

## 基于空间复用的超宽带媒体接入控制技术

徐平平 于淼 徐斌 毕光国  
(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

**摘要** 该文研究超宽带无线网络的媒体接入控制技术和协议。主要分析有望适配应用在未来超宽带网络中的 IEEE 802.15.3 的媒体接入控制协议的基本原理,应用超宽带通信具有精确定位信息的特征,改进 IEEE 802.15.3 协议。提出一种基于空间复用的超宽带媒体接入控制方案。仿真结果表明,与基本 IEEE 802.15.3 技术相比,空间复用媒体接入控制技术的网络吞吐量和数据包接入时延性能都得到了较大的改善。

**关键词** 超宽带网络,媒体接入控制,空间复用

中图分类号: TN915.65

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)05-0795-05

## Space Reuse Based Media Access Control Technique for Ultra-wideband Systems

Xu Ping-ping Yu Miao Xu Bin Bi Guang-guo

(National Mobile Communication Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** This paper studies the media access control protocol and key technologies in ultra-wideband wireless networks. It is mainly analyzed that the basic principle of IEEE 802.15.3 media access control protocol which is as one of the most suitable protocols for ultra-wideband networks. Using the character of accurate location information of ultra-wideband communication, the IEEE 802.15.3 protocol is improved and a scheme which is media access control technique based space reuse is proposed. Simulation results reveal this new proposal improves the performance of network throughput and packet access delay compared with basic IEEE 802.15.3 media access control scheme.

**Key words** Ultra-wideband networks, Media access control, Space reuse

### 1 超宽带技术概述

超宽带(UWB)技术被认为是无线通信领域中一种革命性的新技术,相对于传统的窄带通信系统,超宽带无线通信系统具有高传输速率、高空间频谱效率、高测距精度、低截获概率、抗多径干扰、与现有系统频谱共享、低功耗、低成本、易于全数字化等诸多优点。这些优点使超宽带通信成为中短距离高速无线传输(100—500Mbps)系统的理想方案,UWB技术几乎可以应用于所有的网络场景,在无线局域网(WLAN)、无线个域网(WPAN)、多用户自组织网、无线传感网络、智能家居、公共安全和军事等领域都有着广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。图1为3种UWB技术的典型应用场景。场景1是UWB技术在无线个域网(WPAN, Wireless Personal Area Network)中的应用,例如在一个人的可操作空间内,电脑、打印机、PDA和摄像机相互识别交流,WPAN将会消除房间或办公室内纷杂的布线。在个人空间中,可随意增减的各种

智能化无线设备在空中互相通信。场景2是UWB技术在无线局域网中的应用,PC机以及各种手持设备可通过UWB技术实现无线高速接入因特网和骨干网。场景3是UWB技术在自组织网络中的应用,可实现多个无线设备之间进行临时组网,并通过多跳方式扩大网络的覆盖范围。



图1 UWB网络典型应用场景

Fig.1 UWB network typical application scenes

UWB网络最具生命力的应用场景是第3种场景。实现UWB网络的关键因素是无线设备的传输功率大小是否在UWB技术的允许范围内、是否具有可靠有效的定位信息、高效的媒体接入控制及动态路由机制。网络协议的设计是UWB网络能否真正发挥UWB物理层高速传输特性的重要一环。本文以提高网络吞吐率为目的研究UWB MAC技术。

2004-10-08 收到,2005-04-18 改回

国家自然科学基金重大项目(60496311),江苏省自然科学基金(BK2004067)和华为科技基金资助课题

## 2 基于空间复用的 UWB 媒体接入控制技术

### 2.1 采用空间复用媒体接入控制技术的意义

超宽带网络的媒体接入控制 (Media Access Control, MAC) 协议, 必须紧密结合超宽带系统的特点和所面向的应用, 同时考虑到能耗、安全性、兼容性等其它因素。对于超宽带网络的媒体接入控制技术和协议, 是借用已有的协议还是开发一种全新的协议, 业界一直有争议<sup>[3]</sup>。Xtreme Spectrum 公司决定在超宽带物理层之上采用高速无线个域网 IEEE 802.15.3 MAC 协议。Time Domain 公司也认为 IEEE 802.15.3 的媒体接入控制协议对超宽带系统是一个较为合适的选择。

IEEE 802.15.3 MAC 协议只是针对高速 WPAN 制定的 MAC 协议, 虽然 IEEE 802.15.3 的媒体接入控制协议与超宽带传输技术的特点和所面向的应用基本一致, 但它毕竟不是专门针对 UWB 物理层设计的协议, 使用中会有一些的局限性。考虑到 UWB 的独特物理特性, 我们利用 UWB 的定位信息, 改进 IEEE 802.15.3 协议, 以空间复用的思路设计新的超宽带媒体接入控制协议。

作为空间复用 MAC 技术的设计基础, 我们先分析 IEEE 802.15.3 媒体接入控制协议。

### 2.2 IEEE 802.15.3 媒体接入控制协议

IEEE 802.15.3 网络拓扑结构为基于中心控制的面向连接的自组织网。IEEE 802.15.3 piconet 的基本组成是节点设备 (DEV)。网络初始化时, 由任一个 DEV 来担任 WPAN 的协调器/调度器 (PNC)。除了提供基本的网络同步之外, PNC 还要根据预先定义的 QoS 策略以及当前剩余的信道时隙数量完成接纳控制、分配网络资源、管理节能请求等功能<sup>[4]</sup>。

如图 2 所示, IEEE 802.15.3 基于时隙的超帧结构由 3 部分组成: 信标 (Beacon)、信道竞争访问周期 (CAP, Contention Access Period) 和信道无竞争周期 (CFP, Contention Free Period)。

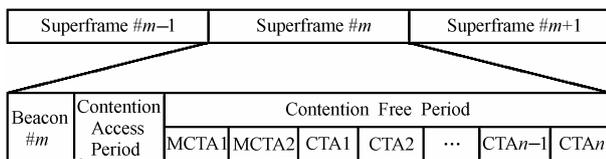


图2 IEEE 802.15.3 超帧结构

Fig.2 IEEE 802.15.3 Superframe

WPAN 中设备的数据传输过程如下: 设备检测所在 WPAN 的信标帧, 从中提取本 WPAN 中设备和超帧的相关信息, 如设备的数目、当前的状态、本超帧及竞争接入期的长短和使用方式、信道使用情况等。在竞争接入期, 设备根据数据的性质 (短的突发数据、管理信息或流媒体数据等) 及服务质量要求, 决定是否申请无竞争期的传输时隙。若是少量的突发数据或无需 QoS 支持的数据业务, 可采用带冲突避免的载波监听多址接入 (Carrier Sence Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) 方式与其它设

备竞争使用竞争接入期的带宽。若所传数据是需要 QoS 支持的流媒体数据, 则在竞争接入期采用 CSMA/CA 方式向 PNC 申请信道时隙分配 CTA (Channel Time Allocation)。带宽请求帧包含数据的源和目的终端的地址、申请 CTA 的类型和长度等信息。主设备在成功接收该带宽请求帧后, 根据当时网络的状况决定是否接纳该请求, 若接纳, 则返回确认帧并在以后的超帧中分配相应的 CTA (带宽)。根据设备所申请的 CTA 类型, CTA 在超帧中可以逐帧动态变化或固定不变 (长度、位置等)。在所申请到的 CTA 中, 数据源设备直接向目的设备发送数据。无竞争周期 (CFP) 采用标准的 TDMA 接入方式。

### 2.3 空间复用媒体接入控制算法的基本思想

如图 3 所示, 在同一 piconet 中, 节点 A 准备向节点 B 发送数据; 同时, 节点 E 要向节点 F 发送数据, 那么根据 IEEE 802.15.3 MAC 协议, 节点 A 和 E 应向 PNC 提出时隙分配请求, PNC 将在 CFP 中为它们分配不同的时隙。因而, 两个节点对需占用两个时隙。若我们利用 UWB 技术独特的定位特性, 使 piconet 中的各节点 (A, B, E 和 F) 将自己相对于 PNC 的位置信息汇报给 PNC。PNC 根据网络整体位置状况, 如果满足  $AE > AB + EF$ , 那么可为这两个节点对分配同一个发送时隙。发送节点则采用功率控制技术, 使源节点的发送功率能保证目的节点正确接收数据即可<sup>[5]</sup>。这样的话, 如图 4 所示, B 不在 E 的覆盖范围内, A 和 B 之间的通信可正常进行, E 和 F 之间的通信也可正常进行。这样, A 和 B, E 和 F 之间的通信可在同一时隙同时进行, 互不干扰, 有效利用了空间利用率, 从而大大提高了信道的使用效率。这就是空间复用 MAC 的基本思想。

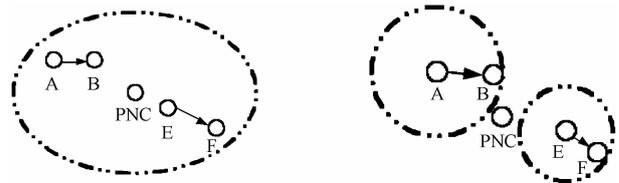


图3 基本 IEEE 802.15.3 MAC 协议 图4 空间复用 MAC 协议

Fig.3 Basic IEEE 802.15.3 MAC Protocol

Fig.4 Space Reuse MAC Protocol

### 2.4 空间复用媒体接入控制算法分析

为实现空间复用, 需采用功率控制技术。而采用功率控制技术需要一些条件<sup>[6,7]</sup>:

(1) 一个节点可以选择用多大功率来发送分组, 需要由物理层提供支持, 我们应用跨层设计思想, 可以让物理层向 MAC 层提供定位信息以及路径衰落等信息。

(2) 在接收到一个分组后, 物理层可以向 MAC 层报告该分组是以多大的功率被接收的。设有一个源节点向一个目的节点发送一个分组, 则有以下公式成立:

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^n G_t G_r \quad (1)$$

式中 $P_t$  为发射机发送分组时传递给发射天线的功率;  $P_r$  为分组到达接收机混频器输入端的功率;  $\lambda$  为载波波长;  $d$  为源节点和目的节点间的距离;  $n$  为路径衰减系数;  $G_t$  为发射机天线增益;  $G_r$  为接收机天线增益。

通常情况下,  $\lambda, G_t$ 和 $G_r$ 为常数;  $n$ 典型值为 2, 根据空间环境的不同可在 2~6 之间变化。UWB在室内应用是密集多径场景。

虽然自组织网中的各节点都是移动的, 但在发送一个分组这一段非常短的时间内, 可将  $d$  和  $n$  看作常数, 这在实际应用中是成立的, 室内常常也是慢衰落的。

当节点无法获知源、目的节点间距离时, 如果节点想采用功率控制提高信道利用率, 那么需发送RTS、CTS分组来确定发送功率大小。即源节点先以功率 $P_t$ 向目的节点发送RTS 分组, 目的节点收到RTS 分组的功率为 $P_r$ 。若源节点以功率 $P_{data}$  向目的节点发送数据, 使得目的节点收到数据分组的功率为 $P_s$ , 则

$$P_s = P_{data} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^n G_t G_r \quad (2)$$

式中 $P_s$  为接收机灵敏度, 亦即接收机正确接收数据所需的最小功率值。由式(1)和式(2), 可推出:

$$P_{data} = \frac{P_t P_s}{P_r} \quad (3)$$

这样, 知道了 $P_t, P_r$  和 $P_s$  以后, 就可以计算出 $P_{data}$ , 用此功率发送数据正好可以保证接收机正确接收的需要。

如果利用超宽带传输技术具有的精确定位原理, 我们就无需进行RTS/CTS的交互即可决定发送数据功率的大小。因为可利用定位技术获得源、目的节点间距离 $d$ , 然后可根据式(2)直接估算出 $P_{data}$ , 用此功率发送数据正好可以保证接收机正确接收的需要。

### 2.5 空间复用媒体接入控制流程

假设 piconet 中各 DEV 已经按照 CSMA/CA 算法接入信道了, 因而 PNC 已经确认 piconet 中有哪些 DEVs。因而, 在此时的超帧结构(Fig.5)中可以讨论 CAP 周期, 这符合 IEEE 802.15.3 MAC 标准, 因为标准规定超帧中的 CAP 是可选项, 其功能可由管理信道时隙分配(MCTA)代替。

piconet 中设备的数据传输过程如下: PNC 首先发送信标帧使 piconet 中各 DEV 达到同步, 信标包括为每个 DEV 分

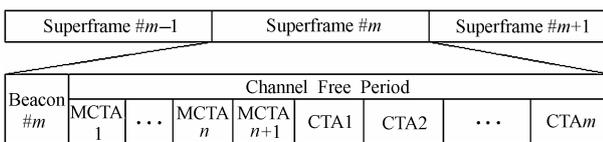


图 5 空间复用 MAC 超帧结构

Fig.5 Space Reuse MAC Superframe

配的 MCTA 情况, DEV 正确收到信标后, 在属于自己的时

隙(1~n, n 等于 piconet 中 DEV 总数)向 PNC 发送时隙请求, 同时将自己的位置信息也写入发送包中。PNC 在收到所有节点请求信息后, 按照 2.3 节的判断准则, 若任意两对节点对之间的通信不会相互造成干扰, 则可给这两对节点分配同一个时隙。PNC 在第 n+1 个 MCTA 时隙中发送广播信息, 信息中包括为每个有信道时隙分配请求的 DEV 分配的 CTA 情况。DEV 收到该广播信息后, 有信道时隙请求的 DEV 便根据 PNC 分配的时隙在指定的 CTA 中发送数据。

所有 CTA 时隙的长度都是不固定的。有些 CTA 是动态改变的, 即这些时隙在不同超帧中的位置是随时改变的。有些 CTA 的位置在一段时间内是基本固定的, 即 PNC 虽然可以修正这些 CTA 时隙的位置, 但是需要得到利用该时隙收发数据的 DEV 的同意方可, 这样的时隙可以用来支持 CBR(固定比特速率)业务。我们采用动态 CTA, 即每个超帧中的 CTA 时隙数量和长度是不固定的, PNC 仅为有数据发送的节点分配 CTA。在接下来的仿真环境中每个 CTA 中只传输一个数据帧。

### 3 性能仿真

#### 3.1 仿真环境及参数

假定 piconet 由 PNC 和 7 个 DEV 构成。网络拓扑结构如图 6 所示: 节点随机分布在 10m×10m 的小区域内; 按照通信范围可将节点分为两组, 左边的四个节点与右边三个节点通信范围是不可达的。每个 DEV 仅向本小组内其它节点发送数据, 且节点寻址服从均匀分布。

上层到达 MAC 层的数据包速率服从泊松分布。采用 Imm-ACK 策略。网络仿真参数见表 1。

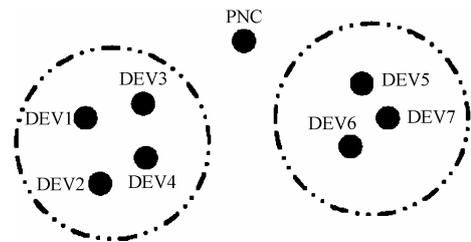


图 6 Piconet 的拓扑结构

Fig.6 Piconet Topology

表 1 网络仿真参数

仿真参数	值
信道带宽	100, 200, 400Mbps
节点数量	8
网络范围	10m×10m
数据包包长	512byte
MCTA 时隙长度	2 μs
CTA 时隙长度	18.61 μs
ACK	14 byte

### 3.2 性能比较

在此仿真环境下，为了将空间复用媒体接入算法和标准 IEEE 802.15.3 媒体接入算法的性能比较，在标准 IEEE 802.15.3 MAC 算法中也没有使用 CAP，这是为了两种算法之间具有可比性。

图 7 和图 8 是两种算法在不同传输速率下平均吞吐量和平均包接入时延之间的比较。虚线是 IEEE 802.15.3 接入算法的性能曲线，实线是空间复用媒体接入算法的性能曲线。

从图 7 (a)可以看出，在网络负载较轻的情况下，IEEE 802.15.3 MAC 算法和空间复用 MAC 算法的吞吐量基本相等，这是因为在一个超帧周期内，两对以上节点同时发包的概率很小，因而，空间复用 MAC 算法的优势并没有体现出来；随着网络负载的增加，亦即节点单位时间内发包数量的增加，处于不同组内的节点对之间可以实现时隙共享的概率增大。随着数据传输速率的增加，两种算法的吞吐量都随之增加。

图 7(b)中，在网络处于轻负载情况下，上层产生的数据包可以在极短时间内发出，因而，数据包接入时延近似为零。随着负载增加，更多的数据包需在同一时隙中发出，因而接入时延迅速增大；随着传输速率的增加，接入时延有所下降。相对于 IEEE 802.15.3 MAC 技术，空间复用 MAC 算法的接入时延要小些。因为在互不干扰的情况下，不同节点的数据包可在同一时隙发出。

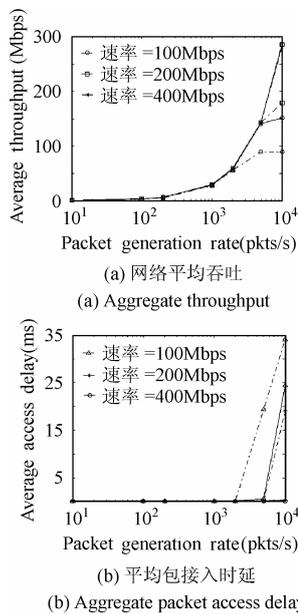


图 7 低负载下 IEEE 802.15.3 MAC 和空间复用 MAC 机制的性能比较

Fig.7 Performance comparison between IEEE 802.15.3 and space reuse MAC under low load

图 8 是网络在高负载情况下两种接入机制吞吐量和包接入时延的性能比较。如图 8(a)所示，在高负载情况下，传输速率为 400Mbps 时，空间复用 MAC 算法的最大吞吐量可达到 600Mbps，标准 IEEE 802.15.3 接入算法为 350Mbps 左右，

前者比后者吞吐量提高了约 70%。因而，在高负载情况下，空间复用接入算法的性能优势明显体现出来。图 8(b)表明，高负载下，其平均接入时延也比 IEEE 802.15.3 接入算法的要小。随着负载进一步增加，网络接入能力趋于饱和，因而，两种算法的吞吐量维持不变。

由以上分析可以看出，当网络负载较轻时可以不必要采用空间复用技术，因为定位信息的获取势必要增加设备的复杂性；但当网络负载增大时，尤其在流媒体业务中，采取空间复用可以大大提高协议的吞吐量减少时延。因而我们可以根据网络负载的轻重由 PNC 来自由选择是否使用空间复用的媒体接入技术。

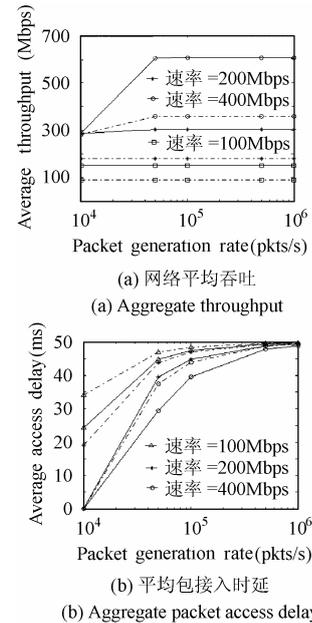


图 8 高负载下 IEEE 802.15.3 MAC 和空间复用 MAC 机制的性能比较

Fig.8 Performance comparison between IEEE 802.15.3 and space reuse MAC under high load

### 4 结束语

超宽带通信技术具有一系列传统的窄带或宽带通信技术所不具备的特点，使其在短距离高速无线通信领域具有较强的技术优势和巨大的市场前景，极有可能成为未来通信技术的关键技术之一。本文利用 UWB 具有的独特物理特性——精确的定位信息，不失一般性的，在 IEEE 802.15.3 媒体接入控制协议基础上结合空间复用的思想，提高了网络的空间利用率，从而改善了网络整体的吞吐量和平均包接入时延。

### 参考文献

[1] Win M Z, Scholtz R A. Impulse radio: how it works[J]. *IEEE Communications Letters*, 1998, 2(2): 36 – 38.  
 [2] Wu S L, Tseng Y C, Sheu J P. Intelligent medium access for mobile ad hoc networks with busy tones and power control. *IEEE*

- J on Selected Areas in Communications*, 2000 : 1647 – 1657.
- [3] Yoshida J. UWB MACs: build or borrow. *EE Times*[OL], <http://www.eetimes.com/story/OEG20020201S0043.2002-2-1/> 2003-8-14.
- [4] Draft standard for part 15.3: Wireless medium access control and physical layer specifications for high rate wireless personal area networks (WPAN). IEEE 802.15 WG, Draft P802.15.3/D10, June 2002.
- [5] Pursley M B, Russell H B, Wysocarski J S. Energy-efficient transmission and routing protocols for wireless multiple-hop networks and spread-spectrum radios. *AFCEA/IEEE EuroComm Conference, Munich*, 2000: 1 – 5.
- [6] 宁录游, 张中兆, 张乃通. 采用功率控制的自组织网MACA协议. *高技术通讯*, 2002, 12(10): 26 – 29.
- [7] Karn P. MACA – A new channel access method for packet radio, *ARRL/CRRL amateur radio, 9<sup>th</sup> Computer Networking Conference, Canada, September 22, 1990*: 134 – 40.
- 徐平平: 女, 1957年生, 教授, 研究方向为小区域无线通信理论与技术、超宽带无线多媒体通信.
- 于 淼: 女, 1980年生, 硕士生, 研究方向为小区域无线通信理论与技术.
- 徐 斌: 男, 1974年生, 博士后, 近期研究方向为超宽带无线通信技术.
- 毕光国: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 近期研究方向为超宽带无线通信技术.