

ZigBee 网络技术研究综述^①

蒲泓全^{1,2}, 贾军营², 张小娇², 孙建伟²

¹(中国科学院大学, 北京 100049)

²(中国科学院 沈阳计算技术研究所, 沈阳 110168)

摘要: ZigBee 是一种供移动电子设备使用的短距离、低功耗、低速率的无线通讯技术, 在智能交通、环境监测等许多领域有广泛的应用, 已成为当前的一个研究和应用热点. 对 ZigBee 网络拓扑结构、路由选择方法和基于网关的 ZigBee 互连技术进行分析和综述, 提出了 ZigBee 技术待解决的问题和未来的研究方向.

关键词: ZigBee; 拓扑结构; 路由; 混合互连

A Survey on ZigBee Network Technology Research

PU Hong-Quan^{1,2}, JIA Jun-Ying², ZHANG Xiao-Jiao², SUN Jian-Wei²

¹(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

²(Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China)

Abstract: ZigBee is a short-range, low-power, and low-rate wireless communication for mobile electronic devices. Which is widely used in many areas, such as intelligent transport, environment monitoring and so on. Nowadays it has become a research and applied hotspot. This paper analyzes and synthesizes ZigBee network topology, routing method and interconnect technology based on ZigBee gateway. At last it proposes the Zigbee technical problem that needed to be solved and future research directions.

Key words: ZigBee; topology; routing; mixed interconnect

1 引言

ZigBee 是一种无线通信技术, 是物联网^[1,2]实现的重要技术, 在许多领域有着广泛的应用^[3-5]. ZigBee 网络^[6]是自组织网络, 大部分节点采用电池供电, 当电池电量用尽且没有及时供电, 网络应该在较短的时间内恢复正常使检测不受影响, 这就对网络的拓扑结构和路由选择方法有比较高的要求, 选择适合环境的拓扑结构和路由方法是 ZigBee 研究的热点领域; ZigBee 的不足在于不能与 IP 网络互连互通, ZigBee 有着不同于 IP 网络的网络封包格式, 严重阻碍了 ZigBee 的应用和发展. 因此 ZigBee 与 IP 网络互连的研究对 ZigBee 的发展有着重要的影响, 也是将来研究方向之一. 本文对 ZigBee 网络拓扑结构、路由选择方法和基于网关的 ZigBee 互连技术进行分类研究, 并分析了 ZigBee 网络技术发展的需要解决的问题.

2 ZigBee技术概述

ZigBee 可工作在 2.4GHz、868MHz 和 915MHz 频段上, 分别具有最高达 250kbit/s、20kbit/s 和 40kbit/s 的传输速率^[6,7].

2.1 ZigBee 协议栈

ZigBee 协议栈分为两部分, IEEE802.15.4 定义了物理层(PHY)和媒体访问控制层(MAC)^[6,7]. ZigBee 联盟^[8]在此基础上定义了网络层(NWK)和应用层(APL), 每一层为上一层都提供服务: “数据实体”提供数据传输服务, “管理实体”提供管理控制服务. ZigBee 协议框架图如图 1 所示.

2.2 ZigBee 网络的各种设备^[8]

ZigBee 网络中, 支持两种类型的物理设备: 全功能设备和精简功能设备.

① 全功能设备: 支持任何拓扑结构, 可以成为网

① 收稿时间:2013-03-06;收到修改稿时间:2013-04-02

络协调器,能和任何设备通信。

② 精简功能设备:只能和网络协调器通信,不能成为网络协调器,实现非常简单。

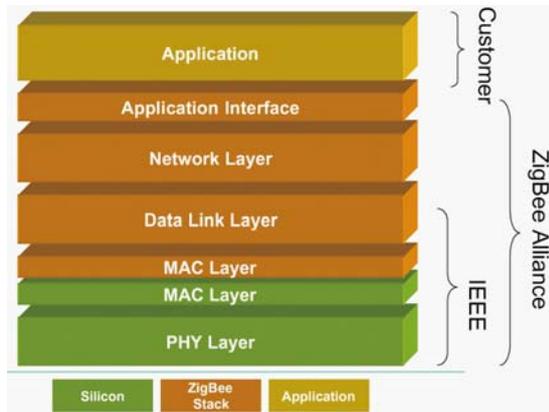


图 1 ZigBee 协议

ZigBee 网络通常有三种设备:协调器,路由器和终端节点。

① 网络协调器:是三种设备类型中最复杂的一种,主要功能建立一个网络、管理网络节点、存储网络节点信息等,是全功能设备。

② 路由器:负责将申请加入网络的新的 ZigBee 终端节点添加到网络拓扑中,然后对新加入的节点进行管理和维护并和其他节点通信,是全功能设备。

③ 终端节点:没有维护网络的能力,能轻易的与路由节点结合在一起,满足用户对一些数据测量的需求。是精简功能设备。

2.3 ZigBee 网络的拓扑结构

ZigBee 网络主要有三种组网方式^[8,9]:星形,簇状型和网状型,其拓扑结构如图 2 所示。

① 星形:星型网络的数据和网络命令都是通过协调器传输^[9]。该网络结构简单;协调器需要承担较多的管理工作;网络的覆盖范围有限。文献[10]采用 PIC18LF4620 单片机和 CC2420 无线收发模块作为硬件平台,在 ZigBee 协议栈上组建了星型网络,文献[11]和文献[12]将星型网络用于农业检测和家电智能化。

② 簇状型:是多个星形拓扑的集合。若干个星形拓扑连接在一起,扩展到更广阔的区域。可以实现网络范围内“多跳”信息服务的拓扑结构^[13,14],树簇形拓扑最值得注意的地方就是它保持了星形拓扑的简单性:较少的上层路由信息、较低的存储器需求。但是树形结构不能很好的适应外部的动态环境^[15]。文献[16]和[17]都是

在该拓扑结构上建立了多播机制,在保证高质量通信效果的基础上有效降低了延迟。文献[18]将树簇型拓扑结构的 ZigBee 网络运用于振动检测中。文献[19]在树簇型拓扑网络上提出了基于能量均衡的路由算法,通过实验仿真提高了该拓扑结构的健壮性。

③ 网状型:是一个自由设计的拓扑,具有很高的适应环境的能力。网络中的每个节点都是一个小的路由器,都具有重新路由选择的能力,以确保网络最大限度的可靠性^[20,21]。文献[20]在网状型拓扑结构的环境下提出了“树形+距离矢量”的路由算法,并基于飞思卡尔的 MC13224 组建了网状型的 ZigBee 网络,文献实验验证了算法的性能和网络拓扑结构的稳定性。文献[22]通过改变节点的通信半径来评估 Mesh 网络的性能,通过模拟实验得出不同通信半径对网络的性能有较大的影响,同时,参数 MY_ROUTE_TIMEOUT(当收到 RREP,节点设置的该路由的生命期)和 ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT(激活路由的生命期)取值不同也对网络性能有较大影响,当数据包发送较为频繁的时候,网络性能下降,能量消耗增加,这样就需要修改这两个参数值来增加网络的性能。

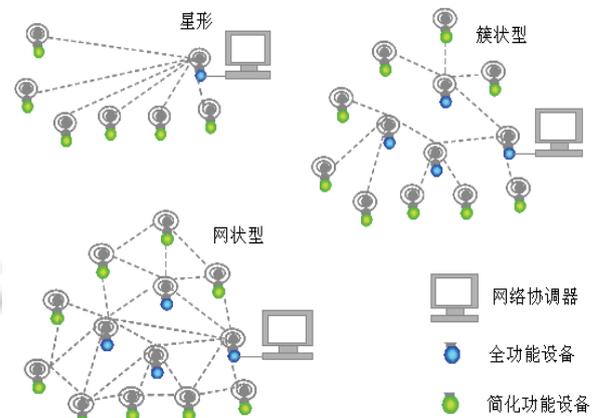


图 2 ZigBee 三种拓扑结构

3 单播路由方法

由于多播和组播相当于多个单播,所以只分析单播路由方法,前面部分是路由器或协调器节点的路由,后面部分分析末端节点的路由。

3.1 树路由

树路由^[23]是 ZigBee 当中最基本的路由方式。树路由就是数据包沿着树的路径传递,它依赖于树形编址^[6,23]。正是树形编址的方式使得根据目的地址和本身地址的

比较,就可以知道下一跳节点的地址.在树形编址当中,节点计算 $CSkip(d)$ 函数^[23]来给路由器子节点预留地址段,其中的第一个地址是路由器子节点本身的地址,那么对于路由器来说,如果目的地址不在这个地址段范围内,就意味着目的地址节点不是自己的子孙节点,显然下一跳应该是父节点.

文献[24]改进了传统的树路由算法^[23],笔者算法依据邻居节点的路由表而不是树的拓扑结构,包被送往邻居节点到达 PAN 协调器的最短路径上,结果表明该算法减少了端到端的延迟,增加了网络吞吐量和减少了网络的总体能量消耗.

在基于树路由的数据收集过程中,单个节点没有考虑优化的路由选择,网络的拥塞程度和节点的能耗消耗不均,这样会降低网络的性能和寿命,基于这个原因,文献[25]提出了一个轻量级的树路由算法(EAMTR),该算法依赖于全局路由表进行局部路由的优化,从而可以均衡各个节点传递数据时的负载,减少到达协调器的跳数.该方法可以显著提高网络的性能和寿命,均衡各个路由的负载.

文献[26]提出了基于邻居表的改进树路由算法(NTR).通过邻居表中节点的选择策略,尽可能地找到距离目的节点最近的邻居节点,并保证每一次的选择都是没有重复出现的邻居节点,避免了不必要的计算量和存储空间.NTR算法在一定程度上可以解决树路由原有算法不灵活的缺点,节省了地址空间,提高了路由效率.

上面文献[24-26]中的树路由过程除了必要的几个网络拓扑参数之外,不需要存储其他的信息,计算也是比较简单,但是由于智能沿着树的路径传递数据,路径单一,效率通常较低,而且可靠性不足.

3.2 网状网路由

网状网路由为 ZigBee 网络提供了高效的路由,是一种重要的路由方式.适用于网状网的路由算法很多,ZigBee 所采用的是 AODV 路由算法^[27,28]的简化版本 AODVjr^[29].这种路由算法适用于拓扑或通信环境有时发生变化,承载数据量不是很重的网络.但直接适用 AODV 路由算法对于 ZigBee 网络仍然有些复杂和耗能,因此 ZigBee 适用的是 Ian D.Charkeres^[28]对 AODV 简化的版本 AODVjr.

文献[30]提出了自学习的网状路由算法(SLR),该算法继承了树路由的低开销和网状路由的路径效率.SLR 包含一个监听和缓存的机制,不依赖于发送一些

路由探测包,该机制发送数据包仅仅依赖于地址和监听过程,每个节点包含两个表.邻居表包含与源节点相连的邻居节点,延迟表的表项是源节点经过某邻居节点到达目的节点的路由延迟,这个路由延迟就是经过自学习过程获得,该算法有效降低了网状网端到端的延迟.

文献[31]提出了优化网状网路由的层次路由算法(EHRP),该算法基于 ZigBee 分层解决方案发现最短的分层路径,当某一链路失效时,节点可以通过邻居表恢复.两个节点之间层次路径所经过节点的跳数可以通过公式得到:

$$NH(A, B) = D(A) + D(B) - 2D(FCA(A, B))$$

$NH(A, B)$ 是经过节点的个数. $D(X)$ 是节点 X 的深度. $F(A, B)$ 是 A 和 B 共同的祖先节点.可以通过文献中相关的算法获得 $D(X)$ 和 $F(A, B)$.从而可以通过 $NH(A, B)$ 的值选择相关的层次路由.

3.3 多到一路由

在无线传感器的一些应用中,网络中传感器节点的数据都会传送到一个汇聚节点,这个汇聚节点可能是一个网关,然后通过网关把数据传到远端服务器.这种情况下,网络中的传感器节点都需要建立到达汇聚节点的路由,由于传感器节点的个数通常非常多,如果遵循树路由的方法,建立这么多条路由,网络拓扑受限,而且路由效率较低^[26];如果遵循网状网路由 AODVjr 的方法,路由发现的广播信息将非常多,同时进行多个路由发现将造成“广播风暴”问题,过多的广播信息可能造成整个网络瘫痪^[28].因此针对这种情况,ZigBee 当中有一种特殊的路由方式,称为多到一路由^[6],就是多个节点到一个节点的路由.

从一般节点到汇聚节点的路由跟前面所说的网状网路由是一样的.都是节点通过查找路由表获取到达汇聚节点的下一跳节点地址,然后把数据包发送到那个节点,直至到达目的节点.但是从汇聚节点到其他节点的路由存在问题,因为其他节点可能数量庞大,汇聚节点或许不能存储那么多的路由项.文献[32]中采用一种临时存储的方式,即只有一般节点要发送数据到汇聚节点之前,才建立汇聚节点到它的反向路由.方法是发送数据包之前,先发送一个路由记录命令到汇聚节点,命令的格式如图 3 所示.命令中包含所有中转节点地址的列表.开始时,中转节点地址列表为空,中转数设置为 0.没经过一个中间节点,中间节点都会把自己

的地址添加到中转节点地址列表当中,然后把中转数加 1,再把新的路由记录命令发送出去,直至达到汇聚节点.汇聚节点把中转地址列表记录到路由记录表(如表 1)当中,这样就把汇聚节点到源节点的全路径都记录下来.当汇聚节点收到数据包之后,汇聚节点就可以根据路由记录表当中记录的路径返回数据.

Octets: 1	Variable
Relay count	Relay list
NWK command payload	

图 3 路由记录命令

表 1 路由记录表

名称	类型	有效范围
目的地址	整数	0x0000-0xffff7
中间节点数	整数	0x0000-0xffff
路径	地址列表	—

4 基于网关的网络互连技术

ZigBee 有一个缺点,就在于与 IP 网络的互联互通. ZigBee 有着不同于 IP 网络的 MAC 层和网络层,网络封装格式不兼容^[33]. 这个问题严重阻碍了 ZigBee 在各个应用领域的发展. 因此 ZigBee 网关的设计对 ZigBee 网络的推广具有重要的作用.

4.1 ZigBee 网关

ZigBee 网关是连接 ZigBee 网络和另一种非 ZigBee 网络的设备. ZigBee 联盟目前只定义了 IP 网络的网关^[34],所以 ZigBee 网关就是指 ZigBee/IP 网关. ZigBee 网关使得 IP 网络中的设备可以和 ZigBee 网络进行通信.

文献[34]是 ZigBee 联盟推出的第十个标准 ZigBee 网关,该网关标准支持以下 ZigBee 标准: ZigBee 楼宇自动化、ZigBee 医疗保健、ZigBee 家庭自动化、ZigBee 零售服务等. 该标准的推出将会使得与互联网连接整合变得简单,进一步促进对 ZigBee 技术的利用和研究.

4.2 ZigBee 网关架构

文献[35-38]等人采用的架构方法是嵌入式处理器加上 ZigBee 模块,如图 5 所示.

应用程序		
ZigBee 协议栈	任务管理	
剪裁的嵌入式操作系统		
收发模块	嵌入式	存储模块
显示模块	处理器	IP 网

图 5 网关总体结构

在整个系统中,网关一端连接 Internet,一端连接 ZigBee 网络.所以在网关的网络接入方面,面向 Internet 和 ZigBee 网络的通信模块必不可少.对内的网络连接部分,选取 ZigBee 模块作为汇聚节点,负责 ZigBee 部分的网络建立、维护和数据传输功能;嵌入式处理器负责连接 IP 网络并具有 IP 协议和 ZigBee 协议进行转换的功能;从而实现两种不同网络之间的互连.

5 ZigBee 技术需要解决的问题

尽管 ZigBee 技术在 2004 年就被列为当今世界发展最快,最具市场前景的十大新技术之一;在长期应用 ZigBee 技术来解决实际问题的实践中,还发现如下几个十分重要而在短期内被认为难以解决的问题:

① ZigBee 的核心技术之一,是动态组网和动态路由,这需要占用大量的带宽资源,并增加数据传输的时延.特别是随着网络节点数目的增加和中转次数增多^[39].因而,经过多次中转后的实际可用速率将大大降低,同时数据传输时延也将大大增加.

② 在网状网拓扑结构中, ZigBee 的每一个节点,除了自身作为信息采集点和执行来自中心的命令外,还承担着随时来自网络的数据转发任务,这样网络节点的收发器必须随时处于收发状态,所以网络功耗问题也制约着 ZigBee 技术的运用^[40].文献[41]把蚁群算法运用于网络路由的优化,以减少节点的转发和功耗,但是蚁群算法的效率问题很难使该方法运用于大规模的 ZigBee 网络.

③ ZigBee 提供了数据完整性检查,身份认证,加密等功能.但 ZigBee 网络中密钥泄露后的安全性问题还需进一步的研究.文献[42]和文献[43]在加密技术、协议栈安全、组网方式和安全结构等方面进行了深入的分析.

当前 ZigBee 技术尚未完全解决的节点功耗问题,网络数据传输的效率较低,时延较长和网络安全性等许多问题,是当前 ZigBee 技术面临的主要问题.也是未来 ZigBee 技术的研究方向.

6 结语

ZigBee 技术已经成为下一代网络技术的发展趋势,但是关于大规模组网、自治性、低功耗技术、微型化信号串扰、网络安全性等方面的研究仍显不足,仍需要进一步深入研究.本文介绍了 ZigBee 技术的基本概念,并

分析了 ZigBee 的相关技术的研究现状,提出了 ZigBee 技术需要解决的问题和展望了进一步的研究方向。

参考文献

- 1 Tan L, Wang N. Future Internet: The Internet of Things. 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering. 2010:376–380.
- 2 刘强,崔莉,陈海明.物联网关键技术与应用.计算机科学, 2010,37(6):1–4.
- 3 Yu HC, Zhu HP, He F, Wan YL. Design of the Remote Monitoring System for Workshop Based on ZigBee Wireless Sensor Networks. Internet of Things. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2012:33–40.
- 4 Wang H, Dong XR, Ma YZ, Yang XW, Liu FN. Design of Greenhouse Environment Wireless Monitoring System Based on ZigBee. Honghua Tan. Informatics in Control, Automation and Robotics. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2011:579–586.
- 5 Shanmugaraj M, Ramya CM, Prabakaran R. Industrial Monitoring Using ZigBee Network. Compute Networks and Information Technologies. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2011:663–665.
- 6 钟永锋,刘永俊. ZigBee 无线传感器网络.北京:中国邮电大学出版社, 2011.
- 7 Farahani S. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Elsevier Ltd, 2008.
- 8 ZigBee Alliance ZigBee Specification 053474r17. San Ramon: ZigBee Standards Organization, 2008.
- 9 宁炳武. Zigbee 网络组网研究与实现[硕士学位论文].大连:大连理工大学, 2007.
- 10 陈镇利. 基于 ZigBee 技术的星型网的实现[硕士学位论文].武汉:武汉理工大学, 2009.
- 11 Kalaivani T, Allirani A, Priya P. A Survey on ZigBee Based Wireless Sensor Networks in Agriculture. Proc. of 2011 3rd International Conference on Trends in Information Sciences and Computing, 2011:85–89.
- 12 周益. 基于 ZigBee 技术的无线传感网拓扑设计与实现[硕士学位论文].苏州:苏州大学, 2009.
- 13 Khan FA, Shahid A, Khan ZZ. ZigBee Based Reconfigurable Clustered Home Area Network. Proc. of 3rd International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2009:32–37.
- 14 ZigBee Alliance: ZigBee Cluster Library Specification 0751 23r04ZB. San Ramon: ZigBee Standards Organization, 2012.
- 15 Paolo M, Macro M, Gianluigi F. A Multi-Dimensional Characterization of Clustered ZigBee Networks. Proc. of IEEE 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. 2008:12–17.
- 16 Gang D, Sahinoglu Z, Orlik P, Jin Y, Bhargava B. Tree-Based Data Broadcast in IEEE 802.15.4 and ZigBee Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(11):1561–1574.
- 17 Lee KK, Kim SH, Park HS. An Effective Broadcast Strategy for Route Discovery in the ZigBee Network. Proc. of 10th International Conference on Advanced Communication Technology, 2008, 3(3):1187–1191.
- 18 樊坤,朴洋,周全,王小钊,罗伟. 基于 Zigbee 树形组网的无线采集系统及其在振动监测中的应用.机械与电子, 2011, (7):33–35.
- 19 王琛,柴乔林,王芳. 基于树形结构的 ZigBee 能量均衡协议研究.计算机工程与设计, 2009, 30(15):3534–3536.
- 20 许勇. 基于 ZigBee 的 Mesh 网络的研究[硕士学位论文].合肥:中国科学技术大学, 2011.
- 21 Sun J, Zhang XF. Study of ZigBee Wireless Mesh Networks. Proc. of 9th International Conference on Hybrid Intelligent Systems, 2009:264–267.
- 22 Tao WY, Zeng JQ. The Performance study of ZigBee Mesh Network. IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks. 2011:407–409.
- 23 李涛. 基于能量优化的 ZigBee 网络树路由算法研究[硕士学位论文].济南:山东大学, 2010.
- 24 Al-Harabawi M, Rasid M, Noordin N. Improved Tree Routing (ImpTR) Protocol for ZigBee Network. International Journal of Computer Science and Network Security, 2009, 9(10):146–152.
- 25 Fariborizi H, Moghavvemi M. EAMER: Energy Aware Multi-tree Routing for Wireless Sensor networks. Boston: MIT Press, 2008 [2012-12-29]. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/59298>.
- 26 刘丹,钱志鸿,刘影. ZigBee 网络树路由改进算法.吉林大学学报(工学版), 2010, 40(5):1393–1396.
- 27 Yang H, Li ZY. Simulation and analysis of a stability reverse AODV routing protocol. Proc. of 2nd Int. Conf. on Consumer Electronics, Communication and Networks,

- 2012:560-563.
- 28 朱颖.基于 ZigBee 的 AODV 路由协议优化及实现[硕士学位论文].武汉:华中科技大学,2009.
- 29 谢川.基于 ZigBee 的 AODVjr 算法研究.计算机工程,2011,37(10):87-89.
- 30 Tsai CH, Pan MS, Lu YC, Tseng YC. Self-Learning Routing for ZigBee Wireless Mesh Networks. Proc. of IEEE Asia-Pacific Wireless Communications Symposium,2009.
- 31 Ha JY, Park HS, Choi S, Kwon WH. EHRP:Enhanced Hierarchical Routing Protocol for ZigBee Mesh Networks. IEEE Communications Letters,2007,11(12):1028-1030.
- 32 朱颖.基于 ZigBee 的无线传感器网络路由算法研究[硕士学位论文].长沙:中南大学,2010.
- 33 宁炳武.ZigBee 网络组网研究与实现[硕士学位论文].大连:大连理工大学,2007.
- 34 ZigBee Alliance ZigBee Document 075468r35:Network Device: Gateway Specification.San Ramon:ZigBee Standards Organization,2011.
- 35 Lin YG, Xie HX, Yang W, Zheng XW. Design of ZigBee Gateway in Intellignet Monitoring System of Agriculture. Proc. of 2011 International Conference on Mechatronic Science,Electric Engineering and Computer.2011:2213-2216.
- 36 Lee WS, Hong SH. KNX-ZigBee Gateway for Home Automation. Proc. of 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering.2008:750-755.
- 37 黄布毅,王俊,常亚军,张海霞.基于 ZigBee 技术家庭网关的设计与实现.通信技术,2009,42(6):71-73.
- 38 Yang FX, Yan CS. Design of WSN Gateway Based on ZigBee and TD. Proc. of 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering,2010: 76-80.
- 39 范晨.ZigBee 技术创造数字家庭未来.(2011-08-18)[2012-10-29].http://it.sohu.com/20110818/n316642377.shtml.
- 40 贾玉福.基于资源受限的无线传感器网络关键问题研究[硕士学位论文].武汉:华中科技大学,2007.
- 41 彭友,杨恢先,满莎.蚁群优化和能量管理的 ZigBee 网络路由.计算机应用,2011,31(2):335-337.
- 42 Li HW, Jia ZN. Application and Analysis of ZigBee Security Services Specification,2010 Second International Conference on Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing,2010:494-497.
- 43 Sun MS, Qian YC. Study and Application of Security Based on ZigBee Standard.Third International Conference on Multimedia Information Networking and Security, 2011:508-511.

(上接第 45 页)

参考文献

- 1 李灿.3G 业务在移动图书馆的应用探讨.情报探索,2011,16(1):110-111.
- 2 戴锦晨.浅谈 WAP2.0 版本技术优势.科技信息,2008,(20): 43-43.
- 3 陈茫.基于 WAP2.0 的移动数字图书馆应用研究.情报杂志, 2010,29(6):213-216.
- 4 洪作奎.基于 WAP2.0 移动学习支持系统研究[学位论文].合肥:合肥工业大学,2009.
- 5 单李旺.Android 操作平台的研究与应用[学位论文].天津:南开大学,2009.
- 6 <http://www.rexsee.com/CN/help.html>.
- 7 李靖,喻萍萍.图书馆手机 OPAC 的实现—以长江大学图书馆为例.科技情报开发与经济,2011,21(15):59-62.