

水声传感器网络数据传输能耗分析^①

王 方, 陈名松, 罗 娜, 薛 鑫

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 桂林 541004)

摘 要: 水声传感器网络设计的其中一个目标就是提供节点间可靠通信的同时, 能量消耗最小化。通过构造简化的场景, 参考海洋中水声信号的吸收损失、传感器节点的参数以及实际环境参数推算出水声传感器网络分别在集中式拓扑结构和多跳式拓扑结构下的能量消耗模型。通过仿真得出: 在短距离通信时采用中继节点实际上浪费了能量, 采用集中式拓扑结构能量效率较高; 而在长距离通信时, 采用多跳式拓扑结构选择合适的中继节点个数有优越的能量效率。

关键词: 水声传感器网络; 传输能耗; 集中式拓扑; 多跳式拓扑; 能量效率

Analysis of Energy Consumption of Data Transmission for Underwater Acoustic Sensor Networks

WANG Fang, CHEN Ming-Song, LUO Na, XUE Xin

(School of Information & Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: One of the aims to design the underwater acoustic sensor networks is to supply the reliable communications between nodes and minimize the energy consumption as well. According to the absorption loss of underwater acoustic signals in the ocean and the parameters of the components, parameter of sensor node and actual surroundings, it also states the methods of forming the energy consumption model of the underwater sensor networks in the structure of centralized topology and Multi-hop topology. Application of the relay in fact a waste of energy. In short-range communication, however adopt the centralized topology structure have high energy efficiency. In long-range communication application of Multi-hop topology and choose the suitable number of nodes have the high energy efficiency. At last, that result is validated by simulation.

Keywords: underwater acoustic sensor networks; energy consumption of data transmission; centralized topology; multi-hop topology; energy efficiency

随着人类对海洋的探索、开发以及利用程度的不断加深, 无论是军用还是民用领域, 都对海洋环境下的信息交流有着巨大的需求。而水声传感器网络 (Underwater Acoustic Sensor Networks) 的出现将会是一个高效探索和海洋观测的理想系统。

1 引言

1.1 文章安排

本文第 2 节介绍水声传感器网络信道的特点以及拓扑结构。第 3 节分别计算在不同的拓扑结构下的能

量消耗模型, 并分析结果。第 4 节给出结论。

1.2 基本介绍

目前, 水声传感器网络, 可以根据水下传感器类型的不同, 获取不同的信息: 可应用于收集海洋学数据获取、污染监测、海底勘探、灾害预防、辅助导航、监视应用战术、水雷侦察、水下油田、管道泄漏监测、地震监测的援助和生态监测等^[1]。由于其应用前景十分广阔, 使得对水声传感器网络的研究与开发成为目前信息领域的一个热点, 学术界和产业界都对它投入了极大的研究热情。

^① 基金项目: 广西信息与通讯技术重点实验室基金(10912)

收稿时间: 2010-07-24; 收到修改稿时间: 2010-08-23

2 水声传感器网络特点

2.1 水声信道特点

在水下，电磁波在导电的海水中长距离传输存在很高的衰减，并且只能工作在 30Hz-300Hz 的超低频段，为了实现电磁波的发射，需要很高的传输能量和很长的天线，这样的要求通常是不能实现的，因此电磁波无法用在中等以上距离的信息传递。在海洋环境下，光波受散射影响过大，能克服散射影响的窄激光传输目前还在研究当中。声波是人类迄今为止已知的较适合在水中远距离传播的能量形式，所以水下无线通信目前主要通过声波传送信息^[2]。

水声信道是水声通信技术的重要环节，其复杂多变性一直影响着水声通信研究的发展。水声信道的海洋介质是一个可利用带宽有限、多途径效应干扰严重的时变、空变、频变的信道。而且声波在海洋介质的传输中存在长的传输延迟，比无线电波在空气中的传输延时高了大约五个数量级(声波在水介质中的延时:0.67ms/m, 电磁波在空气中的传输延时: 3.33ns/m)^[3,4]。

2.2 水声传感器网络的组成

水声传感器网络是由数据获取网络、数据分布网络和控制管理中心三部分组成的，其主要组成部分是集成有传感器、数据处理单元和通信模块的节点(如图 1)和水声换能器，各节点通过协议自组网络，再将采集来的数据通过优化后经水声换能器把电能转换成声波传输给信息处理中心。传感器节点是水声传感器网络的基本组成部分，其基本结构如图 1 所示：

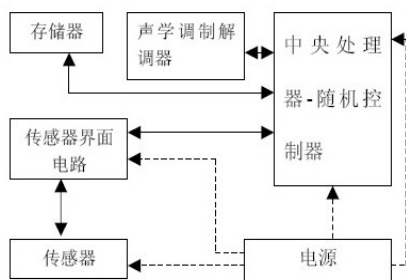


图 1 传感器节点的基本构成

另外，水声传感器网络的设备能量非常有限，不能使用太阳能充电而且更换困难。因而如何在提高网络性能的基础上节约和均衡节点能量的消耗，是任何技术和协议研究的关键^[5]。

2.3 水声传感器网络的拓扑结构

网络拓扑分为集中式、分布式和多跳式三种基本的结构^[6,7]。集中式结构(如图 2)是指每个节点都有一条点到点的链路与中心节点相连，这一中心节点也称为网络的 Hub 节点。信息的传输是通过中心节点存储转发技术实现的，并且只能通过中心节点与其他站点通信。在水声传感器网络中，水面浮标充当中心站，控制发送到海底设备或由海底设备发出的信号之间的通信。由于单个 Modem 的传输距离有限，网络不能大面积覆盖。

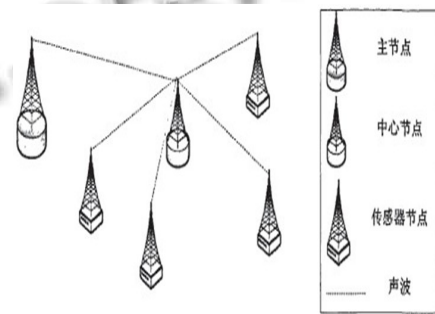


图 2 集中式拓扑结构

分布式结构是指网络中的所有节点之间都可以通信，这种网络虽然不需要路由，但是它所需要的输出功率非常大。因此对于能量设备有限的水声传感器网络，分布式结构是不理想的。

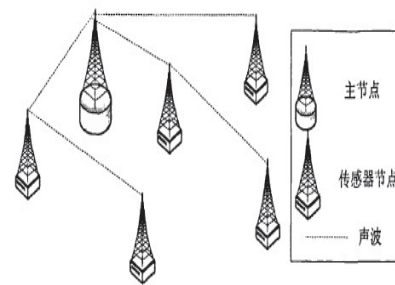


图 3 多跳式拓扑结构

多跳式结构(如图 3)是指只在邻近节点间可以通信，信息从源节点到目的节点的传输是靠信息在节点间的跳转来实现的。由于网络的工作范围是由节点数目来决定的，所以网络覆盖面比较大。但随之而来需要面对的就是路由算法的问题。基于水下无线通信网络在确保正常可靠工作地前提下，将能源消耗和信息传输延时降到最小是当前最主要的设

计目标，多跳式拓扑结构是比较合适的水下长距离通信的网络拓扑结构，因为传感器节点本身就可以担当中继节点，而不需要额外的器件。根据具体应用，可以在合适的位置安装一个中继节点。但是，这不能保证从信源到信宿的多跳路径总是存在或保证路径一定最短。

3 水声传感器网络的能量消耗分析

在海洋环境中，频率一定的声信号的衰减系数

$$A(x) = x^k a^x \quad (1)$$

k 是能量传播（圆柱形取 1，实际中取 1.5，球形传播取 2）

$$a = 10^{\frac{\alpha(f)}{10}} \quad (2)$$

是从吸收因子 $\alpha(f)$ 得到的基于频率的参数， $\alpha(f)$ 计算如下^[8]：

$$\alpha(f) = 0.11f^2 / (1 + f^2) + 44f^2 / (4100 + f^2) + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (3)$$

当 f 单位为 kHz 时，单位为 dB/km。从式(3)可以看出吸收因子的变化主要依赖于工作频率。图 4 给出了频率从 0~100kHz 所对应的吸收因子的变化曲线。从图中可以看出，吸收因子随着工作频率的增大而单调递增。

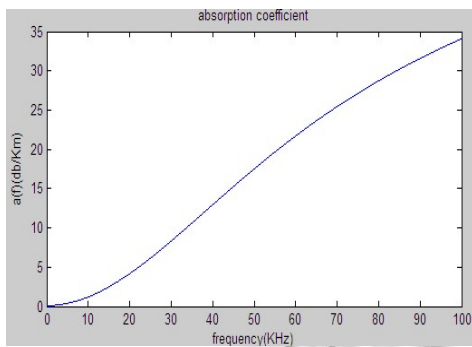


图 4 吸收因子 $\alpha(f)$

因为在海洋环境中，声信号按照式(1)规律衰减的，所以多跳技术可以有效地克服通信距离长或障碍物所造成的通信困难，许多人认为多跳技术还能够提高通信的能量效率，即采用中继节点比直接通信所消耗的能量更少：当所有接收机的 SNR 恒定（为简化问题，假设在该 SNR 下差错率可以忽略不计），若直接通信距离为 d ，而假设接收节点的接收功率电平为 P_r 时就可以达到需要的接收质量，则需要发送节点

$A(d)P_t = d^k a^d P_r$ 的辐射能量；若在 $d/2$ 处安装一个中继节点，则辐射能量下降到 $A(d/2)P_t = (d/2)^k a^{d/2} P_r$ 。

但是上面的计算考虑的只是辐射能量，而不是实际的能量，特别是中继节点消耗的能量。即使假设中继节点属于水声传感器网络而且与之协同工作，计算消耗的能量时，也必须考虑到传感器节点的控制、射频前端、存储器以及换能器等所消耗的能量^[9]。

3.1 水声传感器网络数据传输能耗模型

水下传感器网络中的主要耗能部件包括传感器节点和水声换能器。其中传感器节点对能耗的需求很大，耗能的主体主要是控制器和通信模块，存储器也占一部分，且与传感器的类型有关。通信模块用于节点间的数据通信，它是节点中能耗最大的部件，所以为了简化能耗模型，论文主要讨论通信模块的能耗。为不失一般性，对于水声传感器网络节点通信单元，其工作平均功耗可以表示为^[10]：

$$E_t = M_{tx} [P_{tx}(T_{tx} + T_{sw}) + P_{out} T_{tx}] + M_{rx} [P_{rx}(T_{rx} + T_{sw})] \quad (4)$$

式中， M_{tx} 是平均每秒发送/接收单元工作次数，主要是具体应用环境以及 MAC 协议来决定； $P_{tx/rx}$ 是发送/接收单元电路的平均消耗； P_{out} 是输出功率； T_{sw} 是状态切换时间，即睡眠、接收、发送、侦听状态之间的切换时间，这里假设状态切换时间是相同的； $T_{tx/rx}$ 是发送/接收单元工作时间，主要由包长、传输速率、编码效率来决定，即

$$T_{tx/rx} = l / RR_{code} \quad (5)$$

式中， l 为传输包长， R 为比特率， R_{code} 为编码率。

为了确定从一个源节点经过 n 次中继发送一个持续时间为 T_{tx} 的单个数据包给传输距离为 r 的接收节点所需要的传输能量，我们假设接收功率电平为 P_0 就达到需要的接收质量。即若在距离接收节点为 x 的发送节点到达接收节点处的功率为 P_0 ，根据(1)式得发送节点的传输功率需要 $A(x)P_0$ 。同理，在距离 r/n 的节点间传输一个数据包，节点需要以功率

$$P_{(r/n)out} = A(r/n)P_0 \quad (6)$$

发射。由式(4)得出传输此数据包所消耗的总能量为：

$$E = n[P_{tx}(T_{tx} + T_{sw}) + P_{rx}(T_{rx} + T_{sw})] + nP_0 A(r/n)T_{tx} \\ = n[P_{tx}(T_{tx} + T_{sw}) + P_{rx}(T_{rx} + T_{sw})] + nP_0 (r/n)^k 10^{\frac{\alpha(f)r}{10n}} T_{tx} \quad (7)$$

在这里，我们取 $k=1.5$ ，并且以 UWM1000^[11]水声调制解调器为参考，我们假设 $P_{tx}=1w$ ， $P_{rx}=0.75w$ ，

$T_{tx}=T_{rx}=1s$, $T_{sw}=450\mu s$, $P_0=1w$, $k=1.5$, 则根据式(7) 可以得出传输一个数据包所消耗的总能耗为:

$$E = n[1.75(1 + 450 \times 10^{-6})] + n(r/n)^{1.5} 10^{\frac{\alpha(f)r}{10n}} \quad (8)$$

在多跳通信中, 信息从源节点到目的节点的传输是靠信息在节点间的跳转来实现的。这会使源节点的长距离通信变成由中继节点之间形成的几次较短距离通信。图 5 是源节点距离接收节点 20km 的情况下, 传输一个数据包的能量消耗与中继节点个数和工作频率的关系。从图中可以看出, 所消耗的总能耗随着中继节点的增加递减到一个极小值后又单调递增。这是由于随着中继节点的增加, 多跳通信的声传输媒介的总的吸收损耗会下降, 传输损耗随通信距离的减少而指数的减少, 则总能耗也随着下降到一个最小值, 然后随着中继节点的继续增加会造成在传递过程中过多的中继节点的通信模块的功率消耗而使总的能耗增加。可以得出, 短距离通信时采用中继节点, 实际上浪费了能量。只有在较大的通信距离时, 辐射能量才大于发射机与接收机能量的消耗, 当然, 直接通信与多跳通信的距离主要还取决于元器件的参数和实际环境参数。

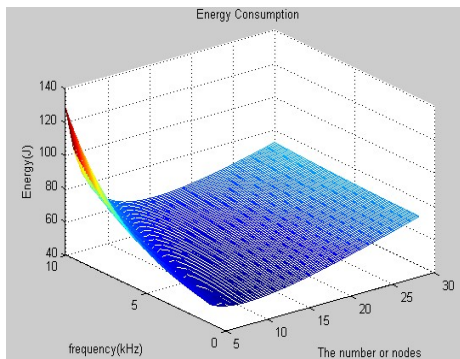


图 5 能量消耗与中继节点个数和工作频率的关系

所以在选择中继节点的个数时, 在一定程度上还要考虑到中继节点在数据传递时内部电路的能量消耗, 选择合适的中继节点个数, 使总的能量消耗最优化。

3.2 水声传感器网络在不同拓扑结构下的能耗比较

为了量化网络的能量消耗, 我们研究一个简化的场景^[12]: n 个节点和一个 sink 节点被直线安排在长度为 r 的一条直线上, 节点统一等间距分布, 间距为 r/n , 考虑两个极端的通信策略: 一是集中式拓扑结构, 即每一个节点都可以和 sink 节点直接通信; 另外一个是多跳拓扑结构, 即每一个节点只与距离它最近的节点

建立通信链路, 通过多跳的方式逐步传递到 sink 节点。下面是这两种情况的能量消耗:

(1) 每一个节点都可以和 sink 节点直接通信(如图 6):

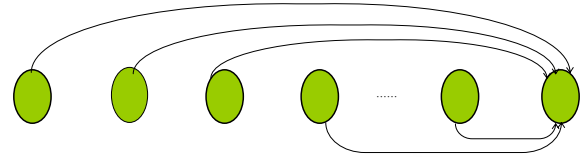


图 6 集中式拓扑结构

当 N 个节点都有数据包各有一个包传输, 并且需要持续发射时间 T_{tx} , 则所需要的传输能耗为:

$$\begin{aligned} E_{out\text{单跳}} &= P_{out} T_{tx} \\ &= A(r/n)P_0T_{tx} + A(2r/n)P_0T_{tx} + A(3r/n)P_0T_{tx} + \dots + \\ &\quad A[(n-1)r/n]P_0T_{tx} + A(r)P_0T_{tx} \quad (9) \\ &= P_0T_{tx} \sum_{i=1}^n A(ir/n) \end{aligned}$$

根据(4)得出所消耗的总能耗为:

$$\begin{aligned} E_{i\text{单跳}} &= n[P_{tx}(T_{tx} + T_{sw})] + P_0T_{tx} \sum_{i=1}^n A(ir/n) + \\ &\quad n[P_{rx}(T_{rx} + T_{sw})] \quad (10) \\ &= n[P_{tx}(T_{tx} + T_{sw})] + P_0T_{tx} \sum_{i=1}^n \left(\frac{ir}{n}\right)^k 10^{\frac{i \cdot r \cdot \alpha(f)}{10n}} + \\ &\quad n[P_{rx}(T_{rx} + T_{sw})] \end{aligned}$$

(2) 每一个节点只与距离它最近的节点建立通信链路(如图 7), 通过多跳的方式逐步传递到 sink 节点。数据包要经过 n 跳到达 sink 节点, 当 n 个节点都有数据包各有一个包传输, 并且需要持续发射时间 T_{tx} , 则所需要的传输能耗为:

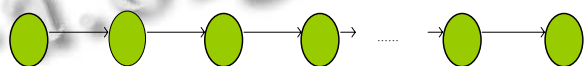


图 7 多跳式拓扑结构

$$\begin{aligned} E_{out\text{多跳}} &= P_{out} T_{tx} \\ &= A(r/n)P_0T_{tx} + 2A(r/n)P_0T_{tx} + 3A(r/n)P_0T_{tx} \quad (11) \\ &\quad + \dots + (n-1)A(r/n)P_0T_{tx} + nA(r/n)P_0T_{tx} \\ &= A(r/n)P_0T_{tx}n(n+1)/2 \end{aligned}$$

因此, 根据 (4) 式得所消耗的总能耗为:

$$\begin{aligned} E_{i\text{多跳}} &= [P_{tx}(T_{tx} + T_{sw}) + A(r/n)P_0T_{tx}]n(n+1)/2 \\ &\quad + [P_{rx}(T_{rx} + T_{sw})]n(n+1)/2 \quad (12) \\ &= [P_{tx}(T_{tx} + T_{sw}) + P_0T_{tx} \left(\frac{r}{n}\right)^k 10^{\frac{r \cdot \alpha(f)}{10n}}]n(n+1)/2 \\ &\quad + [P_{rx}(T_{rx} + T_{sw})]n(n+1)/2 \end{aligned}$$

在这里, 我们仍然取 $k=1.5$, 并且以 UWM1000^[11] 水声调制解调频器为参考, 我们假设 $P_{tx}=1w$,

$P_{rx}=0.75w$, $T_{tx}=T_{rx}=1s$, $T_{sw}=450us$, $P_0=1w$, 则根据式 (10) 和式 (12) 可以得出传输一个数据包所消耗的总能耗为:

$$E_{r_{单跳}} = 1.75n(1 + 450 \times 10^{-6}) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{ir}{n}\right)^{1.5} 10^{\frac{i-r \cdot a(f)}{10n}} \quad (13)$$

$$E_{r_{多跳}} = [1.75(1 + 450 \times 10^{-6}) + \left(\frac{r}{n}\right)^{1.5} 10^{\frac{r-a(f)}{10n}}]n(n+1)/2 \quad (14)$$

图 8 是 20 个直线连接的节点在工作频率 f 分别为 1kHz、3kHz、5kHz、10kHz 时, 在所有节点都有一个数据包发送的假设下单跳通信和多跳通信的总能量消耗与距离 r 变化的关系。

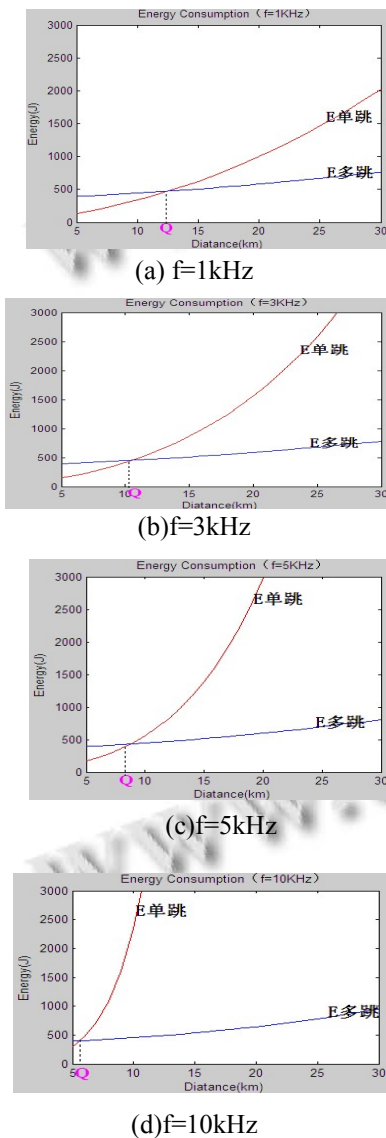


图 8 单跳和多跳的总能耗比较

在图中可以得出两点结论: 一是当 r 较小时, 单

跳通信消耗的总能量小于多跳通信消耗的总能量, 但是随着频率的增大, Q 值越来越小 (当 $f=1kHz$ 时, 当直线连接的距离 $r < 13.5km$ 时, 单跳通信消耗的总能量小于多跳通信消耗的总能量; 而 $f=10kHz$ 时, 直线连接的距离 $r > 6km$ 时, 单跳通信消耗的总能量就大于多跳通信消耗的总能量); 二是随着频率的增加, 单跳通信的总能耗迅速增加, 则多跳通信的总能耗比较稳定, 这是由于单跳通信传输损耗随着工作频率的增加而急速上升, 则总能耗也随着数据发送节点和 sink 节点距离的增加而迅速增大, 而多跳通信可以通过中继节点可以把较长通信距离分为几段较短的通信距离, 使总能耗在随着数据发送节点和 sink 节点距离的增加时变化相对稳定。

在较低频率通信的情况下, 发送节点和接收节点通信较短时, 中心拓扑结构的能量性能优于多跳拓扑结构。在较高频率通信的情况下, 由于传输损耗随着工作频率的增加而急速上升, 多跳拓扑结构的能量性能一般优于单跳拓扑结构, 但是需要复杂的通信协议和增加包延时。

4 总结

本文阐明了水声传感器网络的基本特征和拓扑结构, 根据水声传感器网络的水声信道的特征, 考虑了传感器节点的内部电路的能耗因素和海洋中水声信号的吸收损失, 推出了水下传感器节点数据通信的能量模型。通过对集中式拓扑结构和多跳式拓扑结构的能量消耗比较, 可以根据不同的工作频率和节点距离等环境参数选择合适的拓扑方式和中继节点个数, 在保证通信质量的条件下获得能量最小化。

参考文献

- 1 Nguyen H, Shin SY, Park SH. Efficiency reservation MAC protocol for underwater acoustic sensor networks. Networked Computing and Advanced Information Management, 2008: 365-370.
- 2 Farr N, et al. Optical modem technology for seafloor observatories. OCEANS, Proc. of MTS/IEEE, 2005: 928-934.
- 3 Burrowes GE, Khan JY. Adaptive token polling MAC protocol for wireless underwater networks. Wireless Pervasive

(下转第 29 页)

并发处理能力。

5 服务质量评价系统的应用

服务质量评价系统作为 ESB 的功能模块, 与 ESB 一起用于连接沈阳市安全生产管理综合系统 GIS 平台(系统 1)和沈阳市安全生产应急救援指挥平台(系统 2)。

通过对服务使用者所发送的服务请求的分析, 服务质量评价系统在系统 1 和系统 2 中为其选择相应的服务, 然后将结果转发给服务使用者。系统架构图如图 9 所示。

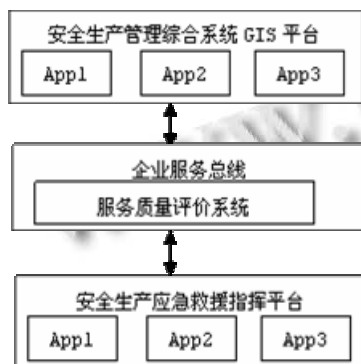


图 9 系统应用架构图

6 结束语

本文通过对现有的 ESB 模型进行分析, 在其基础上进行扩展, 增加并设计了一个基于 ESB 的服务质量评价系统。通过对该系统的性能测试可以证明, 该系统可以满足在负载较大的情况能够快速响应服务请求者的请求, 同时为服务请求者提供满足需求的服务, 并且在负载增大的情况下, 其性能显著提高。今后的工作将对数据预处理阶段的工作做进一步的细化, 进一步完善系统的功能。

参考文献

- 1 IBM Corporation. IBM WebSphere Enterprise Service Bus. [2009-12-04].<http://www-128.ibm.com/developerworks/cn/wesphere>
- 2 Zeng LZ, et al. QoS-aware middleware for Web services composition. IEEE Transactions on Software Engineering, 2004,30(5):311-327.
- 3 杨文军,李涓子,王克宏.领域自适应的 Web 服务评价模型.计算机学报,2005,28(4):514-523.
- 4 金莹,邹立娣.一种支持 QoS 约束的 Web 服务模型框架及实现.合肥学院学报(自然科学版),2005,15(3):28-32.
- 5 李鹏.SOA 企业架构中的 ESB[硕士学位论文].西安:西安电子科技大学,2008.21-22.

(上接第 95 页)

- Computing, 2009.1-5.
- 4 Zhong YX, Huang JG, Han J. A TDMA MAC protocol for underwater acoustic sensor networks. Information, Computing and Telecommunication, 2009:534-537.
- 5 Akyildiz IF, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks research challenges. Elsevier's Journal of ad Hoc Networks,3(3):257-279.
- 6 Sozer EM, Stojanovic M, Proakis JG. Underwater acoustic networks. IEEE J Oceanic Eng, 2000, 25(1):72-83.
- 7 Proakis JG, Rice JA, Stojanovic M.Shallow water acoustic networks. IEEE Communication Magazine, 2001:114-119.
- 8 Stojanovic M. On the Relationship between Transmission Power and Capacity of an Underwater Acoustic Communication Channel. OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, 2008:1-6.
- 9 Karl H, Willig A.无线传感器网络协议与体系结构.北京:电子工业出版社,2007.30-36.
- 10 李晓维.无线传感器网络技术.北京:北京理工大学出版社,2007.120-126.
- 11 LinkQuest. [2010-6-2]. <http://www.link-quest.com>
- 12 朱昌平,韩庆邦,等.水声通信基本原理与应用.北京:电子工业出版社,2009.312-314.