，接着中央节点就开始传输。在轮询的时候，当无线用户节点的缓存区里有数据要发送给中央节点时，用户节点就会发送数据作为对中央节点轮询的回复。

2) Acampora 协议

Acampora协议是由Acampora提出的用于智能天线系统的轮询协议。该协议工作在三个阶段：轮询阶段，请求阶段和数据阶段。协议进行轮询的方式是很有特点的。中央节点首先通过在轮询中发送每个无线用户节点独有的码字来确认每个激活的用户节点，如果节点没有要发送的数据就保持沉默，反之就回复这个码字。接着中央节点向所有的用户节点广播这些被回复了的码字，使每个用户节点都知道需要发送的无线节点的数目以及这些节点的发送顺序。在接下来的请求阶段中，所有的无线用户节点按顺序向中央节点发送请求，再由中央节点来在传送阶段中轮询这些用户节点。

第三章 IEEE802.11a 无线局域网

目前，世界上有两种占主导地位的 WLAN 标准：由欧洲电信标准协会（ETSI）提出的高性能欧洲无线电局域网（HIPERLAN）和 IEEE802.11LAN，两者都涵盖了物理层和媒体控制层的标准，以下主要介绍 802.11a 无线局域网的物理层和 MAC 层的关键技术

3.1 无线局域网 IEEE802.11 技术标准

无线局域网技术标准是在上世纪 80 年代末期由 IEEE802.11 工作组开始制定，1997 年 6 月 26 日，IEEE802.11 标准制定完成，1997 年 11 月 26 日正式发布。2000 年 8 月，IEEE 又推出 IEEE802.11a 协议从 IEEE802.11 标准看，无线局域网不仅可以组建成单纯的自组无线局域网（Ad-hoc-Network）结构，而且可以方便地与有线网络（如以太网、令牌网或广域网）结构组成多区无线局域网（Infrastructure Network）结构。

3.1.1 IEEE802.11 所对应的 IOS/RM 层

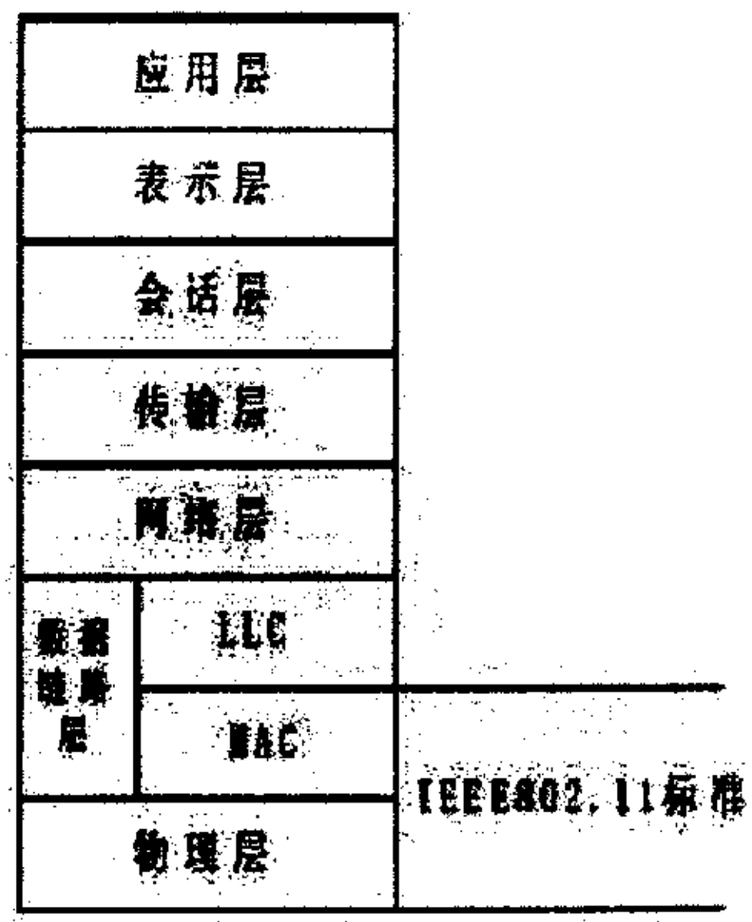

图3-1 IEEE802.11的协议栈结构

IEEE802.11 按照 IOS/RM（开放系统互联参考模型），只涉及了最低两层，如图 3-1。我们知道，IOS/RM 最低层是物理层（PHY），再上一层是数据链路层（DLC），数据链路层又分为逻辑链路控制层（LLC）与介质访问控制层（MAC）。从图 3-1 可知，IEEE802.11 只涉及了物理层和 MAC 层。ISO/RM 中的物理层定义了通过无线连接所必需的机械和电气特性，而介质访问控制层定义了两个数据链路层之间

建立和维持数据传输，并将数据流无差错地提供给网络层的功能协议。

无线局域网的传输介质和频段分配是由 IEEE802.11 确定的。在 IEEE802.11b 中规定了三种物理层规范：脉冲位置调制（PPM）红外线、直接序列扩频（DS－SS）和跳频扩频（FH－SS），如图 3-2。这就形成了基于红外线传输和基于扩频技术的 RF 传输的无线局域网产品。其中直接序列扩频和跳频扩频属于扩频通信技术。从图 3-2 中可知，IEEE802.11 提供了多重速率（Multiple Rates）的功能。IEEE802.11a 协议物理层采用 OFDM 调制方式，无线通信速率可以在 6M、9M、12M、24M、36M、48M、54M 之间，根据通信的质量进行调整。

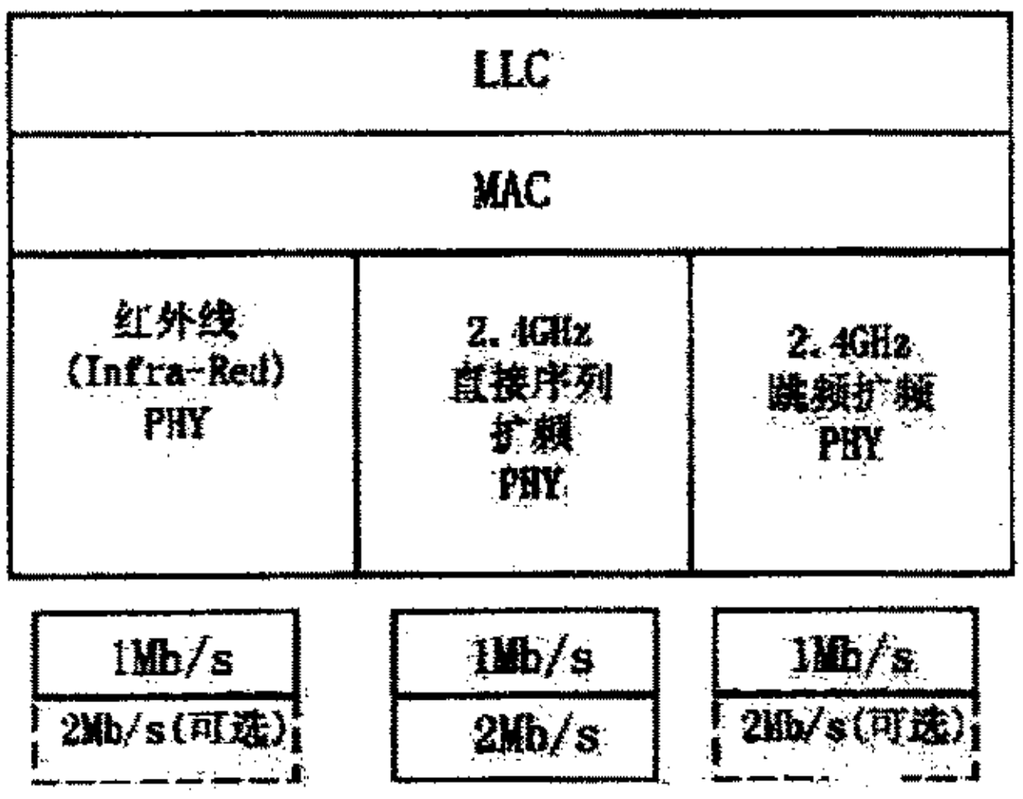

图 3-2 无线局域网的传输介质和频段分配

从图 3-2 中可知，IEEE802.11 提供了多重速率（Multiple Rates）的功能。

3.1.2 IEEE802.11 的频段分配

IEEE802.11 无线局域网选用美国 FCC 开放的三个频段：L 频段 92～928MHz、S 频段 2.4～2.4835GHz、C 频段 5.725～5.850GHz。这三个频段在美国使用时无需申请执照。在我国使用 2.4～2.4835GHz 这一频段。基于扩频通信技术的无线局域网采用上述无线电频段。802.11a 工作在 5GHzU-NII 频带，从而避开了拥挤的 2.4GHz 频段。物理层速率 54Mbps，传输层可达 25Mbps。

3.2 无线局域网网络拓扑结构

无线网络可以按网络结构分为两大类：分布式无线网络结构和集中式无线网络结构。

3.2.1 分布式无线网络结构

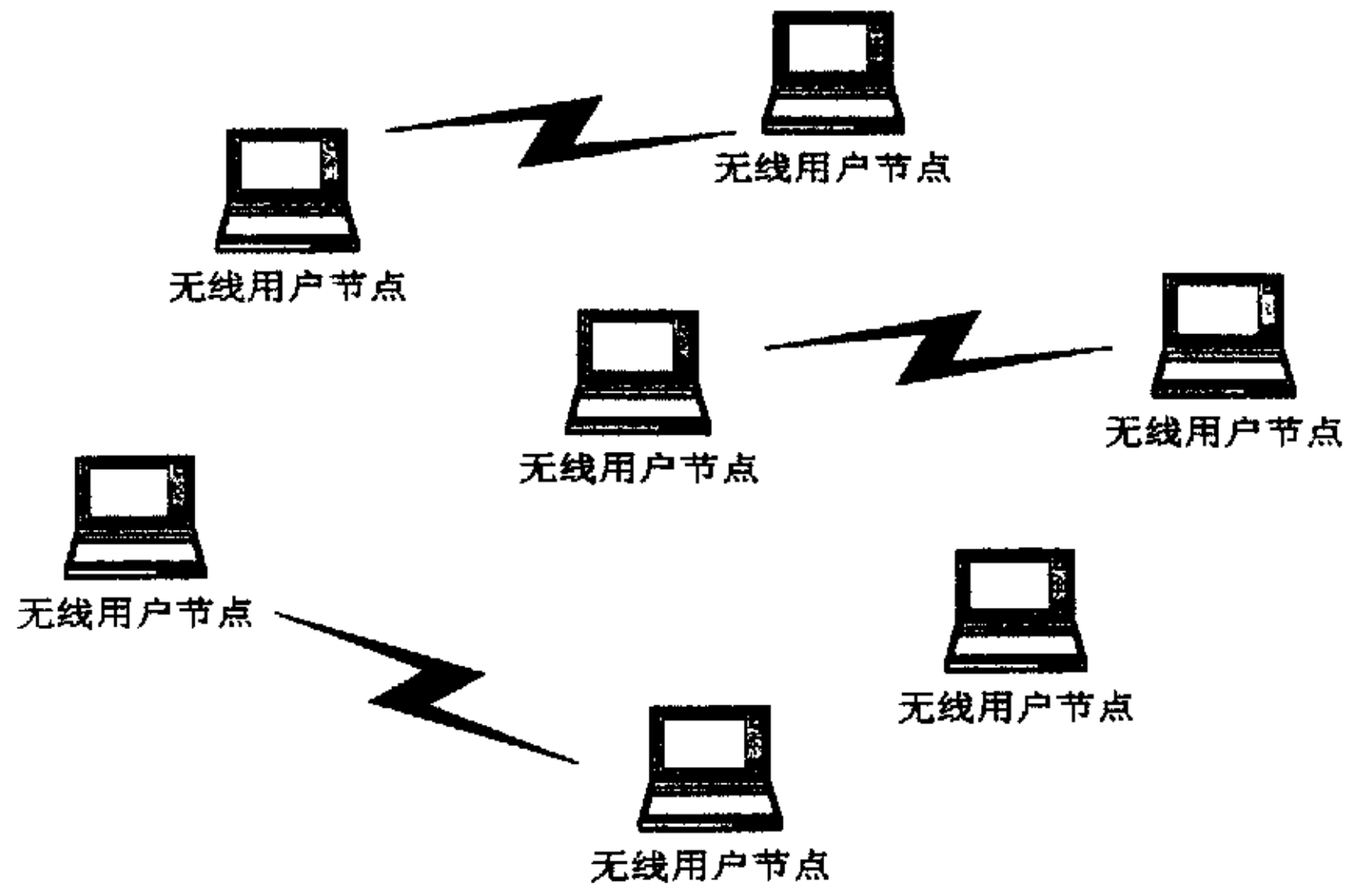

图 3-3 分布式无线网络结构

分布式无线网络（也称为 ad hoc）是指在没有预先存在的基础通信设施的环境下，各个无线节点彼此通信。在这种网络结构中，无线节点之间以分布式的方式相互通信，网络中不存在某个节点进行中央管理，这样就不会因为某个无线节点关机或是移出通信范围而造成整个系统传输上的问题。在分布式网络中，由于没有一个特定的无线节点来将所需传输的数据从一个频段转移到另一个频段，所以所有的数据发送与接受都使用的同一频段。这样按照无线网络的双工方式的划分，所有的 ad hoc 网络使用的都是时分双工方式。通常，分布式无线网络要求网络中任意两个无线节点均可直接通信。在通信的时候，一般使用公用信道，各个无线节点都可竞争使用公用信道，其媒体接入控制（Medium Access Control，MAC）协议大多采用载波监测多址接入（Carrier Sensing Multiple Access，CSMA）类型的多址接入协议。这种网络结构的优点是抗毁性好、建网容易、而且费用比较低。但是当无线网络中的用户数（无线节点数）过多时，对公用信道竞争成为限制网络性能的首要问题。并且为了满足任意两个无线节点之间都可以直接通信，网络中无线节点的布局受环境限制较大。因此这种拓扑结构比较适用于用户节点数目相对较少的情况使用。

3.2.2 集中式无线网络结构

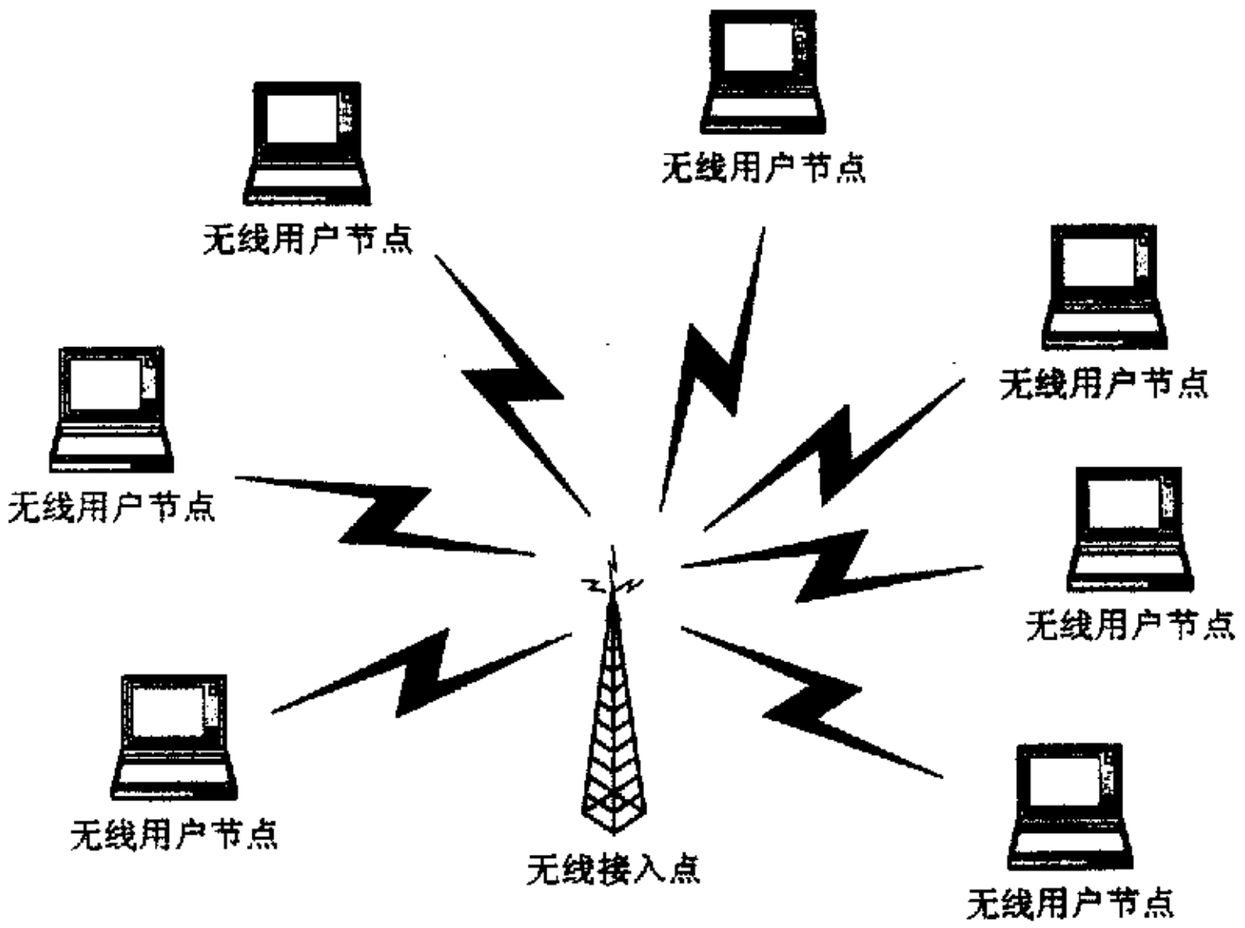

图 3-4 集中式无线网络结构

集中式无线网络（也称为last-hop网络）通常是一种使用无线方式连接网络终端的有线网络。在这种结构的网络中，由无线接入点将整个网络的无线部分和有线部分结合在一起。无线接入点以广播方式发给所有无线节点的下行数据是可以被整个无线网络中的所有的节点所接收到的，而无线节点发往无线接入点的上行线路信道是由所有节点共享的。中央节点（无线接入点）的存在使得在制定MAC协议上有着极大的灵活性。例如，无线接入点可以根据节点所传输的业务对QOS的具体要求来进行接入。集中式无线网络既可以工作在时分双工模式下也可以工作在频分双工模式下。在这种网络中，所有的无线节点对网络的访问均由无线接入点控制。这样，当网络中的业务量增大时，网络吞吐性能及时延性能的恶化情况并不剧烈。由于每个无线节点只需在无线接入点的通信覆盖范围内就可与其它无线节点通信。所以相较分布式无线网络而言，集中式无线网络布局受环境因素的限制较小。集中式网络拓扑结构的弱点是抗毁性差，无线接入点的故障容易导致整个网络瘫痪，而且无线接入点的引入增加了网络的成本。

在实际应用中，这种结构的无线局域网往往与有线主干网络结合起来使用，这时，无线接入点就充当无线局域网与有线主干网的转接器

3.3 802.11a 无线局域网的物理层

最初的 802.11 标准的速率只能达到 2Mbps，并不能够满足日益增长的高速数据传输的需要。IEEE 于 1999 年推出了 802.11b 和 802.11a 两个扩展标准。其中 802.11a 标准是已经在办公室、家庭、宾馆、机场等众多场合得到广泛应用的

802.11b 无线联网标准的后续标准。它采用 OFDM 调制方式，工作在 5GHz 频带，物理层速率可达 54Mb/s，传输层速率可达 25Mbps。

3.3.1 OFDM 调制方式简介

OFDM 技术是一种无线环境下的高速多载波传输技术。无线信道的频率响应曲线大多是非平坦的，而 OFDM 技术的主要思想：就是在频域内将给定信道分成许多正交子信道，在每个子信道上使用一个子载波进行调制，并且各子载波并行传输，从而有效的抑制无线信道的时间弥散所带来的 ISI。这样就减少了接收机内均衡的复杂度，有时甚至可以不采用均衡器，仅通过插入循环前缀的方式消除 ISI 的不利影响。OFDM 中的载波频率是相互重叠的，这样就提高了频谱的利用率。另外 OFDM 系统的一个重要优点就是可以利用快速付立叶变换实现调制和解调，从而可以大大简化系统实现的复杂度，特别是在子信道数目比较多的时候，采用 FFT 可以大大得减少系统的复杂度。其实现原理见下图：

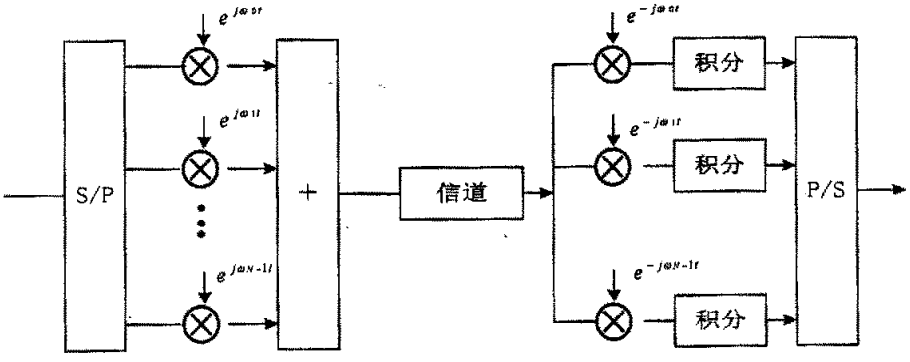

图 3-5 OFDM 原理图

设系统原始的码元速率为 R，持续时间为 T。分割后的码元速率为 R/N，持续时间为 NT。用这 N 个子信号去调制满足下式的相互正交的子载波。

$$\int_0^{NT} e^{j\omega_n t} e^{j\omega_m t} dt = \begin{cases} 1 & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases}$$

为了满足各个载波之间相互正交，子载波间满足关系：

$$f_n = f_0 + \frac{n}{NT}$$

信道上传输的信息为：

$$D(t) = \sum_{n=0}^{N-1} d(n) e^{j2\pi f_n t}$$

则接收端收到的信息为：

$$d(m) = \frac{1}{NT} \int_0^{NT} \sum_{n=0}^{N-1} d(n) e^{j2\pi f_n t} e^{-j2\pi f_m t} dt = \frac{1}{NT} \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \int_0^{NT} e^{j2\pi \frac{n-m}{NT} t} dt$$

可见由子载波信道间的正交性实现了信号的提取。

这种正交性还可以从频域角度来理解。每个 OFDM 符号在其周期 T 内包括多个非零的子载波。因此其频谱可以看作是周期为 T 的矩形脉冲的频谱与一组位于各个子载波频率上的 δ 函数的卷积。矩形脉冲的频谱幅值为 $\mathrm{sinc}(fT)$ 函数，这种函数的零点出现在频率为 $1/T$ 整数倍的位置上。这种现象可以参见图 3-6，其中给出相互覆盖的各个子信道内经过矩形波形成型得到的符号的 sinc 函数频谱。在每一子载波频率的最大值处，所有其它子信道的频谱值恰好为零。由于在对 OFDM 符号进行解调的过程中，需要计算这些点上所对应的每一子载波频率的最大值，因此可以从多个相互重叠的子信道符号频谱中提取出每个子信道符号，而不会受到其它子信道的干扰。从图 3-6 中可以看出，OFDM 符号频谱实际上可以满足奈奎斯特准则，即多个子信道频谱之间不存在相互干扰，但这是出现在频域中的。因此这种一个子信道频谱的最大值对应于其它子信道频谱的零点可以避免子信道间干扰（ICI）的出现。

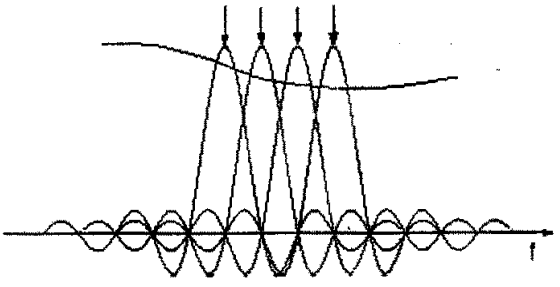

图 3-6 OFDM 系统中子信道符号的频谱（经过矩形脉冲成型）

另外应用 OFDM 的一个最主要原因是它可以有效地对抗多径时延扩展。通过把输入的数据流串并变换到 N 个并行的子信道中，使得每个用于去调制子载波的数据符号周期可以扩大为原始数据符号周期的 N 倍，因此时延扩展与符号周期的比值也同样降低 N 倍。为了最大限度地消除符号间干扰，还可以在每个 OFDM 符号之间插入保护间隔(Guard interval)，而且该保护间隔长度 T_g 一般要大于无线信道的最大时延扩展，这样一个符号的多径分量就不会对下一个符号造成干扰。在这段保护间隔内，可以不插入任何信号，即是一段空闲的传输时段。然而在这种情况中，由于多径传播的影响，则会产生信道间干扰（ICI），即子载波之间的正交性遭到破坏，不同的子载波之间产生干扰。这种效应可见下图：

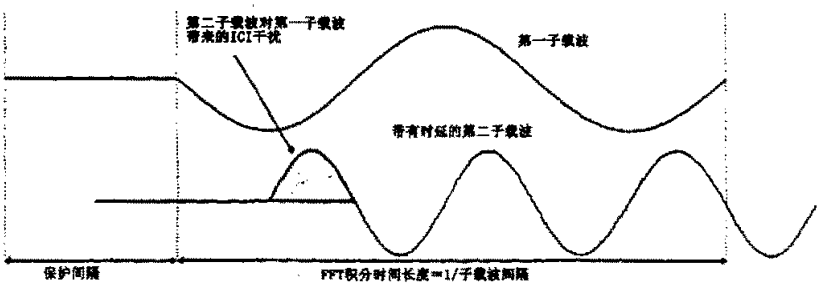

图 3-7 多径效应造成的载波间干扰

由于每个 OFDM 符号中都包括所有的非零子载波信号，而且也同时会出现该 OFDM 符号的时延信号，因此上图中给出了第一子载波和第二子载波的延时信号。从图中可以看到，由于在 FFT 运算时间长度内，第一子载波与带有时延的第二子载波之间的周期个数之差不再是整数，所以当接收机试图对第一子载波进行解调时，第二子载波会对此造成干扰。同样，当接收机对第二子载波进行解调时，也会存在来自第一子载波的干扰。

为了消除由于多径所造成的 ICI，OFDM 符号需要在其保护间隔内填入循环前缀信号。这样就可以保证在 FFT 周期内，OFDM 符号的延时副本内所包含的波形的周期个数也是整数。这样，时延小于保护间隔 T_g 的时延信号就不会在解调过程中产生 ICI。

加入保护间隔之后基于 IDFT（IFFT）的 OFDM 系统框图可以表示为图 3-8。

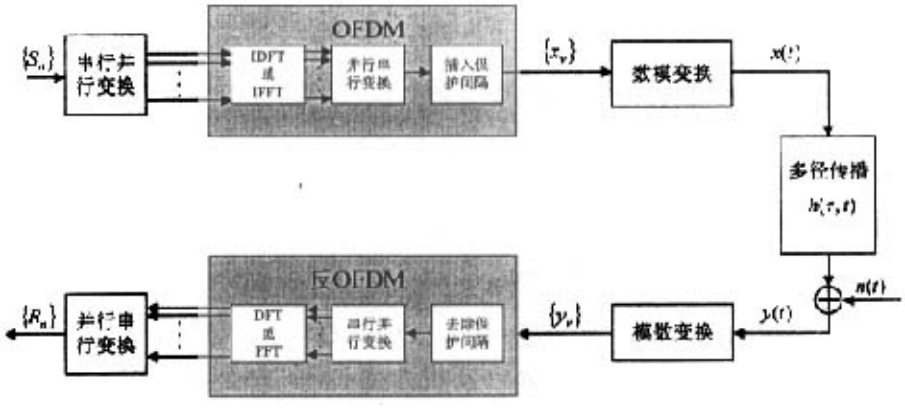

图 3-8 OFDM 系统传输框图

3.3.2 正交频分复用系统的主要优缺点

近年来，OFDM 系统已经越来越得到人们的广泛关注，其原因在于 OFDM 系统存在如下的主要优点：

- 把高速数据流通过串并转换，使得每个子载波上的数据符号持续长度相对增加，从而可以有效地减小无线信道的时间弥散所带来的ISI，这样就减小了接收机内均衡的复杂度，有时甚至可以不采用均衡器，仅通过采用插入循环前缀的方法消除ISI的不利影响。
- 传统的频分多路传输方法中，将频带分为若干个不相交的子频带来传输并行的数据流，在接收端用一组滤波器来分离各个子信道。这种方法的优点是简单、直接，缺点是频谱的利用率低，子信道之间要留有足够的保护频带，而且多个滤波器的实现也有不少困难。而OFDM系统由于各个子载波之间存在正交性，允许子信道的频谱相互重叠，因此与常规的频分复用系统相比，OFDM系统可以最大限度地利用频谱资源。
- 各个子信道中的这种正交调制和解调可以采用IDFT和DFT方法来实现。对于N很大的系统中，我们可以通过采用快速傅立叶变换（FFT）来实现。随着大规模集成电路技术与DSP技术的发展，IFFT和FFT都是非常容易实现的。
- 无线数据业务一般都存在非对称性，即下行链路中传输的数据量要远远大于上行链路中的数据传输量，如Internet业务中的网页浏览、FTP下载等。另一方面，移动终端功率一般小于1W，在大蜂窝环境下传输速率低于10-100kb/s；而基站发送功率可以较大，有可能提供1Mb/s以上的传输速率。因此无论从用户数据业务的使用需求，还是从移动通信系统自身的要求考虑，都希望物理层支持非对称高速数据传输，而OFDM系统可以很容易地通过使用不同数量的子信道来实现上行和下行链路中不同的传输速率。
- 由于无线信道存在频率选择性，不可能所有的子载波都同时处于比较深的衰落情况中，因此可以通过动态比特分配以及动态子信道分配的方法，充分利用信噪比较高的子信道，从而提高系统的性能。而且对于多用户系统来说，对一个用户不适用的子信道对其它用户来说，可能是性能比较好的子信道，因此除非一个子信道对所有用户来说都不适用，该子信道才会被关闭，但发生这种情况的概率非常小。
- OFDM系统可以容易与其它多种接入方法相结合使用，构成OFDMA系统，其中包括多载波码分多址MC-CDMA、跳频OFDM以及OFDM-TDMA等等，使得多个用户可以同时利用OFDM技术进行信息的传递。

但是另一方面，由于OFDM系统内存在有多个正交子载波，而且其输出信号是多个子信道信号的叠加，因此与单载波系统相比，存在如下缺点：

- 易受频率偏差的影响。由于子信道的频谱相互覆盖，这就对它们之间的

正交性提出了严格的要求。然而由于无线信道存在时变性，在传输过程中会出现无线信号的频率偏移，例如多普勒频移，或者由于发射机载波频率与接收机本地振荡器之间存在的频率偏差，都会使得 OFDM 系统子载波之间的正交性遭到破坏，从而导致信子道间的信号相互干扰（ICI），这种对频率偏差敏感是OFDM系统的主要缺点之一。

- 存在较高的峰值平均功率比。与单载波系统相比，由于多载波调制系统的输出是多个子信道信号的叠加，因此如果多个信号的相位一致时，所得到的叠加信号的瞬时功率就会远远大于信号的平均功率，导致出现较大的峰值平均功率比（PAR）。这样就对发射机内放大器的线性提出了很高的要求，如果放大器的动态范围不能满足信号的变化，则会为信号带来畸变，使叠加信号的频谱发生变化，从而导致各个子信道信号之间的正交性遭到破坏，产生相互干扰，使系统性能恶化。

3.3.3 采用 OFDM 调制方式的 802.11a 标准

最初的 802.11 标准的速率只能达到 2Mbps，并不能够满足日益增长的高速数据传输的需要。IEEE 于 1999 年推出了 802.11b 和 802.11a 两个扩展标准。其中 802.11a 标准是已经在办公室、家庭、宾馆、机场等众多场合得到广泛应用的 802.11b 无线联网标准的后续标准。它采用了上面所介绍的 OFDM 调制方式，工作在 5GHz 频带，物理层速率可达 54Mb/s，传输层速率可达 25Mbps。

其物理层主要参数如下:

- 数据速率：6，9，12，18，24，36，48 and 54Mbps（6，12 and 24Mbit/s 这几种速率是必须支持的）
- 调制方式：BPSK OFDM，QPSK OFDM，16-QAM OFDM，64-QAM OFDM
- 纠错编码：K=7（64 状态）卷积码；码率：1/2，2/3，3/4
- 子载波数量：52
- OFDM 符号周期：40μs
- 保护间隔：0.8μs
- 占用带宽：16.6MHz

系统中的 52 个子载波中的 48 个用来传输信息。经过信道编码和交织后的比特流被分为 N 比特（N 与调制方式有关）一组送到调制器，调制时采用格雷码星座映射。信息传输过程中，传输速率可变。各种数据速率下参数见下图：

数据速率/ Mbps	调制方式	码率	单子载波比特波	OFDM 符号比特数	OFDM 符号信息比特数
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

图 3-9 802.11a 协议传输的数据速率

IEEE802.11a 中使用 52 个子载波(应为 53 个,其中 k =0 处,即直流子载波上不传送符号,为空符号 0)，IFFT 算法是基于 2N 点，如考虑 64 点的 IFFT 实现，则 53 个子载波映射到 IFFT 顺序输入数据编号的之间，编号低端和编号高端分别有 6 个和 5 个空符号点($C_{l,k}$=0, k =-32,…,-27,27,…,31)，这样映射是为了保证系统的子载波频谱集中，从而使得系统占用的频谱带宽尽可能窄,节约频谱资源。

下图是协议中规定的 OFDM 的前置训练结构。

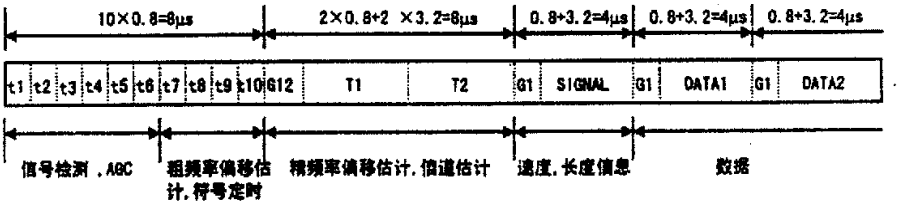

图 3-10 802.11a 中的 OFDM 前置训练结构

OFDM 分组结构由前导和数据部分组成。前导由 10 个持续时间为 0.8 μs 的短训练符号和 2 个长训练符号组成。总的训练时间长度为 16 μs，训练符号后面的信号域，提供后续数据的调制类型、编码速率和数据长度信息。短训练符号通过 52 个子载波中间距为 4 的子载波发送，其上传输已知的伪随机序列(QPSK 调制符号)。短训练符号一是用做粗频偏估计，二是执行自动增益控制(AGC)和符号定时。在接收端,首先要对接收信号进行增益控制。IEEE802.11a 前导中的前六个短符号用作 AGC。对接收到的这六个符号自相关平均得到平均功率,采用 AGC 调节增益可以使输入信号功率在一个合理的范围，以抗衰落和脉冲噪声。短训练符号后是长训练符号，它由 53 个子载波(包括直流处空符号“0”)组成,其上传输 BPSK 符号。长训练符号完成精确频率偏移估计和信道估计，得到用于相干解

调时的参考幅度和相位。按照这种方式设计的长、短符号的峰值平均电平比(PAR)大约为3dB，大大低于OFDM数据符号的PAR。在前导之后，还选用52个子载波中的4个子载波来发送长为127的伪随机序列作为导频序列进行同步。

3.4 802.11中的所采用的MAC协议

802.11所传输的业务包括异步的数据业务，以及对传输时延有着严格要求的各种实时业务，例如语音业务和视频业务。为了适应异步数据业务和实时业务各自不同的特点，802.11无线局域网MAC层提供两种通讯方式，一种叫分布式协同式（DCF），另一种叫点协同方式。分布式协同（DCF）基于具有冲突检测的载波侦听多路存取方法(CSMA/CA)，无线设备发送数据前，先探测一下线路的忙闲状态，如果空闲，则立即发送数据，并同时检测有无数据碰撞发生。这一方法能协调多个用户对共享链路的访问，避免出现因争抢线路而谁也无法通信的情况。它对所有用户都一视同仁，在共享通讯介质时没有任何优先级的规定。点协同方式（PCF）是指无线接入点设备周期性地发出信号测试帧，通过该测试帧与各无线设备就网络识别、网络管理参数等进行交互。测试帧之间的时间段被分成竞争时间段和无竞争时间段，无线设备可以在无竞争时间段发送数据。由于这种通讯方式无法预先估计传输时间，因此，与分布式协同相比，目前用得还比较少。

3.4.1 MAC系统结构

(1)基本服务组

通过配置的无线局域网都具有三个组成部分：站点、接入点（Access Point，AP）和无线介质。一系列互相通信的站就形成了基本服务组（BSS）。一个简单的BSS不具备接入点AP，这种BSS的站都直接和其余站通信，如图3-11所示。我们称之为独立BSS（Id-BSS）。

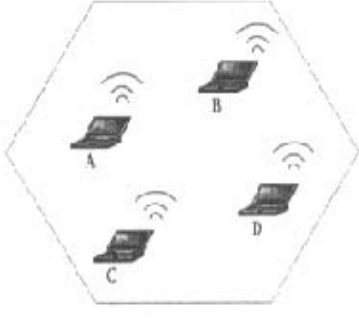

图3-11 一个最简单的独立基本服务组

网络系统比较复杂，站之间的通信要靠AP转接，那么我们称这种结构为构造BSS（If-BSS），如图3-12。AP不仅可以完成BSS内部的数据交换，还可以充

当同其他 BSS 通信时的通道。

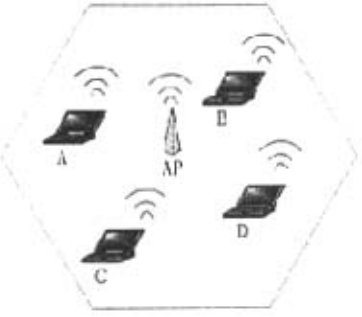

图 3-12 构造 BSS

(2)扩展服务组

随着网络规模的增大，确定其他移动设备的难度也在不断增加。现实中解决这一问题的方法就是让多个相互邻接的 BSS 通过骨干网络来相互通信。这种互相关联的 BSS 被称为扩展服务组（ESS），如。在扩展服务组 ESS 模式中，多个 BSS 是通过接入点 AP 相互连接的。

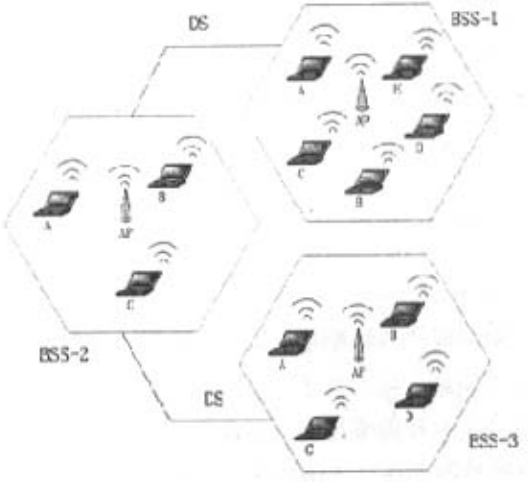

图 3-13 扩展服务组 ESS

3.4.2 MAC 帧格式

802.11 标准定义了三种不同类型的帧用于通信：数据帧、控制帧和管理帧。数据帧的格式如图 3-14 所示。

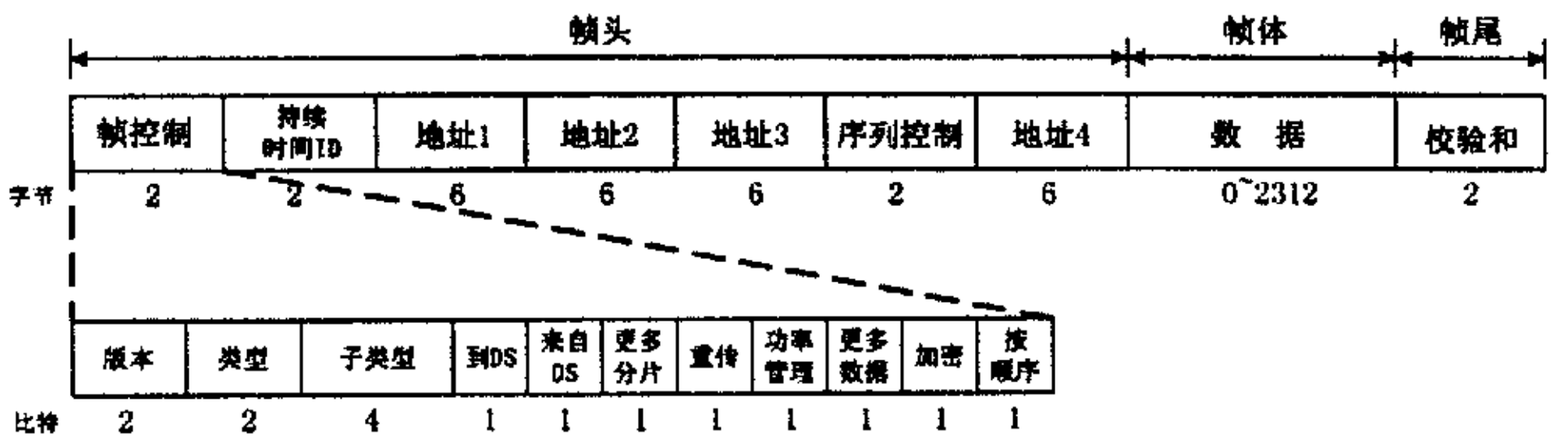

图 3-14 IEEE 802.11 数据帧结构

帧控制域表征一些控制信息，包括 11 个子域，有版本域、类型、子类型、ToDS、FromDS、更多分片、功率管理、重传、顺序等。

持续时间提供该帧和它的确认帧将会占用信道多长时间的信息。

地址 1 到 4 分别标明了源地址和目标地址、源基站和目标基站。

序列控制使得分片可以编号。数据域的内容就是静荷，长度可以达到 2312 个字节，后面跟着常用的校验和域。

管理帧的格式与数据帧的格式非常类似，唯一不同的是，管理帧少一个基站地址，因为管理帧被严格限定在一个单元内。

控制帧也要短一些，它也只有一个或者两个地址，没有数据域，也没有序列控制域。对于控制帧，关键的信息在于帧控制的子类型部分，通常为 RTS、CTS 或者 ACK。

3.4.3 DCF 机制简介

802.11 的数据链路层由两个子层构成，逻辑链路控制层（Logic Link Control，LLC）和介质访问控制层（Media Access Control，MAC）。MAC 要解决的主要问题是协调站点接入介质。无线环境中有两个原因会引起数据冲突：多台移动站同时争抢信道和隐藏终端（Hidden Terminals）。在 802.11 无线局域网协议中，冲突的检测存在一定的问题。这是由于要检测冲突，设备必须能够一边接收数据信号一边传送数据信号，而这因为前面所提到过的信号能量泄漏到接收路径的原因，在无线通信系统中是无法办到的。DCF 模式是建立在 CSMA/CA 的基础之上的。CSMA/CA 机制利用握手的方式来解决隐藏节点的问题，同时也利用 ACK 信号来避免冲突的发生，也就是说，只有当客户端收到网络上返回的 ACK 信号后才能确认送出的数据已经正确到达目的。

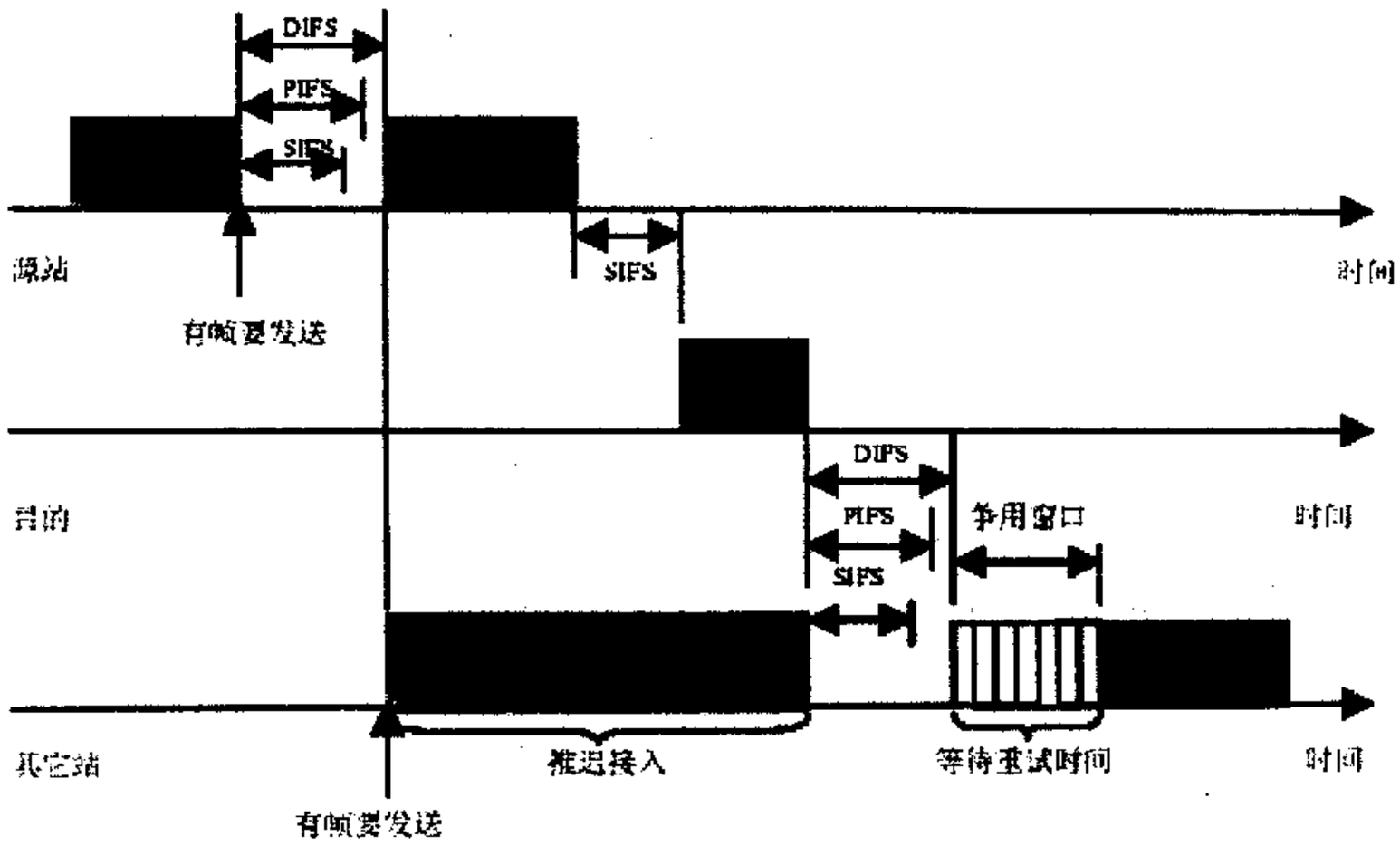

图 3-15　DCF 传输机制示意图

3.4.3.1　DCF 模式支持两种访问方法：

- 基本访问方法：当一个无线节点希望在无线网络中传送数据时，如果没有探测到无线信道上正在传送数据，则会附加等待一段时间，再选择一个时间片继续探测，如果无线网路中仍旧没有传送中的数据，无线节点就将进行数据发送。接收端的无线节点如果收到发送端送出的完整的数据，则会回复一个 ACK 数据报。如果这个 ACK 数据报被发送端收到，则整个数据发送过程完成，如果发送端没有收到 ACK 数据报，或者发送的数据没有被完整的收到，或者 ACK 信号的发送失败，只要是发生上述的任何情况，发送端的用户节点都会认为这次发送失败了并准备下次重发。如果发送失败了，用户节点就需要等待延长一倍的随机时间再次发送 RTS 去竞争信道。这种竞争方式称作二指数待机（Binary Exponential Backoff，BEB）方式。之所以要作这样的设定，是因为如果一个用户节点的 RTS 都出现了失败的情况，说明这个用户节点所要进行传输的信道质量很差，能够误差错地进行传输地概率很小。因此协议让这个用户节点所需等待的时间按指数进行增加，使别的信道质量好的用户节点拥有更大的机会来使用无线信道。RTS/CTS 握手协议：基本访问方法的缺陷在于当数据帧较长时，一旦数据发生冲突，将浪费大量时间传输无效数据，使网络效率大大降低。为解决这个问题，可以采用 RTS/CTS 访问方法，而且这种方法也可以解决隐藏终端问题。每一个有数据需要发送的无线节点在传输数据之前需要先向目的节点发送一个 RTS，收到这个 RTS 的目

的节点随后向发送节点回送一个 CTS 信号。无线网络中的无线节点如果能够检测到在无线信道上传输的 RTS 和 CTS，就不会在 RTS 和 CTS 信息中所包含的传输阶段中尝试进行数据发送。由于 RTS/CTS 需要占用网络资源而增加了额外的网络负担，一般只应用在大数据报的传递上。

3.4.3.2 虚拟载波侦听

802.11 中的载波侦听分为物理层的载波侦听和 MAC 层的载波侦听。

物理层上的载波侦听指的是对空中接口进行侦听，通过监听到的数据包来确定该 WLAN 区域内的各个无线节点，并判断当前有没有其它的无线节点在进行传输。而 MAC 层的载波侦听则是提供一种虚载波侦听的机制，用于减少无线节点对无线资源侦听的次数。

MAC 层的虚载波侦听机制的具体实现是通过引入网络分配向量（Netware Allocation Vector，NAV）来完成的。其具体操作是，每个网络中的无线节点都拥有一个 NAV 值，并且由各个无线节点对自己的 NAV 值进行维护。NAV 值是一个可以变化的数值，用于表示当前在信道上传输的业务所需要占用信道的时间。无线信道上所传输的 RTS、CTS 以及 DATA 等信息中都包含有一个 Duration 字段，这个字段表明了当前在信道上所进行的传输所占用的时长。无线节点通过检测信道上传输的 Duration 信息，来更新自己的 NAV 值。然后 NAV 值将会一直递减，当值减为 0 后，这时说明上次在无线信道上所检测到的传输已经结束了，各个无线节点开始重新竞争信道。

通过上面的描述，我们可以看到。虚载波侦听技术的引入，大大减少了各个节点对无线信道的不必要的侦听次数。在降低了发生冲突的概率的同时，也减少了各个无线节点的耗电量，这对于采用电池作为能源的各种无线用户终端来说，是非常重要的。

3.4.4 PCF 机制简介

与 DCF 机制不同，PCF 是面相连接的，提供无竞争传输的传输机制。PCF 依靠协调节点（Point Coordinator，PC）来完成对系统中各个无线节点的轮询，使被轮询到的无线节点无需经过竞争就能够进行传输。在每个 BSS 中，一般由 AP 来完成 PC 的工作。PC 将整个传输分为竞争阶段（Contention Period，CP）和非竞争阶段（Contention Free Period，CFP）。所有在 BSS 中的可以在 CFP 阶段进行操作的无线节点称为 CF-Aware 节点。在 CFP 阶段中，由协调节点 PC 来对媒介进行控制。802.11 中支持三种不同的帧：管理帧、控制帧和数据帧。管理帧用来进行计时和同步；控制帧用来在 CP 阶段进行确认和通知 CFP 阶段的结束；

数据帧用于在 CP 阶段和 CFP 阶段中进行数据传输。

PCF 需要与 DCF 共同运行，并且在逻辑上运行在 DCF 的上层。无线用户节点依靠检测 CFP 循环间隔（CFP_Rate）来判断 PCF 所运行的频段。在循环间隔中，一部分的时间被分配给了无竞争的业务，剩余的时间提供给基于竞争的业务。CFP 循环间隔是由 PC 所产生的一个信标帧（Beacon Frame）来初始化的，主要任务之一就是用来进行同步和定时。CFP 循环间隔是一个可管理的参数，是一个在信标帧中的整数值。一旦 CFP_Rate 建立起来，则 CFP 所在的时间段就被决定了。CFP 的最大值由管理参数 CFP_Max_Duration 来决定。CFP_Max_Duration 的最小值是能够满足传输两个最长 MPDU 的时间，这一时间包括开销、初始化信标帧和一个 CF_End 帧。CFP_Max_Duration 的最大值是 CFP 循环间隔与在 CP（包括 RTS/CTS 和 ACK）中传输的最长 MPDU 所用时间的差值。这样，在 CP 中，至少需要给一个 MPDU 分配传输时间。由 AP 来决定在任何给出的循环间隔中的 CFP 的运行时间。如果业务量不大，PC 就会缩短 CFP，并将循环间隔剩下的时间都分配给 DCF。如果在上一次循环间隔中有未处理的 DCF 业务，PC 也会缩短 CFP。当 DCF 在传输 RTS/CTS 握手、最长的 MPDU 和 ACK 的时候，相应的 CFP 就会被压缩到最短。

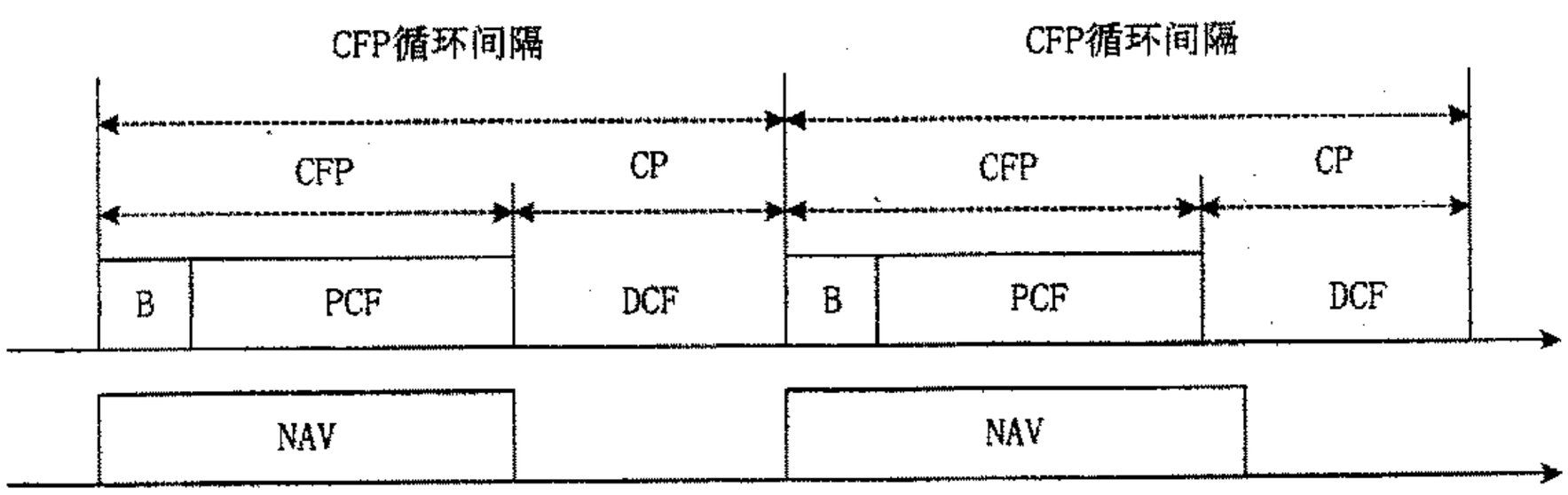

图 3-16　PCF 与 DCF 机制共存示意图

在 CFP 循环间隔的开始阶段，BSS 中的所有的无线节点将各自的 NAV 更新成为 CFP 的最大值（CFP_Max_Duration）。在 CFP 中，无线节点只有在接到 PC 的轮询或者在收到一个 MPDU 需要发送一个 ACK 的情况下，才能够进行传输。在 CFP 的开始阶段，PC 对传输媒介进行检测。如果在传输媒介在 PIFS 的时间里都是空闲的话，PC 就发送信标帧来对 CFP 进行初始化。在发送了信标帧之后，PC 经过 SIFS 的等待，通过发送 CF_Poll 帧、数据帧，开始进行 CF 传输。PC 也可以通过发送一个 CF_End 帧来直接结束 CFP，这种情况在网络流量不大或者 PC 没有业务缓存的时候是经常出现的。如果一个无线节点收到 PC 发送过来的 CF_Poll 帧，这个节点就会在等待 SIFS 之后，向 PC 回送 CF_ACK 和需要传输的数据。如果 PC 接收到了这些信息，PC 就会发送 CF_ACK 和需要传输的数据，

并对下一个无线节点进行轮询。当被轮询到的无线节点没有需要传输的业务时，节点就会向 PC 发送 Null Function 帧。如果 PC 没有成功地接收到所传输的数据的 ACK，就会在等待一个 PIFS 间隔后，向下一个无线节点进行轮询。

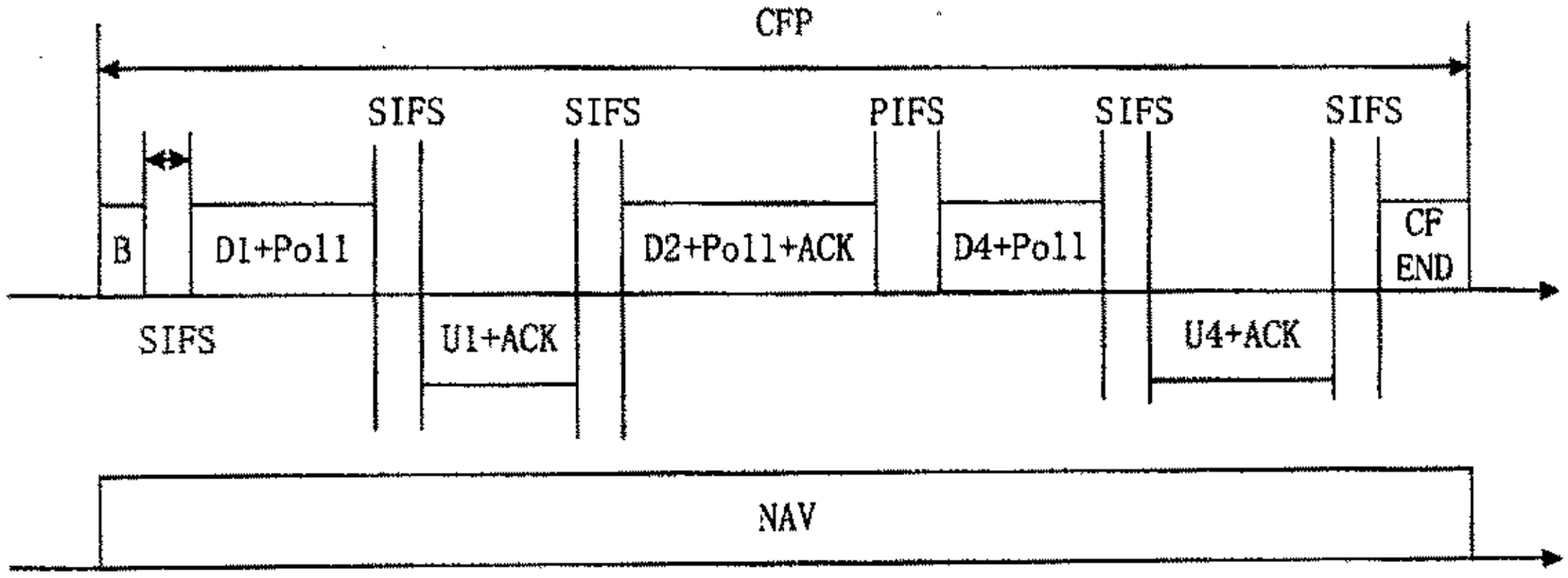

图 3-17 CFP 中 PC 与无线用户节点传输示意图

在无线节点经过轮询，并完成了上述的操作之后，也许会需要和 BSS 内的其它无线节点进行通信。当目的节点接收到这个帧之后，将会返回一个 DCF ACK 给发送节点，同时 PC 将会在这个 ACK 之后等待 PIFS 间隔的时间才回进行传输。

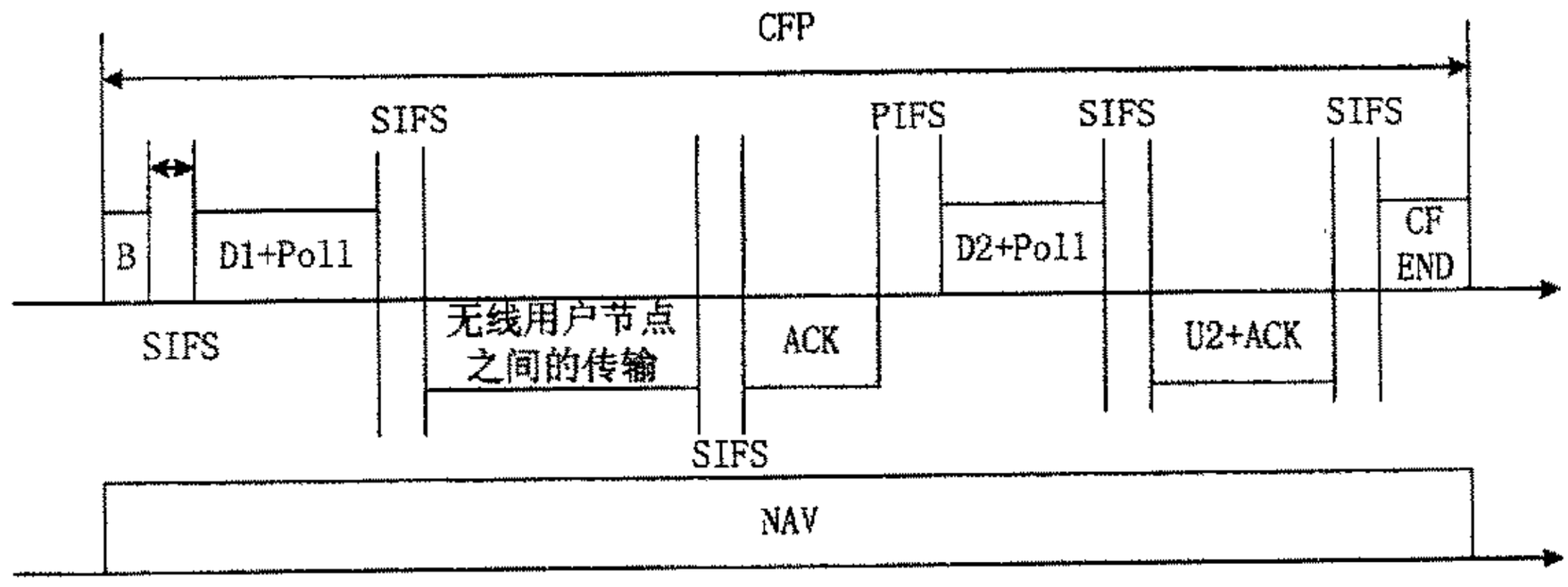

图 3-18 CFP 中无线用户节点相互传输示意图

本章主要对 802。11 中的物理层和 MAC 所采用的主要技术进行了较深入的分析，以后章节中将重点对 MAC 层采用 DCF 机制时的网络性能进行深入的分析和研究。

第四章 802.11MAC 层多址接入协议研究

本文的研究工作是用于探讨多址接入协议对系统性能的影响，主要针对无线局域网标准 IEEE802.11 的采用基于载波监听碰撞避免(CSMA/CA)的四次握手多址接入协议进行研究。下面首先对 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 加以简介，然后介绍几个重要的性能指标以及网络结构模型、射频通信模型、数据业务产生模型，然后详细描述仿真的协议及其仿真建模过程，最后介绍仿真程序的设计。最后给出仿真结果及结果分析。

4.1 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 协议简介

如图 4-1 所示。图中的 RTS 为请求发放包，CTS 为清除发送包，Data 为数据信息包，ACK 为确认包。这个协议的基本概念是：当某终端有数据要发送时，首先采用 CSMA/CA 的方式向接入点（可以是基站、集中器或终端）发出请求发送信息包（RTS），此 RTS 中包括源终端的地址和目的地址（接入点地址），接入点收到 RTS 后，发出清除发送包（CTS），CTS 包中包含有发出请求的终端的地址，发出请求的终端收到 CTS 后向接入点发送数据信息包（Data），与此同时，其他监听信道的终端收到目的地址不是自己的 CTS，推迟自己要发送的包。接入点正确接收到数据后，发出确认信息包（ACK），此终端接收后，才能确认此数据包发送成功。

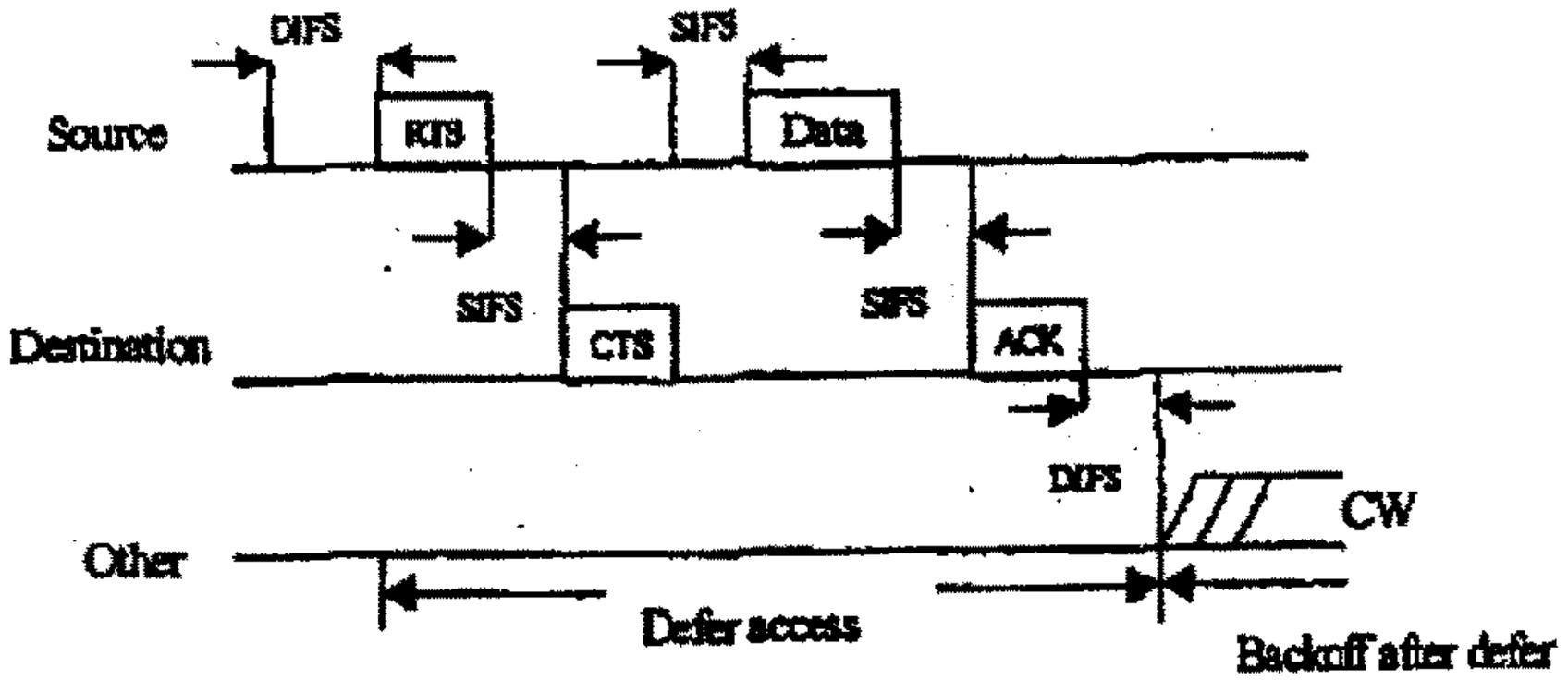

图 4-1 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK

本文中将此协议用 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 来表示。

4.2 多址接入协议的性能指标

一个 MAC 协议在实用中是否可行，如何对其性能做出定量的评估，这些问题对于使用协议的人来说是十分重要。下面引入三个描述 MAC 协议的指标：吞吐量、总业务量、平均传输延迟。

（1） **吞吐量(S)**：把单位时间内在信道上成功传输的信息量定义为吞吐量。假设帧长为固定，长度为 L 比特，且单位时间(以下设为秒)内成功传输的帧数为 n，则吞吐量表示为 nLbps(比特/秒)。通常，用信道传输速率 R(bps)对吞吐量归一化，归一化的吞吐量由 S 表示，即

$$S = n \times \frac{L}{R}$$

这时在，$T = \frac{L}{R}$ 为每帧在信道上的发送时间。

如果在信道上帧不发生碰撞，且帧间隔为零的话，信道将最大限度地使用，这时 $nL = R$，即吞吐量 S=1。相反，如果信道上所有的帧发生碰撞，即成功传输的帧数 n=0 的话，吞吐量达最小值 S=0。

（2） **总业务量(G)**：把欲进入信道要求传输的帧分为两类：一类是各站新产生的帧，另一类是由于碰撞和其它传输错误要求重传的帧。我们把信道上所有的站在单位时间内要求传送的帧的信息量称为信道的总业务量。总业务量等于单位时间内新产生帧的信息量与重传帧的信息量之和。与吞吐量类似，常用信道传输速率对总业务量归一化，归一化的总业务量常用符号 G 表。

（3） **平均传输时延 (D)**：某一帧从进入缓冲器的时刻开始，至成功地到达目的站接收缓冲器的时刻为止的一刻时间，称为帧的传输时延。当某帧被成功地传输时，其时延时间主要是发送等待时间(即为获得信道使用权的等待时间)和该帧在信道上的传输时间(即 T)组成。如果发生碰撞或者传输错误，时延还应包括由于重传而带来的时延。由于每帧的传输时延可能不同，一般取一帧的平均传输时延作为帧时延的量度。通常用一帧的传输时间(T)对平均传输时延归一化，该平均传输迟延用符号 D 表示。

4.3 网络结构模型

在第三章中已经讨论过，无线局域网可以采用中心控制，分布式两种拓扑结构，并且为扩大覆盖范围，可以划分小区进行频率复用。本文是针对中心控制点对多点结构的单一小区的无线局域网进行多址接入协议仿真的。具体网络结构如图 4-2 所示.

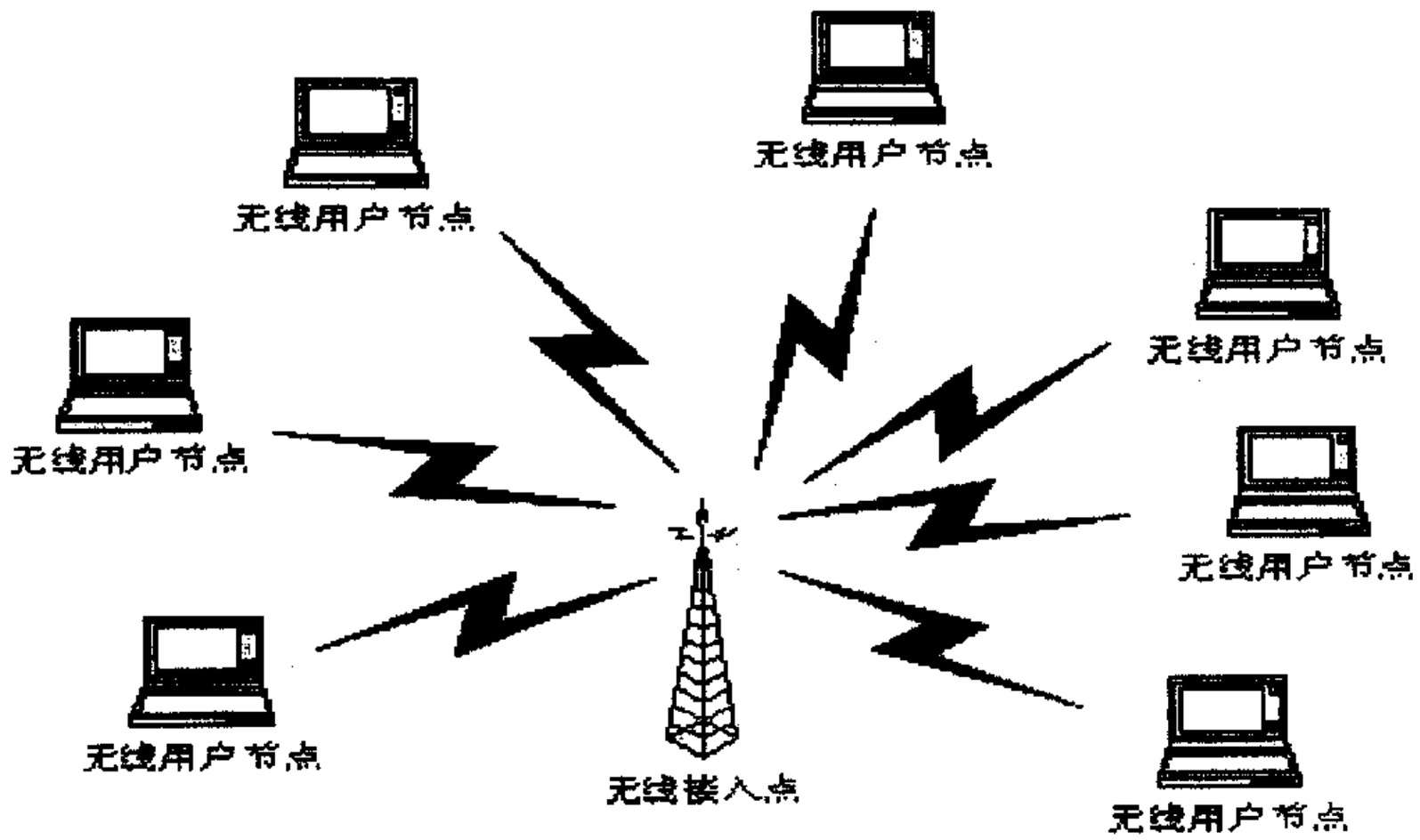

图 4-2 集中式无线网络结构

系统中包括一个基站（AP）和 N 个终端。基站的覆盖半径为 1 的范围。设终端只与基站进行通信，终端之间不能直接进行通信。此 N 个终端及基站共用一个无线信道，发出的信号为广播信号，每个终端都可以收到基站发出的信号，但不一定能收到其它终端的信号，也就是说终端之间不一定在视距范围内，这就存在了隐藏终端的问题，具体情况将在以后讨论。

4.4 射频通信模型

射频通信是指收发射频信号。实际的无线数据通信系统中主要存在以下几个问题：

1）　信道具有多径衰落的特性，其物理特征会在很短的时间或很短的距离内发生变化，从而导致通信的不可靠。根据有关资料给出的在室内无线传播环境下的信道测量结果，信道的统计特性（决定了信号的接收强度）在 10 到 20m s 中或每移动 1 英尺都会有很大变化。

2）　捕获(Capture)效应及干扰(Interference)问题。当两个或两个以上的信息包同时到达接收机时，有的信息包的信号强，有的信号弱。最强的信号被当作有用信号，而其他的弱信号被看作干扰，当信干比（SIR）超过接收机的 SIR 门限时，那么最强的信号被正确接收。这就是捕获效应。捕获效应将导致不公平接入，造成某些终端长期无法进行通信。

3）　碰撞（Collision）问题。如果信息包不是同时到达接收机，那么后到

的信息包，即使信号更强，也被当作干扰，并且将破坏前面信息包的接收。或者当信干比低于门限时，也无法正确接收。这就是碰撞。

4） 隐藏(Hidden Terminal)终端问题。当两个终端之间的距离大于信号可正确接收的距离，或之间有障碍物阻挡时，互相不能监听到对方发出的信息。这就是隐藏终端问题。当采取载波监听的多址接入协议时，这个问题对协议性能影响很大。因为当一个终端发出信息包后，它的隐藏终端无法监听到信道已被占用，如果发出信息包将导致碰撞。

5） 传播时延。无线局域网通信距离很短，一般为十几米到几百米，因此无线传播时延相对很小。例如设通信距离为 30 米，数据速率为 1，数据包长 1000 比特，则相对时延为 0.0001，可以忽略不计。因为本文将不考虑传播时延的影响。

以上问题在制定接入协议时必须给予考虑。但信道传输问题相当复杂，在此不可能对信道的实际情况进行具体研究仿真，因此在这里将信道理想化，即信道为无衰落的，传输是可靠的。由于对信道不进行模拟，所以不能计算信号的强弱，因此也将不考虑捕获效应及干扰问题。凡是两个信息包同时到达或第一个信息包还未接收完时，又有新的信息包到达，将都被视为无效传输，即发生了碰撞。

本文将对隐藏终端的问题进行讨论。由于导致出现隐藏终端的情况很多，为便于讨论，所有终端均随机分布在以 AP 为中心，半径为 1 的区域内。设定一个距离门限，当两个终端之间的距离大于门限距离时，则它们互为隐藏终端。

4.5 数据业务模型

数据包是按照相互到达间隔为相互独立且为负指数分布的泊松到达模式产生的。数据到达的平均时间间隔是根据相对负载参数 G 计算得到的。相对负载参数是用信道容量进行规一化的数据速率，当 G 为 1 时，数据速率等于信道容量。如果数据包的长度为定值，则 G 为单位时间内产生的数据包数，即数据的到达率。这里的单位时间指传送一个数据包所需要的时间，即：包长（bit）/信道容量(bit/s)。还要说明的是 G 包括成功传送的包数和由于缓冲区满而被拒绝的包数，而不包括失败重发的包数，也不包括 RTS，CTS 和 ACK 这些握手信息包。

泊松分布随机数的模块流程图如图 4-3 所示。

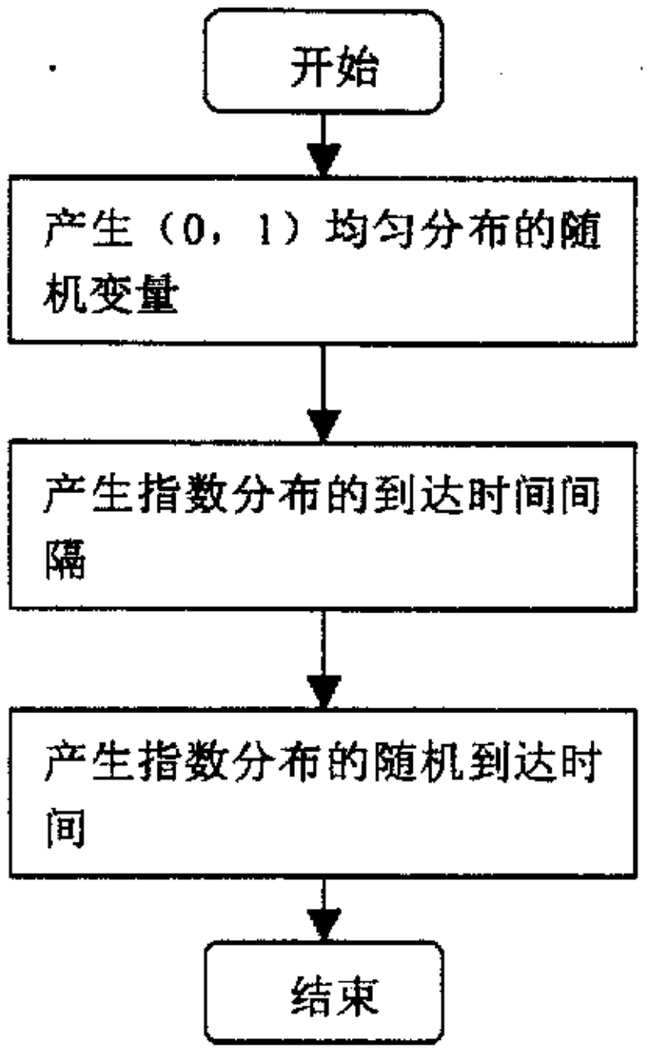

图 4-3 泊松分布随机数产生过程

这里的负载是系统的各个终端的负载，每个终端独立的按照泊松分布产生自己的数据的包。每个终端设有一个缓冲区，即最大可存储的数据包数，当某一包到达时，如果缓冲区已满，此包将被拒绝，如果不满，则进入缓冲区等待发送。

4.6 退避算法

由于本文仿真的协议采用的是坚持监听的方式，对信道的接入是竞争的，因此必须采用合适的退避算法使请求接入信道及碰撞后重发随机化，并且分散程度较大，才能减少碰撞或再碰撞。不同的退避算法对防止碰撞的作用有所不同中，退避算法的选择对网络的性能有着很大的影响。

4.6.1 常见的退避算法

（1）截断的二进指数退避算法

这种算法是在二进指数退避算法基本上作了改进后得到的，对退避的时间的最大值有一个限制，认为在网内的终端数是有限的，没有必要把退避时间计算得非常大。因此为其规定了一个可能的最大上限。如果冲突过多，将放弃此数据包或以故障报告主机进行处理。以太网采用的就是这种算法。其表示式为：

$$BackoffTime=INT(CW\times Random())\times SlotTime$$

其中

$$CW=W\times 2^{m-1},\ m\in [1,\ max]$$

Random() ∈ [0, 1]的一个随机数

SlotTime 为时隙值

Max 为最大退避次数

退避时间的增长按平均分布的随机规律取值。由于采用了随机计算方法，此算法对减少碰撞的效果较好。

(2)线性增长退避算法

线性增长退避算法如下：

BackoffTime=SlotTime+k×(m-1)

其中　　m∈ [1, max]

k 是一个待定的系数，它的最佳值可以用实验的方法来选定，实验结果得到 b =1.5S 时相同的平均响应延迟时间最短。

线性增长退避算法避免了退避时延随碰撞次数的增长而增长得过快的缺点。但它没有随机化。

本文仿真的协议中有三种情况需要进行退避：接入信道时，无 CTS 时和无 ACK 时。每一种退避时间是否合适都将影响系统的吞吐量及时延。但由于本文讨论的网络结构是中心控制的，且认为物理无线信道是理想的，终端只要收到 CTS 信息后，数据包将成功发送。所以无 ACK 的情况是不存在的，即无 ACK 的退避算法是不影响结果的。因此这里仅讨论接入信道时的退避，及无 CTS 的退避情况。

4.6.2 退避算法的选择

根据协议中的规定，终端在准备发送 RTS 包接入信道时必须进行一个接入退避（信道空闲超过长帧间隔情况除外）。当有多个终端有新的数据包发送时，如果退避时间没有随机，则必然会同时争抢信道，即发生碰撞，而且碰撞次数相同使退避的时间也相同，这样会导致碰撞不断的发生下去。退避时间没有随机化的退避算法是不合适的。因此线性退避算法是不适于本仿真协议的。所以对于碰撞退避，本仿真程序选择的是截断二进制退避算法。

接入退避是数据包准备接入信道时为避免同时争抢而采取的一种措施。其时隙和窗口的设置直接影响着减少碰撞的性能。下面对这两个因素分别讨论。

退避算法中的时隙影响着退避时间间隔的长短　。一般退避时隙应为能检测到信道被占用的时间。退避时隙过小，终端间不能及时检测到信道被占用的情况。在有线系统中，一般为传播时间。而在无线局域网系统中，传播时延很短可以忽略。但对于有隐藏终端的情况，隐藏终端必须收到在收到基站发出的 CTS 信息后才能暂停对信道的争抢。退避时隙原则上应大于 RTS+shortIFS 时长。但退避时隙过长，使信道空闲时间过长，必然降低信道的利用率，延长响应时间。因此必须选

取合适的时隙长度。无隐藏终端时退避时隙越长，响应时间越长。在轻负载情况下信道利用率影响不大。这是因为轻负载时，多个终端同时有数据要发的概率很小，因而碰撞次数很小。但对于重负载信道利用率将随着时隙的增加而下降，有隐藏终端时，在轻负载情况下退避时隙越长，响应时间越长，但对信道利用率影响不大。这同样是因为轻负载时，多个终端同时有数据要发的概率很小。在重负载情况下，退避时隙小于 RTS+shortIFS 时的碰撞次数明显多于退避时隙大于 RTS+shortIFS 的情况。这是因为当退避时隙大于等于 RTS+shortIFS 时，隐藏终端只要不是同时发出数据，便可以收到基站发出的 CTS，从而减少了碰撞。

退避算法中的最小窗口影响着终端对信道争抢的分散程度，最小窗口太小，当有多个终端要占用信道时，发生碰撞的可能性就大。但窗口太大，终端退避等待时间也就延长，使信道空闲时间过长，信道利用率不高，而且响应时间会增大。

4.7 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 协议描述

4.7.1 信道接入过程

(1) 每个终端不管是否有数据要发，都一直监听信道情况。如果信道由忙变为闲，即接收到的信号功率由大于门限值变为小于门限值，各终端将记录下这个时间。当终端有数据要发时（有新的数据包到达或缓冲区取出一个数据包时）

(2) 当终端有数据要发时（有新的数据包到达或缓冲区取出一个数据包时）：

- ✧ 如果此时信道正忙，它将等待信道变闲。然后再等待一个长的帧间隔 LongIFS，之后还要再等待一个随机退避时间，这个随机退避时间是根据截断二进制指数退避算法得到的。
- ✧ 如果此时信道是闲，但闲的时间小于 LongIFS，它将等待剩下的时间，并像第一步一样等待一个退避时间。
- ✧ 如果信道闲的时间已超过 LongIFS，它将立即发出信息包。

(3) 如果终端处于退避等待时，信道变忙，终端退避时间计时器将停止计时，进入信道空闲等待状态。当信道两次变闲并且闲的时间大于 LongIFS 时，计时器重新开始计时，每隔一个 slot 减 1，在避退时间计数器减到零后主机立即发出数据帧。

CSMA/CA 协议的算法过程描述框图如下：

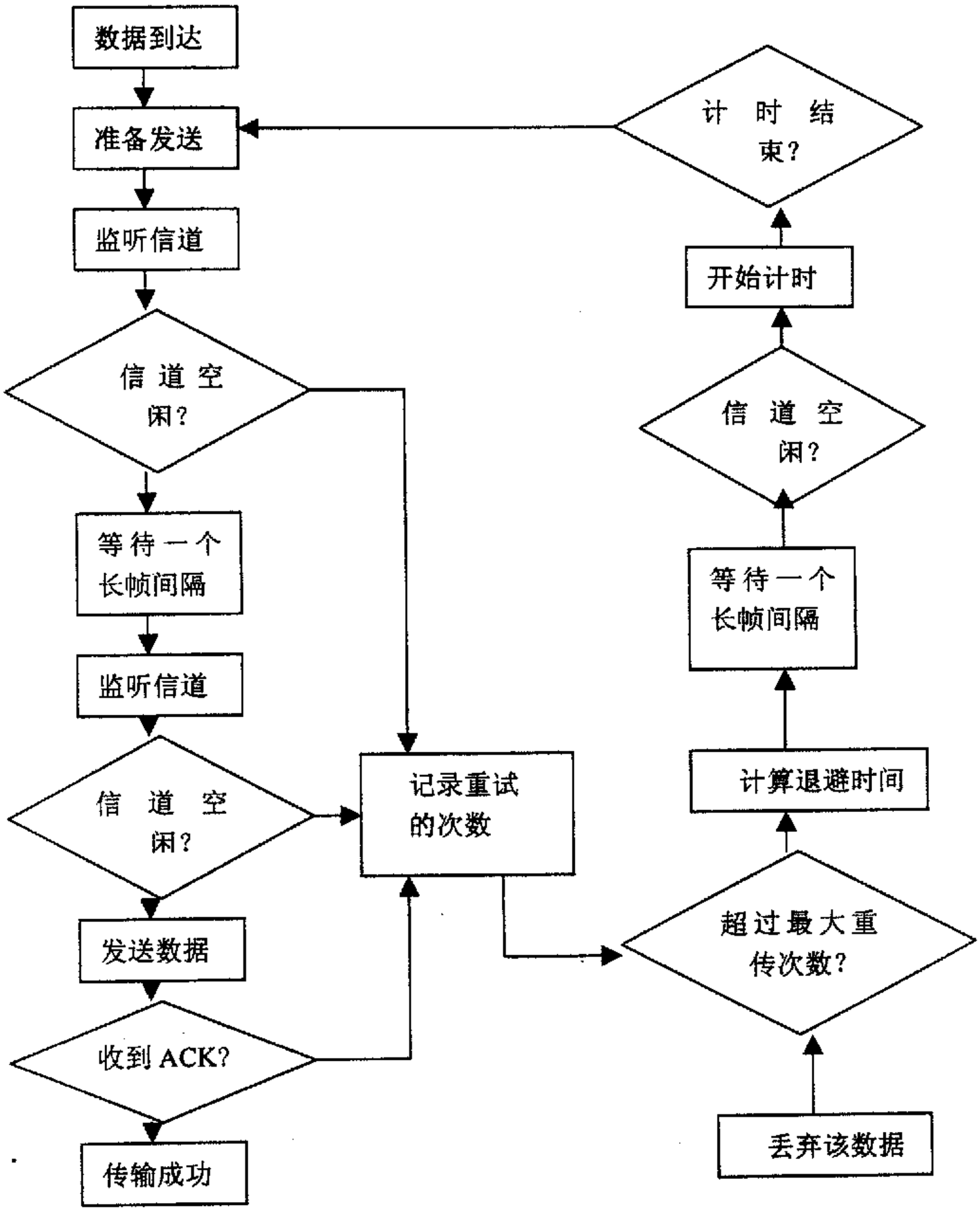

图4-4 CSMA/CA协议的算法过程描述框图

以上过程即为CSMA/CA协议过程。而本协议就是采用CSMA/CA接入信道。

4.7.2 终端发送数据过程

当一个终端有数据待发时，其具体协议过程为：

1. 源终端：通过 CSMA/CA 协议发送 RTS。

   源终端发出 RTS 之后，启动等待 CTS 定时器(CTSWait)，等待基站的响应。

2. 其他终端如果正确收到 RTS 信息包后，计算完成此次通信协议周期（即正确传递 CTS、DATA、ACK 信息包）所需要的时间，立即启动暂

停通信定时器，并进入暂停通信等待状态（Wait_for_idle）。在此期间将不发送任何信息包。如果已经处于 Wait_for_idle 状态，则根据需要延长定时时间。

3. 基站如果正确接收到源终端发来的 RTS 信息包，将等待一个短的帧间隔（shortIFS），然后发送 CTS 信息包，同时启动等待数据定时器(DATA Wait)，等待终端发送数据包。DATAWait 定时器的定时时间为 shortIFS 时间与传送数据包所需时间之和。如果没有正确接收到 RTS，基站将不予以响应。
4. 其他终端如果正确接收到一个 CTS 信息包（包含有源终端的地址）后，计算完成此次通信协议周期（即正确传递 DATA、ACK 信息包）所需要的时间，立即启动暂停通信定时器（Wait_for_idle），并进入暂停通信等待状态。在此期间将不发送任何信息包。如果已经处 mWait_for_idle 于状态，则根据需要延长定时时间。
5. 源终端如果在 CTSWait 定时器到时之前正确接收到响应自己的 CTS，则按照步骤 7 进行；否则按照步骤 6 进行。在仿真中 CTSWait 定时器的定时时间为 shortIFS 及传送 CTS 包所需要的时间之和。
6. 等待一个 shortIFS。然后启动一个无 CTS 的退避延迟，延迟结束后将接入计数器（accessretry）置为零，将无 CTS 计数器（CTSretry）加 1，并回到步骤 1。无 CTS 的延迟时间的计算方法采用截断的二进指数退避算法。
7. 等待一个 shortIFS，发送数据信息包（DATA），然后启动 ACK 等待定时器，等待基站发回的 ACK 信息包。仿真中定时间为 shortIFS 及传送 ACK 包所需要的时间之和，实际系统可能会更长一些。
8. 基站在 DATAWait 定时时间到后还没有正确收到数据，将使自己状态变为空闲，等待接收其他信息。如果正确接收到数据包，则等待一个 shortIFS，发送 ACK 予响应。
9. 源终端在 ACKWait 定时时间内正确收到基站响应的 ACK，执行步骤 11；否则执行步骤 10。
10. 源终端等待一个 shortIFS 时间，然后启动一个无 ACK 的退避延迟，延迟结束后将接入计数器(accessretry)及无 CTS 计数器置为零，将无 ACK 计数器加 1，并回到步骤 1。无 ACK 的退避延迟时间的计算方法采用截断的二进指数退避算法，只是参数不同。
11. 如果没有数据要发送，则进入准备状态 mStandby；否则执行步骤 1。
12. 其他终端在定时器 Wait_for_idle 到后，如果没有数据要发送，则

进入准备状态 mStandby；否则执行步骤 1。

CSMA/CA +RTS/CTS+ACK 协议事件及状态变化流程图如图 4-5 所示。

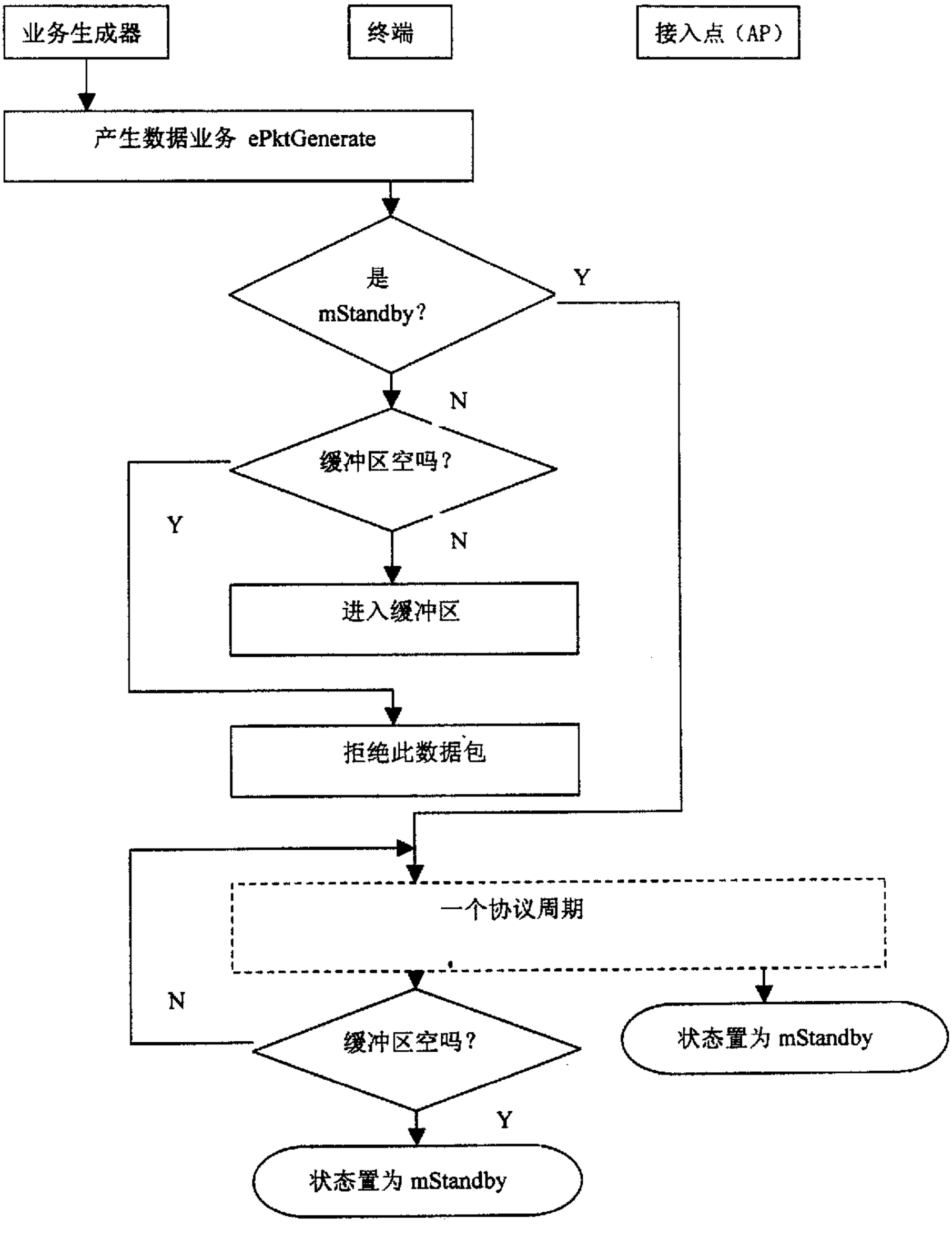

图 4-5 CSMA/CA +RTS/CTS+ACK 协议事件及状态变化流程图

4.8 仿真系统的设计

仿真系统共分三大部分：第一部分是参量表及数据结构的定义；第二部分是

协议仿真程序，包括主程序、事件调度子程序、事件子程序；第三部分是结果输出程序，主要是结果统计。

4.8.1 参量表及数据结构的建立

（1）仿真中的几个概念：

1）协议周期指从缓冲区中取出数据包准备发送，到正确受到 ACK 确认信息。

2）信道接入是指发送 RTS 申请接入信道。

3）单位时间是指用传送一个数据包所需要的时间，记为 UT。由于传送时间与包长成正比，所以包长与它传送的时间是一致的。仿真中信道速率 R=2Mbps, 数据包长 DATAPkt=8000bit, 所以 UT=4e-3。

(2)仿真建模

1）仿真中所用到的事件结构有：

- 业务生成器
- 数据包
- 事件
- 终端
- 接入点（AP）
- 统计计数器

每个事件结构包括该事件的属性和事件的行为。

2）描述变量有：

- 基站和终端得状态集合
- 事件集合

4.8.2 仿真程序流程

仿真采用离散事件法，结构如图 4-6

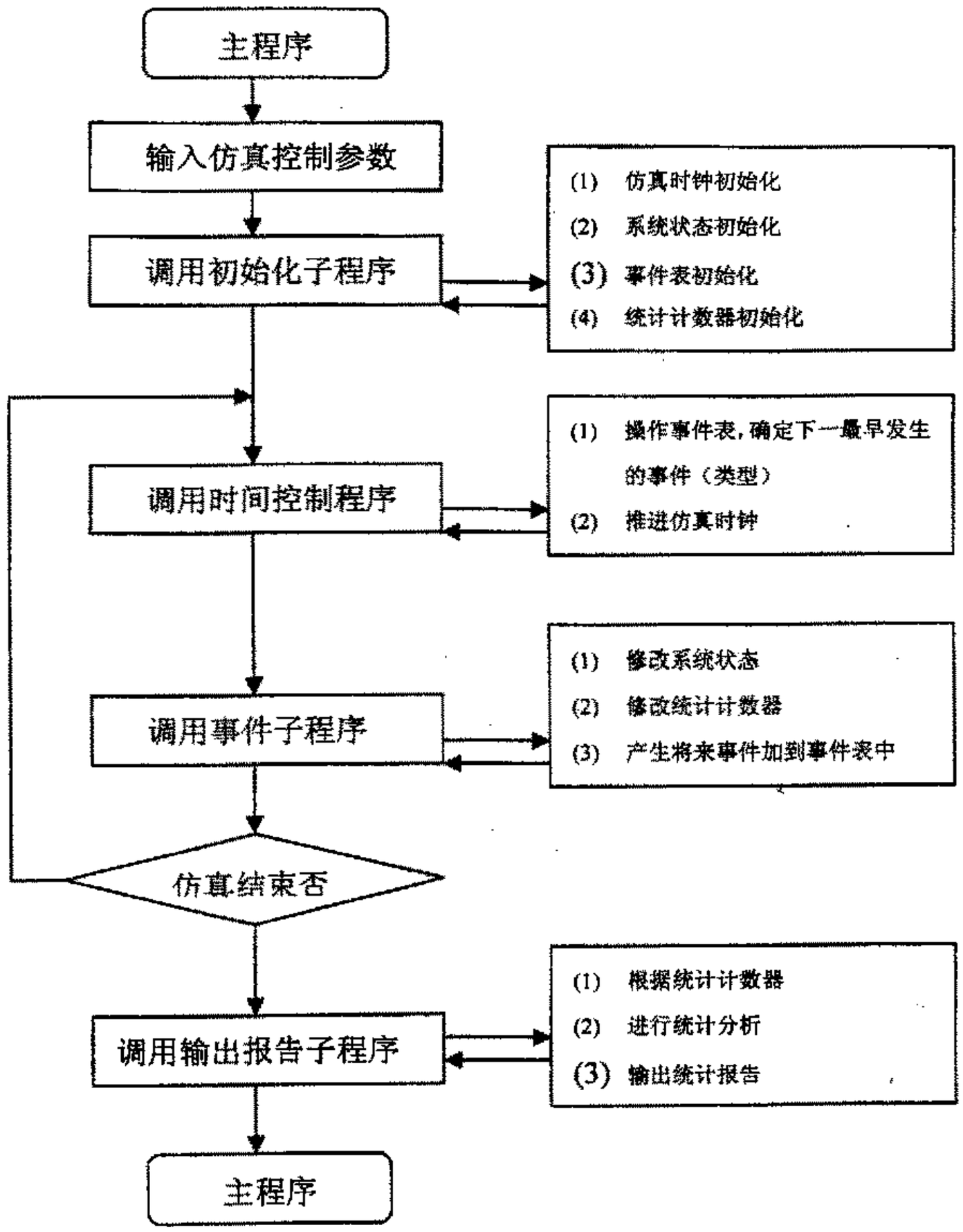

图 4-6 仿真程序流程

4.9 仿真结果分析与讨论

衡量一个多址接入协议是否适合于某一系统，吞吐量、时延和负载能力的相互关系是十分关键的。因此本文重点探讨了应用于无线局域网的多址接入协议此三方面性能及协议有关因素对协议性能的影响. 以说明其在无线局域网中的适用性。

4.9.1 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 协议的性能仿真与分析

1. 吞吐与量负载的关系

终端数：20　　AP 覆盖半径 r=1

缓冲区长度　　100

shortIFS=0.05, longIFS=0.1,

AccessSlotTime=0.11,　　AccessWin = 32

RTSPkt=0.05　　CTS Pkt=0.05

CTSSlotTime=0.11,　　CTSMinWin=32

DATAPkt=1.0,　　ACKPkt =0.05

隐藏终端距离分别为:　2.0, 1.6, 1.2

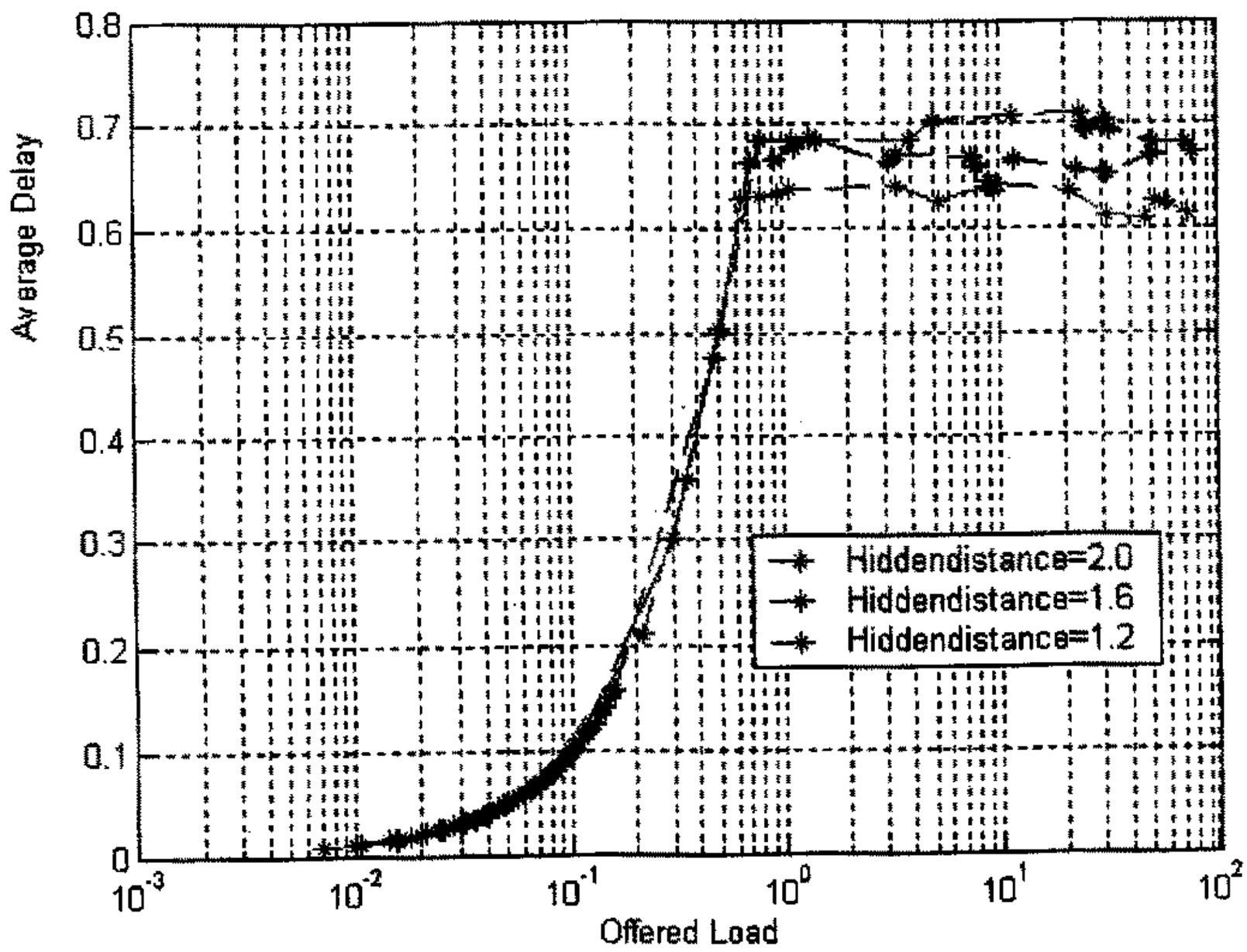

图 4-7 吞吐量与负载得关系

由图可以看出:

(1)在没有隐藏终端的情况下，吞吐量最高可达 0.68 左右。这是因为完成一次数据传输所需要的开销：RTS+CTS+ACK+退避时间+碰撞时延。其中：

RTSPkt+CTSPkt+ACKPkt+3* shortIFS+longIFS =0.4

根据协议，数据包在准备接入信道时要先退避一段时间，这段时间是由参量 AccessSlotTime、AccessWin 决定。主机根据退避算法选择一个退避时间，并设置退避时间计数器。在媒体空闲时，退避时间计数器每隔一个 slot 减 1；媒体忙时，退避时间计数器停止计数。在避退时间计数器减到零后，主机立即发出数据帧。退避算法为:　BackoffTime=INT(CW*Random())*SlotTime

CW=W*2^(m-1)，m∈ [1，mmax]

Random() ∈ [0，1]的一个随机数

设平均退避时间+平均碰撞时延为 D，估计可得 D 的值为 0.71。

根据定义，信道利用率

S=有效信息传输时间/传输总时间

传输总时间＝有效信息传输时间+开销时间+空闲时间；

则最大信道利用率：

$$s_{\max}=\frac{DATA}{DATA+\mathrm{RTS}+\mathrm{CTS}+\mathrm{ACK}+3*\ \mathrm{shortIFS}+\mathrm{longIFS}+\mathrm{D}}$$

$$=\frac{1}{1+0.4+0.071}=0.6798$$

上面的各公式　是在没有隐藏终端情况下，忽略了一些概率很小的情况并进行了一定简化得到的。由于本仿真中吞吐量与信道利用率相同，所以以上理论分析结果与仿真结果基本相符。

（2）在输入负载小于 0.6 时，吞吐量和输入负载基本成线性关系增长（图中水平轴是对数坐标，因此呈曲线）。这是因为，在轻负载时，碰撞情况很小，输入的信息包基本能够来一个发一个。当输入负载超过最大吞吐量时，实际传输的信息包不再增加，而碰撞增加，产生重传的旧包，使实际系统负载超过输入负载。但当系统达到最大吞吐量时，随着负载的增加，吞吐量基本保持在最大值，没有急剧下降。这是因为，当负载大于系统容量时，将出现信息包在缓冲区的排队，每个终端信息包占用信道的时间将与信息达到时间无关，而与协议采用退避算法有关。退避算法使各个终端接入信道的时间随机分开，防止了无限制的连续碰撞，从而保证了信道的吞吐量。当然，此时缓冲区的信息包队列越来越长，如果不拒绝新信息的进入，将会无限增加。本仿真中设置了缓冲区长为 100。当输入负载超过系统容量时，将出现数据包的拒绝。

（3）当出现隐藏终端的情况时（Hidden_distance=1.6 和 Hidden_distance=1.2 时），系统的最大吞吐量略有下降，在输入负载小于系统容量时，三条曲线几乎重合。这说明 RTS/CTS 的引入使隐藏终端问题对协议的吞吐量的影响非常小，即有效的克服了无线局域网中隐藏终端的问题。

2. 时延与负载的仿真与分析

平均时延与负载的关系如下图：

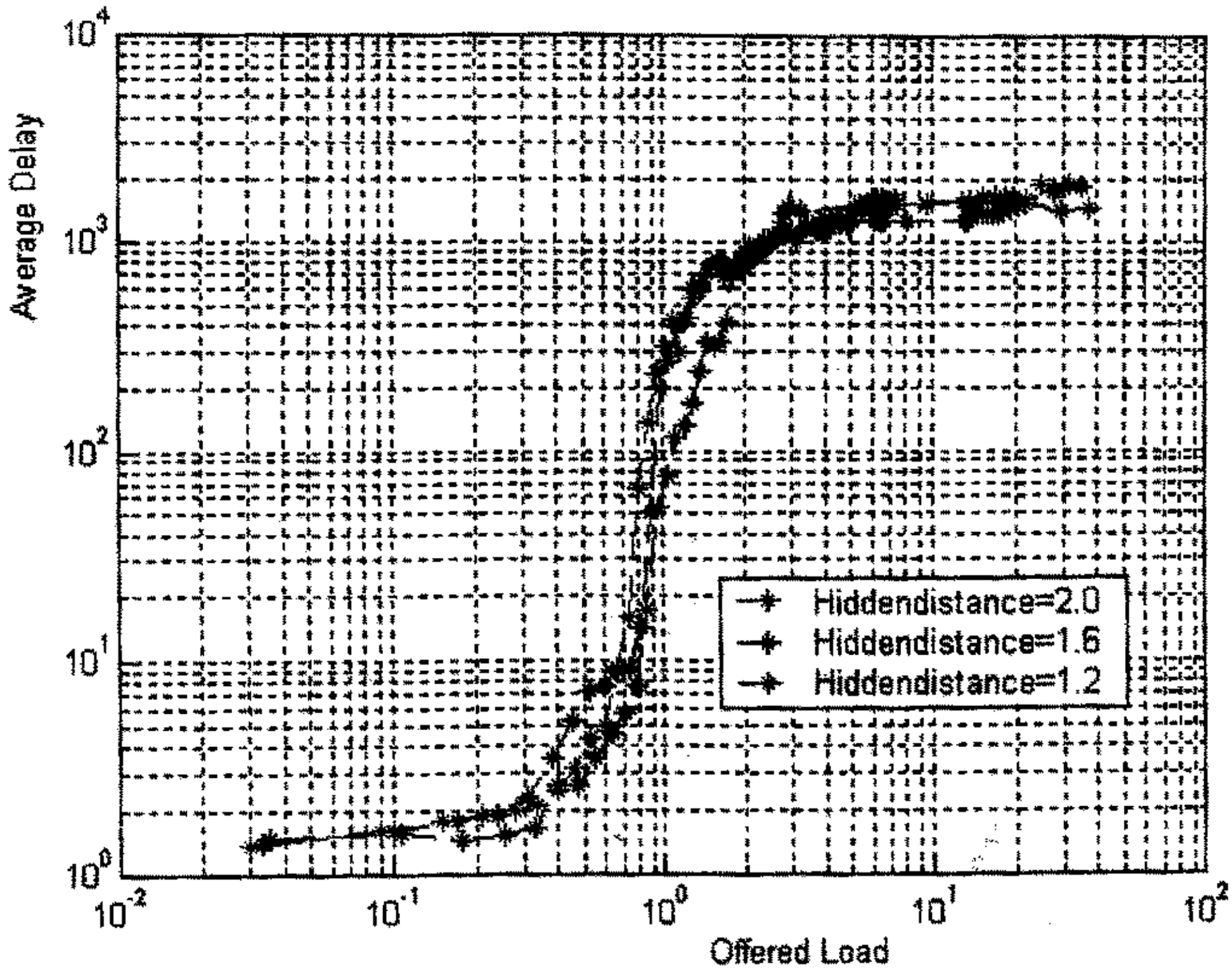

图 4-8 平均时延与负载的关系

在输入负载很轻时，系统时延基本等于数据包占用信道的时间，这里：

信道占用时间＝传输时间+信息开销时间+短帧间隔时间

＝DATAPkt+RTSPkt+CTSPkt+ACKPkt+3* shortIFS

由于此时数据包达到的时间间隔远大于长帧间隔，因此每个数据包只要达到就发出，没有退避等待时间。随着负载增加，系统时延也随之增加。当吞吐量接近最大值时，系统时延迅速增大。这是因为此时数据包的达到率接近或大于信道吞吐量，使数据包在缓冲区中排队等待，另外碰撞的次数也增加了。此时系统时延等于排队时间加占用信道时间及碰撞退避时延。吞吐量达到饱和时，系统时延也达到饱和。这个饱和值与缓冲区大小有关。由于 G>S，排队长将无限长，如果缓冲区无限大的话，那么系统时延也趋与无限。采取拒绝制，系统时延将有一稳定的饱和值。本文规定了一个有限的缓冲区，因此属于拒绝系统。

根据图 4-7 还有两点需要说明：

（1） 在三种情况下的碰撞次数，隐藏距离越短，意味着隐藏终端越多，碰撞次数就越多，但信道利用率并不会下降很多，这是因为碰撞只可能是发生在发送 RTS/CTS 期间，而 RTS 和 CTS 都远远小于数据包的长度，因此短信息的碰撞对系统性能影响很小。

（2） 系统在重负载情况下，可以以较高的吞吐量稳定工作。

4.9.2　CSMA/CA+ACK 协议的性能仿真与分析

在无线环境难以检测碰撞的发生及存在隐藏终端问题的情况下，请求发送信息包(RTS)和清除发送信息包(CTS)对保证系统具有较高的吞吐量是非常重要的。为进一步说明这个问题，本文还对没有(RTS/CTS)的多址接入协议进行仿真，作为比较。仿真的策略也是事件离散法，仿真程序的结构与 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 的程序结构基本相同。

1. 吞吐量和时延与负载的关系

终端数：20　　AP 覆盖半径 r=1

缓冲区长度　100

shortIFS=0.05，longIFS=0.1，

AccessSlotTime=0.11，　　AccessWin = 32

DATAPkt=1.0，　　ACKPkt =0.05

吞吐量和与负载仿真结果如下图所示

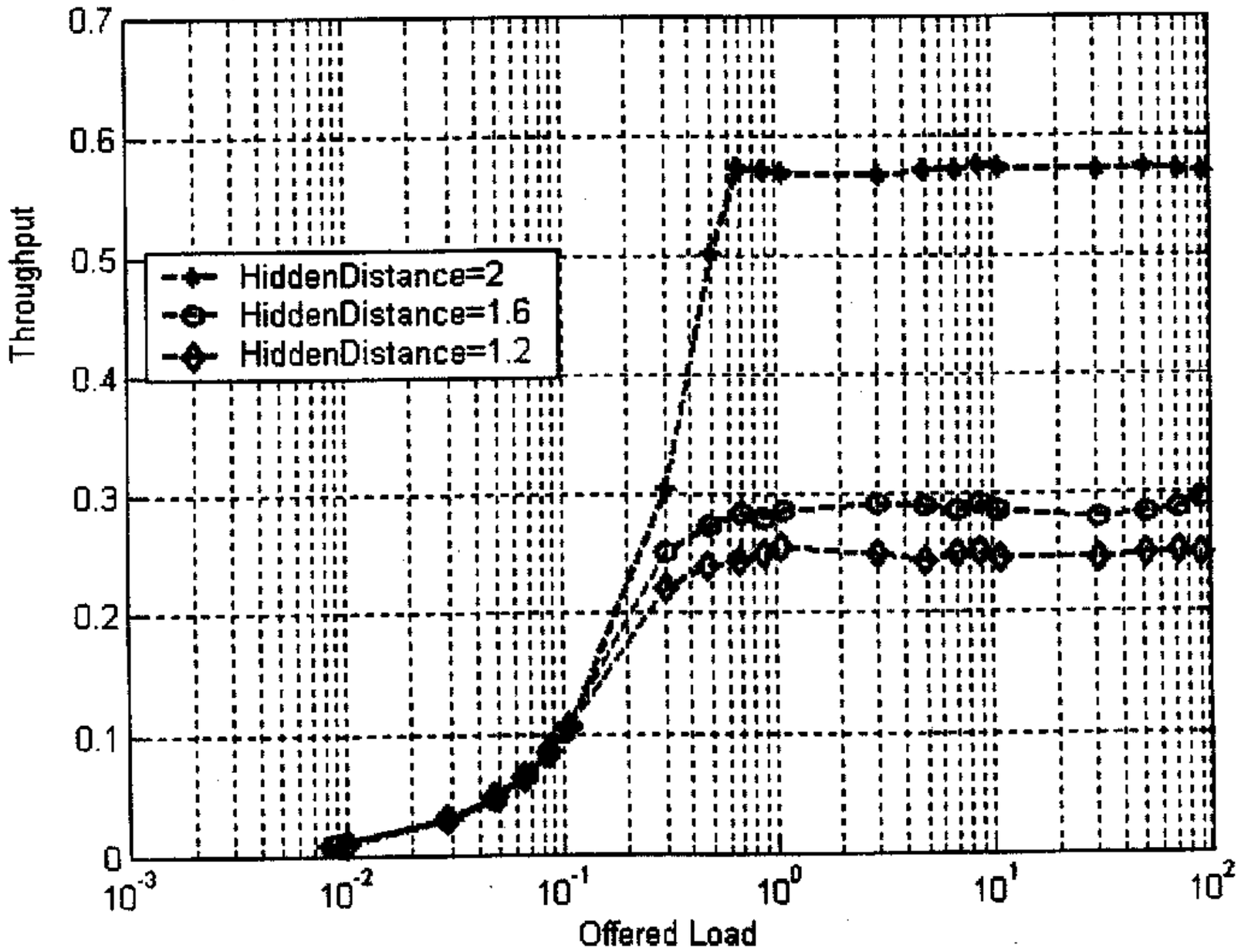

图 4-9 吞吐量与负载的关系

时延与负载的仿真结果为：

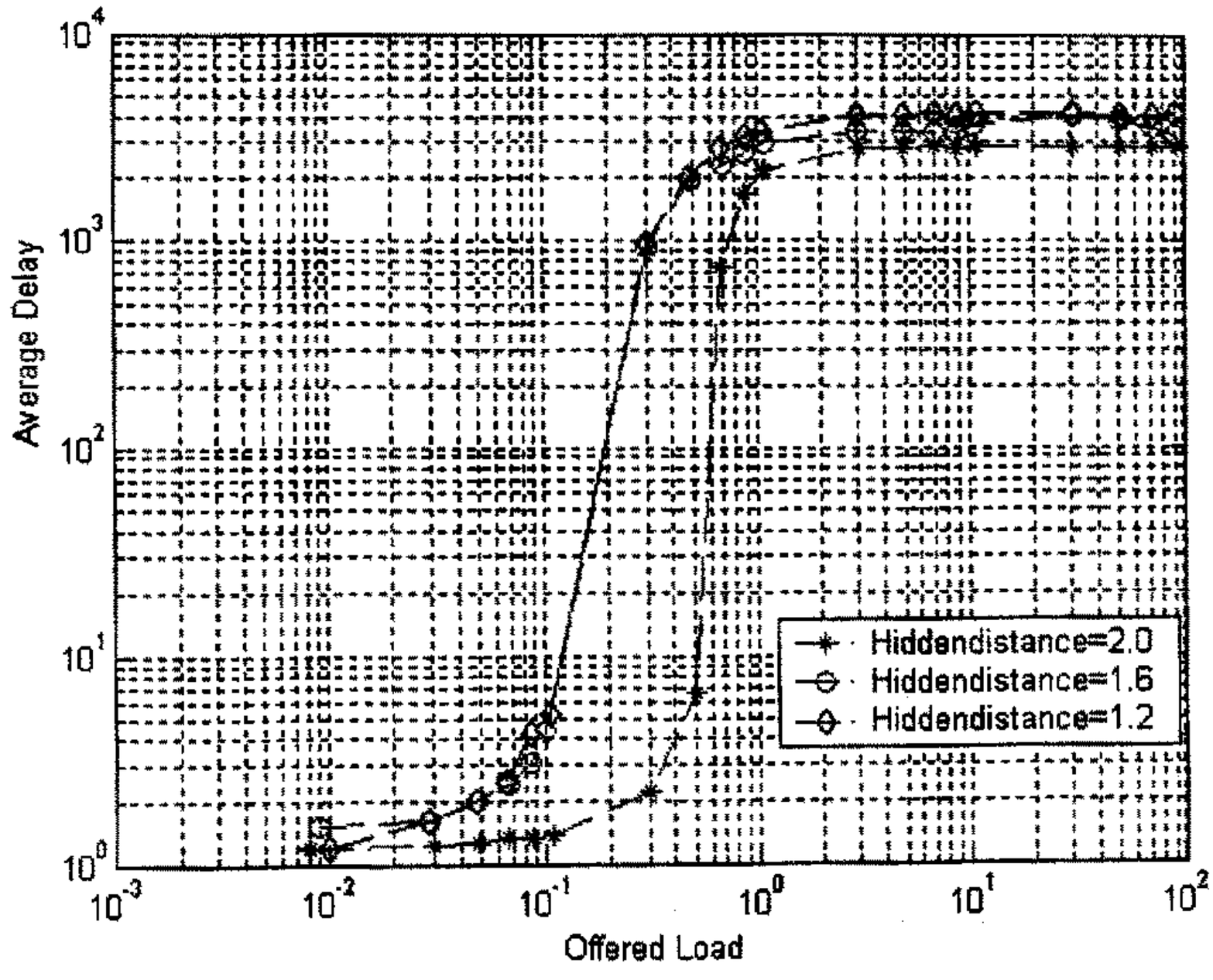

图 4-10 时延与负载的关系

由图 4-9 可以看出：

（1） 没有隐藏终端的情况下，系统的最大吞吐量为 0.575 左右。记平均退避+平均碰撞时间为 D，估计可得 D 的值为 0.63。所以

$$s_{\max}=\frac{DATA}{DATA+\mathrm{ACK}+\mathrm{shortIFS}+\mathrm{longIFS}+\mathrm{D}}$$

$$=\frac{1}{1+0.05*2+0.1+0.63}=0.546$$

仿真结果与估计值基本一致，其差异是理论中对模型进行了简化。

由于可见中，数据包碰撞造成的影响远大于短的信息包（0.05）碰撞时造成的影响。这也是必须采取措施避免隐藏终端造成的数据包碰撞的原因。

（2）在有隐藏终端的情况下，吞吐量下降很明显，其性能已经接近 ALOHA 的性能，这是因为由于无法对信道进行有效的监听，终端对信道的接入已接近于纯随机。

（3）由于在有隐藏终端情况下碰撞的次数急剧增加，不但大大降低了吞吐量，而且使系统时延也明显增加。虽然由于退避算法使系统能在一定的吞吐量下工作，但出现了由于碰撞次数过多而被放弃的数据包的数量增多。这时系统已不可靠。

4.9.3 接入退避算法对协议性能的影响

接入退避是数据包准备接入信道时为避免同时争抢信道而采取的一种措施。其时隙和窗口的设置直接影响着减少碰撞的性能。

1. 退避算法中的时隙的选择

退避算法中的时隙影响着退避时间间隔的长短　。一般退避时隙应为能检测到信道被占用的时间。退避时隙过小，终端间不能及时检测到信道被占用的情况。在有线系统中，一般为传播时间。而在无线局域网系统中，传播时延很短可以忽略。但对于有隐藏终端的情况，隐藏终端必须收到在收到基站发出的CTS信息后才能暂停对信道的争抢。退避时隙原则上应大于RTS+shortIFS时隙长。但退避时隙过长，使信道空闲时间过长，必然降低信道的利用率，延长响应时间。因此必须选取合适的时隙长度。

在存在隐藏终端，输入负载G=1:5时仿真结果如图4-11。

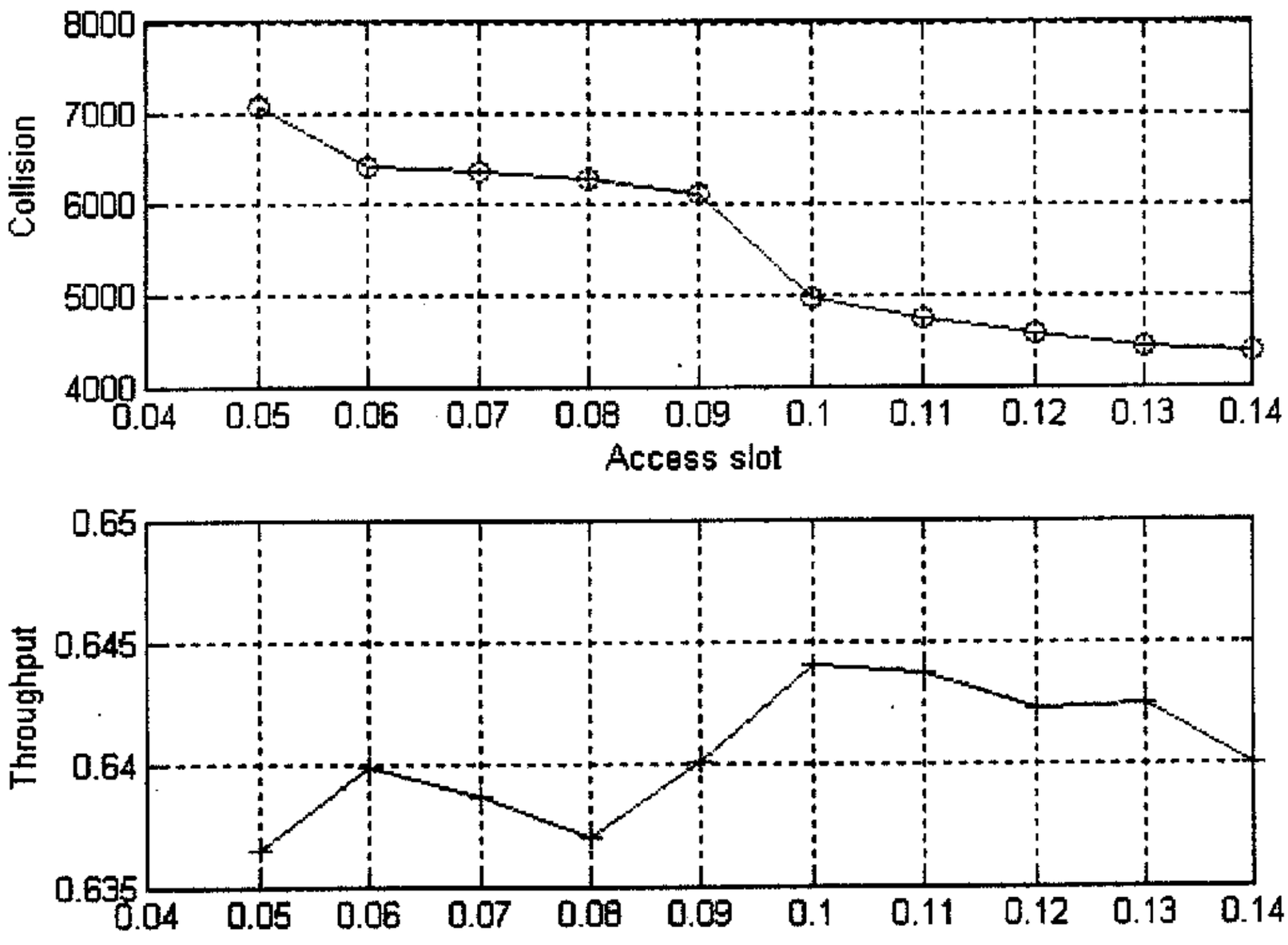

图4-11 接入时隙与碰撞次数和吞吐量的关系

由图4-11看出存在隐藏终端，在重负载情况下，退避时隙小于RTS+shortIFS时的碰撞次数明显多于退避时隙大于等于RTS+shortIFS情况。这是因为当退避时隙大于等于RTS+shortIFS时，隐藏终端只要不是同时发出数据，便可以收到基站发回的CTS，从而减少了碰撞。但响应时间由于是受到碰撞情况与退避时长的综合影响，并不是碰撞越小，响应时间就越短。信道利用率也是如此。根据以

上仿真实验的结果，在 0.11UT 附近吞吐量及响应时间性能相对比较好。

2. 退避窗口大小对协议性能的影响

退避算法中的最小窗口影响着终端对信道争抢的分散程度，最小窗口太小，当有多个终端要占用信道时，发生碰撞的可能性就大。但窗口太大，终端退避等待时间也将延长，使信道空闲时间过长，信道利用率不高，而且响应时间会增大。G=1.2,终端数为 20，Hidden_distance=1.6 仿真结果如图 4-12。

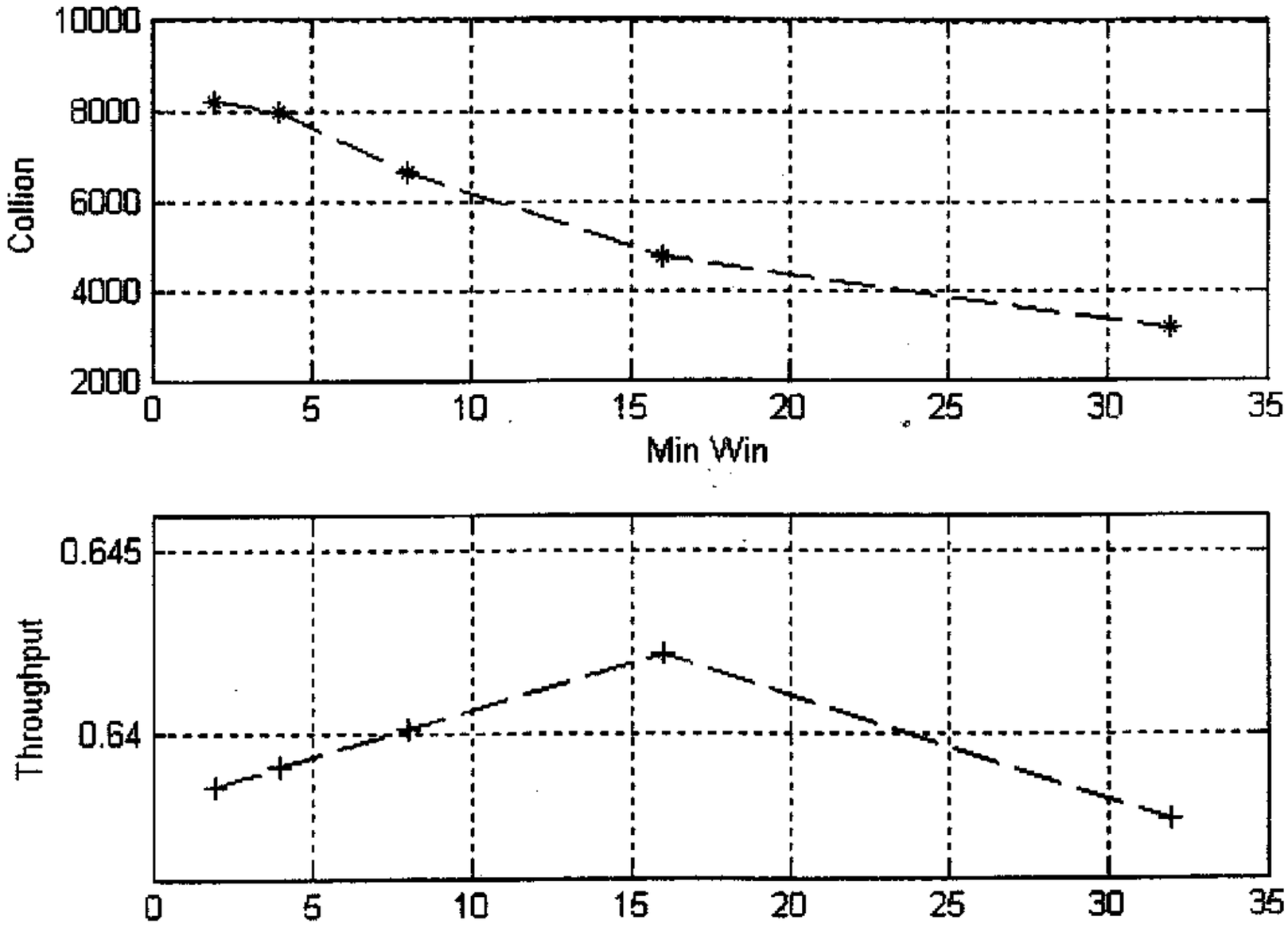

图 4-12 退避窗口与吞吐量和碰撞次数的关系

由图 4-12 看出：重负载情况下窗口越大，碰撞的次数越小。因为在这种情况下，当多个终端同时有数据要发送时，窗口太小，不能把它们对信道的争抢分散开，从而碰撞就不断发生，碰撞次数超过一定限度时，根据协议就要将此数据包放弃，这将直接影响数据通信的可靠性。

4.9.4 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 协议带终端能力

前面的结果是在终端数一定的条件下，得到的总输入负载与吞吐量及系统时延的关系。下面在每个终端输入负载 g 一定的条件下，通过仿真对协议带终端的能力进行测试。

终端数：20　　AP 覆盖半径 r=1

缓冲区长度　　100

每个终端的输入负载：0.1

shortIFS=0.05，longIFS=0.1，

AccessSlotTime=0.11，　　AccessWin = 32

RTSPkt=0.05　　CTS Pkt=0.05

CTSSlotTime=0.11，　　CTSMinWin=32

DATAPkt=1.0，　　ACKPkt =0.05

Hidden_distance=1.6　　AccessWin=32

终端数目和吞吐量的关系仿真结果如下图：

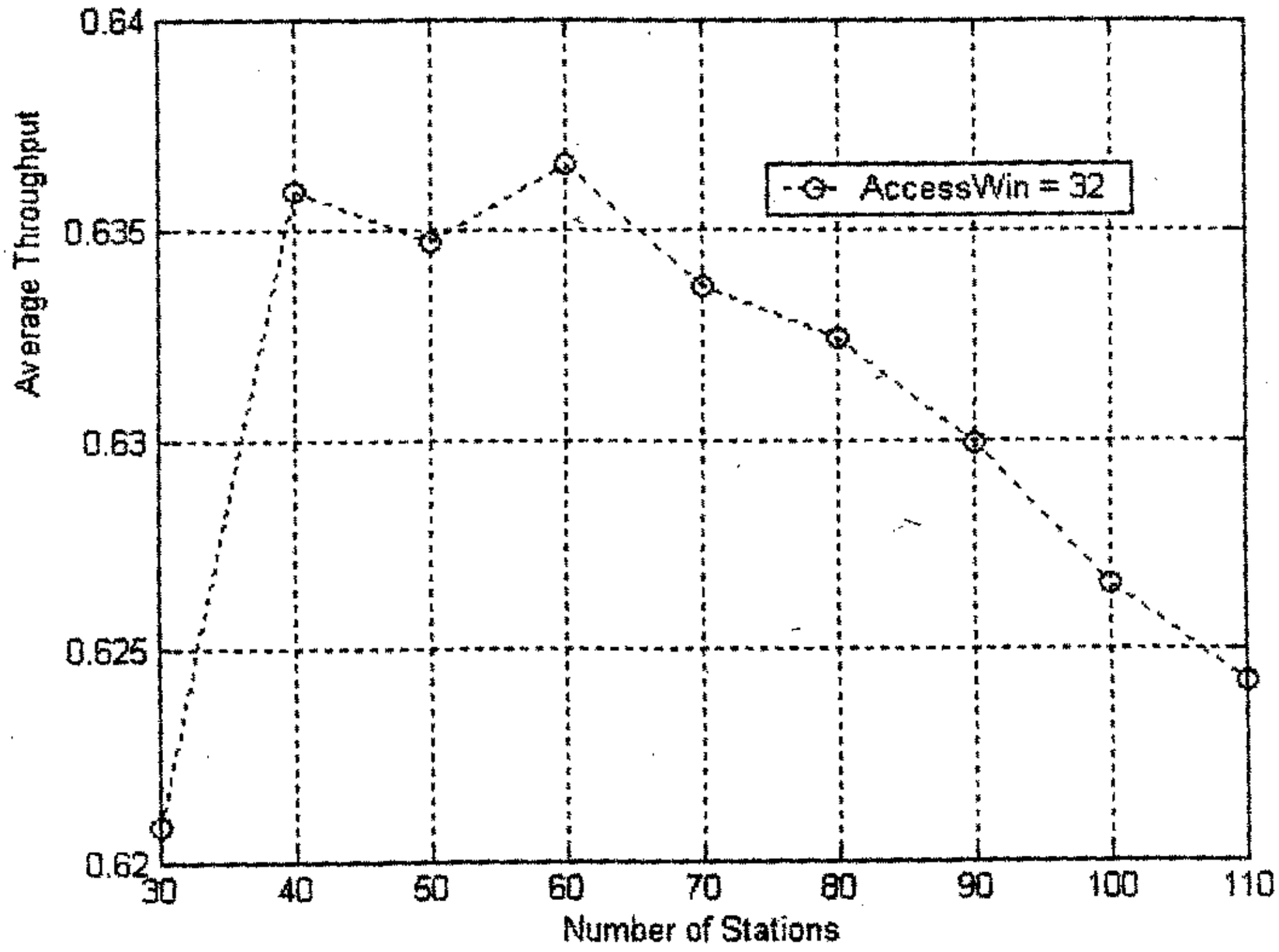

图 4-13 终端数目与吞吐量的关系

终端数目与时延的关系仿真结果如下图：

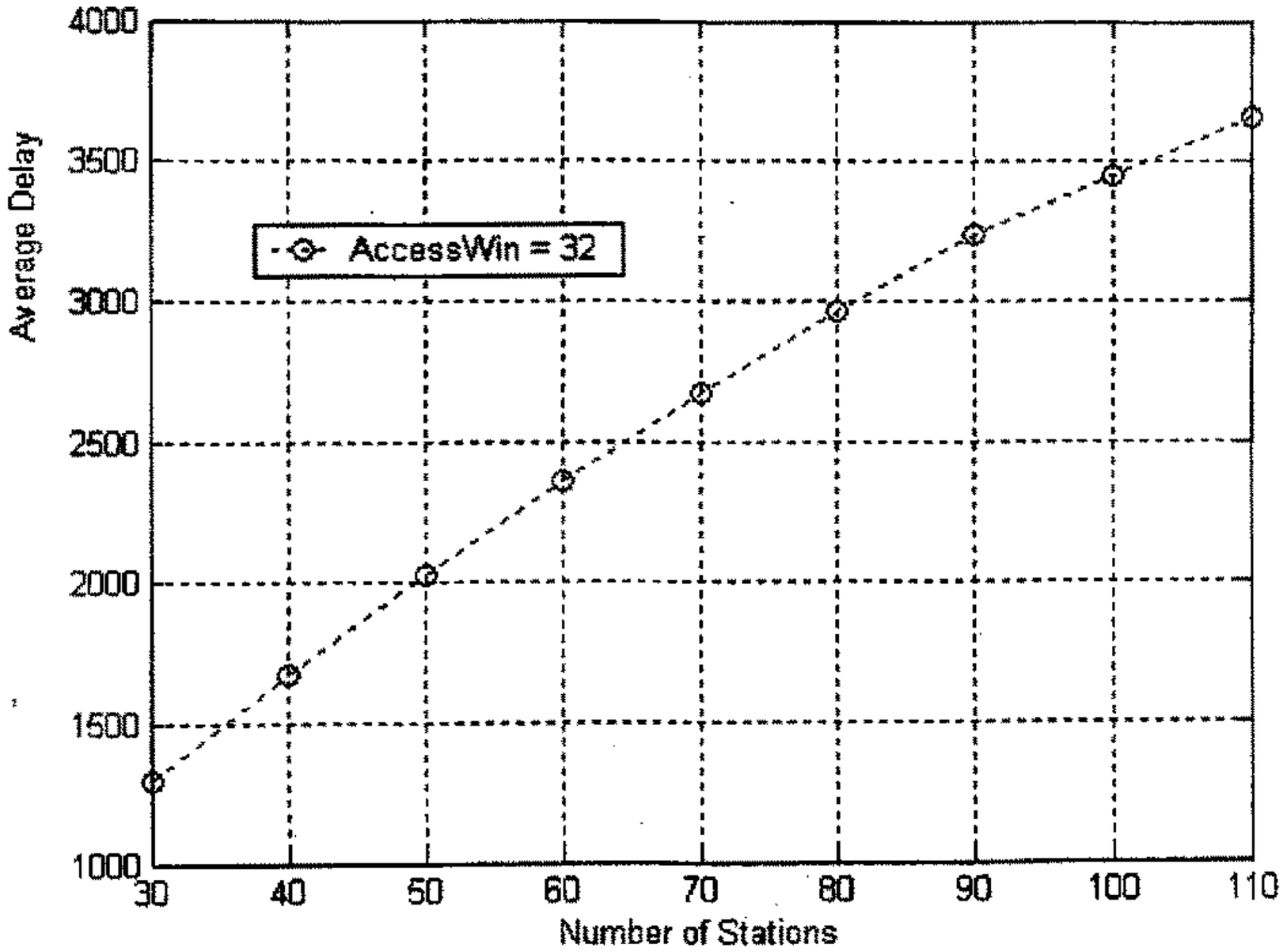

图 4-14 终端数目与时延的关系

图 4-13 和图 4-14 是在每个终端的输入负载为 0.1，隐藏终端距离为 1.6，也就是说有隐藏终端情况下测试的结果。由结果可见，系统吞吐量已达饱和。这是因为在终端数 N 足够大，且每个终端输入负载 g 比较小的情况下，系统总输入负载 G 约等于所有终端输入负载之和。因此当 $N \geq 10$，g=0.1 时，$G \approx Ng \geq 1$。 结果表明：当信道接入最小窗口相同时，终端数越多，碰撞的次数越多，吞吐量有所下降，且系统时延也随之增大。但只要适当调整信道接入最小窗口，可以使碰撞数大大降低，其吞吐量保持不变，且没有由于碰撞次数过多而被放弃的包。由此可以得到以下结论：协议可以在较多终端的情况下，以较高的吞吐量稳定工作。另外，不同的每个终端数据产生速率不同，系统可带的终端数也不同。因此这里无法给出明确数值结论。但根据图 4-7，系统可以在 G>50 稳定工作，G≈N g，那么 N 可以足够大。当然，重负载情况下的稳定工作是以响应时间为代价的，而且要求缓冲区足够大。由于计算机内存有限，终端数增加使每个终端的缓冲区不能开得足够大。这里缓冲区长度为 100。

4.9 结论

根据大量的仿真实验及以上的分析比较，可以得到以下结论：

1. 由于无线通信信道较有线信道要恶劣的多，不能有效地进行碰撞检测，也就无法采用有线以太网中的高效的带碰撞避免的载波监听多址接入协议。只能采用碰撞避免的方法，即 CSMA/CA。但是由于存在隐藏终端的问题，CSMA/CA 的性能大大降低，严重时近似成为 ALOHA 方式，因此无法获得高的吞吐量。
2. 带 RTS/CTS 有握手信息的 CSMA/CA 协议使碰撞仅发生于请求发送（RTS）信息包，避免了数据包的直接碰撞。由于 RTS 很短，使碰撞发生的可能性更小，即使发生了碰撞，造成的信道占用的浪费也很短，从而大大提高了信道利用率。同时也有效地克服了隐藏终端问题。
3. CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 协议的信道响应时间与终端数无关。要使其在重负载时稳定地高效地工作，必须对有关参量进行合理设置。对于退避算法中的参量设置，根据本文的仿真结果可参与下几点原则：
   a) 信道接入退避时隙应大于 RTSPkt+shorIFS，这样可以使碰撞只能发生在同时接入信道的终端之间，避免了非同时接入信道的碰撞。
   b) 根据终端数设置最小退避窗口，以便终端对信道的接入尽可能分开。当然不能太大，因为它会造成无谓的时间浪费。对于信道接入退避算法，一般为接近终端数的 2 的 n 次幂。
   c) 无 CTS 退避时隙也应大于 RTSPkt+shorIFS，且最好与接入退避时隙有所差异，这样可进一步减少碰撞。
   d) 无 CTS 退避的最小窗口可不必太大，因为碰撞的终端数远少于要接入信道的终端数。

   当然，实际中最有效的方法是对具体系统情况仿真，以确定符合系统要求的最佳参数。
4. CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 议不仅可以用于本文仿真的中心控制网络结构，还可用于分布式控制结构。此协议组网灵活，各终端可以随时入网或出网，信道也可有效地分配给负载重的终端。总之，此协议效率较高，响应时间快，灵活，适于数据速率较高的无线数据传输。

第五章 总结

无线局域网是 90 年代计算机网络与无线通信技术相结合的产物，它提供了使用无线多址信道的一种有效方法来支持计算机之间的通信，并为通信的移动化、个人化和多媒体的应用提供了潜在的手段。本篇论文主要对 802.11 无线局域网中的 MAC 层协议进行了探讨和研究。

本文所做的工作主要有：

- 本文首先对无线局域网的现状和发展作了介绍；
- 详细阐述了无线传输的特点（包括信道特点，传输特点以及运用中出现的独特问题），以及这些特点对于运用在无线网络中的 MAC 协议的各种影响，对当前常见的随机接入协议性能进行了仿真和分析；
- 论文对现有的各种运用在无线网络环境中的 MAC 协议进行归纳总结，根据网络结构将其分为分布式 MAC 协议和集中式 MAC 协议，并对各种类型的 MAC 协议分别举例进行介绍；
- 详细的分析了 802.11a 无线局域网的物理层和 MAC 层的关键技术；
- 建立基于 DCF 机制的仿真模型，搭建仿真平台；在该仿真平台下，研究 IEEE802.11a DCF 机制吞吐量性能和时延特性，研究对象包括 CSMA/CA +ACK 和 CSMA/CA+RTS/CTS+ACK 机制；研究参数对吞吐量性能和时延特性的影响，主要研究隐藏终端、退避算法等对协议性能的影响，最终找到能使网络性能最佳的参量的设置，最后提出了提高协议性能的原则。

今后的工作方向：

- 本文为了分析问题的方便，对信道模型做了简化，而在实际的无线环境下，信道情况往往比较复杂，因此，为了能更加精确的对接入协议性能进行研究，必须还要考虑传播损耗、传输时延、捕获效应等。
- 随着个人数据通信的发展，功能强大的便携式数据终端以及多媒体终端的广泛应用，为了实现任何人在任何时间、任何地点均能实现数据通信的目标，要求传统的计算机网络由有线向无线，由固定向移动，由单一业务向多媒体发展。这些需求标明了未来无线局域网的发展方向。目前的无线局域网技术已经相当成熟，速率也从 1Mbps 增长到了 54Mbps。随着标准的发展与无线网络产品的成熟，未来的无线局域网将会在通信的移动化、个人化和多媒体业务的提供等领域得到进一步的发展。因此能够满足未来实时多媒体业务的无线局域网 MAC 的实现方式就显得格外重

要。在以后的工作中，应该加强在实时业务对于无线网络中的 MAC 协议的要求的方面的研究，对现有的 IEEE802.11a 标准中的 MAC 层 DCF 机制进行改进，使其能够提供对实时业务传输的支持。

参考文献

[1]. *Chen YuZhong; Kai CaiHong; Geng YanHui; Li Feng;*"Performance analysis and improvement of IEEE 802.11 WLAN",Communications, 2004 and the 5th International Symposium on Multi-Dimensional Mobile Communications Proceedings. The 2004 Joint Conference of the 10th Asia-Pacific Conference on , Volume: 1 , 29 Aug.-1 Sept. 2004 Pages:147 - 151 vol.1

[2]. *Hang Su; Peiliang Qiu;*"IEEE 802.11 distributed coordination function : performance analysis and protocol enhancement",Advanced Information Networking and Applications, 2004. AINA 2004. 18th International Conference on , Volume: 2 , 29-31 March 2004 Pages:335 - 338 Vol.2

[3]. *Cali, F.; Conti, M.; Gregori, E.;* "IEEE 802.11 wireless LAN: capacity analysis and protocol enhancement", INFOCOM '98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE , Volume: 1 , 29 March-2 April 1998 ,Pages:142 - 149 vol.1

[4]. *Juha Heiskala* 著，杨晓春译，"OFDM 无线局域网 " ，北京：电子工业出版社，2003 年 3 月

[5]. *Khurana, S.; Kahol, A.; Gupta, S.K.S.; Srimani, P.K.;* "Performance evaluation of distributed co-ordination function for IEEE 802.11 wireless LAN protocol in presence of mobile and hidden terminals" , Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 1999. Proceedings. 7th International Symposium on , 24-28 Oct. 1999 ,Pages:40 – 47

[6]. *Bianchi, G; Fratta, L.; Oliveri, M.;* "Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs" Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1996. PIMRC'96., Seventh IEEE International Symposium on , Volume: 2 , 15-18 Oct. 1996 ,Pages:392 - 396 vol.2

[7]. 谢希仁，计算机网络(第三版)，大连理工大学出版社，2000 年 6 月，p68-82

[8]. *Yunli Chen; Qing-An Zeng; Agrawal, D.P.;"* Performance analysis and enhancement for IEEE 802.11 MAC protocol" *Yunli Chen; Qing-An Zeng; Agrawal, D.P.;*Telecommunications, 2003. ICT 2003. 10th International Conference on , Volume: 1 , 23 Feb.-1 March 2003 Pages:860 - 867 vol.1

[9]. *Hang Su; Peiliang Qiu;"* IEEE 802.11 distributed coordination function : performance analysis and protocol enhancement " Advanced Information Networking and Applications, 2004. AINA 2004. 18th International Conference on , Volume: 2 , 29-31 March 2004 ,Pages:335 - 338 Vol.2

[10]. IEEE Std 802.11-1999,wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications,1999

[11]. *Ch. V. Verikoukits, J. J. Olmos,* "Optimization of the DQRUMA MAC Protocol for Multimedia Traffic in an OFDM Based W-ATM System", *Circuits and Systems*, 2001. ISCAS 2001.

[12]. 刘元安等，“宽带无线接入和无线局域网 “，北京邮电大学出版社
[13]. *Chhaya, H.S.; Gupta, S.;* "Performance of asynchronous data transfer methods of IEEE 802.11 MAC protocol" Personal Communications, IEEE [see also IEEE Wireless Communications] , Volume: 3 , Issue: 5 , Oct. 1996
[14]. *Crow, B.P.; Widjaja, I.; Kim, L.G; Sakai, P.T.;* "]IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks" Communications Magazine, IEEE , 9 , Sept. 1997
[15]. 谭浩，"无线局域网 MAC 层协议的研究",北京邮电大学硕士学位论文
[16]. 刘利民，徐志伟，“一种基于 CSMA/CA 的无线局域网协议”，计算机工程 2002 年第 7 期
[17]. *Youjin Kim, Haewon Jung, Hyeong Ho Lee, Kyoung Rok Cho,* "MAC Implementation for IEEE 802.11 Wireless LAN".Ajar Chandra V. Gummalla, John O. Limb, "Design of an Access Mechanism for a High Speed Distributed Wireless LAN".
[18]. *Andrews.Tanenbaum,* “Computer Network（第三版）”，北京：清华大学出版社，1998
[19]. 谭浩强，"C 语言程序设计 “，北京：清华大学出版社
[20]. 韩旭东，张春业，曹建海，"OFDM 技术在无线局域网中的应用研究及最新发展”，数据通信，2003 年第 5 期;
[21]. *Jeff Frolik,* "QoS Control for Random Access Wireless Sensor Networks"，WCNC 2004 / IEEE Communications Society，2004

致 谢

首先感谢我的导师尹长川副教授。在北京邮电大学攻读硕士学位的两年半中，从基础学科的学习，到科研项目的研究，再到论文的撰写和修改，老师为我倾注了大量的心血。在生活和学习上都给予了我许多有益得指导和教诲。尹老师渊博的学术修养，严谨的治学态度，给我留下了深刻的影响，并将使我受益终身。

在论文的工作期间，还得到了乐光新老师、郝建军老师、刘丹谱老师、纪红老师和罗涛老师的热情指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

在这里我还要感谢本实验室的李晓飞、赵学渊、俞一帆等同学，同他们在学习上的讨论，使我受益匪浅。

我还要衷心地感谢我的父母，没有他们在身后默默的支持和帮助，我不可能完成我的学业。

最后，还要感谢在百忙中抽出宝贵时间阅读本论文的各位评委。