

# 水声网络中的跨层设计研究

许肖梅, 邹哲光

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 厦门大学海洋与地球学院, 福建厦门 361005)

**摘要:** 跨层设计是水声网络中急需解决的关键技术之一。对于能量和可用频带严重受限的水声网络系统, 跨层设计能有效地利用海洋声信道环境下稀少的可用资源, 克服分层网络设计中非最优和不灵活的缺点, 使系统运行在最佳模式下。在介绍国内外水声网络跨层设计研究的基础上, 提出了一种基于控制通道和数据通道的双通道水声网络跨层设计模型, 分析了该跨层网络模型的优势, 并给出一种自适应节点调制和编码的双通道水声网络跨层模型应用方案, 在水池和厦门海域中进行了多节点自组织组网实验, 验证了该方案的可行性, 表明双通道跨层模型在水声网络设计中具有良好的应用前景。

**关键词:** 水声网络; 跨层设计; 双通道

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-03-0239-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.03.002

## Research on the cross-layer design of underwater acoustic networks

XU Xiao-mei, ZOU Zhe-guang

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology,  
Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

**Abstract:** Cross-layer design is one of the most significant and urgently needed techniques for Underwater Acoustic Networks (UWANs). For the energy and bandwidth severely limited UWANs system, cross-layer design can effectively utilize the scarce resources in such special environment as underwater acoustic channels, overcome the disadvantages of the non-optimum and the inflexibility of the traditional layering network design, and optimize the functionality of the system. In this paper, we introduce recent advances in the cross-layer design of UWANs, propose a kind of dual-channel (a control channel and a data channel) cross-layer design for UWANs and analyze the advantages of our dual-channel cross-layer model. Based on the dual-channel cross-layer model, the paper provides an adaptive modulation and coding with practical applications. Some multiple-node self-organized networking experiments are conducted in the water pool and Xiamen waters. Promising experimental results are obtained and show that dual-channel cross-layer model could offer diverse applications in underwater acoustic networks in the future.

**Key words:** underwater acoustic networks; cross-layer design; dual-channel

## 0 引言

随着高速数字信号处理等相关软硬件技术的发展, 水声网络在军事和民用上的应用范围日益扩大。网络化水声通信技术显示出其在大尺度海洋环境污染监测, 港口及近岸水域的监测以及水下侦察与集群作战、指挥调度等方面的重要性。由于水声信道的复杂性、多变性和水下组网的特殊要求, 使得水声网络的系统构造复杂、设计难度大<sup>[1]</sup>。海水介质中的声传播在时间、空间和频率的三维尺度上

都存在复杂变化, 形成复杂的时-空-频变特性, 声传播扩展和海水介质对声的吸收限制了水声信道的可用带宽和信号的传输距离; 多径效应造成了接收信号的起伏衰落和码间干扰; 海洋环境噪声、内波湍流等造成的介质不均匀性使接收信号严重失真, 对信号的传输和检测产生严重干扰<sup>[2,3]</sup>。此外水声网络还面临缺乏固定设施支持、拓扑动态变化、系统资源有限等多重考验<sup>[4]</sup>, 需要通过跨层设计来寻求网络优化和性能的提升。

由于分层设计可以降低网络整体设计的复杂度, 现有的网络通常以“分层”方式进行。美国 MIT、WHOI 海洋研究所和新加坡国立大学等多个水声网络研究单位联合提出了基于五层模型的水声网络结构<sup>[5]</sup>, 其自下而上依次为: 物理层、数据链路层、网络层、传输层、应用层。分层设计方法对于有线网络是成功的。然而, 水声信道的接入冲

收稿日期: 2012-03-20; 修回日期: 2012-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(41176032); 厦门大学研究生基础创新科研基金(201212G012)

作者简介: 许肖梅(1960—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声通信与水声网络。

通讯作者: 许肖梅, E-mail: xmxu@xmu.edu.cn

突、用户干扰和信号衰落等情况远比有线网络严重得多,在这种情况下分层协议体系存在“非最优”和“不灵活”两个问题<sup>[6]</sup>。“非最优”是由于分层设计导致了各层之间缺乏系统整体的信息共享,信息对每一层来说都是不充分的,无法保证整个网络达到最优化状态;“不灵活”是因为分层网络要求在最坏的情况下也能正常工作,使得网络协议只能基于最差的情况进行设计,缺乏适应环境变化的能力,影响协议栈对现有的资源进行优化配置。

跨层设计是一种利用各层之间相关性进行网络整体优化的设计方法,最早在计算机网络中提出,目前是下一代无线通信系统的一项关键技术。尽管跨层设计仍属于无线网络中的新兴概念,但近年来已经在水声网络中引起重视,越来越多的文章倡导跨层设计,是目前水声网络研究的热点问题。Pompili 等<sup>[7]</sup>首次在水声网络中提出一套比较完整的跨层设计方案,为提高网络生存时间和网络吞吐量,提出采用综合调度物理层(发射功率和频率)、链路层(编码长度和深度)和网络层(最佳路由选择)的方案。仿真结果表明跨层后的网络寿命可以延长 20%~30%,网络吞吐量有明显的提高。Vuran<sup>[8]</sup>认为在跨层网络设计中,通过优化数据包的大小、配合低功率通信,可以有效优化系统性能,并提出了运用控制发射功率、数据包大小以及 ARQ 重传等技术的一套跨层系统方案。但目前直接针对水声网络进行跨层设计的相关报道并不多见。本文介绍国内外在水声网络跨层设计上所开展的相关工作,分析了水声网络跨层设计的优势,提出了一种基于控制通道和数据通道的双通道水声网络的跨层模型。基于该跨层网络模型,采用虚拟仪器 LabVIEW 模块编程,构建了以 NI CompactRIO 为硬件平台的水声网络系统,实现了一种自适应节点调制和编码方式的应用方案。在水池和厦门海域中验证了该方案并进行了多节点自组织组网实验,获得了良好的实验结果。

## 1 水声网络中跨层设计方法

网络设计实际上是一个最优化问题的求解过程,即在给定网络环境和资源限制下调整各个协议层的参数值,以达到最优的网络性能。因此,把网络中的各个协议栈作为一个整体进行分析和设计,把整个网络协议栈看作是这些优化问题的“优化器”,而网络资源(功率、信道或链路等)限制看作是问题的约束条件。以多跳网络优化设计为例,如果

不考虑协议分层,那么网络优化问题的一般形式可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\text{Maximize } \sum_s U_s[x_s, y_s(\mathbf{P}_e)] + \sum_l H_l(w_l) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \mathbf{R}\mathbf{x} \leq \mathbf{C}(\mathbf{w}, \mathbf{P}_e), \mathbf{x} \in \Theta(\mathbf{P}_e)$$

$$\mathbf{x} \in \Delta(\mathbf{F}) \text{ or } \mathbf{x} \in \Phi(\mathbf{w})$$

$$\mathbf{R} \in \mathbf{R}, \mathbf{F} \in \mathbf{F}, \mathbf{w} \in \mathbf{W}$$

方程(1)中,  $x_s$  表示某个通信  $s$  的端到端速率;  $y_s(\mathbf{P}_e)$  表示通信端到端的丢包率,是链路解码错误概率矢量  $\mathbf{P}_e$  的函数;  $\mathbf{x}$  表示所有  $x_s$  组成的矢量;  $w_l$  表示网络单元(或链路)  $l$  所占用的物理资源(如功率或信道)。函数  $U_s$  和  $H_l$  可以是线性或非线性函数;  $\mathbf{R}$  表示所有通信路由矩阵,  $\mathbf{C}$  是所有链路的平均传输速率矢量,是物理层资源分配矢量  $\mathbf{w}$  以及解码错误概率矢量  $\mathbf{P}_e$  的函数。此外,通信速率还可能受其他两个方面的限制:一是信道解码可靠性和每跳链路错误控制机制(如自动重传请求等)的限制,可以用  $\Theta(\mathbf{P}_e)$  表示;另一个是 MAC 层调度的限制。在基于竞争的 MAC 中这个限制可以表示为媒质接入概率  $\Delta(\mathbf{F})$ ,其中  $\mathbf{F}$  表示网络的竞争矩阵,而在基于调度的 MAC 中可以表示为可用资源分配限制  $\Phi(\mathbf{w})$ 。最后集合  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{F}$  和  $\mathbf{W}$  分别表示所有可能的单径、所有可能的基于竞争的 MAC 机制以及所有坑内的资源分配策略。

尽管可以把多跳网络的设计问题表达为方程(1)的通用形式,但由于各类无线多跳网络的内在特性和各种应用的不同服务质量要求,应用上述理论框架的无线多跳网络进行跨层设计和优化,无论在理论或者实际算法设计中还存在较多问题。

跨层设计打破传统的分层设计思想,将无线电网络中原来被割开的网络各层,作为一个统一的整体进行设计、分析、优化和控制,使得水声网络在恶劣的声信道环境下,注重短缺资源的分配和利用,尽可能地提高系统资源(CPU、内存、带宽、能量等)的利用率,从而降低系统的整体能耗,并提升网络性能(误码率、吞吐量、时延等)。针对优化的层或目标不同,产生了不同的跨层设计方法。虽然目前还没有统一的跨层框架或设计方法,但是已有研究中已经提出了不少的跨层设计方法。如基于五层模型直接扩展而来的通用跨层设计协议栈,它在保持原有分层结构的基础上增加了一个跨层自适应层,可与网络各层进行信息交互和共享,从而实现跨层应用和优化(见图 1)。此外,还有层间传递相关信息、联合优化、融合设计、分层最优化分解等四种跨层设计方法(见图 2),四种跨层设计方法的比较如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

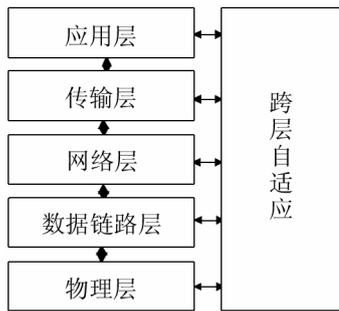


图 1 通用跨层设计协议栈

Fig.1 Common protocol architecture with cross-layer protocol stack

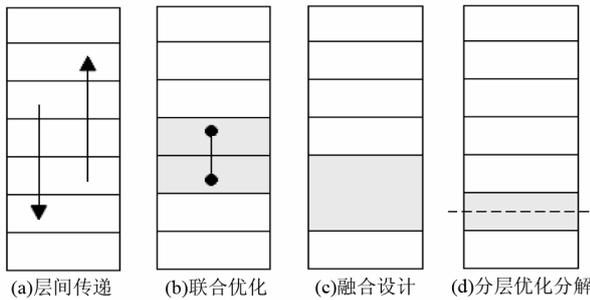


图 2 四种跨层设计方法

Fig.2 Four methods of cross-layer design

表 1 四种跨层设计方法比较

Table 1 Comparison of the four methods of cross-layer design

	层间传递参数	联合设计	融合相邻层	分层最优化分解
难易度	较易	较难	难	较易
层耦合度	较高	高	很高	低
可扩展性	好	较好	不好	好
统一框架	无	无	无	有

由此可见, 层间传递参数的方法最简单, 且能达到比较高的层耦合度和可扩展性; 联合设计和融合相邻层应用较困难, 但层耦合度极高; 分层最优化分解操作简单, 且有统一的框架。在进行网络设计时, 可根据实际的网络需求选择相应的跨层设计方法。

## 2 双通道跨层模型

在分层网络体系中, 各层之间的信息交互是逐层进行的。每一层为了完成自身的任务或功能, 需进行一定的转换和处理, 或在交互数据中添加必要的标记头(Header)。显然, 这样的逐层传递结构在资源利用上不是最优的。系统层数  $N$  越大, 内存开销  $M$  也越大。从协议层的角度总结, 数据的逐层传递而引起的系统开销主要包含以下三个方面:

- (1) 数据在多个层之间传递占用的系统资源;
- (2) 数据在逐层传递中产生了大量的分帧、分组;

(3) 各层独立的标记头造成的冗余, 也在一定程度上增加了系统开销。

从以上分析可知, 为了提高系统执行效率, 减少系统占用的内存, 一方面, 协议体系中的层数  $N$  应尽可能减少; 另一方面, 为降低系统开销, 应尽量减少数据传递的次数。因此, 将交互过程中的信息分为两类: 一类来自于原始的用户数据, 另一类来自于系统内部产生的控制信息。控制信息的系统内存占用记为  $M_{ctrl}$ , 数据信息的系统开销记为  $M_{data}$ 。一般来说, 控制信息较短, 内存占用少, 而用户数据通常比控制信息长的多, 内存消耗要远远大于系统控制信息, 即  $M_{data} \gg M_{ctrl}$ , 主要的内存消耗在于用户数据。因此, 只要适当减少数据信息交互的次数, 就可有效降低开销, 提高内存利用率。

本文从以上两方面考虑, 提出了一种基于控制信息和数据信息分别独立的双通道跨层设计。在跨层设计中采用了融合相邻层和联合设计的方法来减少协议层数, 而采用层间相关传递信息的方法对拟传输的数据进行跨层数据共享, 达到减少数据交互的次数, 降低系统开销、提高系统性能的目的。跨层设计方案如图 3 所示:

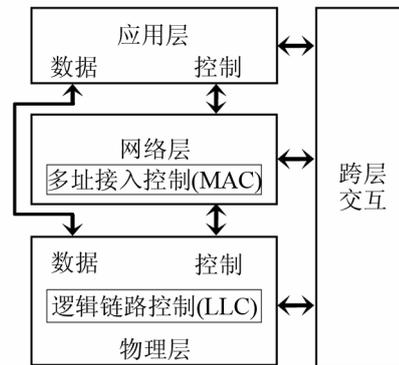


图 3 双通道的跨层设计协议体系模型

Fig.3 Dual channel cross-layer design architecture

针对原有的水声网络五层模型, 双通道跨层方案的重构过程如下:

- (1) 使用分层作为优化分解的方法, 将数据链路层划为两个新层——多址接入控制层(MAC)和逻辑链路控制层(LLC);
- (2) 使用联合设计的方法, 将网络层与 MAC 联合设计, 形成新的网络层; 将物理层与 LLC 联合设计, 形成新的物理层;
- (3) 考虑到系统未涉及深入的传输层研究, 暂不作单独的分层考虑, 将传输层的功能暂时并入应用层;
- (4) 将信息区分为控制与数据两类, 使用层间传递相关信息的方法处理数据信息交互, 即数据信

息略过网络层, 在应用层和物理层采用跨层交互, 而控制数据则按正常方式交互;

(5) 增加一个跨层交互层, 用于跨层信息的共享, 以及适应一般跨层应用的需要。

由于跨层设计后原有协议栈的结构和功能有所变化, 因此需要对该模型中的各层进行重新定义。新的应用层、网络层、物理层以及跨层交互层定义如下:

物理层除了同步、调制的功能外, 增加了逻辑链路成帧和前向纠错编码功能。物理层内建立两个独立通道——控制和数据通道。两个通道分工明确, 调制、编码过程独立。控制通道处理控制报文, 与网络层交互; 数据通道处理数据信息, 与应用层直接交互, 不经过网络层。

网络层除了完成路由功能以外, 还联合了多址接入控制(MAC)和自动重传请求(ARQ)控制等与网络节点接入密切相关的协议。此外, 网络层中的控制报文与物理层协作, 物理层数据通道的开启及参数配置受控于网络层, 换言之, 未经网络层建立连接的通信无法进行数据通道的传输。

应用层作为用户接口, 承担高层与低层之间通信的转换。应用层将用户任务转分为控制信息和数据信息两类, 将它们分别与网络层和物理层交互。其中, 新信息发送、节点搜索、路由表主动更新等控制类信息, 交由网络层处理; 用户数据、文本、图像等数据类信息, 在网络链路建立后直接传到物理层的数据通道中。此外, 该模型中的应用层作为网络的最高层, 可能还需要承担其它网络下层的任务, 如研究过程中需要传输层的处理可以暂时归至应用层。

跨层交互层, 负责存储用于跨层交互中共享的变量, 并提供必要的系统整体约束。它与应用层、网络层和物理层直接相连, 以全局变量的形式存储各层的跨层参数, 提供层与层之间充分的信息交互。跨层交互层使各层的信息与协议栈其它层进行直接共享, 保证了各层的协议能根据应用需求和网络条件, 进行全局的自适应优化; 而网络中的每个层可在系统整体约束和性能要求下进行联合、协作。

### 3 跨层设计应用方案

本文以 NI CompactRIO 硬件为核心, 采用 LabVIEW 图形化编程软件, 构建了一套基于双通道跨层模型的水声网络系统, 实现了一种节点自适应调制、编码方式的跨层设计应用方案, 在水池和

厦门五缘湾海域进行了初步的测试。系统中物理层划分出独立的控制、数据通道; 多种调制解调方案以模块化方式编程; 模块的选择由参数控制; 数据通道的开启、参数配置则由网络层控制。表 2 给出了控制通道和数据通道参数设计对比。

表 2 控制通道和数据通道参数设计对比  
Table 2 Comparisons of parameter designs of the control and the data channels

参数	控制通道	数据通道
调制模式	FH-4FSK	可选*
编码方式	卷积码(2, 1, 9)	各型卷积码或无编码可选
帧长/bytes	4	可变
码元宽度/ms	10	可变, 2~10
发射电压/V	1V	可变, 0~1
比特率/bps	200	200~2000

\* 注: 可采用跳频、直扩或 OFDM 等多种通信体制

控制通道的调制、编码方式保证了网络指令的可靠传输; 数据通道则使数据传输更加灵活。控制通道和数据通道的方案描述如下:

#### (1) 控制通道

控制通道使用固定设计方式, 在通信过程中不改变调制和编码方式。为了使控制报文在浅海信道中有较可靠的传输性能, 控制通道采用跳频 FSK 调制, 并使用交织、编码模块。水声跳频通信系统具有抗衰落、抗多径效应和抗码间干扰的优势, 适合构建稳健的控制传输通道。此外, 交织的卷积码可以有效提高系统的抗干扰性, 抑制信道的突发错误, 构造简单, 执行效率高, 适合水声实时系统。信道编码采用 LabVIEW 调制解调工具包中卷积码模块。

本文中控制通道的调制采用 FH-4FSK 方案: 每个码元含有 2bits, 按带宽划分成 6 个跳频区间, 每个码元长度为 4 ms, 可抵抗 24 ms 的多径时延, 传输速率 200bps(100baud/s)。同步使用双曲调频, 同步信号长 50ms, 保护间隔 10 ms, 调频范围使用跳频图案中最后一跳的频点区间。编码采用(2, 1, 9)卷积码, 译码采用 Viterbi 硬判决。

#### (2) 数据通道

数据通道使用参数可调的设计方式, 允许内置多种调制和编码方案, 由网络层控制切换。例如, 以 OFDM 和多调制用于近距离通信, 以慢跳频通信、直接序列扩频用于远距离传输等。数据通道的调制暂时沿用控制通道的跳频方案, 但码元宽度为 2~10ms 可调, 传输速率为 200~2000bps。数据通道的编码使用卷积码, 包含无编码、(2, 1, 3)、(2, 1, 7)、(2, 1, 9)卷积码四种方式可选。

跨层交互层负责存储各层中可用于跨层的共享变量参数, 是一个“虚”的层。因此, 该层的参数需要使用全局变量。表 3 为跨层交互层与网络各层的共享变量设置。

表 3 网络各层的共享变量  
Table 3 Shared Variables of network layers

	变量	说明
应用层	LOCAL_ID	节点编号
网络层	ROUTER_TABLE	路由表信息
	NET_STATUS	当前的网络状态
	REFRESH_TIME	最后一次的网络更新时间
物理层	NOISE	当前背景噪声大小
	SNR	当前信噪比
	BER	测试误码率结果
	POWER_CONTROL	发射功率设置
	data_mode	数据通道调制方式
	data_code	数据通道编码方式

为验证水声网络跨层系统设计方案的性能, 课题组于 2011 年 6 月在某海域进行了自适应节点调制、编码方式的跨层应用方案系统测试及现场组网实验。该港湾属于半封闭宽海湾, 湾内风浪较小, 水势平稳, 是进行海上前期实验的良好场所, 但水深较浅, 高潮时水深为 7~8 m。实验结果表明, 基于跨层设计的水声网络具有系统响应时延小、控制报文识别率高的优点, 验证了自适应节点调制、编码方式的水声网络跨层设计方案的有效性。为了测试系统的水下自组网能力和协议算法的正确性, 课题组还将三个节点组成几种不同的网络拓扑结构, 包括分布式、多跳式, 以及单向链路式等, 进行了基于双通道跨层模型的水声网络自组织实验。实验取得了良好的成果, 验证了协议的邻居维护、网络初始化、多跳路由建立等功能。实验过程中测试的三种拓扑如图 4 所示, 其中, 实线表示双向链路, 虚线表示单向链路。

实验测试的第一种简单分布式拓扑如图 4 (a) 所示。其中 1、2、3 号节点均处于节点发射功率范围以内, 网络启动后, 三个节点在路由协议的控制下进行初始化接入, 由于可以直接听到节点接入网络时发出的 HELO 报文, 因此自动形成分布式拓扑;

第二种拓扑如图 4(b)所示, 三个节点以 2、1、3 的顺序一字排开。为了实验需要, 适当降低了 2 号节点和 3 号节点的发射功率, 形成多跳式的网络拓扑, 由 1 号节点充当链路中继节点。实验中 2 号节点发送给 3 号节点的信息, 由 1 号节点成功转发;

第三种拓扑结构比较特殊, 如图 4(c)所示。其中, 连接 1 号节点和 2 号节点的虚线表示一条单向链路。实验过程中, 降低了 2 号节点的发射功率,

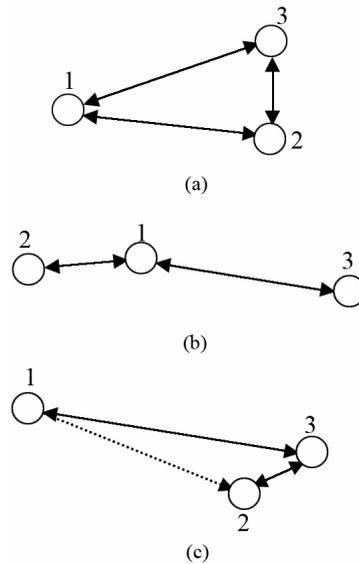


图 4 组网实验中的三种拓扑  
Fig.4 The three topologies tested in networking experiments

使得 2 号节点可以侦听到 1 号节点报文, 却由于自身发射功率过小无法与 1 号节点直接通信, 出现反向链路不存在的情况, 此时的网络拓扑如图 5 所示。MACAW 协议的接入过程需要双向链路, 因此, 尽管 2 号节点能够听到 1 号节点发出的 RTS, 但由于所回送的 CTS 无法到达 1 号节点, 所以通信链路仍无法建立。然而, MAC 层和网络层联合设计后, 1 号节点在发现链路建立失败后通过广播方式接入。邻近的 3 号节点听到 1 号节点的广播接入请求, 同时自己的路由表中存在到达 2 号节点的路由信息, 因此响应 1 号节点请求, 进行数据接收。数据接收完成后, 3 号节点立刻将接到的信息继续转发给 2 号节点, 完成 1 号节点与 2 号节点的通信过程。

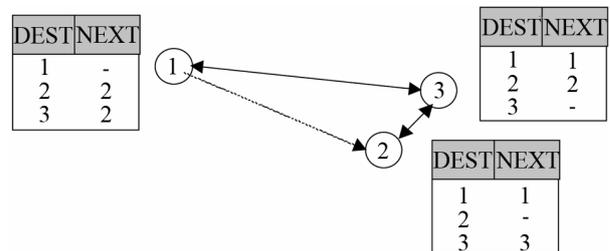


图 5 拓扑中存在单向链路的组网实验  
Fig.5 Networking experiment of the topology including single link

三种拓扑试验表明, 跨层设计后系统在链路调度方面可以获得更高的灵活性, 链路接入结果可以更新路由信息, 而路由信息又可以快速应用于链路调度。路由协议能在网络初始化后自动形成分布式和多跳式拓扑, 且在单向链路情况中仍然有效。

## 4 结论与分析

本文所提出的双通道跨层水声网络模型,与现有的分层水声网络相比较具有以下三方面特点:

(1) 通道优化:双通道设计使控制报文和数据报文的处理方式独立进行,可根据报文的不同特点和要求进行相应的通道优化。控制通道要求极高的可靠性,而数据通道要求在数据传输上具有较高的传输速率和一定的灵活性。因此,控制通道可以采用稳健的调制方式和较可靠的信道编码模式。由于控制指令的长度通常较短且比较固定,所以独立的控制通道可在较短时间内将控制报文解调,对实现一些实时性高的网络应用(例如网络测距)十分重要。对于数据通道,在信道良好的海区中通信可以选择高速传输模式,而信道较差的海区则应降低速率,并选择增加信道编码功能。同时,独立的数据通道可以运用功率控制等手段来降低节点的能量消耗,对于较长数据,节能效果尤为明显。

(2) 内存优化:该模型在层的结构上进行了重新规划,通过减少系统层数、联合设计、跨层交互等多种方式,对系统内存的利用进行重新优化。应用层接收了用户提交的发送数据任务时,原本最为消耗内存的数据信息,跳过多个协议层,直接从应用层传递到物理层,有效地降低了数据内存的消耗。当数据量越大时,提升的性能也越明显。用户数据直接在物理层内部完成链路编码和调制。因此,层之间的大数据交互缩减为一次,避免了多次交互产生的重复开销;与此同时编码和调制都在物理层内部完成,内存资源的利用和回收还可相应做更进一步优化。

(3) 联合设计优化:该模型运用了两种联合设计——物理层和 LLC 层的联合、网络层和 MAC 层的联合,有助于使原本复杂的跨层应用在实现上变得简单。网络层与 MAC 层的联合,使链路调度更简单,能够充分共享节点在信道接入过程中产生的各种信息。一方面,可以使网络层共享信道中的节点多址接入信息,另一方面,可以使 MAC 子层及时共享路由信息,有助于链路的协作调度。物理层

与 LLC 层的联合,使链路成帧、编码过程与帧调制统一的同时实现数据链路层与物理层的帧完全匹配。一方面,可以将链路层的分帧成帧直接与物理层的帧统一,省去重复分、组帧过程,另一方面,可以使物理层根据当前的信道状况,有效地实现自适应信道编码,降低通信误码率。基于双通道跨层网络设计模型,验证了一种自适应节点调制、编码方式的应用方案,在水池和某海域试验验证了该设计方案的有效性,表明双通道跨层模型在水声网络设计中具有广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Sozer E M, Stojanovic M, Proakis J G. Underwater Acoustic Networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.
- [2] Jornet J M, Stojanovic M, Zorzi M. On joint frequency and power allocation in cross-layer protocol for underwater acoustic networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(4): 936-947.
- [3] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(4): 257-27.
- [4] 许肖梅. 水声通信与水声网络的发展与应用[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 811-816.  
XU Xiaomei. Development and applications of underwater acoustic communication and networks[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(6): 811-816.
- [5] Chitre M, Freitag L, Sozer E. M. An Architecture for Underwater Networks[C]// OCEANS 2006-Asia Pacific, 2006, 1-5.
- [6] 张海霞, 袁东风, 马艳波. 无线通信跨层设计——从原理到应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.  
ZHANG Haixia, YUAN Dongfeng, MA Yanbo. Cross-layer design for wireless communications from principle to application[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2010.
- [7] Pompili D, Akyildiz I F. A multimedia cross-Layer protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 9(9): 2925-2933.
- [8] Vuran M C, Akyildiz I F. Cross-Layer Packet Size Optimization for Wireless Terrestrial, Underwater, and Underground Sensor Networks[C]// IEEE INFOCOM, 2008, 780-788.
- [9] Chiang M. Balancing transport and physical layers in wireless multi-hop networks: Jointly optimal congestion control and power control[J]. Sel, Area Comm., 2005, 23(1): 104-116.
- [10] 卢先领, 孙亚民, 周灵, 等. Ad Hoc 无线网络跨层设计综述[J]. 计算机科学, 2007, 34(10): 24-32.  
LU Xianling, SUN Yamin, ZHOU Ling, et al. A Survey of cross layer design for Ad Hoc wireless networks[J]. Computer Science, 2007, 34(10): 24-32.