

基于 UWB 的 Inter-piconet 网间通信问题的研究^{*}

吕程^{1,3} 肖政^{1,3} 侯紫峰^{1,2} 杜晓黎^{1,2}

(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)¹ (联想研究院 北京 100085)²

(中国科学院研究生院 北京 100049)³

摘要 针对目前基于 UWB(超宽带技术)的 IEEE 802. 15. 3a 标准协议并未规范其 inter-piconet 范围的网间通信问题及移动个域网的发展对此的需求,提出了建立完善的 piconet 之间通信流程的解决方案,包括码字分配、同步、路由及调度等一系列过程,并对其关键问题进行了深入探讨和仿真,以解决 inter-piconet 之间通信的干扰及同时运作多个 piconet(SOP)的问题,从而有利于 inter-piconet 网间通信问题的标准化。

关键词 超宽带, 微微网, MB-OFDM, DS-CDMA

Research and Design on Inter-piconet Communication Based on UWB

LU Cheng^{1,3} XIAO Zheng^{1,3} HOU Zi-Feng^{1,2} DU Xiao-Li^{1,2}

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)¹

(Lenovo Corporate Research, Beijing 100085)² (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)³

Abstract Currently the international standard IEEE 802. 15. 3a, based on UWB(Ultra-Wide Band) technology, doesn't refer to inter-piconet communication, which will be in need nowadays, due to the growing needs of the mobile PAN in quantity. Thus a solution for building an end-to-end inter-piconet communication was proposed, through the thorough research on the process of code assignment, synchronization, routing strategy and scheduling, to finally solve the existing problems of interfering and SOP(Simultaneously Operating Piconets) in the inter-piconet communication.

Keywords UWB, Piconet, MB-OFDM, DS-CDMA

1 引言

随着计算机、通信与家电的融合,设备之间迫切需要高速、互操作性强的无线通信,超宽带(UWB, Ultra-Wide-band)^[1]技术就是一种能实现无线局域网(WLAN)、无线个域网(WPAN)及无线传感器网络^[2]互联接入的技术。目前在超宽带的标准协议 IEEE 802. 15. 3a 中仅涉及到微微网(piconet)内的通信,范围局限于一个主设备(PNC)和另外一些数量有限的从属设备(DEV)之间。随着移动个人局域网的不断发展,单个微微网无论是在网络结构还是通信范围上都显然无法满足其需求,因此建立一个范围更广的 inter-piconet 的通信是今后短距无线通信的发展趋势。

由于 PAN 设备支持移动性,当多个 piconet 在一个 PAN 中共同存在时,某个 piconet 中的设备可能会移动到另外一个 piconet 的范围之内,这样将会影响到每个 piconet 的通信状况。由这种同时运作多个 piconet(SOP)引发的诸多问题在个人局域网中是无法避免的,而目前 IEEE 的标准协议中还没有制定一个规范来保证 UWB 散射网(多个 piconet 组成的网)的建立和最小服务质量(QoS)的通信,国内外的相关研究也大多集中在 intra-piconet 内部通信,inter-piconet 的网间通信研究较少。

针对于此,本文的研究重点在于解决 inter-piconet 网间的无干扰交互与通信问题,使得彼此未经协调的 UWB piconet

能够并行运作。本文首先对 inter-piconet 网间通信问题进行了阐述,在第 2 节就该问题在目前的研究现状做了介绍。第 3 节是文章的重点,提出了建立完善的 inter-piconet 网间的通信流程,完成码字分配、同步、路由及调度等一系列过程,重点解决微微网间的码字分配、同步机制等关键问题。在文章结尾对工作做了一个总结并对后期工作做了展望。

2 研究现状

2.1 UWB 两大技术阵营

在目前 IEEE 针对 UWB 提出的两种标准中,MB-OFDM^[3]技术根据 FCC 规范,将 3. 1~10. 6GHz 频段分成 14 个频段,5 个频段组,前 4 个频段组分别由 3 个频段组成,第 5 个频段组由 2 个频段组成,每个频段的带宽为 528MHz。系统的传输可达到 53. 3, 80, 110, 160, 200, 320, 400 和 480Mbps。每一个频段被分成 128 个子载波,使用时频交织 OFDM(TFI-OFDM)方式,将每一个频段分成一组正交的窄带信道。

DS-CDMA^[4]技术采用双频段脉冲无线电扩频方式,频段中不考虑 5. 2~5. 8GHz,每一个频带用短脉冲传送,带宽超过 1GHz(即脉冲无线电),使用每符号 24 个码片的 DS-SS 调制,纠错方式采用 R-S 码和卷积码。

2.2 现有标准对 piconet 工作方式的支持

对于散射网而言,其中的设备既可以是某个微微网的主

^{*}国家 863 计划基金资助项目(2004AA1Z1090;2005A142030)。吕程 硕士生,主要研究领域为无线通信、网络体系结构;肖政 博士生,主要研究领域为网络安全、计算机安全体系结构;侯紫峰 博士后,研究员,博士生导师,主要研究领域为无线通信、计算机体系结构;杜晓黎 博士,研究员,硕士生导师,主要研究领域为计算机体系结构、网络应用模式。

设备,也可以是另一个微微网的从设备。每个微微网的跳频序列或者扩频码各自独立,互不相关,同一微微网的所有设备跳频序列或扩频码同步,通过时分复用或 CDMA 技术,一个 UWB 设备便可以同时与几个不同的微微网保持通信。

在 inter-piconet 通信所涉及关键问题的支持方面,上述两个标准只提及不同 piconet 码字分配问题:MB-OFDM 系统采用分配时频交织码(TFC)方式,在每个子频带中传输 OFDM 信号,每个频带组可支持 4 个 piconet 同时工作。而 DS-SS-OFDM 方案通过同一频段的 4 个 piconet 使用不同的扩频码集合以相互区分,可以支持最多 8 个 piconet 同时工作,其中 4 个工作在低频段,另 4 个工作在高频段。但是两种标准的码字分配都非完全正交,存在干扰,且两标准都未解决 inter-piconet 通信中涉及到的一些其他问题,诸如同步机制、路由及 PMP(participant in multiple piconets)节点调度等。

鉴于此,本文拟解决 inter-piconet 网间的无干扰交互与通信问题,包括改进不同 piconet 的码字分配干扰问题、piconet 之间的同步机制、路由及 PMP 节点调度四方面,其中前两者相对关键,为本文研究的重点。

3 Inter-piconet 通信关键问题的研究与设计

3.1 不同 piconet 的码字分配干扰问题

3.1.1 MB-OFDM

作为一项 IEEE 802. 15. 3a 的原始提议,MB-OFDM 采用 128 组长度 242. 4ns 的 OFDM 字符来使用 528MHz 的传输频宽,之后再套用一套跳频机制,让所有占用频宽提高 3 倍,增加至 1. 6GHz。

表 1 MB-OFDM 协议中的 TFC 码字分配

TFC Number	Preamble Pattern index	Cover Sequence index	Length 6Time Frequency Code								
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3
2	2	1	1	3	2	1	3	2	1	3	2
3	3	2	1	1	2	2	3	3	2	3	2
4	4	2	1	1	3	3	2	2	3	2	2
5	5	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

表 1 显示了位于同一频带的 4 个 piconet 可用的不同时间频编码(TFC),如表中所示每个 OFDM 信号按照不同时间隙分别分配在三个频带中传输。从中可很容易看出该 TFC 编码并非完全正交,存在一定的交叉,因而当多个使用这些 TFC 码的 piconet 共存于一个 PAN 时,势必会产生干扰。

针对原 MB-OFDM 协议的不足,主要使用以下两种方法进行改进,并对比其仿真效果:

(1) Half PRF (Pulse Repetition Frequency)

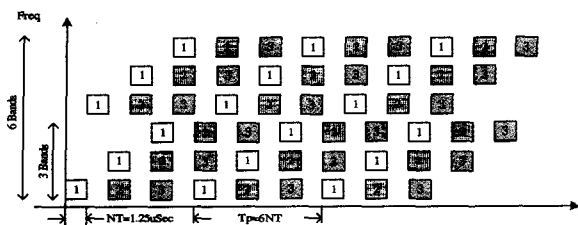


图 1 Half PRF 方式下的 piconet 频带复用

PRF 为脉冲重复频率,该方法是在原方案的基础上将每个 OFDM 信号的传输时间减少为原来的一半,同时增加每个信号的编码比特数为原来的两倍。这样在保证相同的传输速率的情况下,减少了冲突和干扰的发生,并可以使更多的 piconet 共存于一个频带组。如图 1 所示为 3 个 piconet 同时运作方式。

(2) Time Spreading

在这种方式下,每个 OFDM 信号仍然在自己的时隙里传输相同的时间,不同的是每个信号现在需要传输两次。这个方法的好处在于可以增加系统传输的频带多样性,有效地避免冲突,增加抗干扰性,如图 2 为 4 个 piconet 同时运作方式。

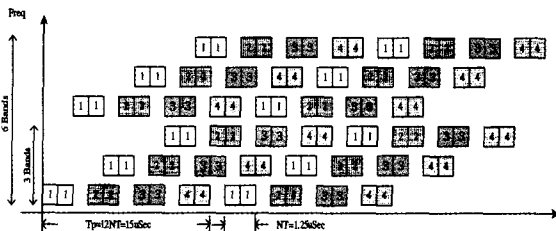


图 2 Time Spreading 方式下的 piconet 频带复用

(3) 仿真结果及数据分析

在 110Mbps 的传输速率下,分别对上述两种方案在多个干扰 piconet (interfering piconet) 存在情况下进行误包率 (PER) 仿真,其中各干扰 piconet 与原参考 piconet 分别使用不同 TFC 码,横轴 $D(int)$ 和 $D(ref)$ 分别表示接收节点距干扰 piconet 和原参考 piconet 的距离。当干扰 piconet 数目大于 1 时,假设各干扰 piconet 距接收节点距离相等。基于上述设定,仿真结果如下。

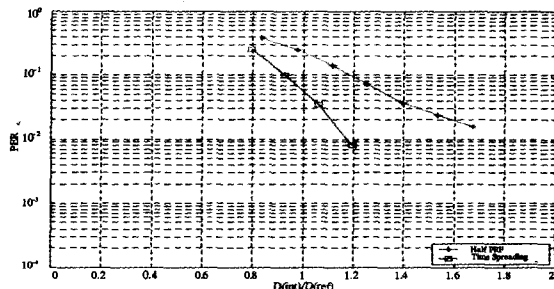


图 3 单个干扰 piconet 存在下的两种方案 SOP 性能比较

图 3 显示了在单个干扰 piconet 存在下的 time spreading 和 Half PRF 两种方案的 SOP 性能比较,从图中可看出前者在相同 $D(int)/D(ref)$ 比值下,误包率明显小于后者。下面表 2 通过进一步仿真,分别列出了在 1~3 个干扰 piconet 存在情况下两种方案的对比结果。

表 2 多个干扰 piconet 存在下的两种方案 SOP 性能比较

@10% PER, 110Mbps	1interfering Piconet ($d(int)/d(ref)$)	2interfering Piconet ($d(int)/d(ref)$)	3interfering Piconet ($d(int)/d(ref)$)
Time Spreading	0.9	1.24	1.6
Half PRF	1.2	1.58	2

从理论上讲,在 time spreading 中,每个 OFDM 信号被传输两次。即使某个子载波深度衰落导致某个信号受到干扰,由于其与另一个无干扰信号共同传输,在解码端将会减弱这种干扰的影响。而对于 Half PRF 而言,在单个干扰 piconet

存在时,按照原 TFC 编码方式,1/3 的 OFDM 信号会产生干扰,但是在传输时间减少一半的情况下保证相同的信号能量,每比特的传输功率也应相应增加 3dB;由于受到较高功率干扰信号影响,信号受损严重,一般无法恢复,导致误包率增高,多个干扰 piconet 存在时亦是如此。因此通过理论分析和仿真数据比较,time spreading 较之 Half PRF 能够更好的解决原标准中 piconet 码字分配所产生的干扰问题。

3.1.2 DS-CDMA

DS-CDMA 作为 802.15.3a 的另外一项原始提案,使用长度为 24 的三元码(±1, 0)字符,在 1.368GHz 的芯片速度下进行展频,供 4 组 piconet 同时运作。24 字符序列在 piconet 之间提供约 14dB 的隔离效果。

在实际应用中,原协议的抗干扰效果并不理想,因此应寻找更合适的正交码集。这里提出一种新的解决方案,即利用 LAS-CDMA^[5]中的一种基于代数编码构成的抗干扰能力很强的码字-LAS 码。LAS 码是一个智能扩频码,由 LS 和 LA 两个码集构成,LS 码凭借其良好的自相关函数和零相关窗的特点可以直接用作扩频码和地址码,将其零干扰多址优点融入 piconet 之间的码字分配上,将会获得新的效果。LS 码参见图 4。

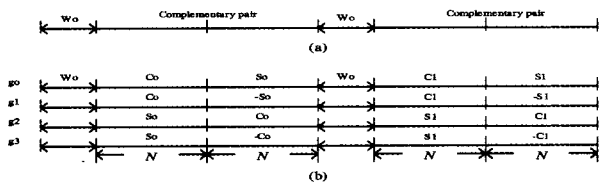


图 4 LAS 正交码的构成

LS 码分为两部分:C 码和 S 码,两部分自相关函数(除原点外)和互相关函数绝对值相等,符号相反,具有理想相关性。其构成有以下约束关系:如果码的长度为 N(C 码、S 码长度分别为 N/2),在 2N 个码中可以构造 N 个正交码,根据其原理有

$$g_1(n) = c_1(n) + s_1(n - N - \tau) \quad (1)$$

$$g_2(n) = c_2(n) + s_2(n - N - \tau) \quad (2)$$

$$p_{n+1}(k) = p_n(k) + q_n(k - 2^n) \quad (3)$$

$$q_{n+1}(k) = p_n(k) - q_n(k - 2^n) \quad (4)$$

其中 $p_0 = q_0 = 1$,做 n 次迭代,就可以得到长度为 $N(N = 2^n)$ 的符合条件的非对称互补序列 c_0, c_1, \dots ,然后取 $s_0(n) = (-1)^n c_0(n) \dots$ 即可构造如下码长为 16(非零位)的 LS 码如下:

- $g_0 : c_0(1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, -1),$
 $s_0(1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, 1)$
- $g_1 : c_1(1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, 1),$
 $s_1(1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1)$
- $g_2 : c_2(1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, 1),$
 $s_2(1, -1, 1, 1, 1, -1, -1, -1)$
- $g_3 : c_3(1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1),$
 $s_3(1, -1, 1, 1, -1, 1, 1, 1)$

实际使用时需在 LS 码的 C 码和 S 码前加零,可以增强抗多径的能力。当 $W_0 = 8$ 时,其 24 位 LS 码的自相关和互相关函数如图 5 所示。

由图 5 可看出其自相关函数和互相关函数在除零点之外具有均匀分布的零相关窗(IFW: Interference Free Window),或者说理想互补的特点,用其取代原 DS-CDMA 中的 24 位三

元码做扩频码可以大大减低系统内的干扰,大幅度提高系统容量。

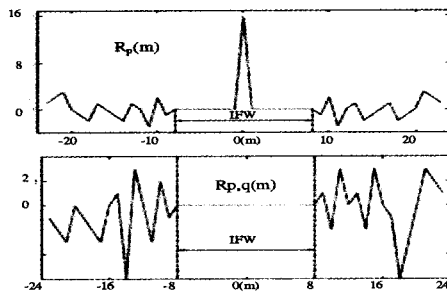


图 5 $2N + W_0 = 16 + 8 = 24$ LS 码的自相关和互相关函数图

3.2 Piconet 之间的同步机制

在个人局域网中,各设备之间通过发送 Superframe 帧进行通信,并采用 Beacon 来保证同步传输。在 IEEE 802.15.3 标准中,如图 6 所示,一个 Superframe 帧由 Beacon, 争用期(CAP)以及信道时间分配(CTA)构成,其中 Beacon 的同步脉冲保证了传输的同步性。PNC 节点发送一个标记为 B 的 Beacon 信标,然后其他 DEV 节点根据此信标来同步他们的传输。

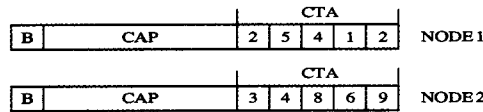


图 6 Piconet 中两节点的 Superframe 帧结构

多个 piconet 共存的情况下,某个 DEV 节点在受到其他 piconet 的干扰而丢掉 Beacon 的同步信号后,则不能有效进行通信,两个 PNC 在同时发送 beacon 信标时也是如此。因此我们需要在 PNC 和 DEV 之间进行协调,来确保各节点在发送 beacon 的时候不会受到干扰。但是事实上干扰可能发生在任何时间;Beacon, CAP 以及 CTA 阶段,因此解决干扰变得比较复杂。在 CAP 阶段,由于采用 CSMA 的冲突避免策略,可以保证最终的传输。但是在 beacon 和 CTA 阶段,由于无相应机制存在,干扰将会导致传输的失败,直接影响到最终的传输质量。

针对上述干扰问题,借鉴 MeshDynamics^[6]的提案,这里使用一个逻辑微微网的模型。所谓的逻辑微微网包含多个关联 PNC 组,当一个 piconet 进入到另外一个 piconet 的范围之内,这些 PNC 允许其 beacon 进行相应的偏移和排列,以达到各 piconet 间的无干扰共存。

根据上述分析,决定 beacon 信标是否可以同步传输,可以使用集合论来决定两个 PNC 之间是否存在一个公有集。每个节点都存储有一个可达节点集合,如果两个节点(2 和 3)之间没有公共节点,则它们可以同步传输。如果两个节点(1 和 2, 3 和 4)在它们各自的可达节点集合中有交集,则其中一个 beacon 的传输必然要滞后,如图 7。

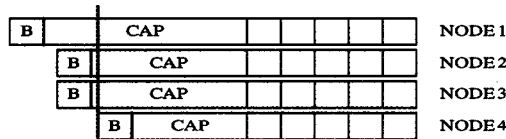


图 7 同步后的 piconet 中 PNC 节点的帧结构

因此,通过本文所提方法对端业务建模,可在系统分析阶段检查出端业务间的潜在冲突,尽早修改业务设计方案,减小业务实现后的维修成本。

结论 本文提出了端业务 LESS 脚本到 CPNs 模型的通用转化规则,实现了用形式化方法对 Internet 电话端系统业务建模分析。利用 CPN Tools 对所建模型仿真并分析系统状态空间,最终检测出业务冲突。目前已经研究了该方法在信令服务器和端系统中的应用,接下来将把这两种应用结合在一起,研究信令服务器中的 CPL 脚本和端系统中的 LESS 脚本之间的业务冲突。

参考文献

- 1 Wu Xiaotao, Schulzrinne H. Feature interaction in Internet telephony end systems:[Technical Report]. New York: Columbia University, 2004
- 2 Keck D O, Kuehn P J. The Feature and Service Interaction Prob-

- lem in Telecommunications Systems; a Survey. IEEE Transactions on Software Engineering, 1998, 24(10): 779~796
- 3 张智江,张云勇,刘韵洁. SIP 协议及其应用. 北京:电子工业出版社, 2005. 178~185
- 4 Wu X, Schulzrinne H. Handling feature interactions in the language for end system services. In: Reiff-Marganiec S, Ryan M D. eds. Feature interactions in telecommunications and software systems VIII, Amsterdam: IOS Press, 2005. 270~287
- 5 Wu Xiaotao, Schulzrinne H. End system service examples: [Technical Report]. New York: Columbia University, 2004
- 6 Wu X, Schulzrinne H. Less: Language for end system services in internet telephony. Internet Draft I-D, Internet Engineering Task Force, February 2005
- 7 Jensen K. An introduction to the practical use of coloured Petri nets. Lecture Notes in Computer Science, 1998, 1492:237~292
- 8 Christensen S, Mortensen K H. Design/CPN ASK-CTL Manual, version 0.9. 1996
- 9 Jensen K, Christensen S, Kristensen L M. CPN tools occurrence graph manual, version 0.1. 2002
- 10 Xu Yiqun. Detecting feature interactions and feature inconsistencies in CPL:[Master thesis]. School of Computer Science, University of Ottawa, 2003

(上接第 25 页)

由于 PNC 之间无法直接监听彼此的消息,则它们并不知道自己的 Beacon 是否应该滞后以及偏移量是多少。一种方法是依靠两个 PNC 之间的 DEV 节点对其所属 Piconet 的 Beacon 信息进行重传,并通知到其周围节点。在这里,DEV 起到了中介或者转发器的作用,这种 Beacon 的重传称为 HB (Heartbeat)。两个互相未知的 PNC 通过 HB 达到同步的过程如下(A 表示原 Piconet PNC, B 表示后续进入的干扰 Piconet PNC):

(1) B 请求信息后,收到从 DEV 发送的 HB,得知 A 的存在,发送自己的 Beacon 并在其中标记 A 为 SEEN 状态;

(2) DEV 收到 B 的 Beacon,看到 A 的状态已被标记为 SEEN,则标记 B 为 IDENTIFIED;

(3) DEV 发送 HB;

(4) A, B 听到 HB 之后,决定二者主次或先后关系,次级 PNC 将 Beacon 进行相应偏移,标记整个 CTAP,并发送 CTA 请求给主 PNC。DEV 收到该 Beacon,将 CTA 请求复制到 HB 中;

(5) 主 PNC 收到 HB,分配 CTA,相应调整 Superframe 长度,然后发送 Beacon;

(6) DEV 收到 Beacon,复制 CTA 信息到 HB,然后发送 HB;

(7) 次级 PNC 收到 HB,完成最终同步和偏移。

上述消息传递过程比较清晰,整个同步过程需要 6 个 Superframe(步骤 5、6 针对同一 Superframe)参与。另外给出一种替代方案,即将 Superframe 的一小部分预留给 PNC 作为 Beacon 时隙分配。例如,将设好的预留区分为 4 个 Beacon slots。在图 7 中,当 PNC 4 作为新节点进入时,通过向 DEV 请求信息得知预留区中已经有两个时隙分别被 PNC 1 和 4、5 使用,则它可以申请第三个 Beacon slot 并且更新自己的 Beacon 信息,整个同步过程可以在一个 Superframe 中完成。方案 1 灵活性强,但建立过程复杂;方案 2 实现简单,但可扩展性一般。二者各有优劣,实际应用中可结合使用。

3.3 路由、调度及其它问题

由于 UWB 中 Piconet 接入点在时间和放置地点具有不规律性,因此设备在 Inter-piconet 网内的通信非常复杂。如何解决其路由问题及 PMP 节点调度问题,以保证网间通信顺畅成了目前研究的热点。

在组网和路由方面,困扰的主要问题是路径的选择。目前的主要路径搜索模式为地址表路径搜索模式和需求搜索模式。这两种方式要么需要通信节点具有庞大的记忆体,要么在网内

发送广播信息,容易造成路径确认延迟或网内泛滥的询问路径信息,而一种基于 Piconet 设备地址的自定义路径方式相对较为适合 UWB 的随机组网模式。它根据设备地址大小的不同,确认每个节点的网内通信范围。当两个节点需要发送信息时,发送节点会判定目的节点是否在自己的通信范围之内。如果没有,则上传信息给主节点,由主节点传给相应的分节点,直到找到目的节点。这种方法基本不会增加节点记忆体开销,并且路径方式是唯一确定的,结构清晰,搜索路径快捷。

而在 PMP 节点调度方面,由于作为 PMP 的 DEV 单元以时分方式存在于不同的微微网中,PMP 节点的轮询原则上可采用循环轮询、优先级轮询等策略。但是鉴于不同 piconet 中设备接入的随机性,拟采用蓝牙中跳模式调度方式来解决此问题。

跳模式的本质是跳节点在所有与其相关的微微网中使用相同的约会窗口序列,并结合简单的信令协议,使所有跳节点的对端都知道跳节点是否在每个约会窗口存在于特定的链路中,从而减小时延。在跳模式中,当主设备在约会点开始轮询时,跳从设备向主设备通知其存在。此外,跳从设备可以为每个微微网预先分配一定数量的约会窗口,以加强与微微网内部调度策略的联系,同时这种跳模式可以允许新的微微网或节点设备加入,较好地满足了其接入随机性。

结束语 本文针对目前亟待解决的 Inter-piconet 网间的无干扰交互与通信问题,提出了建立完善的 Piconet 网间通信流程的解决方案,通过使用 LAS 正交码等方法分析解决了不同 Piconet 的码字分配干扰问题;提出逻辑微微网模型,通过 Beacon 偏移来实现 Piconet 之间的同步机制;并对路由及调度等问题逐一探讨,完成建立连接、同步、码字分配、路由等一系列过程,使得彼此未经协调的 UWB Piconet 之间能够并存运作。下一步我们准备就 Piconet 同步机制进行仿真,并且针对 UWB 组网的特点对其路由策略做进一步优化,从而促进 inter-piconet 网间通信问题的标准化。

参考文献

- 1 IEEE 802.15.3. Wireless MAC and PHY Specifications for High Rate WPANs [S], 2003
- 2 徐振阳,宴文华. 无线传感反应网络综述[J]. 计算机科学, 2005 (09)
- 3 MBOA Wireless MAC Specification for High Rate WPANs [S]. 2004
- 4 DS-UWB Physical Layer Submission to 802.15 Task Group 3a [S]. 2004
- 5 Chol B-J, Hanzo L. On the design of LAS spreading codes. In: Proc. 56th IEEE Vehicular Technology Conference [C]. vol 4. Vancouver, Canada, September 2002. 2172~2176
- 6 MDP Beacon Alignment [EB/OL]. <http://www.meshdynamics.com/WPAN.html>, 2004