

Internet 无线接入网络中应用智能天线的 多址协议及性能分析

杨 军 李建东 周晓东

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室信息科学研究所 西安 710071)

摘 要 该文研究将智能天线应用于 Internet 无线接入网络的中心接入点(CAP),提出了基于轮询的自适应波束形成多址接入协议(PB-ABFMA).该协议中,CAP 接收或发送数据分组前,由 CAP 引导用户节点发送训练序列,CAP 的智能天线据此计算出与用户节点对应的权矢量.CAP 以轮询及动态 TDMA 方式为各节点安排发送时隙,采用微时隙为处于空闲状态的节点保持连接以降低时延.设计了一种简单有效的竞争接入算法,保证新用户能快速接入信道.针对 Internet 中主要的“请求-回应”(request-reply)式业务,分析了协议的信道利用率与平均“请求-回应”时延.结果表明,PB-ABFMA 协议能有效支持智能天线应用并具有较高的信道利用率与良好的时延性能.

关键词 Internet 无线接入网络;智能天线;多址接入协议

中图法分类号 TP393

Multiple Access Protocol for Wireless Internet Access Network with Smart Antennas

YANG Jun LI Jian-Dong ZHOU Xiao-Dong

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Institute of Information Science, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract Employing smart antennas in the central access point (CAP) of wireless internet access networks is studied, and a polling-based adaptive beamforming multiple access protocol (PB-ABFMA) is proposed. In PB-ABFMA, the CAP stimulates the corresponding mobile terminal (MT) to transmit training sequence just before the data packets transmission, so the temporal reference beamforming (TRB) can be performed by the smart antennas. The CAP schedules packet transmissions based on the polling mechanism, and a mini-slot is used to keep connectivity when an MT is idle, thus, the access delay is reduced. A simple and effective collision resolution algorithm is proposed to guarantee rapid access of new arrival MTs to the channel. Based on the “request-reply” traffic, the analysis of channel utilization and mean turn around delay is presented. Results show that the proposed protocol effectively supports the application of smart antennas and provide high channel utilization and low turn around delay.

Keywords wireless Internet access networks; smart antennas; multiple access protocol

1 引 言

近年来,Internet 的高速无线接入技术成为研究的热点.如何减弱时变衰落信道的不利影响以及如何充分利用信道资源并及时传输业务是其中的两个关键问题.

Internet 无线接入网络通常具有一个中心接入点(CAP),用户节点通过与 CAP 的通信实现对 Internet 的访问.在 CAP 采用智能天线^[1]技术能够有效对抗同信道干扰(CCI),显著改善通信质量并提高系统容量^[2],而且不会明显增加移动台的复杂性,因而具有很好的应用前景.对于每个数据分组,CAP 的智能天线都需要对目标节点进行波束形成,然而,

收稿日期:2002-09-23;修改稿收到日期:2003-03-19. 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划项目(2001AA123031)、高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划及教育部科学技术研究重点项目的资助. 杨 军,男,1975 年生,博士研究生,主要研究兴趣为扩频通信、分组无线网络与通信系统设计. E-mail: jyang@pcn.xidian.edu.cn. 李建东,男,1962 年生,博士,教授,主要研究领域包括分组无线网络、移动 IP 和软件无线电等. 周晓东,男,1975 年生,博士研究生,主要研究兴趣为无线网络协议、无线局域网与 OFDM.

由于时变信道、节点移动以及分组的突发性等因素的影响,仅依靠智能天线本身难以简便、快速、准确地实现上述目标^[3].这就需要提供一种新的机制(主要是与物理层密切相关的多址接入协议)以充分发挥智能天线的优势并简化其功能.然而这方面的研究还不够充分,文献[4]研究了支持智能天线在星型网络中应用的 S-ALOHA 协议.文献[5]对相应的 CSMA/CA 协议进行了讨论.文献[3]基于轮询方式提出了支持智能天线应用的多址接入协议,具有较高的信道利用率;但该协议中要设置多个微时隙,要求很严格的时隙同步,信道接入过程复杂,并且未考虑新用户如何接入信道,而这一点在实际网络中是很重要的.

本文提出了一种新的多址接入协议——基于轮询的自适应波束形成协议(PB-ABFMA),推导了信道利用率与平均时延的计算公式,给出了仿真与数值计算结果.

2 网络与智能天线模型

本文考虑的 Internet 无线接入网包括一个中心接入点及若干移动用户.所有节点与 CAP 使用相同的频率,采用时分双工(TDD)方式进行通信.在 CAP 配备了智能天线,用户节点使用普通的全向天线.通常用户节点先向 CAP 发送“资源请求”(Resource Request,RR)分组,服务器根据 RR 分组从 Internet 上查找到相应的资源,再通过 CAP 将信息发送给用户节点.这种“请求-回应”(Reply Message,RM)式业务在 Internet 中占很大比重.

在确定智能天线模型前应考虑以下因素:

(1)用户节点通常可以自由移动,RR 分组的发送具有较强的突发性与随机性,并且节点可能在一段时间内保持静默状态.

(2)考虑因素(1)与时变信道的影响,在开始发送分组时,CAP 的智能天线系统难以快速、准确地获得与目标节点对应的权矢量,这时 CAP 采用全向天线是比较合适的.

(3)接收完目标节点的训练序列之前,智能天线并未获得与目标节点对应的权矢量,这时 CAP 使用全向天线监听信道.

使用 N_e (N_e 可取 8~16) 个全向性阵元构成天线阵列(线阵或圆阵),阵元间距为 1/2 波长,该天线系统具有全向和波束形成两种工作模式(后者称为 BF 模式).BF 模式中采用基于训练序列的自适应波束形成,其结构如图 1 所示.这种方法简单实用,并且适合在移动环境中使用.接收训练序列时,利用自适应算法(如 RLS 等)即可获得与目标节点对应的权矢量(如图 1 所示).由于各节点与 CAP 均使用相同的

频率,所以在信道变化很小的条件下,CAP 接收上行信号时使用的权矢量也可用于下行信号的波束形成.

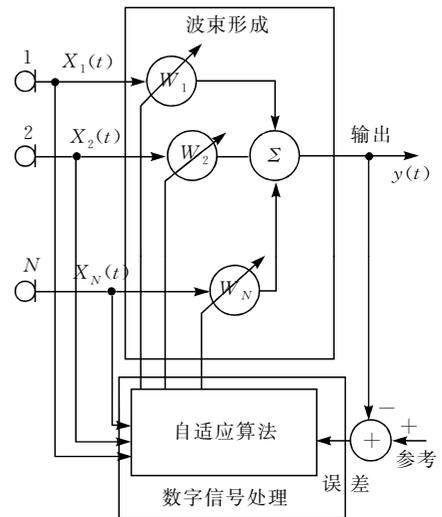


图 1 TRB 的结构

为降低系统复杂度,我们只考虑单波束形成.这时智能天线的的作用主要表现为:(1)有效提高接收信号的信噪比.阵元数为 N_e 时,信噪比可提高 $10\log N_e$ (dB),从而增大 CAP 的覆盖范围或提高信道速率;(2)多小区环境中,CAP 采用智能天线能有效对抗小区间的同信道干扰,改善通信质量,明显减小频率再用系数,提高系统容量.上述两点已有很多文献进行论述,本文不再重复.

该天线系统工作于全向模式时与通常的全向天线性能相同.通过调整发射功率可使全向模式与 BF 模式具有相同的传输距离.

3 基于轮询的自适应波束形成协议(PB-ABFMA)

3.1 节点移动的影响

相干时间是信道冲激响应维持不变的时间间隔的平均值,描述了小尺度内信道的时变特性^[6],它通常定义为

$$T_c = \sqrt{9/16\pi f_m^2} = 0.423/f_m \quad (1)$$

其中 f_m 为最大多普勒频移.假设节点的移动速度为 60km/h,载波频率为 1GHz,则相干时间 $T_c \approx 7.6$ ms,如果时间间隔小于 T_c 就可以认为信道变化不大,这种估计方法与文献[3]的方法是一致的,并且更严格.

3.2 PB-ABFMA 协议

PB-ABFMA 协议的核心思想是:在 CAP 接收或发送数据分组(包括 RR 与 RM 分组)前尽可能短的时间内,由 CAP 引导用户节点发送训练序列,这样 CAP 的智能天线就能快速、准确地计算出与该节

点对应的权矢量. 以动态 TDMA 方式为各节点安排发送时隙; 采用微时隙为处于空闲状态的用户保

持连接. 图 2 给出了协议的典型帧结构, 该协议可工作于异步网络或准同步网络.

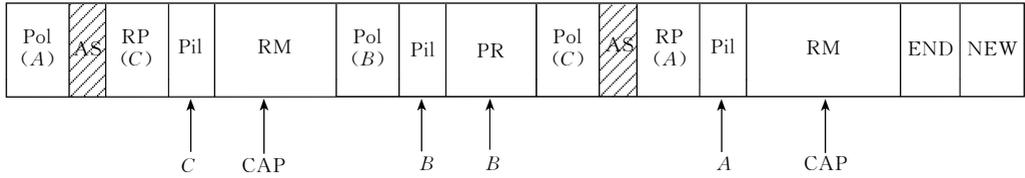


图 2 PB-ABFMA 协议

PB-ABFMA 协议中 CAP 对各节点的轮询与 CAP 发送 RM 分组将交替进行. CAP 在轮询时隙 (Pol) 中询问某节点是否有 RR 分组 (图 2 中 Pol(A) 表示对 A 节点轮询). 轮询阶段 CAP 使用全向天线, 所以这时采用抗干扰与多径衰落能力强的直接序列扩频 (DSSS) 信号, 扩频信号的码片速率与发送数据分组时的速率相同. 扩频序列长度大于 100 (扩频增益 20dB, 数据速率较低) 时就能有效对抗多径衰落, 抑制干扰并区分不同用户. 每个节点均有一个唯一的扩频序列与之对应.

在每个轮询时隙之后, 有一个微时隙 (AS) 供被轮询的节点接入信道. 如果该节点队列为空就使该时隙空闲 (图 2 中阴影部分), 这时 CAP 可以发送 RM 分组或继续轮询. 如果该节点发送队列不空, 则发送特定的训练序列 (Pil); 训练序列结束后, 该节点发送 RR 分组, CAP 以 BF 模式进行接收. RR 分组发送完毕后, 如果 CAP 的发送队列为空, 则 CAP 将开始轮询下一个节点. 反之, CAP 在随后的时隙中发送与目标节点对应的扩频信号, 通知该节点发送训练序列并准备接收数据, 我们称之为 RP (Request Pilot) 分组. 目标节点在随后的微时隙中发送训练序列, 而后 CAP 以 BF 模式向目标节点发送 RM 分组, 发送完毕后则继续轮询.

CAP 轮询完所有节点之后, 在随后的时隙中以全向模式发送结束 (END) 分组 (采用一个专用的扩

频序列). END 分组后的时隙 (NEW) 预留给新节点接入时使用. 新节点在 NEW 时隙中发送接入请求 (AR) 分组 (所有节点采用一个统一的扩频序列), 如果只有一个节点发送 AR 分组, 则不会发生碰撞, CAP 将接受该节点的接入请求, 并利用之后的若干时隙告知新节点一些信息 (如所分配的扩频序列等), 同时将它加入轮询队列的末尾. 如果有多个新节点请求接入就会发生碰撞 (不考虑捕获效应), 为此我们提出一种简单的碰撞分解方法:

如果多个节点发送 AR 分组, 在只有一个 NEW 时隙时, 必然发生碰撞. 这时 CAP 将 NEW 时隙个数增加至 4 个, 并立即发送一个 END 分组, 告知所有新节点重新开始竞争接入. END 分组中指明 NEW 时隙个数, 每个新节点根据均匀分布选择某个 NEW 时隙发送 AR 分组. 每个 NEW 时隙后 CAP 发送一个信标 (Beacon). 如果前一个 NEW 时隙中有一个节点成功接入, 则要告知该节点一些相关信息. 如果本轮接入过程发生了碰撞但碰撞时隙数与本帧 NEW 时隙数的比值小于参数 p_{NEW} 时, 下一帧中 NEW 时隙个数不变, 所有未成功接入的节点到下一帧再次竞争接入; 否则下一帧的 NEW 时隙个数增加一倍直至最大 NEW 时隙数 (N_{NEW}) 为止; 如果所有新节点都成功接入, 未发生碰撞, 则下一帧将 NEW 时隙个数恢复至 1. 图 3 给出了 D, E, F 三个新节点在第 i 帧请求接入, 在第 i+1 帧完成碰撞分解的过程.

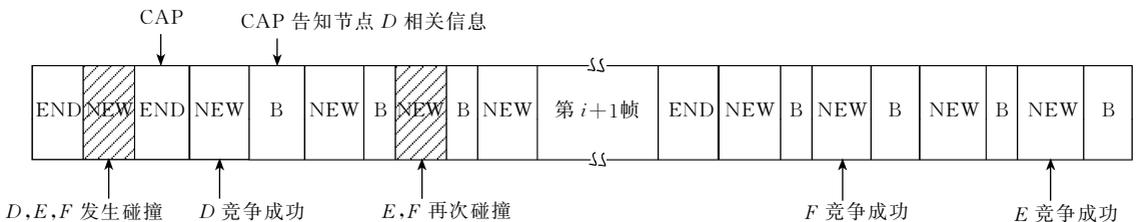


图 3 碰撞分解过程

4 PB-ABFMA 协议的性能分析

4.1 信道利用率

信道利用率指有用信息传输时间在总传输时间

中所占的比例 (平均值), 有用信息只包括 RR 分组与 RM 分组. 假设用户节点数为 N , 各节点 RR 分组的产生服从参数为 λ 的 Poisson 过程, 每个 RR 分组均与一个 RM 分组对应. 如果 CAP 处理速度比较快, 可以认为 CAP 收到 RR 分组后, 经过一帧的时

间就发送相应的 RM 分组, RM 分组的时间 (D) 服从几何分布, 均值为 D_{av} , 方差即为 $D_{av}^2 - D_{av}$. 为简化分析, 假设轮询时隙、AS 时隙、RP 分组、END 分组及 NEW 时隙的长度均为 S , RR 分组长度为 R , 训练序列长度为 P . 假设系统稳态条件下节点发送队列为空的概率是 P_0 , 各节点发送队列长度是独立同分布的随机变量.

从平均意义上考虑, 一帧中有 $N(1 - P_0)$ 个非空节点, 与每个非空节点对应的轮询时隙、训练序列、RR 分组、RP 分组及 RM 分组的平均时间长度为 $S + P + R + S + P + D_{av}$; 一帧中还有 NP_0 个空闲节点, 与每个空闲节点对应的轮询时隙与 AS 时隙的长度为 $2S$; 如果不考虑新节点的加入, 一帧中还有一个 END 时隙及一个 NEW 时隙, 所以平均帧长为

$$F_{av}(N) = N(1 - P_0)(R + 2P + D_{av}) + 2(N + 1) \cdot S \quad (12)$$

各节点的发送队列可用 $M/G/1$ 模型来描述, 所以稳态情况下节点发送队列为空的概率为^[7]

$$P_0 = 1 - \lambda \cdot F_{av}(N) \quad (13)$$

当然, 只有 $\lambda \cdot F_{av}(N) \leq 1$ 时上式才有意义. 由式 (12), (13) 可得

$$P_0 = \frac{1 - \lambda N(R + 2P + D_{av}) - 2\lambda S(N + 1)}{1 - \lambda N(R + 2P + D_{av})} \quad (14)$$

信道利用率为^[7]

$$\rho = \frac{N(1 - P_0)(R + D_{av})}{F_{av}(N)} \quad (15)$$

当网络负载很重时, 可以认为 $P_0 \equiv 0$, 这时信道利用率将达到最大值:

$$\eta = \frac{R + D_{av}}{R + D_{av} + 2(P + S) + (2S/N)} \quad (16)$$

通过分析 PB-ABFMA 协议的帧结构也可以证明式 (16) 是正确的.

4.2 平均“请求-回应”时延

平均“请求-回应”时延定义为 RR 分组产生与接收完相应的 RM 分组之间的平均时间间隔, 我们不详细考虑 CAP 获得资源的时间, 而是主要分析 MAC 层的时延. 长帧中到达的 RR 分组比短帧中到达的可能要多一些, 而且帧长取决于以前到达的 RR 分组数, 所以长帧群 (由多个长帧组成) 与短帧群将交替出现. 只要节点发送队列不为空, 就会有非空帧 (至少有一个 RM 分组) 出现, 因此非空帧群的长度约等于一个 $M/G/1$ 队列的忙碌期, 该队列的分组到达率为 $N\lambda$, 非空帧群的平均长度为^[7]

$$\overline{BP} = \frac{D_{av} + R + 2P + 2S}{1 - N\lambda(D_{av} + R + 2P + 2S)} \quad (17)$$

空帧的长度为 $(N + 1) \cdot 2S$. 某帧为空的概率可以近似为 $(P_0)^N$, 所以某帧不空的概率为 $1 - (P_0)^N$. 依据更新定理 (renewal theory), RR 分组在非空帧群中到达的概率为

$$P_{RB} = \frac{\overline{BP}(1 - P_0^N)}{\overline{BP}(1 - P_0^N) + 2S(N + 1)P_0^N} \quad (18)$$

RR 分组在空帧到达的概率 $P_{RI} = 1 - P_{RB}$. 这里难以准确计算平均服务时间, 所以采用近似方法. 令 P_1 为非空帧群中某帧仅含有一个 RM 分组的概率, 并假设前一帧的长度为 F , 则

$$P_1 = e^{-(N\lambda F)} \cdot N(1 - P_0)(P_0)^{N-1} + N\lambda F e^{-(N\lambda F)} \cdot P_0^N \quad (19)$$

上式中第一项表示前一帧中无 RR 分组到达而且仅有一个非空节点, 第二项表示前一帧只有一个 RR 分组到达而且所有节点队列均为空. 由于 F 是未知的, 所以式 (19) 的计算也要进行合理的近似. 因为非空帧群中每一帧至少含有一个 RM 分组, 所以我们假设前一帧只有一个 RM 分组 (如果前一帧有多个 RM 分组, 那么本帧中仅有一个 RM 分组的概率即 P_1 就很小). 这时 P_1 近似为

$$P_1 \approx e^{-N\lambda D_{av}} \cdot N(1 - P_0)P_0^{N-1} + N\lambda D_{av} e^{-N\lambda D_{av}} \cdot P_0^N \quad (20)$$

如果 RR 分组在仅有一个 RM 分组的帧中到达, 该帧的服务时间为 $S_1 = D_1 + R + 2P + 2(N + 1)S$. 至少有两个 RM 分组的帧的服务时间为 $S_2 = D_1 + D_2 + 2(R + P + S) + F(N - 2)$. 所以非空帧群的服务时间 S_B 的概率母函数为

$$\begin{aligned} G_{S_B}(Z) &= P_1 \cdot Z^{[D_1 + R + 2P + 2(N+1)S]} + \\ &\quad (1 - P_1) \cdot Z^{[D_1 + D_2 + 2(R+P+S) + F(N-2)]} \\ &= P_1 \cdot [D(Z)Z^{R+2P+2(N+1)S}] + (1 - P_1) \cdot \\ &\quad [D^2(Z)Z^{2(R+P+S)}G_{F(N-2)}(Z)] \quad (21) \end{aligned}$$

经过推导可以求出 S_B 的均值为

$$\begin{aligned} \overline{S_B} &= (2 - P_1)(D_{av} + R) + 2P + 2(NP_1 + 1)S + \\ &\quad (1 - P_1)F_{av}(N - 2) \quad (22) \end{aligned}$$

二阶矩的推导过程与结果均比较复杂, 在此不详细列出. 各节点的发送队列可以用 $M/G/1$ 模型描述, 所以平均时延为

$$\overline{D_0} = \overline{S_B} + \frac{\lambda \overline{S_B}^2}{2(1 - \lambda \overline{S_B})} \quad (23)$$

RR 分组到达 CAP 后, 经过一帧时间 CAP 即发送相应的 RM 分组, 这时平均“请求-回应”时延近似为

$$\overline{D_B} \approx \overline{D_0} + F_{av}(N) + D_{av} + S + P \quad (24)$$

如果 RR 分组在空帧到达, 平均时延 $\overline{D_I} = D_{av} + R + (2N - 1)S$. 所以总的平均“请求-响应”时延为

$$\overline{D} = P_{RB} \overline{D_B} + P_{RI} \overline{D_I} \quad (25)$$

5 仿真与计算结果

通过计算机仿真,我们对 PB-ABFMA 协议的性能进行了评估.为了与理论分析结果进行比较,仿真中 RR 分组的到达服从 Poisson 分布.仿真中未考虑信道误码与传播时延,轮询与 RP 分组均占用一个时隙(S),具体仿真参数在表 1 中列出.

表 1 仿真参数

节点数(N)	信道速率	D_{ev}	RR 分组	S	训练序列
50,30,20,10	10Mbit/s	1.5ms	120 μ s	40 μ s	20 μ s,40 μ s

图 4 给出了不同节点数情况下,信道利用率与每节点 RR 分组到达率的关系($P=20\mu$ s),并将理论分析结果与仿真结果进行了比较.可以看出,理论值与仿真值基本上是吻合的.三种条件下的最大值基本相同,分别为 0.9302,0.9296 与 0.9289,说明 PB-ABFMA 协议具有较高的吞吐率.随着节点数的增大,系统趋于饱和的速度也明显加快.

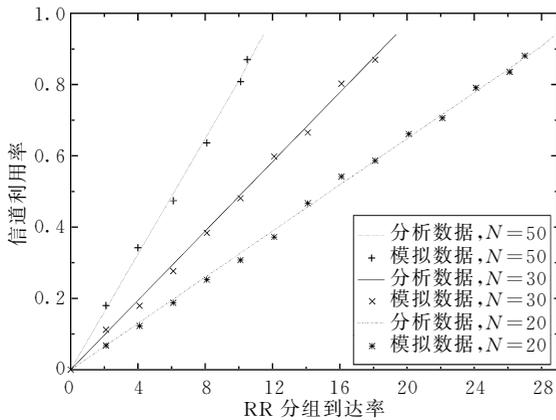


图 4 信道利用率与 RR 分组到达率

图 5 给出了平均“请求-回应”时延与信道利用率的关系($P=20\mu$ s),并对理论值与仿真值进行了比较.可以看出,理论值与仿真值的趋势基本一致,说明我们在分析中使用的近似方法是合理的.因为协议中利用微时隙为处于空闲状态的用户保持连接,CAP 空闲时将连续轮询各节点,并且 CAP 在一帧中有相同的发送机会,所以能够有效降低“请求-回应”时延.当信道利用率小于 0.85 时,平均时延均小于 100ms.节点增多使平均“请求-回应”时延明显增大,当信道利用率接近最大值时,平均“请求-回应”时延急剧增大.文献[3]的协议为进一步提高信道利用率,采用了复杂的接入方法,但在业务量不大或各节点业务量不均衡的条件下,该协议的性能将

有所下降^[3].可以看出,本文协议对业务量与业务类型具有良好的适应性,所以性能比较平稳.

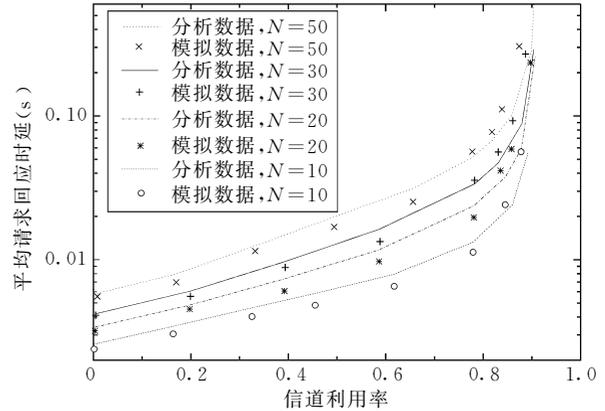


图 5 平均请求-回应时延与信道利用率

为了有效支持智能天线的应用,协议中多次使用了训练序列,所以有必要考察训练序列对系统性能的影响.图 6 即给出了不同训练序列长度条件下,平均“请求-回应”时延与信道利用率的关系,同时给出了仿真结果(实际中 P 通常小于 40μ s(400bit)).为便于观察,我们将 P 取为 40μ s.可以看出,网络负载不重时(信道利用率小于 0.85),使用训练序列不会明显降低系统性能,而训练序列的使用将显著降低智能天线实现的难度.网络负载很重时,训练序列的影响比较明显.

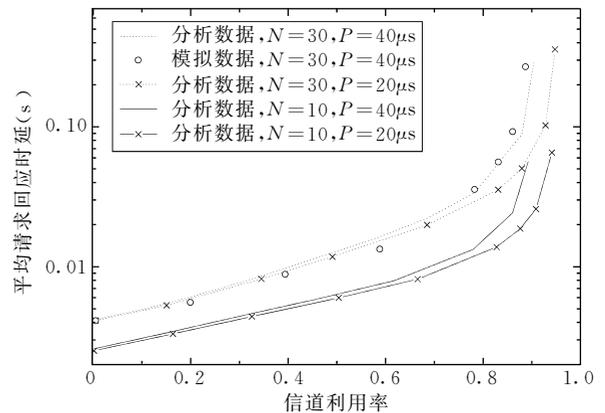
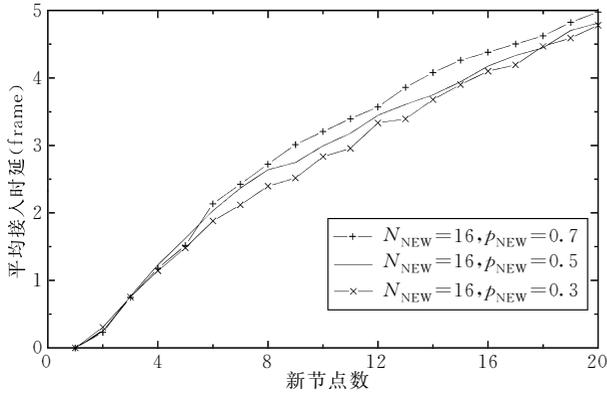
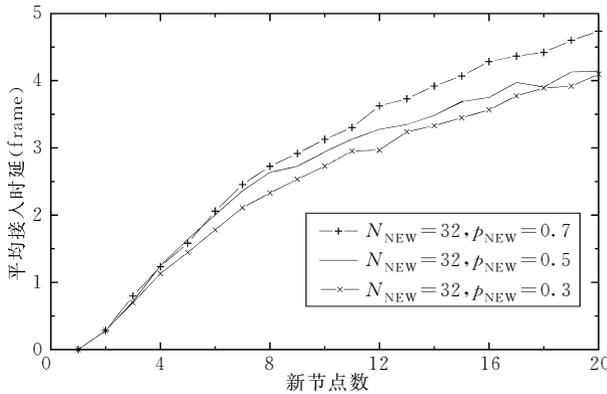
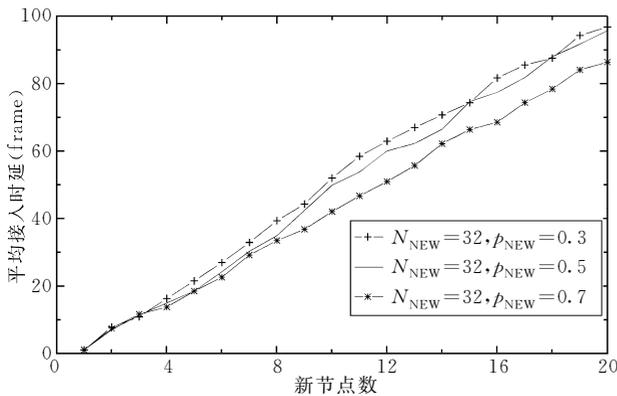


图 6 平均请求-回应时延与训练序列长度

图 7~9 考察了碰撞分解算法的性能(采用蒙特卡罗仿真方法).其中 N_{NEW} 与 p_{NEW} 的含义已在 3.2 节中介绍.图中平均接入时延表示整个碰撞分解过程持续的时间(以帧为单位),可以看到,增大 N_{NEW} 将显著减小新节点的接入时延,而增大 p_{NEW} 将使接入时延有所增加(因为每帧中用于碰撞分解的 NEW 时隙数减小).随着 N_{NEW} 的增大, p_{NEW} 的影响也越明显.从图 9 可以看出, p_{NEW} 的增大使用于碰撞

图 7 平均接入时延与新节点数($N_{NEW}=16$)图 8 平均接入时延与新节点数($N_{NEW}=32$)图 9 NEW 时隙总数与新节点数($N_{NEW}=32$)

分解的 NEW 时隙总数(包含在若干帧中)有所降低,但效果不明显,同时还使接入时延增大,所以 p_{NEW} 取 0.5 以下比较合适。

6 结 论

本文在充分考虑 Internet 无线接入网络业务的特点及智能天线特点的基础上,提出了支持智能天线应用于 Internet 无线接入网络的多址接入协议-基于轮询的自适应 BF 协议(PB-ABFMA),针对 Internet 无线接入网络中主要的“请求-回应”式业务,推导了信道利用率与平均“请求-回应”时延的计算公式。数值计算与仿真结果表明,PB-ABFMA 协议能够有效支持智能天线应用并具有较高的信道利用率与良好的时延性能,其简单有效的碰撞分解算法能保证新用户快速接入信道。

参 考 文 献

- 1 Reudink M. . Smart antenna for cellular systems; An overview. In: Proceedings of the IEEE RAWCON (Invited), Denver, 1999
- 2 Liberti J. C. , Rappaport T. S. . Smart Antennas for Wireless Communications; IS-95 & 3rd Generation CDMA Applications. New Jersey: Prentice Hall, 1999
- 3 Krishnamurthy S. V. , Acampora A. S. , Zorzi M. . Polling-based media access protocol for use with smart adaptive array antennas. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9 (2): 148~161
- 4 Ward J. , Compton R. T. . High throughput slotted ALOHA packet radio networks with adaptive arrays. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41(3): 460~470
- 5 Sakr C. , Todd T. D. . Carrier-sense protocols for packet-switched smart antenna basestations. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Network Protocol (ICNP), Atlanta, 1997, 45~52
- 6 Rappaport T. S. . Wireless Communications Principles and Practice. New Jersey: Prentice Hall, 1996
- 7 Hayes J. F. . Modeling and Analysis of Computer Communication Networks. New York: Plenum, 1984

YANG Jun, born in 1975, Ph. D. candidate. His research interests include spread spectrum communications and wireless network protocol.

LI Jian-Dong, born in 1962, Ph. D. , professor. His research interests include wireless networks, packet radio network, software radio and broadband wireless Internet access etc.

ZHOU Xiao-Dong, born in 1975, Ph. D. candidate. His research interests include wireless network protocol, WLAN and OFDM.

