

基于 Ptolemy II 的无线传感器网络自适应通信体系结构

郭剑峰¹, 陈潇君^{1,2}, 柯佳^{2,3}, 陈祖爵²

(1. 江苏大学附属医院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013;

3. 江苏大学 工商管理学院, 江苏 镇江 212013)

(tony_jdfy@hotmail.com)

摘要:针对现有的异构无线传感器网络(WSN)体系结构中,不同的数据链路层缺乏通用架构的问题,提出在网络体系中增加“属性装配层”的概念。采用 Ptolemy II 建模仿真平台,将属性装备层与数据链路层分别建模,首先采用属性装备层中的属性工厂模块分类各种通信协议原型,封装上层应用程序;然后采用装配工厂模块生产数据包头,分发于不同的网络;最后形成自适应的无线传感器网络体系。该体系融合了异构网络数据链路层,兼容了现有的平台、通信协议和网络机制,适用于未来的通信协议和机制。实验结果证明,基于该体系的通信系统内存占用和时间开销相对较小,具有自适应能力。

关键词:无线传感器网络;网络体系结构;Ptolemy II;自适应

中图分类号: TP393.03 **文献标志码:** A

Self-adaptive communication architecture of wireless sensor network based on Ptolemy II

GUO Jian-feng¹, CHEN Xiao-jun^{1,2}, KE Jia^{2,3}, CHEN Zhu-jue²

(1. Affiliated Hospital of Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

2. School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

3. School of Business Administration, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: In the existing heterogeneous Wireless Sensor Network (WSN) architecture, various data link layers lack a common structure. To solve this problem, the concept of attribute assembly layer was proposed. Based on the modeling and simulation platform of Ptolemy II, the authors modeled the attribute assembly layer and the data link layer respectively, and then put forward an adaptive architecture for WSN. In the attribute assembly layer, the attribute factory was designed to classify various prototypes of communication protocols and encapsulate upper applications, while the assembly factory was designed to generate packet headers and distribute packets to different networks. This architecture unifies the data link layers for heterogeneous networks, and it is well compatible with the existing platforms, communication protocols and network mechanisms. What's more, it can be applied to potential communication protocols and mechanisms. The experimental results show that the communication systems based on this architecture have low memory occupation and time cost, and also have good adaptive capacity.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); network architecture; Ptolemy II; self-adaptive

0 引言

随着无线通信技术的不断进步,无线传感器网络的蓬勃发展,出现了很多典型的无线通信技术,主要包括基于 3G^[1] 技术的无线广域网(Wireless Wide Area Network, WWAN),基于 IEEE802.16^[2] 技术的无线城域网(Wireless MAN, WMAN),基于 IEEE 802.11^[3] 技术的无线局域网(Wireless LAN, WLAN),基于 IEEE 802.15^[4] 和 Blue Tooth 技术^[5] 的无线个人网(Wireless Personal Area Network, WPAN)。对于现有的众多无线通信技术,以及不断涌现的新标准、新技术,无线网络中的应用程序和协议势必运行于不同的链路层之上,数据也不能依靠固定的链路层机制进行传送,因此,需要考虑现有的无线传感器网络的通信协议架构,希望可以采用一种与

链路层无关的机制进行独立的应用程序及协议的开发。

具有通用的可操作性的通信协议架构可以进行良好的代码重用,适应于链路层的兼容性、通用性、发展性,因此在无线传感器网络开发中具备很大优势。传感器网络相关的许多联盟和组织都相继提出了许多不同的异构网络通信协议体系,在日本的 e-Japan 计划的研究中,提出了一种未来移动通信系统结构(Multimedia Integrated network by Radio Access Innovation, MIRAI),设想实现终端用户在本网络内的通用接入^[6],但是该设想没有考虑到用户在多个网络中的通用接入问题。Sachs 提出了通用链路层(Generic Link Layer, GLL)的概念^[7],将无线链路层设计成兼容的通用模式,但是使用该技术,就会修改所有无线网络协议的链路层协议。Internet 工程任务组(Internet Engineering Task Force, IETF)设计并制定

收稿日期:2010-09-13;修回日期:2010-11-10。

基金项目:国家 863 计划项目(2006AA10Z258);江苏省自然科学基金资助项目(BK2009199);山西省科学技术发展计划项目(20100321066);江苏省高校研究生科研创新计划项目(CX08B_097Z);镇江市科技支撑计划项目(SH2009002)。

作者简介:郭剑峰(1973-),男,江苏镇江人,工程师,主要研究方向:无线通信;陈潇君(1981-),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、无线通信;柯佳(1982-),女,江苏镇江人,博士研究生,主要研究方向:图像处理、无线通信;陈祖爵(1951-),男,上海人,教授,主要研究方向:无线通信、网络技术、嵌入式系统。

了低功率的 IPv6 无线个人区域网络 (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks, 6LoWPAN) 架构^[8], 如图 1 (b), 该架构可以很好地扩展于应用程序和协议上; 但 6LoWPAN 没有从根本上解决协议的自动匹配问题, 而是仅仅添加了一个 6LoWPAN 适配层来进行 IPv6 到 IEEE802.15.4 的协议格式转换。

本文为了保证通信体系结构的自适应能力, 基于 6LoWPAN 的思想, 在传统网络体系结构基础上, 如图 1 (a), 将网络体系重新封装, 引入属性装配层, 即传感器网络的自适应通用架构, 如图 1 (c)。属性装配层包括两部分: 属性工厂和装配工厂, 可以设计为具备适应多种不同的潜在通信协议, 并具体表现为对现有的不同链路层的兼容。通过仿真实验看出, 本文提出的自适应网络体系结构 (以下简称 Self-Adaptive) 可以很好地映射于传统典型的无线传感器网络协议, 包括数据包分发、数据包集、mesh 路由等。通过属性工厂可以很好地将上层通信机制传达的数据包描述属性根据特定情况转换为相应的通信。



图 1 网络体系结构比较

1 自适应通信体系结构

自适应适配层是自适应体系结构的核心内容, 它代表了

通用的无线传感器通信架构, 如图 2 所示。自适应体系结构统一和简化了针对传感器网络的特定通信协议, 使得运行于适配层之上的通信协议可以很好地和底层中的媒体访问控制 (Media Access Control, MAC) 层和链路层保持互通性, 这些功能可以通过属性工厂来实现。自适应适配层使得通信协议及应用程序与输出数据包的头部格式保持分离, 标准数据包头部格式由独立的装配工厂包格式转换模块来完成的。自适应通信体系结构由三部分组成: 属性工厂 (用于提供一系列通信接口给上层应用程序)、应用程序及通信协议 (运行于属性工厂之上)、装配工厂 (用于封装属性工厂传来的数据包)。应用程序可以直接调用属性工厂或运行于通信协议之上。

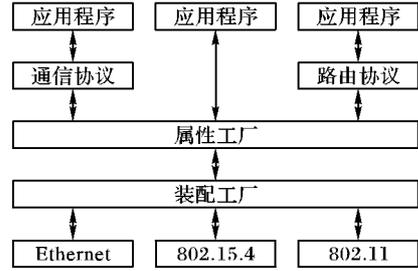


图 2 属性工厂的通信原型层次划分

1.1 属性工厂

属性工厂协议栈定义了一系列通信原型, 具体的通信原型如表 1 所示, 从单跳传送到多跳传送。位于其上层的应用程序和协议可以调用任意一个或多个通信原型, 其协议栈采用层次性的结构构成, 相对复杂的协议由相对简单的协议组成, 属性工厂协议栈的层次结构如图 3 所示。

表 1 协议通信原型

通信原型名称	英文缩写	工作方式
匿名单跳广播	asb	通过单跳广播传送给所有邻居节点的方式, 无源地址和目的地址信息
源地址单跳广播	ssb	在匿名单跳广播的基础之上增加了源地址属性到输出数据包
单跳传送	sh	在源地址单跳广播基础上增加了目的地址属性到输出数据包
单跳重传	shr	在单跳传送的基础上增加了重传机制
单跳确认	sha	单跳确认采用可靠性传送方式(确认和重传)将一个数据包发送给邻居节点
非重复单跳广播	nsb	通过停止转发经由其他邻居节点发来的具有相同数据包属性的数据包来减少总的数据包传送次数
非重复源地址单跳广播	nr-ssb	非重复单跳广播的基础上添加了源地址数据包属性
多跳传送	mh	多跳传送原型通过发送数据包逐跳到达特定的目的节点, 需要路由协议
带确认的多跳传送	amh	在多跳传送基础上增加了相邻转发之间的单跳确认功能
网络洪泛原型	fld	在原有非重复源地址单跳广播基础上增加了逐级传送机制

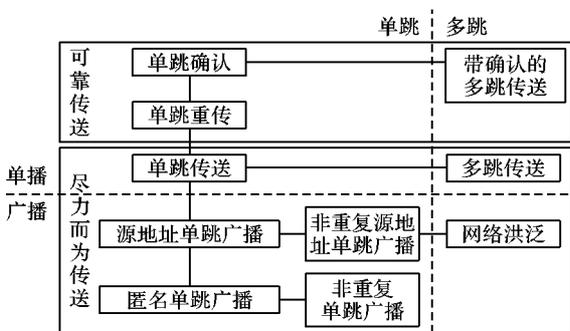


图 3 自适应通信体系结构示意图

属性工厂支持单跳和多跳的传送原型, 其中多跳传送原型并没有指定数据包是如何通过网络进行路由选择的, 路由选择的任务则交给了位于上层的通信协议来完成, 通信协议根据数据包的包头字段决定如何选择适当的下一跳地址。路由协议和多跳模型的分离有助于实现任意一种或多种路由协议, 只需添加或删除所需要的路由协议即可, 具体多跳的传送

细节由通信原型来完成。某种意义上来说, 通信模型提供了数据传送的高度抽象, 使得协议逻辑和传送模型相互分离。

属性工厂采用数据包属性方式代替了头部定义方式, 使得数据包属性和传统的数据包头部一样, 包含了通信中所需要传达的信息。可以说, 数据包属性信息是一种头部字段数据的抽象表示。属性工厂预定义了若干数据包属性, 包括数据包 ID、数据包类型、收发端地址、跳数、生存期、重传次数、可靠性、链路情况等, 作用域一般设为 2, 应用程序和协议还可以定义附加属性。

1.2 装配工厂

装配工厂既可以产生以比特方式封装的数据包头部, 又可以产生能够适用于特定链路层的数据包头部。应用程序和协议将应用层数据传递给属性工厂, 由属性工厂负责添加数据包属性, 而后将应用数据和数据包属性传递给其下的装配工厂; 装配工厂的数据包头部格式转换模块将根据数据包属性和链路层情况产生相应的头部, 将其传递给发送模块; 发送模块的 MAC 层会根据数据包头部的字段含义决定数据包的

转发方式。

数据包头部由独立的第三方头部转换模块来完成,这些模块将相应的应用层数据和数据包属性进行封装,生产出具备典型格式的数据包。这都是通过自适应适配层的不同装配工厂来完成的。不同的装配工厂制定不同的数据包头部规范,并创建相应规范的数据包。例如对于以太网和 IEEE 802.15.4 的兼容性问题,通过自适应适配层可以轻松地将应用层数据封装成为具备 802.15.4 MAC 层头部的数据包和具备 UDP/IP 头部的数据包。

自适应适配层不同于传统协议架构的意义在于,运行于自适应适配层之上的应用程序无需考虑是否兼容于底层的通信协议或者潜在的通信协议,装配工厂就可以很好地承担模拟潜在通信协议的任务,在某种程度上,装配工厂只需要进行头部格式转换,模拟所需链路层通信协议即可。

2 基于 Ptolemy II 的 WSN 自适应通信体系结构

Ptolemy 是由美国 UC Berkeley 大学开发的,研究并行、实时嵌入式系统级异构建模、仿真与设计的平台^[9],即将复杂的系统分解为多个系统,每个子系统由一个定义明确的计算模型管理组件间的交互实现,而不同的子系统行为可在不同层由不同的计算模型控制实现。本文的无线传感器网络系统的设计遵循了面向角色建模仿真要求,重点分析了无线传感器网络系统中如何融合异构体系结构的原理和机制,并基于 Ptolemy II 建模仿真平台环境完成了系统建模。

2.1 建立 WSN 整体模型

系统基于文献[10]提供的 WSN 原型基础,扩展了 WSN 异构体系结构的处理模块,主类的统一建模语言 (Unified Modeling Language, UML) 结构见图 4。

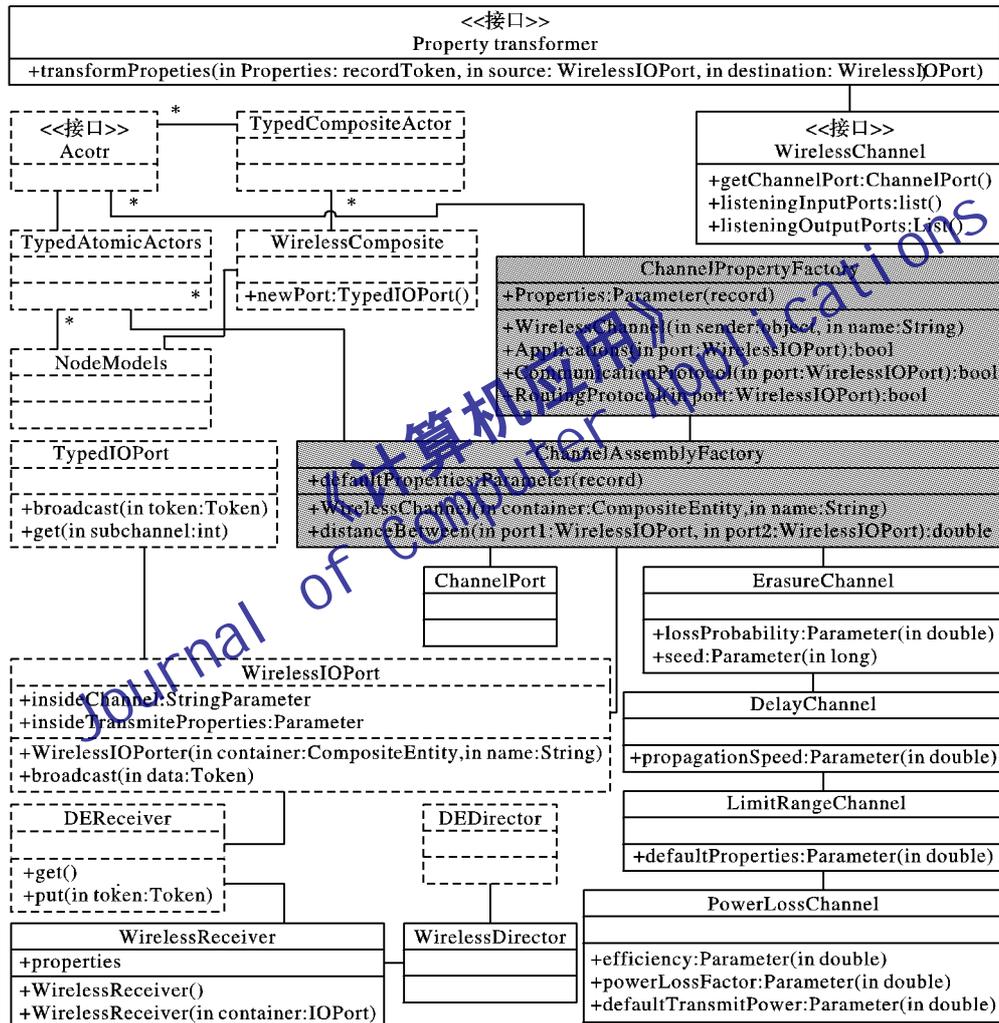


图 4 Ptolemy II 无线传感器网络系统建模主类 UML 图

一个完整的无线传感器网络系统模型是由无线域 (WirelessDirector)、节点模型 (NodeModels)、无线信道 (WirelessChannel) 和无线输入输出端口 (WirelessIOPort) 四部分组成,其他部分均可以通过这四个主类扩展。其中,无线域负责指挥无线传感器网络系统模型中所有的系统行为,通过无线信道来决定侦听到广播的节点。节点模型创建无线输入输出端口 (Input/Output, I/O),并能检查其输入端口是否接收到无线信息,如果目前没有信息,该节点就会向其可及范围内的所有节点广播 (由无线域定义该行为)。节点模型是一个原子角色,所以对于不同特点的无线传感器网络系统,其传感器节点的特点取决于该角色的合成。无线信道决定了无线信

息在传感器节点间的传输方式,除了决定哪个节点在传输范围内之外,还考虑了信息在传输过程中的延时及稳定性,信道的延时及信道传输范围由发送者信号范围参数和信号稳定性决定。无线信道是整个无线传感器网络系统的主心骨,它们负责网络中传输的所有信息;无线 I/O 端口是 Ptolemy II I/O 端口中的一种,专门负责发送及接受无线信息。

基于无线信道的属性工厂和装配工厂的逻辑层结构如图 4 中灰色底纹的框标示,属性工厂封装了上层应用程序 (Application)、通信协议 (CommunicationProtocol) 和路由协议 (RoutingProtocol) 的行为,装配工厂负责生产数据包头,并分发于不同的网络。

2.2 建立异构体系模型

如图 5 所示,采用 Ptolemy 层次异构的面向角色系统级设计方法学,基于 Ptolemy II 的无线传感器异构网络通信系统的系统级行为描述,将无线传感器异构网络通信系统的属性工厂模型分为四个通道模块模型分别建模,其中应用程序对应于 ApplicationChannel, 通信协议对应于 CommunicationProtocolChannel, 路由协议对应于 RoutingProtocoChannel。装配工厂中则分别模拟了 802.15.4、802.11 和 Ethernet 等异构网络的通信。

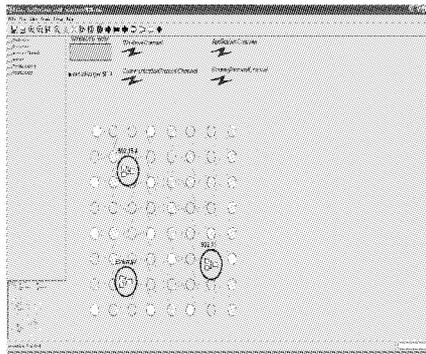


图 5 异构体系模型

3 系统测试

实验中测试环境是 Pentium Dual-Core 2.5 GHz CPU, 1 GB

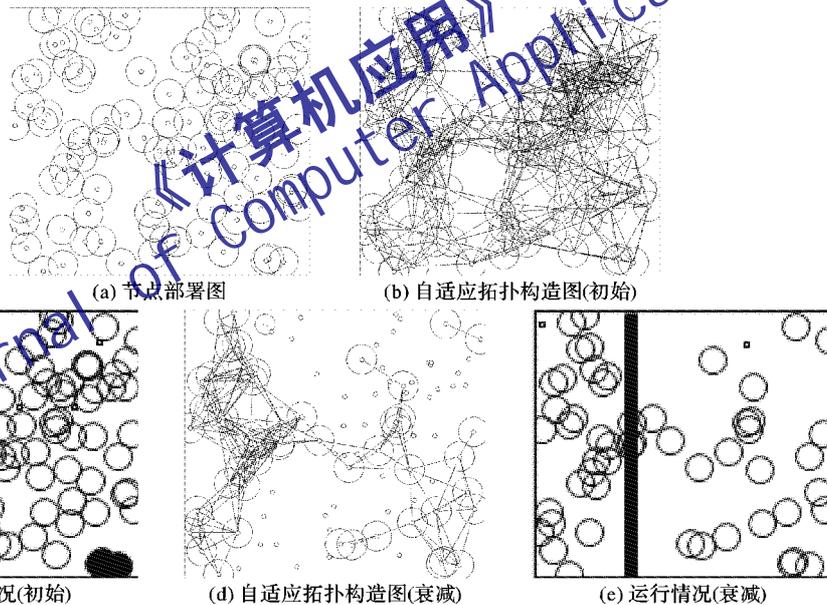


图 6 自适应网络实验仿真图

表 2 模块加载情况

模块	ROM 占用情况/B	RAM 占用情况/B
自适应缓冲区	416	168
队列缓冲区	320	730
asb	134	2
ssb	114	2
sh	124	2
shr	272	16
sha	254	4
nr-sb	390	15
nr-ssb	406	15
mh	246	2
amh	266	3
fld	356	7

SDRAM 和 5 400 RPM IDE 硬盘,运行的操作系统是 Windows 2000 Server。为了便于拓扑结构的比较,我们固定网络规模为 $100 \times 100 \times 100$,网络节点数为 200,并固定此时的节点半径为对应的网络最佳覆盖半径。

3.1 网络通信情况分析

100 个传感器节点被随机部署在试验区域内,如图 6(a) 所示。通过实验仿真图 6(b)~(e) 可以看出,整个虚拟拓扑结构图脉络清晰,所有位置的节点都具有良好的连接属性。在网络的初始情况和通信能力衰减之后,都能建立有效的网络通信体系。

3.2 内存开销

由于传感器节点的内存受限特性,自适应适配层的空间占用成为可行性和有效性的重要测量指标。总的内存占用分为两部分:一部分为预编译的代码段占用,存储于片上只读存储(Read-Only Memory, ROM);一部分为可用于运行代码的数据段部分,包括各种缓冲区。自适应缓冲区包括应用程序和各种数据包头属性,驱动程序在进行写入时具有系统优先级;而用于物理层的队列缓冲则称为队列缓存区,是由队列池动态分配的,其初始化内容来自于自适应缓冲区的复制。具体队列缓冲区的数目和管理方式由相应的应用程序来负责。所有模块的加载情况如表 2 所示。结果表明,队列缓冲的运行开销占用是最大的,与队列缓冲区的数目有关,具体仍取决于应用程序和协议的分配。

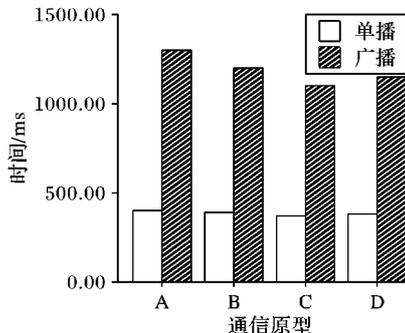
3.3 数据往返及执行时间

为了测量自适应适配层属性的开销对数据包传送的影响,采用 802.11、802.15.4、Ethernet 和 Self-Adaptive 协议栈的节点进行对比的方式进行。在链路层协议进行两个节点传输测试,分别采用单播和广播原型进行测试,结果表明两者数据包的往返时间差异不显著,如图 7 所示。产生此种结果的原因在于往返时间大部分取决于等待另一个节点唤醒的时间。

从应用程序调用自适应适配层功能函数算起到数据包的成功发送为一个原型执行时间。上层选取 asb、ssb、sh、sha 和 mh。考虑数据负载大小的影响,采用 802.11、802.15.4、Ethernet 和 Self-Adaptive 分别进行测试,执行时间开销对比如图 8 所示。

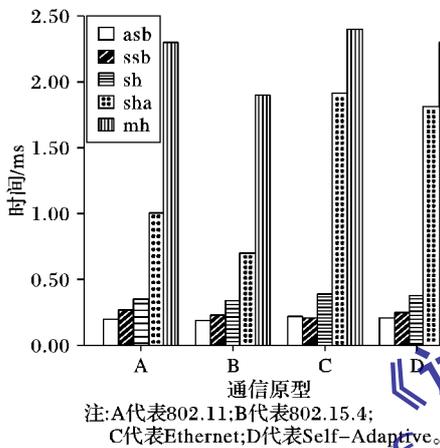
结果表明最底下三层的原型处理时间如 asb、ssb、sh 的开销与经典协议栈的通信原型比较差别不显著,而较上层的通信,如 sha、mh 则会比经典协议栈的开销大,一般相差 0.5 ms

左右,原因在于较上层的通信原型应用了更多的缓冲区,在进行数据包头属性的转换过程中增加了从自适应缓冲区到队列缓冲区的传送时间,而 802.11 和 802.15.4 协议栈无需进行数据包头属性的转换,直接进行包头封装并发送到对方缓冲区,相对执行时间较短。



注:A代表802.11;B代表802.15.4;
C代表Ethernet;D代表Self-Adaptive。

图7 往返时间的前后对比



注:A代表802.11;B代表802.15.4;
C代表Ethernet;D代表Self-Adaptive。

图8 不同原型的执行时间比较

3.4 传输速率和吞吐量

为了比较 IEEE802.15.4、802.11、Ethernet 与 Self-Adaptive 协议栈的性能,分别测量四者的信道传输容量和吞吐量。由图9的实验结果可以看出,节点在初始运行时,四种体系结构的信道传输率呈类似的线性变化,随着节点负载的增加,各种体系结构的传输率略微变化但基本维持在高水平,其中自适应体系结构由于协议本身的信道适应能力,其信道利用率可以达到98%以上,高于其他两种体系结构。

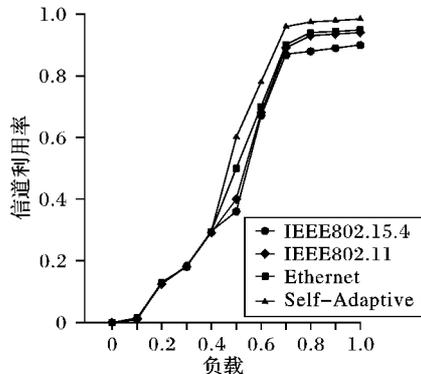


图9 信道传输容量随负载变化的比较

由图10可以看出,节点的吞吐能力会随着节点数目增加而减少,原因在于节点数目增加会造成信道的拥塞,从而降低了数据吞吐能力,由于 IEEE802.15.4 的协议栈简单,需要利用的缓冲区较少,组网结构比较固定,所以在三者中吞吐量最高且趋于稳定。而 802.11 和自适应结构均增加了适配层,在

拥塞控制实现方面增加了协议的复杂度,且组网结构比较灵活,同时在特定情况下需要考虑到通用的可操作性和不同信道的匹配支持,所以节点吞吐量会相应地降低,但随着节点数目的增加,802.11 和自适应结构两者的吞吐量趋于持平。

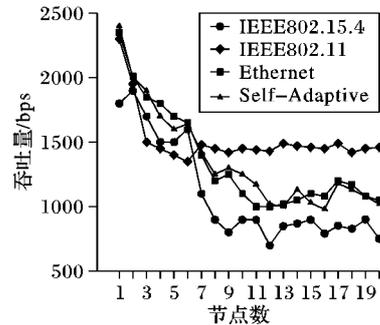


图10 吞吐量随节点数目变化的比较

4 结语

针对当前无线传感器网络的发展现状和各种体系结构,提出了新型的自适应通信体系结构。采用自适应适配机制的体系结构可以解决跨层通信的问题,对于具备层次性的协议栈来说,划分不同的协议逻辑分别进行数据包头部描述有利于保证应用程序屏蔽底层的平台,并向上层提供统一的属性接口服务,而无需打破现有的协议规则。其次,采用轻量级的自适应通信架构,可以减少对于实现不同通信协议而进行频繁代码改动所带来的开发复杂度。该结构不仅可以良好地兼容 802.11、Ethernet 及 IEEE802.15.4 MAC 层,而且独立于链路层,能够与任何协议网络实现无缝互联,具有很好的扩展性和可操作性。通过系统仿真测试证明,此协议架构的内存占用和时间开销较小,信道利用率高,吞吐量适中,能够很好适用于无线传感器网络的各种应用领域。

参考文献:

- [1] 3GPP. TS 33.102 V8.0.0, 3rd generation partnership project; technical specification group services and system aspects; 3G security; security architecture (Release 8) [S], 2008.
- [2] IEEE Std 802.16-2004 (Revision of IEEE Std 802.16-2001): IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems [S], 2004.
- [3] IEEE 802.11e-2005. Wireless LAN for Quality of Service [S], 2005.
- [4] IEEE Std 802.15.4-2006: Part 15.4: Wireless MAC and PHY layer specifications for low-rate wireless personal area networks [S], 2006.
- [5] Bluetooth SIG. Bluetooth Core, Specification of Bluetooth System, Version 1.1 [S], 1998.
- [6] WU GANG, MIZUNO M, HAVINGA P. MIRAI architecture for heterogeneous network [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 2 (2): 126-134.
- [7] SACHS J. A generic link layer for future generation wireless networking [C] // IEEE International Conference on Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003, 2: 834-838.
- [8] MONTENEGRO G, KUSHALNAGAR N. 6LoWPAN: Overview, assumptions, problem statement and goals [S/OL]. (2005-06-15) [2007-03-19]. draft-ietf-6LoWPAN-problem-00.txt.
- [9] EKER J, JANNECK J, LEE E A, et al. Taming heterogeneity - the Ptolemy approach [J]. Proceedings of IEEE, 2003, 91(1): 127-144.
- [10] LEE E A. Finite state machines and modal models in Ptolemy II, UCB/EECS-2009-151 [R]. Berkeley: University of California, EECS Department, 2009.