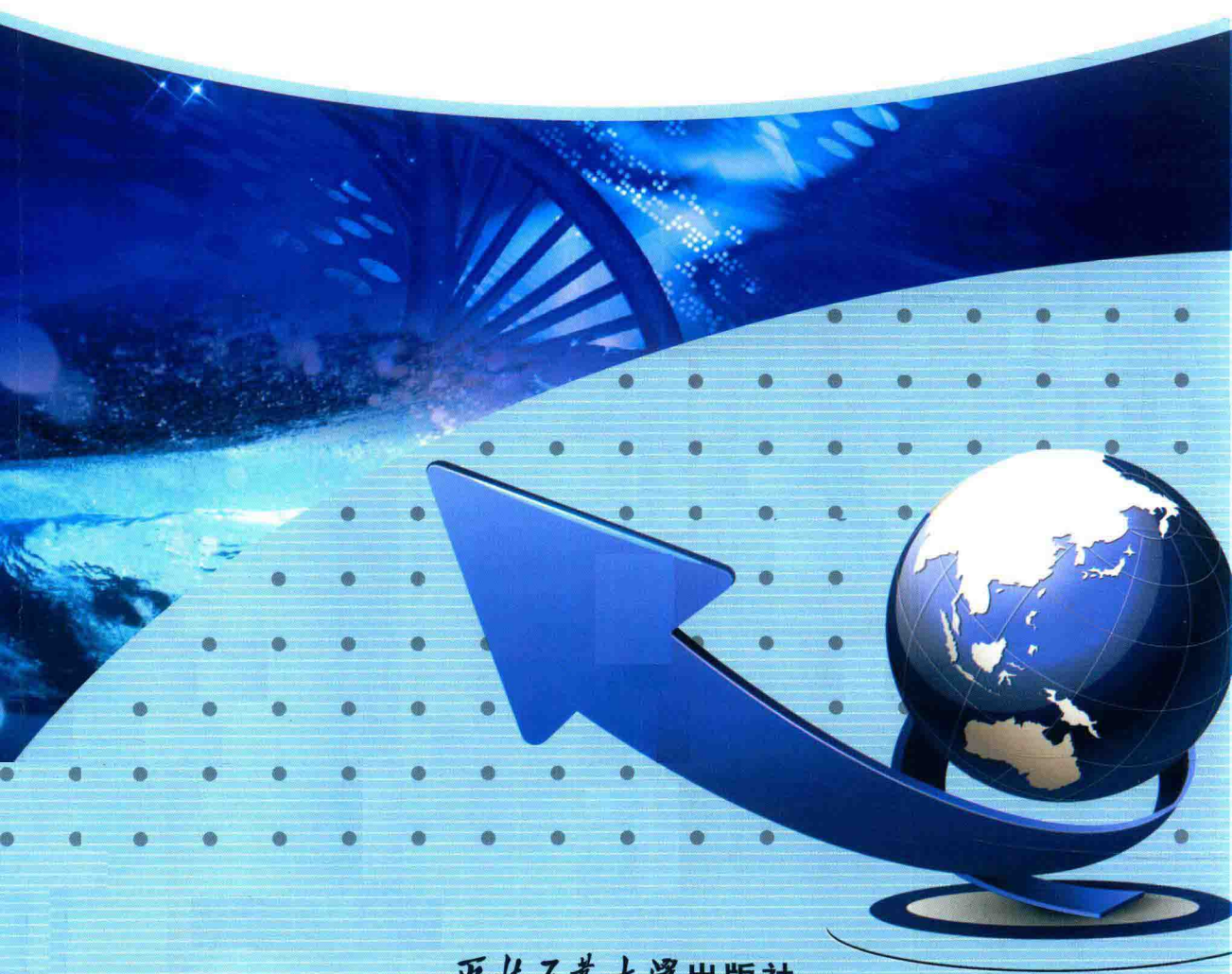




工业和信息化部“十二五”规划教材

水声信息网络基础

赵瑞琴 申晓红 姜喆◎编著



西北工业大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

SHUISHENG XINXI WANGLUO JICHU

水声信息网络基础

赵瑞琴 申晓红 姜 喆 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地介绍水声信息网络的基本理论和组网方法。全书共 8 章,具体内容包括水声信息传输、水声信道的传播特性、水声网络的基本构成与协议体系、水声网络物理层中常用传输方法、水声网络的多址接入方法、组帧与链路差错控制、自动请求重传协议、水声网络中逻辑链路控制技术、网络路由的基本方法、典型水声网络路由协议、水声网络仿真、水声信息网络在海洋探测、监测与观测方面的应用技术以及水声网络节点定位等内容。本书旨在分析海洋声信道特性的基础上,系统深入地阐述水声信息网络的基本理论和方法,使读者在系统掌握水声信息网络的基本原理和框架的基础上,广泛了解水声信息网络的组网新方法和新技术。

本书适合作为高等学校信息工程、通信工程、水声工程、船舶与海洋工程等相关专业高年级本科生或研究生的教材,也可作为水声信息领域技术人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水声信息网络基础/赵瑞琴,申晓红,姜喆编著. —西安:西北工业大学出版社,2017.6
ISBN 978-7-5612-5379-3

I. ①水… II. ①赵… ②申… ③姜… III. ①水声通信—信息网络 IV. ①TN929.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 147324 号

策划编辑:杨 军

责任编辑:王 静

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:8.75

字 数:209 千字

版 次:2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价:29.00 元

前 言

海洋科技大发展,催生了以水声通信和网络技术为基础的水声信息网络技术。在海洋环境监测、海洋资源开发、海洋灾害预报、辅助导航、分布式战术预警及水下目标探测等方面,水声网络有着非常光明的应用前景。可以预见,水声信息网络将成为经济发展和国家战略安全的强大推动力,对人们的生活方式和社会的发展变革将会产生重大和深远的影响。

本书的宗旨是在分析海洋声信道特性的基础上,系统深入地阐述水声信息网络的基本理论和方法,使读者对水声信息网络的基本原理和框架有广泛的理解,对水声信息网络的组网新方法和技术有所涉猎。这些原理包括水声信息网络的组网理论方法,对其进行分析的方法和工具,以及设计水声信息网络系统时利弊的权衡与深入理解。

全书共8章。第1章概括介绍水声信息网络的基础知识,包括水声信息传输、水声网络的基本构成、网络分层协议体系及跨层设计,最后阐述水声信息网络的研究与发展。在第2章阐述水声信道的传播特性,主要包括海水中的声速与多径传播、声传播的多普勒效应与起伏效应、声信道的时变与空变性等内容。第3章讲述水声信息网络物理层中常用传输方法,涉及单载波调制方法、均衡技术以及扩频技术等内容。第4章讨论水声信息网络的多址接入方法,分析网络中多个用户如何高效共享一个物理链路资源的方法,涵盖网络时延模型、固定多址接入协议、随机多址接入协议和基于预约方式的多址接入协议等。第5章讨论链路层如何形成一条可靠的链路通道,为高层提供更为可靠的数据传输服务,其主要内容包括组帧技术、链路差错控制、自动请求重传协议、流量控制以及水声信息网络中逻辑链路控制的一些新方法。第6章讨论网络路由的基本方法,按照不同的分类依据对路由协议进行分类,最后讨论针对水下环境特点而设计的典型水声信息网络路由协议。第7章是水声信息网络仿真,介绍两种常用的网络仿真软件,重点讲述如何利用仿真软件完成对水声信息网络的建模与性能分析。第8章对水声信息网络的应用,尤其是近10年的新技术、新进展进行简要的介绍;简述水声信息网络在海洋探测、监测与观测方面的应用情况;最后介绍几种水声信息网络应用的关键技术及研究热点,包括网络数据融合、水声信息网络节点定位和水声信息网络的最优布放等内容。

本书是国内第一本关于水声网络的教材,也是工业和信息化部“十二五”规划

教材,本书的出版得到国家自然科学基金(61571367)和教育部高等学校博士点基金的资助。本书是在介绍基本原理的基础上,根据当前水声信息网络的最新发展动态,结合8年来的教案和教学经验撰写而成的,其中部分内容在西北工业大学研究生班进行了试用。本书可作为高等学校信息工程、通信工程、水声工程等专业的本科生教材,也可作为通信与信息系统与水声工程硕士研究生的教材,以及其他从事水声信息网络研究人员的参考书。

本书由赵瑞琴编写第1,4,6,7章和附录,申晓红编写第2,5,8章,姜喆编写第3章。全书由赵瑞琴修改定稿。参与编写工作的还有白卫岗、王鑫、李保军、赵晓博、王亚祥、刘孟杰和李森等。选修西北工业大学“水声通信组网技术”课程的部分硕士研究生也协助进行了校对工作,在此表示感谢。

全书承西北工业大学黄建国教授、厦门大学许肖梅教授仔细审阅并提出了许多宝贵意见,谨致以衷心的感谢。感谢西北工业大学航海学院与工业和信息化部“海洋声学信息感知”重点实验室“深水信息感知”研究团队的支持。

由于水平有限,书中难免存在疏漏与差错,敬请读者批评指正(E-mail:rqzhao@nwpu.edu.cn)。

赵瑞琴

2016年9月

目 录

第 1 章 水声信息网络概论	1
1.1 水下信息的传输	1
1.2 水声网络	4
1.3 网络分层协议体系及跨层设计	7
1.4 水声信息网络的研究与发展	11
参考文献	12
第 2 章 水声信道传播特性	14
2.1 水声信道中的带宽与频率	14
2.2 海水中的声速与多径传播	19
2.3 多普勒效应及时变特性	22
2.4 水声信道统计特性	25
2.5 水声信道传输的多样性	27
参考文献	28
第 3 章 水声网络的物理层传输	29
3.1 单载波数字调制	29
3.2 均衡技术	35
3.3 扩频技术	41
参考文献	46
第 4 章 水声网络的多址接入	48
4.1 概述	48
4.2 网络时延模型	49
4.3 固定多址接入	51
4.4 随机多址接入	56
4.5 预约多址接入	61
4.6 不同的多址接入策略的结合	67
参考文献	68

第 5 章 水声网络的逻辑链路控制	69
5.1 概述	69
5.2 组帧技术	69
5.3 链路差错控制	73
5.4 链路流量控制	80
5.5 水声网络逻辑链路控制新方法	82
参考文献	83
第 6 章 水声网络路由	84
6.1 概述	84
6.2 无线网络路由	84
6.3 路由协议分类	85
6.4 典型的水声网络路由协议	88
参考文献	94
第 7 章 水声网络仿真	96
7.1 概述	96
7.2 常用的网络仿真软件	96
7.3 基于 OPNET 的水声信道仿真建模	98
7.4 水声网络仿真实例	100
参考文献	114
第 8 章 水声信息网络的应用技术	115
8.1 水声信息网络的应用	115
8.2 水声信息网络的应用新技术	122
参考文献	130
附录 英文缩写对照表	131

第1章 水声信息网络概论

海洋是生命的摇篮,是人类赖以生存的基础。广袤的海洋给人类提供了各种丰富的资源,被誉为人类的未来粮仓。面对能源危机、资源紧缺等日益突出的全球性问题,人们通过探索海洋奥秘,积极地开发和利用海洋资源,海洋时代已经来临。然而,海洋也时常发脾气,风暴潮灾害、巨浪灾害、海冰灾害、海雾灾害、大风灾害及地震海啸灾害等突发性自然灾害,不仅威胁海上及海岸安全,有时还危及沿海地区与国家的经济和人民生命财产的安全。

海洋时代的到来,催生了以水声通信和网络技术为基础的水下信息技术。在海洋灾害预报、海洋资源开发、海洋环境监测、水下搜救、辅助导航及水下目标探测等方面,水下信息网络尤其是水下无线声网络,即水声信息网络有着非常光明的应用前景。可以预见,水声信息网络将成为经济发展和国家战略安全的强大推动力,对人们的生活方式和 社会的发展变革将会产生重大和 意义深远的影响。

本书讨论水声信息网络的组网技术。为了便于读者学习各章内容,本章将概括介绍相关的基础理论与方法,包括水下信息传输、水声信息网络的基本构成、网络分层协议体系以及水声信息网络的研究与发展。

1.1 水下信息的传输

水下信息传输是人类探索海洋、利用海洋必不可少的信息交互方式。例如,浮标与水下传感器、水面舰艇与潜艇、潜艇与潜艇、潜艇与水下无人航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)或自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、母舰与蛙人、蛙人与蛙人之间的信息交流都离不开水下信息的传输。对于水下传感器网络、UUV 网络等水下网络的构建而言,水下信息传输更是其基石。

信息在水下传输分为有线传输和无线传输两种方式。有线传输通过水下电缆或光缆实现,具有信号稳定、抗干扰能力强等优点,但水下线缆不仅价格非常高,而且在水下铺设线缆投资巨大,施工艰难,且存在线缆难以移动的问题,这些因素限制了水下有线信息传输的发展及应用。无线传输方式投资小、方便灵活、且不受空间位置的限制,从而成为水下信息传输的重要方式。本书重点讨论水下信息的无线传输与交互。

1.1.1 水下信息的传输媒介

就目前人类对自然界的探索与认知水平而言,能够作为水下信息传输媒介的主要有电磁波、光波和声波三种。

电磁波作为信息传输媒介,其优点在于传播速度非常快。然而,在采用无线方式进行传输时,海水对电磁波的吸收作用很强,电磁波在水中的衰减程度与其频率相关,频率越高,衰减越

大。例如,在几十到几百赫兹超低频段,电磁波可以在水中传播较远的距离,但必须要求非常大的发射天线和高的发射功率;而在几百兆赫兹以上的高频段,电磁波在水中的传播距离小于 10 m。因此,海水的传导特性造成巨大的传播损失,从而严重限制了通信距离,这是电磁波在水下作为信息传输媒介的主要缺陷。

光波作为传输媒介的主要优点也在于其传播速率较高,然而这种信息传输方式也存在很多问题。第一,光信号在海水中的吸收损失非常大;第二,海洋中悬浮颗粒和浮游生物引起的光散射非常严重,光波因散射问题在水中会引起很大的衰减;第三,浅海区域具有很强的背景光噪声,从而对光波通信的性能造成很大的影响。

利用声波作为信息传输媒介是目前水下无线通信的主要方式,这是因为声波在海水中的吸收损失相对较小。声波已被认为是解决长距离水下信息传输最有效的载体。电磁波和光波在海水中的传输衰减严重、传导性很差,而声音在海洋中有很强的传播能力。实验表明,几千克 TNT 炸药的爆炸声,能够在海洋中 6000 km 的距离处被接收到。

表 1-1 中对三种无线通信媒介的主要特点进行了对比^[1]。从表中可知,声波在水下作为信息传输的媒介虽然存在传播速度很低且带宽非常有限的问题,但是其传播距离明显大于其他两种无线通信方式,用声波作为信息传送载体是目前海洋中实现中长距离无线通信的唯一有效手段。因此,目前绝大多数水下无线通信系统采用水声通信方式。

表 1-1 三种物理波水下通信特点对比

物理波 参数	电磁波	光波	水中声波
传播速度	约为 3×10^8 m/s	约为 3×10^8 m/s	约为 1500 m/s
功耗	约为 $28\text{dB}/(\text{km} \cdot (100\text{ MHz})^{-1})$	∞ 浊度	$>0.1\text{dB}/(\text{m} \cdot \text{Hz}^{-1})$
可用带宽	MHz 量级	10~150 MHz	kHz 量级
频段	MHz 量级	$10^{13} \sim 10^{15}$ Hz	kHz 量级
通信距离	约为 10 m	10~100 m	km 量级
数据率上限	10 Mb/s	1 Gb/s	100 kb/s
收、发设备尺寸	约为 0.5 m	约为 0.1 m	约为 0.1 m

水声信道是一个随时间和空间均发生变化的复杂信道,并且信道传播特性会受到严重的传播损失、噪声、多径和多普勒频移等因素的影响,水声信道具有传播时延长,信道带宽窄和数据传输错误率高的特点,这也决定了水声信道与空中无线信道存在着显著的区别^[2]。水声信道具体传输特性包括以下几个方面:首先,声信号在水中的传播平均速度为 1500 m/s,相应的传输延时约为 0.67 s/km,相比电磁波在空中以 3×10^8 m/s 的速度传播,其传播速度整整低了 5 个量级,这将导致水声网络中节点间的数据传播延时长,从而会降低网络性能。其次,声信号的传播速度随着海水的深度、温度、盐度等因素的变化而变化,这将导致信号到达时间的误估计,对很多网络协议的设计产生较大的影响;此外,水声信道受到严重的多径效应与多普勒频移的影响,声链路时断时续,且信道速率远低于水上无线电通信所提供的速率。最后,水

声信道的传播损失随信号频率和通信距离的增加而迅速增加,这使得信道带宽成为通信距离的函数,通信距离在 10~100 km 时带宽只有几千赫兹,当通信距离在 100 m 以内时带宽可在 100 kHz 以上。

总之,水声信道的传播损失、海洋噪声、多径效应以及多普勒频移等因素最终将影响水声通信数据传输的可靠性,因此水声信道的传输特性总体可以归纳为传播时延长、信道带宽窄和传输不可靠三个方面。而水声信道复杂的时变与空变特性使水声信道具有与水上无线电信道截然不同的特性,因此水上无线网络的组网方法无法直接应用于水下信息网络。

1.1.2 水声通信及其性能指标

为了在信息传输的有效性与可靠性两方面获得较好的性能,现有的水声通信系统大多是以数字通信的形式出现,其系统框图如图 1-1 所示。具体包括信源、信源编码与解码、加密与解密、信道编码与解码、调制与解调、水声信道与噪声等。

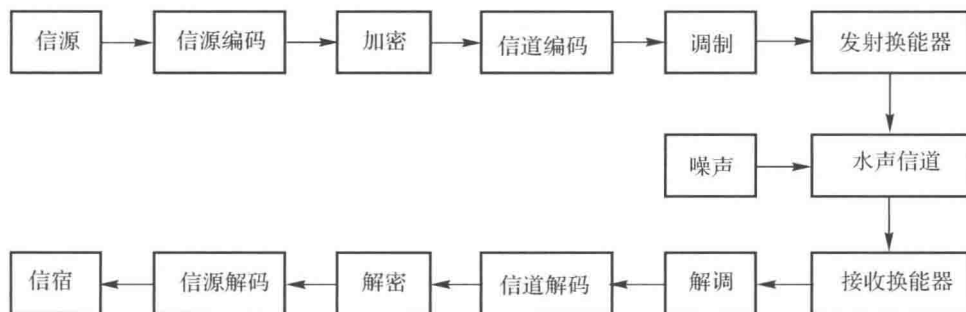


图 1-1 数字水声通信系统原理框图

各部分功能如下:

(1)信源与信宿。信源产生图像、声音、数据等信息,分为模拟信源和数字信源。数字通信只能传输数字信号,当信源产生的是模拟信号时,需模/数转换为数字信号。信宿即接收端,所接收到的为最终信息。

(2)信源编码与解码。信源编码的基本目的有两个:一是提高信息传输的有效性,即通过某种压缩编码技术设法减少码元数目,降低传输对码元速率的要求;二是完成模/数转换。解码是编码的逆过程。

(3)信道编码与解码。经信源编码后的数字信号抗干扰能力弱,在信道中传输时易受到噪声干扰产生差错。为增强抗干扰能力,必须对传输的码元信息按一定的规则加入冗余度,以便接收端的信道译码器按相应的逆规则去发现或纠正信号在传输中发生的错误,提高通信系统的可靠性。

(4)加密与解密。加密适用于需要实现保密通信的情景。为了保证所传信息的安全性,人为地将被传输的数字序列扰乱,即加上密码。在接收端利用与发送端相反的处理过程对收到的序列进行解密,恢复出原来的信息。

(5)数字调制与解调。数字调制是把数字基带信号频谱搬移到高频处,形成适合在信道中传输的带通信号。水声通信中常用的数字调制方式有相移键控(PSK)、频移键控(FSK)和正

交幅度调制(QAM)。接收端可以采用相干或非相干解调还原数字基带信号。

(6)发射/接收换能器。水声发射换能器将电信号转换为声信号,并辐射出去。接收换能器将接收到的声信号转换为电信号。

通信的任务是快速、准确地传输信息,因此传输信息的有效性和可靠性是通信系统最主要的性能指标,这两者是既相互矛盾又相互联系的,且通常是可以互换的。有效性是指在给定信道上单位时间内所传输的信息内容的多少,衡量数字通信的有效性的主要性能指标是传输速率、频带利用率;可靠性是指接收信息的准确程度,衡量数字通信可靠性的主要指标是错误概率,而这与接收端的信噪比(SNR)有关。

符号传输速率 R_B (Baud) 为单位时间内传输符号的数目。若一个符号周期为 T , 则 $R_B = 1/T$ 。

比特传输速率 R_b (b/s) 为单位时间内传输信息量(比特)。若一个符号周期为 T , 且为 M 元调制, 则 $R_b = \frac{\log_2 M}{T}$ b/s。

频带利用率 R_b/W ((b/s)/Hz, W 为接收机的带宽): 在比较不同调制方式的通信系统时, 单看传输速率是不够的, 还应看在这样的传输速率下, 所占的信道频带宽度。因此真正衡量数字通信系统传输效率的指标为单位频带内的传输速率。

符号错误概率 P_B = 错误符号数/传输总符号数

比特错误概率 P_b = 错误比特数/传输总比特数

SNR 与比特 SNR 的关系: 若一个符号的能量为 ϵ_s , 则 1 比特信号的能量为 $\epsilon_b = \epsilon_s / \log_2 M$ 。一个符号的平均功率为

$$P_s = \frac{\epsilon_s}{T} = \frac{\epsilon_s R_b}{\log_2 M} = \epsilon_b R_b \quad (1-1)$$

接收机的噪声功率为

$$P_N = N_0 W \quad (1-2)$$

其中, N_0 为加性噪声的平均功率谱密度。信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_N} = \frac{\epsilon_b R_b}{N_0 W} = \frac{\epsilon_b}{N_0} \frac{R_b}{W} \quad (1-3)$$

其中, ϵ_b/N_0 为比特 SNR。从式(1-3)可看出, SNR 为比特 SNR 与频带利用率之积。

1.2 水声网络

水面和空中通信广泛采用的电磁波或光波辐射形式在水中的传播距离很短, 水下无线通信主要采用声波来传播信息。因此, 目前水下信息网络大多以水声网络(Underwater Acoustic Networks, UAN)的形式出现^[2]。

水声网络^[3]是由布放在海底至海面广阔水体中的节点(包括固定的传感器节点、水面船只、装载传感器的移动平台 AUV, UUV 和遥控式潜水器 ROV 等)和海面浮标节点以及它们之间的声链路组成的分布式、多节点、大面积覆盖水下三维区域的通信网络。利用水声网络, 可实现对水下获取信息的进一步处理, 并通过水声网络节点以中继方式将结果回传到陆基或船基的信息控制中心和卫星。

随着世界各国开发海洋和利用海洋步伐的加快,水声网络在民用水下工程以及军事防御等方面均有着重要的应用价值与意义,因此在以下领域引起了学术界和工业界的高度重视。

(1)数据采集。水声网络可用于采集各种海洋数据,如测算海流的速度,获取海水的温度、盐度等数据信息。例如,美国佛罗里达大西洋大学利用水下航行器协同传感器节点工作,对沿海水域进行自适应数据采样,验证了水声网络具有提高观察和预测海洋环境的能力。

(2)环境监测。海洋环境的变化越来越受到人们的关注。水声网络通过带有传感器的节点对水质的分析,可监测海洋的污染状况;通过对洋流和海风的监视,可检测气候的变化,提高天气预报的准确性;通过对鱼群或微生物的监测,可进一步了解人类活动对海洋生物的影响。

(3)资源勘探。水声网络有助于勘探各种海洋矿产资源、检测搜寻海底石油和天然气资源以及测定水下电缆的布放线路等。

(4)灾难预警。水声网络对海底地震带进行长期监测,当发现有异常地震活动情况,可及时发布海啸警报,通知沿海地区做好预防工作。

(5)导航辅助。水下传感器节点可用来识别暗礁和浅滩,辅助海上的船舶航行,也可引导海上搜救人员搜寻和打捞失事船只。

(6)军事警戒。利用水声传感器网络的快速部署和自组织的特点,可在海上战场部署水下警戒网,通过 UUV 和水下传感器协同工作,达到对战场进行实时监控和态势感知。

1.2.1 水声网络的基本构成

1. 水声网络节点及其特点

水声网络的基本单元是网络节点。对于不同的网络应用,水声网络节点的设计也各不相同,但是它们的基本结构是类似的。节点典型的硬件结构主要包括传感器、传感器接口电路、微处理器、存储器、水声 Modem、电池及电源管理电路。传感器和传感器接口电路负责采集目标区域的数据,将数据发送给微处理器。它主要负责对数据进行处理及控制整个传感器节点的操作;存储器存储采集的数据和其他节点要进行转发的数据;水声 Modem 负责与其他传感器节点进行通信和完成组网功能,实现交换控制信息和收、发采集数据;电池和电源管理电路为节点的各个模块供电。由于节点在水下工作,能量受限,为了最大限度地节省能耗,应尽量在硬件方面采用低功耗器件,并且电源管理电路要进行相应的节能设计,例如在没有通信任务时,切断水声 Modem 电源等,以获得更高的节能效果。

根据不同的应用需求,水声网络节点可以分成很多种类。如分析海水密度、温度、盐度以及各种化学成分的水质测量传感器;还有用于测量光谱的硫化物、硅酸盐传感器以及测量光辐射的量子传感器等。一般而言,水声网络节点具有以下特点。

(1)节点寿命有限。水下节点通常由电池供电,电池容量有限,而通过更换电池的方式补充能源在水下是不现实的,为此如何分配能量(或功率)来最大化网络寿命是水声网络面临的首要问题。

(2)移动性强。由于洋流、海浪和其他因素,大多数水声网络节点都存在不同程度的漂移或移动。AUV 和 UUV 节点本身就是移动性节点,节点的移动造成网络拓扑结构的不稳定,导致网络协议设计面临较大的困难。

(3)定位困难。水声网络中,除了漂浮于海面的节点外,大部分位于水面以下,而 GPS 由

于电磁波信号在水下急剧衰减而在水下无法使用,为此水下节点的定位是个难题。再者,节点的飘移或移动给定位问题提出了更大的挑战。

(4)计算和存储能力有限。水下节点是一种嵌入式设备,要求它功耗低,这些限制必然导致其携带的处理器计算能力较弱,存储容量较小。

(5)可靠性低。水下环境恶劣,传感器节点容易遭受污垢或腐蚀,且人为维护困难,故节点可靠性较低。

2. 水声网络的分类与组成

水声网络有多种分类方式,根据监测或观测对象不同,可分为海洋环境监测网络、水下钻探网络、水下灾害预报网络、辅助导航网络、分布式战术预警网络及水下探测网络等。根据节点在水下空间布放的差异,水声网络可分为静态二维、静态三维和动态三维三种网络结构。其中,静态二维网络中节点被锚定在海底,传感器信息可以通过 AUV 定时收集或者直接发往浮在海面的基站,然后通过无线电与卫星、船舶或者陆基基站通信,最终将海底传感器信息传给用户。静态三维网络将带有气囊的水下节点锚定在海底,或者利用浮标将节点下降到不同的深度都可形成静态三维网络。动态三维网络由多个 AUV, UUV 等移动节点单独组成,或与固定节点形成混合三维网络。水声网络也可以根据网络节点密度和空间覆盖范围分类,将网络节点的覆盖空间与节点的通信范围相比较,若所有节点间都能直接通信,则为单跳网络;若空间进一步增大,源节点与目的节点需要增加跳数,形成多跳网络;若空间继续增大,原有的链路无法满足源节点与目的节点的通信,即网路中部分链路被切断,此时网络被称为中断容忍水声网络。

1.2.2 水声网络的特点

水声网络与空中无线传感器网络存在着共同之处,但由于海洋环境的特殊性,使得水声网络具有如下显著的特点。

1. 信道质量差

水声信道受传播损失和海洋噪声的影响严重,多径和多普勒效应明显,使得水声通信链路传输不可靠且链路中断现象时有发生,这是水声网络与空中无线传感器网络的重要区别之一。水声信道具有传播时延长、信道带宽窄和传输不可靠的特点,具有与水上无线电信道截然不同的特性,因此水上无线网络的组网方法无法直接应用于水声网络。

2. 电池能量有限

水下节点采用电池供电,能量有限且不易补充和更换。另外,相比于空中无线通信,水声通信要求更高的发射和接收功率以及更为复杂的信号处理技术,这些都需要消耗更多的电池能量,因此如何高效地使用能量,从而最大化网络的运行周期是水声网络设计的一项重点内容。

3. 稀疏网络

考虑到水下节点的高昂的造价与维护成本,且由于海洋范围大、面积广阔,水声网络中节点的部署一般具有稀疏性。

4. 自组织网络

水声网络通常布放在无基础设施的海域,传感器节点的位置不能预先确知,节点间的相邻关系也无法预先设定。因此,网络需具备自组织能力,节点通过分层协议和分布式拓扑控制算法协调各自的行为,可快速、自动地组成一个独立的网络。

5. 动态拓扑

水声网络的拓扑结构可能因多种因素而改变,如电池能量耗尽导致网络节点发生故障或失效;海洋环境变化引起水声通信链路时断时通;节点移动和新节点加入等也会使得网络拓扑结构发生改变,因此需要水声网络能够自动适应这种变化。

6. 可靠性要求高

水声网络通常部署在恶劣的海洋环境,传感器节点容易遭受污垢和海水侵蚀,因此要求节点硬件具有很强的防水性、抗压性和防腐蚀性。同时,由于水下节点不便于管理和维护,所以还要防止节点或监测数据被盗的现象发生。

1.3 网络协议体系及跨层设计

1.3.1 网络分层与协议体系

网络分层,即将整个网络的通信功能划分为若干层次,令每层各自完成一定的功能,且功能相对独立,通过层间接口与相邻层连接,并且要求每一层内部的改变应不影响其他层的功能。以现实生活中信件投递为例,如图 1-2 所示,假设位于 A 地的一位寄信人写了一封信,并通过邮政系统送给位于 B 地的收信人。可以看出,整个寄信与收信过程可以分为三层,其中,寄信人/收信人为最高层,邮局为第二层,车站为最底层。其中,每一层之间的一些事先的约定称为协议,如写信人与收信人事先约定使用中文通信就是一种约定。而在通信过程中,每一层使用下层提供的服务并向其上层提供服务,最高层则无需提供服务且使用较低层提供的服务,如邮局在整个通信过程中通过使用车站的运输服务,写成为写信人/收信人提供收件/派件服务。

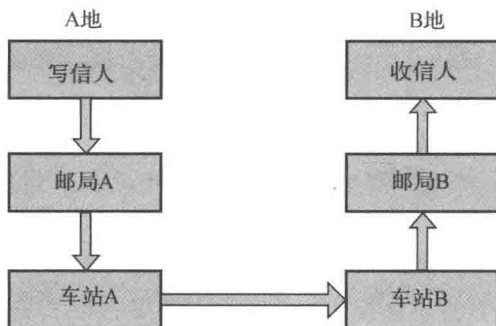


图 1-2 信件投递过程示意图

对网络进行分层的好处体现在以下几方面。

(1) 灵活性好。当任何一层发生变化时,只要层间接口关系保持不变,则在这层以上和以下的各层均不受影响。此外,对某一层提供的服务还可进行修改。当不再需要某层提供的服务时,甚至可以将这层取消,更容易管理。分层使得各层间耦合度降低,不仅大大降低后续增加功能的成本,而且还利于各层功能的模块化与细化。

(2) 各层之间独立。在各层间标准化接口,允许不同的产品只提供某一层的功能,某一层不需要知道它的下一层是如何实现的,而仅仅需要知道该层通过层间的接口所提供的服务。由于每一层只实现一种相对独立的功能,因而可将一个难以处理的复杂问题分解为若干个较容易处理的更小一些的问题。

(3) 易于实现和维护。这种结构使得实现和调试一个庞大而又复杂的系统变得易于处理,因为整个系统已经被分解为若干个相对独立的子系统,大大减少了系统的复杂性。

(4) 能促进标准化工作。因为每一层的功能及其所提供的服务都已有了明确的说明,较低的层为较高的层提供服务,层间的标准接口方便了工程模块化与标准化工作。

下面,我们分别对 OSI 协议体系, TCP/IP 协议体系以及无线网络常采用的简化网络协议体系这三种最重要和最常见的网络分层协议体系进行介绍。

1. 开放式系统互联体系结构

国际标准化组织将网络协议体系模型分为 7 个层次,并将其作为开发协议标准的框架,这一模型称为开放式系统互联(Open System Interconnect, OSI)模型,模型结构如图 1-3 所示。可以看出,OSI 模型由高至低包括应用层、表示层、会话层、传输层、网络层、数据链路层和物理层 7 层。下面分别对各层的主要功能进行简要介绍。

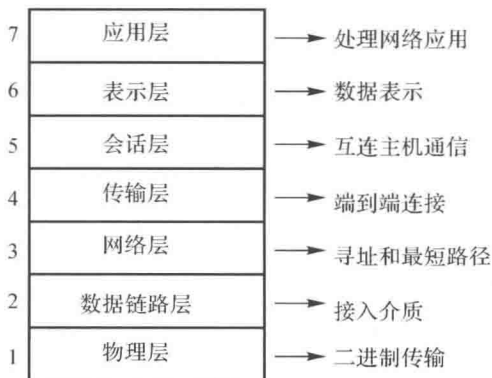


图 1-3 OSI 参考模型

第 1 层:物理层。物理层为在由物理通信信道连接的任一对节点之间,提供一个传送比特流的比特管道。在发射端它将从高层接收的比特流变为适合于物理信道传输的信号,在接收端再将该信号恢复成所传输的比特流。在这一层,数据还没有被组织,仅作为原始的位流或电气电压处理,单位是 bit。

第 2 层:数据链路层。数据链路层解决如何在不可靠的物理链路上进行数据可靠传递的问题,负责数据块(帧)的传送,并进行必要的同步控制、差错控制和流量控制。其中,帧是用来移动数据的结构包,它不仅包括原始数据,还包括发送方和接收方的物理地址以及检错和控制

信息。其中的地址确定了帧将发送到何处,而纠错和控制信息则确保帧无差错到达。如果在传送数据时,接收点检测到所传数据中有差错,就要通知发送方重发这一帧。由于有了第2层的服务,其上层可以认为链路上的传输是无差错的。

第3层:网络层。网络层的基本功能是把网络中的节点和数据链路有效地组织起来,为高层(终端)提供透明的传输通路(路径),使高层的功能独立于用来连接网络节点的传输和交换技术。网络层通常解决路由选择、寻址和传输问题,它还包括不同长度分组的适配、连接的建立、保持和终止等。

第4层:传输层。传输层可以看作是用户和网络之间的“联络员”。它利用底3层所提供的网络服务向高层提供可靠的端到端的透明数据传送。它根据发送端和接收端的地址定义一个跨过多个网络的逻辑连接(而不是第3层所处理的物理连接),并完成端到端(而不是第2层所处理的一段数据链路)的差错纠正和流量控制功能。它使得两个终端系统之间传送的数据单元无差错,无丢失或重复,无次序颠倒。

第5层:会话层。会话层负责控制两个系统的应用程序之间的通信。它的基本功能是为两个协作的应用程序提供建立和使用连接的方法,而这种表示层之间的连接就叫“会话”。除此之外,会话层还可以提供一些其他服务,例如提供不同的通信类型(两个方向同时进行,两个方向交替进行,或单方面进行等),以及遇到故障时的通信的恢复(同步)。即会话层除向高层提供连接外,还考虑了通信的规则和连续性。

第6层:表示层。表示层负责定义信息的表示方法,并向应用程序和终端处理程序提供一系列的数据转换服务,以使两个系统用共同的语言来进行通信。例如,在 Internet 上查询用户的银行账户,使用的即是一种安全连接。用户的账户数据在发送前被加密,在网络的另一端,表示层将对接收到的数据解密。除此之外,表示层协议还对图片和文件格式信息进行解码和编码。

第7层:应用层。应用层是最高的一层,直接向用户提供服务,它为用户进入 OSI 环境提供了一个窗口。应用层包含管理功能,同时也提供一些公共的应用程序,如文件传送、作业传送和控制、事务处理、网络管理等。应用层只使用其下面6层提供的服务,而它本身不再向上提供服务。

2. TCP/IP 协议的体系

TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)协议族,即传输控制协议/因特网互联协议,是 Internet 最基本的协议,也是 Internet 国际互联网络的基础。TCP/IP 协议族定义了电子设备如何连入因特网,以及数据如何在它们之间传输的标准。TCP/IP 协议族将通信任务组织成5个相对独立的层次:应用层、传输层、互联网层、网络接入层、物理层。

3. 简化网络协议分层体系

一般的无线网络以开放系统互联模型 OSI 和 TCP/IP 协议族结构为基础,采用简化网络协议分层体系(见图1-4)。简化网络协议分层体系是将 OSI 的上3层合并起来统称为应用层,而低4层保持不变的一种5层网络协议体系。简化网络协议分层体系中网络协议的研究重心在底4层,这符合一般无线组网的特点。

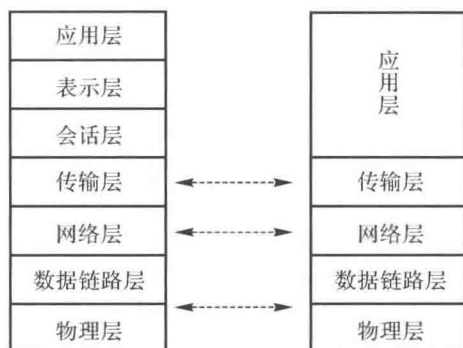


图 1-4 OSI 与简化网络协议分层的对应关系模型

结合海洋环境的特点,水声网络一般也采用这种 5 层简化网络协议分层体系^[4],下面针对水声网络分别对底 3 层进行讨论。

1. 物理层

物理层主要涉及点对点链路上的比特传输,包含调制、编码、均衡、同步、自适应技术等。相比于电磁信道,水声信道载波频率低,可用带宽窄,多径效应与多普勒频移问题严重,被认为是最恶劣的无线信道之一,这严重制约物理层信道的选择和分配、发送功率、误比特率、信号编码调制方式、信道估计与均衡等。因此物理层的设计目标是以相对低的能量消耗,克服信道畸变与干扰,获得较大的链路容量。

2. 数据链路层

数据链路层由媒质接入控制(Medium Access Control, MAC)子层和逻辑链路控制(Logical Link Control, LLC)子层两个子层组成。其中 MAC 子层主要解决媒体接入控制问题,即 MAC 协议的设计。水下高时延、时延的动态变化、低带宽以及低能耗的要求,对水下 MAC 协议的研究带来了挑战。LLC 子层的功能包括组帧、链路差错控制及流量控制等。

3. 网络层

水声网络中网络层主要负责源节点到目的节点之间数据传输路径的确定,即完成路由的功能。现有的无线网络路由协议主要分为 3 种:表驱动路由协议、按需式路由协议和地理路由协议。表驱动路由协议不考虑网络中的业务流量等因素,会造成资源浪费;按需式路由协议只在必要的时候进行路由发现,负载小、节能,适用于移动性高而负载低的网络,然而出现路由失败,在水下环境中将导致很大的时延和高额开销;地理路由协议利用节点位置信息建立路由,能在一定程度降低路由开销,然而需要定位或时间同步信息。

由于水声网络面临的带宽有限、数据率低、节点电池容量有限、链路的间歇性中断、节点定位困难等挑战,水声网络协议的研究目前主要在底 3 层开展,对其他层的研究较少。

1.3.2 跨层设计

面对带宽有限、信号严重衰落的无线信道,传统的分层协议存在两大问题:首先是非最优,分层方法拒绝各层之间共享信息,而每层的信息都不是充分的,从而分层协议无法保证整个网