

一种新的有效支持智能天线应用的多址接入协议

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、宽带无线通信实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 本文研究将智能天线应用于分组无线网络中,提出了支持智能天线应用的自适应时隙分配多址接入协议(ASAMA)。该协议采用时分双工(TDD)方式,每一帧开始时用户节点依次发送训练序列,基站的智能天线据此计算出各用户节点的空间特征(Spatial Signature)。基于波束形成的信噪比最大化准则,设计了逐点优化与全局优化两种不同复杂度的时隙分配算法。由基站对上下行业务的时隙进行动态分配,在保证通信质量的前提下,使每个时隙容纳多个数据分组,以充分实现信道的空分复用(SDMA)。对该协议的信道利用率进行了近似分析,并利用仿真方法考察其性能。结果表明,ASAMA 协议能有效支持智能天线应用并具有很高的信道利用率与良好的时延性能。

关键词: 分组无线网络;智能天线;多址接入协议;空分复用

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 10-1600-05

A Novel MAC Protocol for Packet Radio Network with Smart Antennas

YANG Jun, LI Jian-dong, ZHOU Xiao-dong

(State Key Lab. of ISN, Information Science Institute, Broadband Wireless Communications Laboratory, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Employing smart antennas in the basestation of packet radio network is studied. An adaptive slot allocation multiple access protocol (ASAMA) is proposed. In ASAMA protocol, Time-Division Duplexing is adopted, and pilot signals are transmitted orderly by mobile terminals (MTs) at the beginning of one frame, so the spatial signatures of MTs can be obtained by the smart antennas. Based on the optimal SINR beamforming method, two slot allocation algorithms, which are point-by-point optimizing (PPO) and global optimizing (GO), are presented. On condition that all packets can be received successfully, the basestation dynamically schedules uplink and downlink traffic to achieve that several data packets can be simultaneously transmitted in one traffic slot. Therefore, efficient space-division-multiple-access (SDMA) can be obtained. Approximate analysis of channel utilization is presented. Simulations show that ASAMA protocol effectively supports the application of smart antennas and provides higher channel utilization and lower delay.

Key words: packet radio network; smart antennas; multiple access protocols; space division multiple access

1 引言

近年来,分组无线网络得到了迅猛发展,而如何减弱时变衰落信道的影响及如何充分利用无线信道资源并及时传输数据业务是其中的两个关键问题。

研究表明,在基站采用智能天线^[1]能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,而且不会明显增加移动台(MT)的复杂性,因而具有很好的应用前景。在分组无线网中,对于每个数据分组,基站的智能天线都要获得与目标节点对应的空间特征(Spatial Signature)以进行波束形成,然而由于时变信道、节点移动及分组的突发性等因素,仅依靠智能天线本身难以简便、快速、准确地实现上述目标^[2]。这就需要设计一种新的机制(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。然而目前这方面的研究还不够充分,文献[3]研究了支持智能天线应用的 S-ALOHA 协议,文献[4]考虑将定向天线用于多跳无线网络,文献[5]研究将波束切换天线用于多跳无线网络,但上述协议均工作于竞争方式,所以会发生分组碰撞,难以保证稳定可靠的通信质量。文献[2]提出了相应的轮询方式的多址协议,虽然避免了碰撞的发生,但没有考虑多波束形成,所以不能实现信道的空分复用。文献[6]研究了支持智能天线应用的动态时隙分配方法,但没有将该方法与多址接入协议结合并考察接入机制彻底改变后的网络综合性能,其研究结果并不完整。

本文提出了自适应时隙分配多址接入协议(Adaptive Slot Allocation Multiple Access Protocol-ASAMA),设计了逐点优化与

收稿日期:2002-12-16;修回日期:2004-07-06

基金项目:国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合资助项目(No. 60372048);高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划;国家自然科学基金重大项目(No. 60390540)第6子课题;教育部科学技术研究重点项目(No. 104171);国家863计划重大课题(No. 2001AA123031)

全局优化两种不同复杂度的时隙分配算法,在保证通信质量的前提下,使每时隙容纳尽可能多的数据分组,以充分实现空分复用.通过仿真方法考察了 ASAMA 协议及其时隙分配算法的性能.

2 系统模型

本文研究的无线网络由一个无线基站及若干移动节点组成.基站配备了智能天线系统,用户节点使用普通的全向天线.各节点与基站具有相同的载波频率,以时分双工(TDD)方式进行通信.

为分析方便,本文考虑平坦衰落信道,接收信号的幅度服从瑞利分布.多径信号的入射方向在所有可能方向上均匀分布,假设各条路径的传播延迟很小,时延扩展在 0.1 μs 以下;如果信道速率为 1 ~ 2Mbps,则时延扩展小于一个符号周期,码间干扰很小.信道在小尺度内的时变特性可以用相干时间来描述,相干时间通常定义为^[7]

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

其中 f_m 为最大多普勒频移.若节点移动速度小于 15 千米/小时,载波频率为 1GHz,则相干时间大于 30ms,如果一帧长度小于 T_c 就可以认为在一帧内信道基本不变.这种估计方法与文献[2]是一致的.确定智能天线模型时应考虑以下因素:

(1) 用户节点通常可以自由移动,数据分组的产生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,在获得各目标节点的空间特征之前,基站的智能天线系统难以准确地进行波束形成,这时基站应采用全向天线.

(3) 应建立一种有效的机制保证智能天线系统快速、准确地获得与目标节点对应的空间特征以进行波束形成.

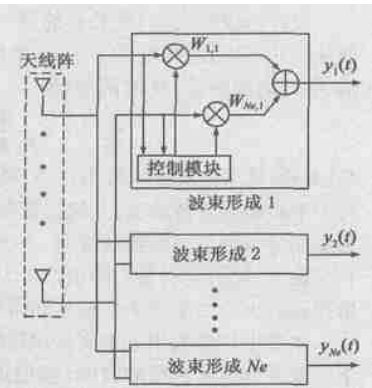


图1 智能天线的结构

使用 N_e (N_e 可取 8 ~ 16) 个全向性阵元构成天线阵列,该天线系统具有全向和波束形成两种工作模式(我们将后者称为 BF 模式,这里假设采用圆形天线阵列,以便于实现全向模式).BF 模式的结构如图 1 所示(接收),它具有 N_e 个波束形成模块,最多可同时对 N_e 个目标节点进行波束形成.采用基于训练序列的波束形成方法(Temporal Reference Beamforming TRB),接收目标节点的训练序列时,运行相应的算法(如 RLS 等)即可获得与该节点对应的空间特征,这种方法简单实用,并适合

在移动环境中使用.

该天线系统的全向模式与通常的全向天线性能基本相同.通过调整发射功率可以使全向模式与 BF 模式具有相同的传输距离.

3 自适应时隙分配多址接入协议(ASAMA)

3.1 ASAMA 协议

ASAMA 协议的核心思想是:在基站接收或发送数据分组之前,用户节点发送训练序列,基站的智能天线据此计算出节点的空间特征.根据相应的时隙分配算法,基站为上下行业务动态分配时隙,使每个时隙尽可能多地容纳数据分组.图 2 给出了 ASAMA 协议的帧结构.

假设网络中有 N 个注册节点,并且数据分组(Data Packet)的长度固定,与业务时隙长度相等.每个注册节点分配一个 ID 号(1, 2, ..., N).基站首先以全向模式发送 Start 分组与 Request 分组,后者指明目前基站准备向哪些节点发送数据分组(下行),假设有 m 个目的节点. Request 分组后, m 个指定的节点按照 ID 号递增的顺序发送训练序列(图 2 中 $Pil_i \sim Pil_j$),如果其中某个节点有上行业务分组,则在训练序列后附加一个标志位.之后,有 $N - m$ 个微时隙供其他节点发送训练序列(图 2 中 $Pil_p \sim Pil_q$).由于所有节点均能收到 Request 分组,按照 ID 号递增的顺序,剩余的 $N - m$ 个节点很容易计算出应在哪一个微时隙中发送训练序列.如果某节点有上行业务分组,则在相应的微时隙中发送训练序列,反之,则保持静默状态,这样基站即可掌握上行业务情况.

设计这一方案的目的主要在于:利用微时隙为各节点保持连接,从而有效降低分组的接入时延;并且用户节点没有上行和下行业务时,不发送训练序列,在业务量不大的情况下,能有效降低功耗,这对于移动台也是很重要的.

接收完训练序列后,基站根据各节点的空间特征进行时隙分配(详见 3.2 节),并将分配结果置于 Allocation 分组中,该分组以全向模式发送.之后,基站以 BF 模式与各节点通信,依次传输上行与下行数据分组,各节点则在指定的业务时隙中进行发送或接收.为保证服务的公平性,一个节点在一帧中最多只能发送和接收各一个分组.由于 BF 模式的使用,一个业务时隙可能容纳多个数据分组(如图 2 所示),从而实现信道的空分复用.为保证空间特征的有效性,一帧的最大长度应小于信道的相干时间(T_c).

一帧中数据分组传输完毕后,基站以全向模式发送结束(End)分组,其后的一个微时隙(new)预留给新节点接入.新节点在 new 时隙中发送接入请求(AR)分组,基站以全向模式接

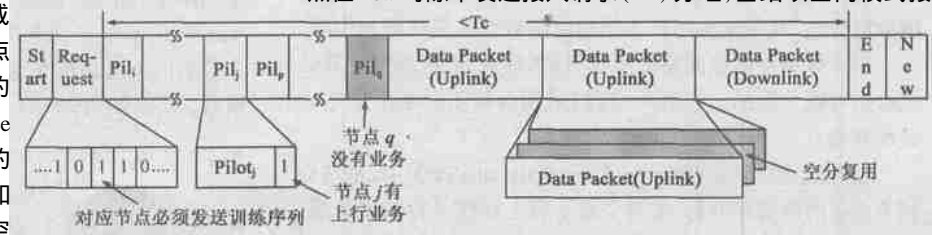


图2 ASAMA 协议的帧结构



收. 若仅有一个新节点发送 AR 分组, 基站就能正确接收该分组, 并发送应答分组. 如果有多个新节点同时发送 AR 分组就会发生碰撞, 这时需采用碰撞分解算法, 但这已超出本文的范畴, 下面主要讨论协议中的时隙分配算法.

3.2 时隙分配算法

假设 M 个节点在同一时隙向基站发送数据分组, 节点 ID 号为 $1, 2, \dots, M$. 令节点 i 为波束形成的目标节点之一. 其发送信号为 $s_i(t)$, 基站天线阵列收到的信号为:

$$r_i(t) = v_i s_i(t) \quad (2)$$

其中 $v_i (N \times 1$ 向量) 代表节点 i 的空间特征, 它是节点 i 与天线阵列之间所有多径分量的合成. 同理, 天线阵列收到的其他节点的信号 (可看作干扰信号) 为:

$$r_{ij}(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^M v_j s_j(t) \quad (3)$$

天线阵列的接收信号可以表示为:

$$\begin{aligned} r(t) &= r_i(t) + r_{ij}(t) + r_n(t) \\ &= v_i s_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^M v_j s_j(t) + r_n(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $r_n(t) (N \times 1$ 向量) 表示加性高斯白噪声. 假设 $E[s_i(t)] = 0$, $E[|s_i(t)|^2] = 1$, $\forall i$; 并且 $E[s_i^*(t) s_j(t)] = 0 (i \neq j)$. 则非期望信号 $(r_{ij}(t) + r_n(t))$ 的协方差矩阵为:

$$\begin{aligned} \Sigma &= E[(r_{ij}(t) + r_n(t))(r_{ij}(t) + r_n(t))^H] \\ &= \sum_{j=1, j \neq i}^M v_j v_j^H + \sigma_n^2 I \end{aligned} \quad (5)$$

其中 H 表示向量的共轭转置, I 是单位阵. σ_n^2 为各阵元的平均噪声功率. 以期望信号信干噪比 (SINR) 最大化为准则, 对各阵元的信号进行合并形成输出信号:

$$y_i(t) = W_i^H r(t) \quad (6)$$

其中 W_i 为对节点 i 进行波束形成的权矢量,

$$W_i = \Sigma^{-1} v_i^* \quad (7)$$

其中 $*$ 表示向量的共轭, 波束形成之后的信干噪比为:

$$SINR_i = \frac{E[|W_i^H r_i(t)|^2]}{E[|W_i^H [r_{ij}(t) + r_n(t)]|^2]} = \frac{|W_i^H v_i|^2}{W_i^H \Sigma W_i} \quad (8)$$

如果多个节点在同一时隙中与基站进行通信, 为了使各数据分组都能正确接收, 期望信号的信干噪比均应大于某门限值, 用 $SINR_{th}$ 表示, 即:

$$SINR_i \geq SINR_{th}, \quad \forall i \quad (9)$$

$SINR_{th}$ 主要取决于调制与编码方式及分组长度. 时隙分配算法根据各节点的空间特征, 为上行或下行业务安排合适的发送时隙, 在满足式 (9) 条件下, 使每个业务时隙尽可能多地容纳数据分组, 从而减少每帧占用的时隙数以提高信道利用率.

由于各节点的空间特征是随机的, 独立的, 很难用计算公式给出时隙分配的全过程^[6], 我们采用两种不同复杂度的尝试性算法:

在逐点优化算法 (Point-by-Point Optimizing PPO) 中, 基站收到节点 i 的训练序列后, 如果节点 i 有上行或下行数据分组, 就将节点 i 尝试加入当前时隙并根据式 (2) ~ (8) 计算当前时隙中所有节点的信干噪比; 如果当前时隙中所有节点均满足

式 (9), 则节点 i 正式加入当前时隙; 否则为节点 i 分配一个新时隙并以此作为当前时隙. 该算法类似于文献 [6] 中的随机 (Random) 分配算法. PPO 算法的复杂度低, 可以逐点执行, 不必等待接收完所有节点的训练序列, 可以与训练序列的接收并发执行, 适于硬件实现并会明显缩短算法消耗的时间. 但该算法每次时隙分配仅针对一个节点, 所以不能充分实现信道的空分复用.

在全局优化算法 (Global Optimizing GO) 中, 基站首先对所有节点按照接收信号功率 (v_i^2) 递增的顺序排序, 从序号最小的节点开始分配时隙. 每个未分配时隙的节点被依次尝试加入当前时隙并计算当前时隙中各节点的信干噪比, 如果当前时隙中各节点均满足式 (9), 则记录当前时隙信干噪比的最小值 ($SINR_{min}$). 当前所有未分配节点均尝试完毕后, 与最大的 $SINR_{min}$ (记录于 $\max SINR_{min}$ 中) 对应的节点 (记录于 $bestMT$ 中) 被正式加入当前时隙, 如果任一节点的尝试加入都不能使当前时隙中的所有节点满足式 (9), 则为序号最小的未分配节点增加一个新时隙, 并以此作为当前时隙. 为节点排序的目的是首先给弱信号分配时隙, 减少强信号对弱信号的干扰. 该算法类似于文献 [6] 中的最佳 (Best Fit) 分配算法. GO 算法的复杂度较高, 但由于每次时隙分配都找出使信干噪比降低最少的未分配节点, 所以能获得很好的效果. 该算法只能在接收完所有目标节点的训练序列后执行, 这会显著增加运行算法所消耗的时间.

3.3 ASAMA 协议的性能分析

设计协议时, 我们最关心的是一个时隙中所能容纳的数据分组的平均数. 假设 M 个分组平均需要 $L(M)$ 个时隙来容纳, 平均时隙容量 (M 的函数) 为:

$$C_s(M) = \frac{M}{L(M)} \quad (10)$$

$C_s(M)$ 很难用分析方法得到, 我们采用蒙特卡罗仿真方法^[3]. 对于平坦瑞利衰落信道, 空间特征向量的各元素是零均值的, 独立同分布的复高斯随机变量, 并且各节点的空间特征也是相互独立的. 仿真时我们随机产生大量的空间特征向量, 并对所得到的大量结果求平均值从而得到 $C_s(M)$.

本文中信道利用率定义为单位时间内成功传输的上行与下行业务分组所占用的时间 (按信道速率进行归一化). 这与通常的定义一致, 但由于空分复用的原因, 一个业务时隙中可能容纳多个数据分组, 这些分组的时间总和超过一个业务时隙, 所以信道利用率可能大于 1. 由于没有 $C_s(M)$ 的解析式, 很难精确推导信道利用率的计算式, 我们只讨论网络满负载的情况, 即每一帧中各节点都有上行与下行分组, 这时得到信道利用率的上限. 假设用户节点数为 N , 数据分组长度为 D , Start 与 Request 分组长度分别为 S, R , 训练序列长度为 P , 每个节点的信道指配信息长度为 A . 令 $\lceil x \rceil$ 表示大于 x 的最小整数, 则信道利用率的上限为:

$$\begin{aligned} \max &= \frac{2ND}{\lceil \frac{N}{C_s(N)} \rceil D + \lceil \frac{N}{C_s(N)} \rceil D + N(P+A) + R+S} \\ &= \frac{D}{\frac{1}{N} \lceil \frac{N}{C_s(N)} \rceil D + \frac{(P+A)}{2} + \frac{R+S}{2N}} \end{aligned} \quad (11)$$

4 ASAMA 协议性能评估

通过仿真与数值计算,我们对 ASAMA 协议的性能进行评估.假设天线阵元数 $N_e = 8$,信噪比为 10dB(波束形成前).根据第 3 节的分析,随机产生大量的空间特征向量并运行相应的时隙分配算法,对所得结果求平均值即得到 $C_s(M)$.

研究表明数据业务具有很强的突发性、自相似性及长时相关特性,Poisson 到达过程不能确切反映数据到达的基本特征^[8],而 ON 和 OFF 期长度服从重尾分布的 ON/OFF 过程更接近实际情况.本文即采用 ON 和 OFF 的持续时间服从 Weibull 分布的 ON/OFF 信源,ON 和 OFF 的分布相互独立.Weibull 分布的分布函数为:

$$F(x) = 1 - e^{-x^\alpha} \quad (12)$$

其中 $\alpha > 0$, $\beta > 0$, 为形状参数, θ 为尺度参数. $x < 1$ 时,随着 x 的减小,分组的突发性增强.利用“反函数法”可以方便地产生服从 Weibull 分布的随机数.为便于比较,我们对泊松过程也进行了仿真.表 1 列出了具体的仿真参数,其中节点负荷指整个仿真时间内(包括 ON 期与 OFF 期)各节点上行数据的平均产生速率,仿真中认为各节点上下行业务负荷平衡.

我们只考虑分组的排队时延,即分组从产生到开始发送的平均等待时间.当一个分组的排队时延超过规定的分组生存期,该分组就被丢弃.平均分组丢弃率为丢弃分组在所有分组中的比率.

表 1 仿真参数

SNR	10dB	$SINR_{th}$	15dB	信道速率	2Mbps
节点负荷	100kbps	ON 期均值	3.3s	OFF 期均值	22.8s
$\alpha_{ON} = \alpha_{OFF}$	0.88	ON	3.067	OFF	21.378
分组生存期	8s	Star_Request	64bit	训练序列	64, 100bit
Allocation 信息	24bit/用户	数据分组	2000bit	相干时间	30ms

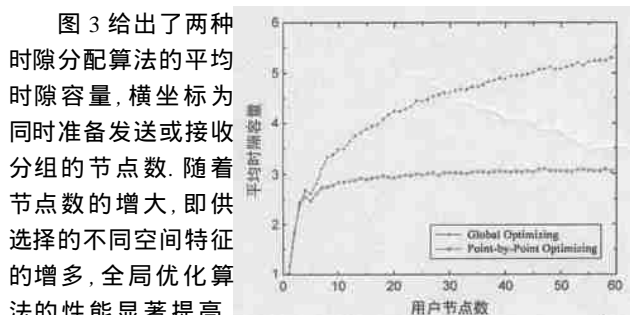


图 3 平均时隙容量

图 3 给出了两种时隙分配算法的平均时隙容量,横坐标为同时准备发送或接收分组的节点数.随着节点数的增大,即供选择的时隙特征向量的增多,全局优化算法的性能显著提高,因为该算法将所有空间特征向量综合进行考虑,当然这是以大大增加运算复杂度为代价的,该算法提供了平均时隙容量的上界.逐点优化算法运算量小,适合实际应用,对它可作进一步的改进以提高性能.

图 4 给出了 ASAMA 协议信道利用率的仿真结果与分析结果(根据式(11)).可以看出,当节点数比较大时理论值与仿真值是吻合的.因为式(11)是在网络满负荷情况下得到的,而仿真中节点数较少时远未达到满负荷,所以这时两者的差距比较大.因为一个时隙可以容纳多个数据分组,所以信道利用

率的最大值分别达到 4.4, 3.8, 2.8 与 2.5, 与相应的 $C_s(M)$ 的值很接近,这是传统多址接入协议无法达到的.说明 ASAMA 协议能充分利用智能天线实现信道的空分复用.分析结果的曲线中出现锯齿形状是因为一帧中上行或下行的某个时隙可能只有 1~2 个数据分组,该时隙没有被充分利用.

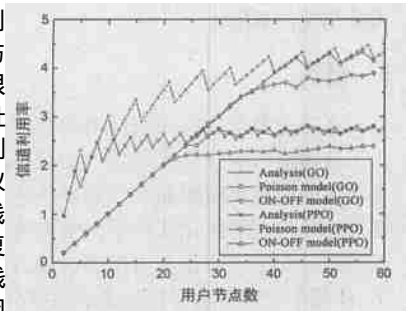


图 4 信道利用率

图 5 给出了协议的平均分组时延.由于一个时隙中可以与多个节点进行通信,没有待发分组的用户节点仅发送很短的训练序列,并且基站空闲时将连续轮询各节点,所以能够有效降低平均分组时延.对于 Poisson 信源与 PPO 算法,当节点数小于 25 时,平均分组时延小于 100ms.对照图 4 可以看出,当信道利用率接近最大值时,平均分组时延将急剧增大.

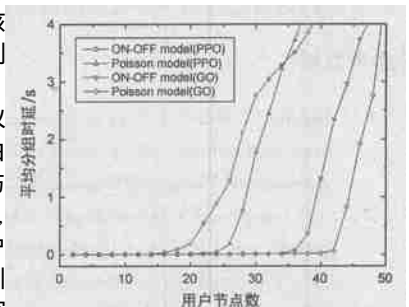


图 5 平均分组时延

图 6 给出了协议的平均分组丢弃率.通常数据业务对分组丢弃非常敏感,因此需要很低的分组丢弃率. ASAMA 协议的分组丢弃率很低,这是因为分组时延被有效降低.对于 Poisson 信源与 PPO 算法,当节点数小于 25 时,分组丢弃率基本为 0,若节点数继续增加,分组丢弃率将明显增大,因此系统应限制最大允许接入的用户数以保证通信质量.

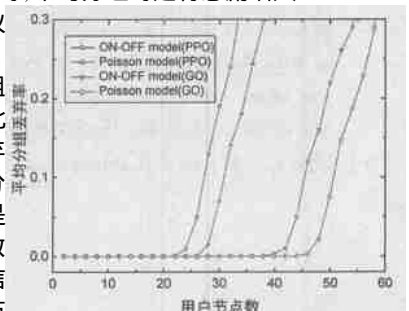


图 6 平均分组丢弃率

协议中使用了训练序列,所以有必要考察训练序列对协议性能的影响.图 7 即给出了采用 ON-OFF 信源时信道利用率与训练序列长度的关系,训练序列长度分别为 64bit, 100bit.可以看出,如果节点数小于 20(PPO),即网络负载不是很重时,增大训练序列的长度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

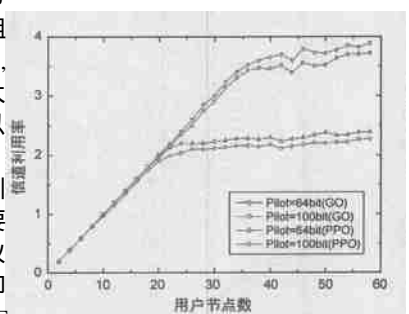


图 7 训练序列对协议性能的影响

天线应用.可以看出,如果节点数小于 20(PPO),即网络负载不是很重时,增大训练序列的长度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.

5 结论

在充分考虑分组无线网络与智能天线特点的基础上,提出了自适应时隙分配多址接入协议(ASAMA).该协议采用简单有效的措施保证智能天线能够快速适应时变信道;设计了逐点优化与全局优化两种不同复杂度的时隙分配算法;由基站动态分配上下行业务占用的时隙,在保证通信质量的前提下,使每个时隙容纳尽可能多的数据分组,以充分实现空分复用.仿真结果表明,ASAMA协议能有效支持智能天线应用并具有很高的信道利用率与良好的时延性能.

参考文献:

- [1] Bellofiore S, Balanis C A, et al. Smart-antenna systems for mobile communication networks. part 1. overview and antenna design [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2002, 44(3) :145 - 154.
- [2] A S Acampora, et al. A new adaptive MAC layer protocol for broadband packet wireless networks in harsh fading and interference environments [J]. IEEE/ ACM Trans. Networking, 2000, 8(3) :328 - 336.
- [3] J Ward, R T Compton Jr. High throughput slotted ALOHA packet radio networks with adaptive arrays[J]. IEEE Trans. Commun. 1993, 41(3) : 460 - 470.
- [4] Y Ko, V Shankarkumar, N H Vaidya. Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in Ad Hoc Networks [A]. In Proc. IEEE INFOCOM 2000[C]. Tel Aviv, Israel, 2000. 13 - 21.
- [5] M Sanchez, T Giles J Zander. CSMA/ CA with Beam Forming Antennas in Multi-Hop Packet Radio [A]. In Proc. Swedish Workshop on Wireless Ad-hoc Networks[C]. Stockholm, 2001 (Online :<http://www.s3.kth.se/radio/Publication/Pub2001/PubList2001.shtml>).
- [6] Shad F, Todd T D, et al. Dynamic slot allocation (DSA) in indoor SD MA/ TDMA using a smart antenna basestation [J]. IEEE/ ACM Trans. on Networking, 2001, 9(1) :69 - 81.
- [7] T S Rappaport. Wireless Communications Principles and Practice [M]. Prentice Hall Inc. ,1996. 165 - 166.
- [8] Walter Willinger, et al. Self-similarity through high variability: statistical analysis of ethernet LAN traffic at the source level [J]. IEEE/ ACM Trans. on Networking. 1997, 5(1) :71 - 86.

作者简介:



杨 军 男,1975 年生,1997 年和 2000 年于西安电子科技大学获得图像传输与处理专业学士学位及通信与信息系统专业硕士学位,2003 年于西安电子科技大学获通信与信息系统专业博士学位,主要研究兴趣为蜂窝无线网络规划,扩频通信,分组无线网络与通信系统设计. E-mail : yangjunxd@yahoo.com.cn



李建东 男,1962 年 10 月生于江苏省阜宁县,1982 年和 1985 年于西北电讯工程学院获得学士和硕士学位,1990 年于西安电子科技大学获工学博士学位,1994 年破格晋升为教授,2002 年 1 月~2003 年 1 月在美国 Cornell 大学作访问学者,现任西安电子科技大学通信工程学院院长和信息科学研究所所长,博士生导师,总装备部通信导航测控专业专家组成员,主要从事宽带无线 IP 技术、移动通信、软件无线电、ad hoc 自组织网络等方面的研究.

周晓东 男,1974 年生,西安电子科技大学通信与信息系统专业博士生,主要研究兴趣为无线局域网,分组无线网络及扩频通信.