

基于水声的水下无线通信研究

许克平¹, 许天增², 许 茹¹, 程 恩¹, 王清池², 粘宝卿²

(1. 厦门大学电子工程系, 2. 厦门大学海洋学系, 福建 厦门 361005)

摘要: 介绍在水声随机多途径传输的信道中, 基于水声的水下无线通信的方法及其实现。海洋环境的水声信道不仅是一个极其复杂的时—空—频变随机多途径传输信道, 尚有环境噪声高、带宽窄、载波频率低、传输延时大等因素制约数据传输速率。介绍的通信方法及支持实现的关键技术, 都对这些方面的影响予以考虑。做出的语音、图像以及数据 3 种不同的应用系统, 多数已通过海上实验, 效果良好, 可实际应用。并指出国际上技术先进的国家致力这领域研究的也仅在最近才有极少数取得重大突破, 该结果展示它与国际近于同水平同步地进展。

关键词: 海洋; 水声; 无线通信

中图分类号: TN 929.3

文献标识码: A

海洋是人类生存活动十分重要的领域。海啸的准确预警, 资源开发方面的水下自动生产系统, 以及与国家安全有关的多种监控与观通等, 它们要求现代的通信系统是: 陆—海—空三维空间移动互联通信网。

三维移动互联通信网的组成, 当前主要制约于水下通信。光与电磁波在海水中的传播衰减很大, 无法用在中等以上距离的信息传递。例如电磁波, 即使选用甚低频(小于 10 kHz), 配上兆瓦级的发射功率和庞大的天线, 在海水中的穿透力也不外乎 100 m 左右, 数据传输速率达到 100 b/s 而已。水下通信, 水声是当前唯一可选择的有效手段。

之所以这样选择是声波的衰减相对小得多。要不然水声信道是一个十分复杂的时—空—频变参随机多径传输的信道; 还加上它的环境噪声高、带宽窄、可适用的载波频率低、传输的时延大等。这诸多不利因素加剧了抗多径干扰的困难。实现误码率低, 数据率高的水声通信是很困难的, Bill Schweber(美国 EDN 杂志执行总编辑)说, 如果你认为速率为几百兆位/秒的数据链路(铜缆或无线——笔者注)的难度很大的话, 那你试试看达到 2 400 b/s(不过, 这是在水中)就更知其难了^[1]。

收稿日期: 2001-02-15

基金项目: 国家“863”计划(863-512-11-24, 863-512-11-26, 863-512-04-07)和福建省自然科学基金(A 9910001)资助项目

作者简介: 许克平(1938-), 男, 教授

2000 年,美国实现了从水下 400 英尺的潜艇发送 E-M A L 至陆上 其间通过中等距离的水声无线数据传输后,由其他的通信链路予以中转接入因特网^[2,3]。这结果标志水声通信技术达到有实用意义的程度;它亦预示:国际间,出于海洋资源开发、科学研究或军事活动等目的,将竞相研究与组建陆—海—空三维移动通信网 研究的重点放在水下无线移动通信的中继与组网的方法及技术^[4]。

1 多径传播对接收信号的影响

图 1, 2 是浅海负跃层声传播路径的简图^[5]。假设海面和海底都较平整,则路径的形状是由声源所在位置以及整个传播范围内的声速结构所决定 从这个简化的模型中,看到声源和接收器之间存在大量的声路径

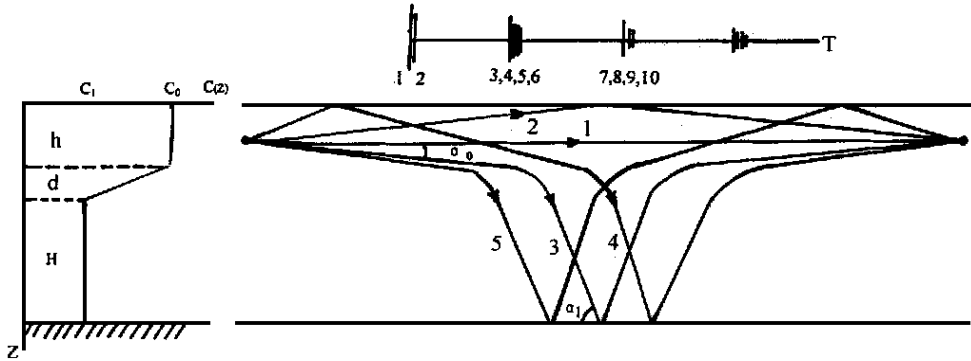


图 1 上发上收的声线图(跃层为界)

Fig 1 Sound rays when upper sending and upper receiving

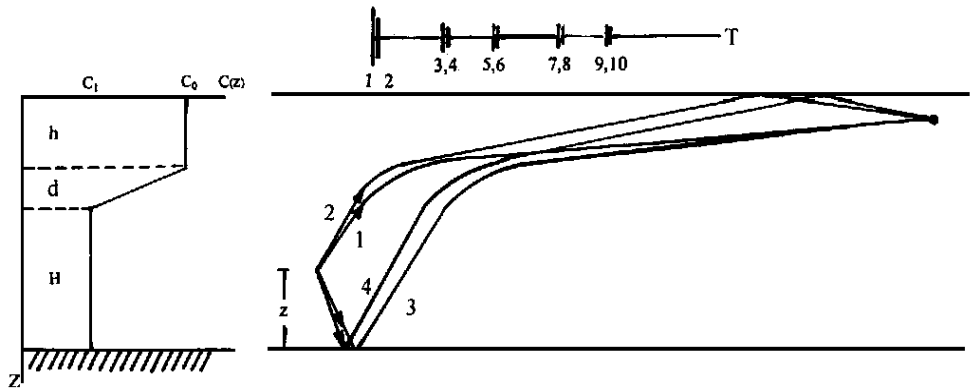


图 2 下发上收的声线图

Fig 2 Sound rays when lower sending and upper receiving

实际的海洋,海面波浪会把入射声波反射到不同的方向上去;同样,海底也不是平整的,尤其海水—沉积层的分界面多数是起伏的;在浅海域声速剖面,绝大多数是复杂的随机分层 因此,声在浅海中传播,实际经历的是复杂的随机多径过程

1.1 多径的影响

对接收信号的影响主要在两个方面: 1) 幅度衰落; 2) 码间干扰

1) 幅度衰落

幅度衰落, 即接收信号忽大忽小 在浅海域大深度衰落是频发性的, 时常衰到小至无法检测 衰落的机理是: 沿各途径的信号(假设简正波)到达接收器时相位不同相干形成的 对此, 用提高发射功率来改善, 显然收效甚微

一定的频率间隔, 衰落的相关性显著降低, 从图 3 海上的实验结果可明显看出 在图 3 中, 脉冲的载波频间 300 Hz, 间隔 10 ms, 标注号[1]与[2]脉冲的信号衰落幅度有较大的差异 可见, 采用频率分集处理幅度衰落是一个较有效的方法 图 4 示出海上试验频率分集方法得到的“此起彼伏”结果(见图中标注号[1]、[2]的脉冲). 不过, 频率分集要关掉窄带的水声信道原就已经十分匮乏的频率资源 从这里看到, 实施抗多径效应, 水声与电磁短波比较, 前者难上加难

2) 码间干扰

无线电短波各径间最大相对延时差绝大多数在 5 ms 以内 水声则不然, 由于海水的声速只有 1 500 m/s, 中、远距离的传播, 各径间相对时差就较大, 同一符号的接收信号以梳状结构分布在较宽的时间轴上(如图 1, 2 所示). 如果传播的是没有间隙的脉冲序列, 多径将造成接收信号发生不同码元重叠, 这给判决带来困难(甚至无法辨别).

码间留有适当的间隙, 这只能用在低速率的传输系统

在时间同步脉冲引导下, 不同时刻发射的脉冲用不同的频率来表示 对于接收, 同一时刻各径到达的信号频率是不同的, 若有同步信号可参考, 则不同时刻的信号频率是确定的(根据码书). 这样, 即便有若干多径形成的干扰码与之混迭, 也有以频率为准则来提取信号的办法 这就是跳频抗多径干扰的思路

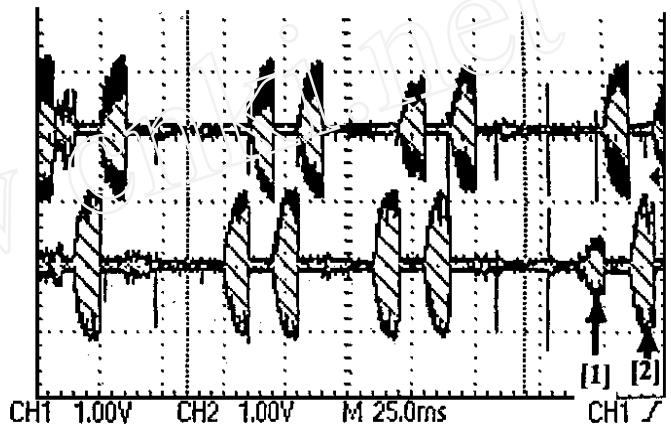


图 3 幅度衰落频率相关性海上实验结果

Fig 3 Relativity of the fading between the frequencies on the sea

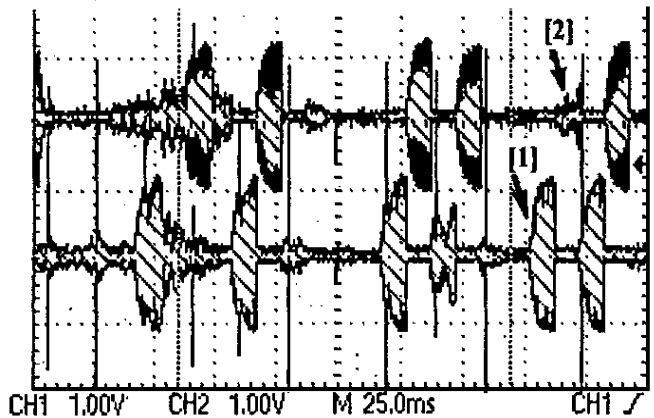


图 4 频率分集海上实验结果

Fig 4 Frequencies diversity on the sea

2 水声通信中抗多径的方法

海洋环境的水声信道, 诚如 Lee Freitag 说: “这是至今还存在的难度最大的无线通信的信道, 也正因为如此, 它同时也是最吸引人的”^[2]。

焦点聚集在大陆架(浅海域 0~ 200 m 海深)实现水声通信 因为这是难度最大, 也是经济与军事活动最有意义的区域, 关键是抗多径干扰 抗多径的主流方法有两种: 一是全自适应式; 另一种是扩展频谱式

1) 自适应方式

自适应的名目繁多, 最关键的(也是最难的)是如图 5 所示的解调器 不过, 能否对付多变复杂的信道这是一个问题

构想: 先通过较简单、易实现的判决反馈均衡(DFE), 减小多径对传输信号的影响(如时间扩散), 使后继的最大似然序列检测(MLSE)较易实现

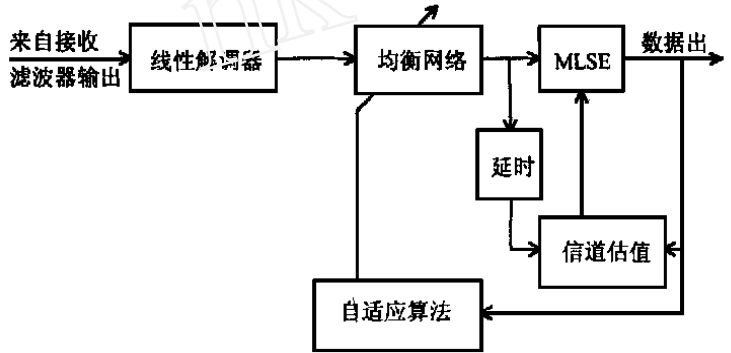


图 5 DFE 与 MLSE 组合的解调器原理框图

Fig 5 Block diagram of DFE & MLSE demodulator

问题是: 要做到快速跟踪信道的变化来实时调节均衡网络, 在当前, 信道估算及 MLSE 尚难胜任 在深海变化较慢、较稳定的信道, 可选择这种方法

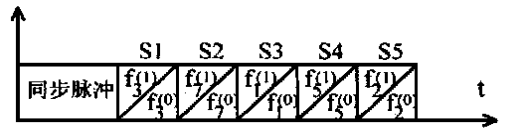


图 6 跳频的脉冲序列结构

Fig 6 Pattern of frequency-hopping sequence

2) 扩展频谱方式

这里主要讨论扩频中的跳频方式 图 6 示出跳频通信脉冲序列的结构 图中: 逻辑“1”或“0”分别用 $f_i(1)$ 或 $f_i(0)$ 频率予以表示 图 6 的序列结构是按约定的码书排列的, 因此, 接收端离同步不同时间的信号频率是确定的, 例如距离同步 4 个脉冲宽度间隔的信号 S_5 , S_5 : 是“1”则为 $f_2(1)$; 是“0”则为 $f_2(0)$. 非 $f_2(1)$ 、 $f_2(0)$ 的频率信号按“干扰”排除

对于自适应方式, 信道特性“变”就需自适应调整过程, 频繁地变(浅海域实际存在), 难免无以是从自适应 对于跳频方式, 则不管怎样变, 可根据同步脉冲, 按位据已知频率来检测信号, 就方法(不是指技术)而言: 简明、切实、有效

图 7 是跳频方式接收原理框图

上面是以方法层议论的 实际上, 跳频在技术实现, 对应水声信道所需的技术支持并非易事 跳频中至关重要的同步脉冲如何准确无误地检测, 就是一例 不言而喻, 错、漏一个同步脉冲将引发一大片码的误、错判决

- * 选择自相关性强的伪随机码(如巴克码)作为同步脉冲, 可以作为一种选择
- * 防漏测, 用多重互相关码也是一种选择
- * 面对水声信道, 简单的脉冲将产生位置抖动、漏、错等, 担不起同步重任

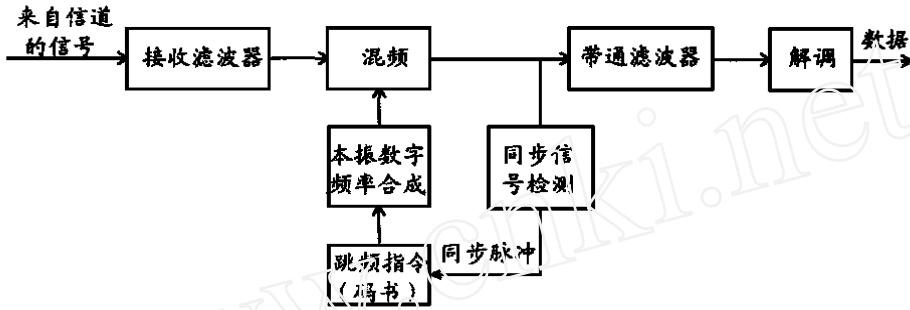


图 7 跳频方式接收原理框图

Fig 7 Block diagram of frequency-hopping receiver

对于抗幅度衰落:

- * 分集是很有效的方法
- * 跳频与多进制频移键控(MFSK)有部分频率分集功能
- * 利用自相关性强的伪随机码
- * 前向纠错编、解码技术
- * 中等幅度衰落采用对信号的包络快速响应的恒幅放大器

以上是本研究在实施具体应用的通信系统中, 按系统的需要与允许分别予以录用

3 研究成果

海洋环境中, 水声信道的传输函数具有许多不确定性因素, 通信系统设计与信道特性密切相关。自适应信道均衡必须在线估算信道来调整均衡系数, 能否成功取决于随机应变的能力。这在浅海域实际工作中, 因信道参量快速多变, 原就存在信道估算时延问题又加上估计误差, 将造成误差往往不收敛于最佳值, 甚至发散; 对于这种不确定性的水声信道, 通信系统采用鲁棒处理, 可望得到较大宽度的适应性和实际应用的效果^[6]。因为鲁棒策略是保证即使不确定性对系统的性能品质影响最严重的时候也能满足设计要求, 而这正是实际现场最需要的。

下面介绍语音、图像、数据三种不同的应用系统

3.1 语音通信

图 8, 9 是本研究的语音通信机系列中的一种

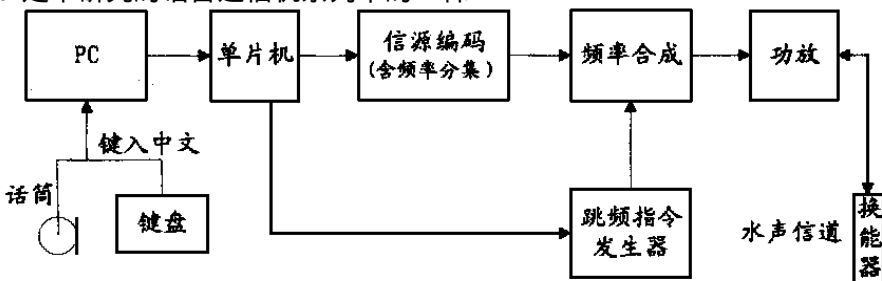


图 8 发射原理框图

Fig 8 Block diagram of underwater acoustic speech communication transmitter

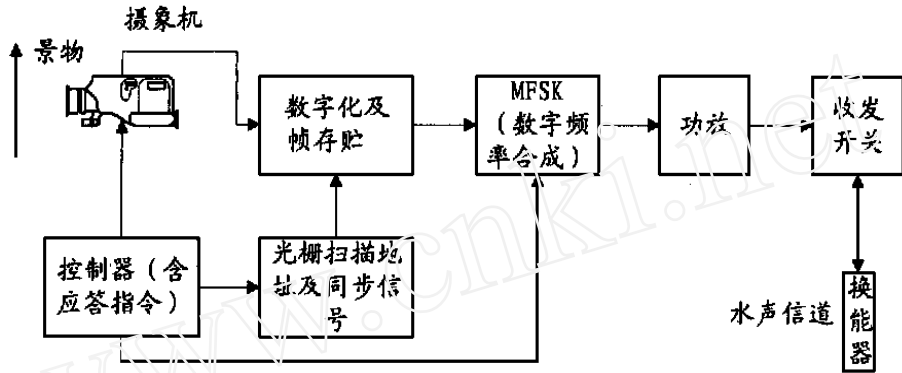


图 10 图像发送原理框图

Fig 10 Block diagram of underwater acoustic image transmitter

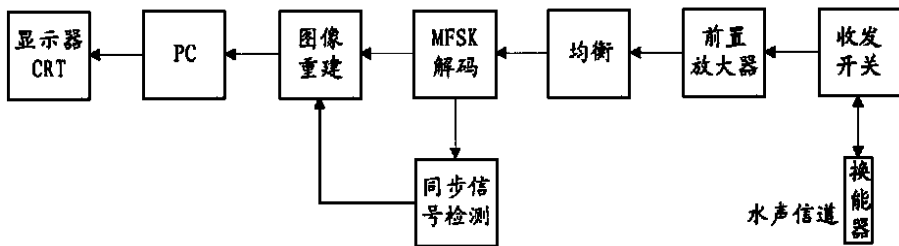


图 11 图像接收原理框图

Fig 11 Block diagram of underwater acoustic image receiver

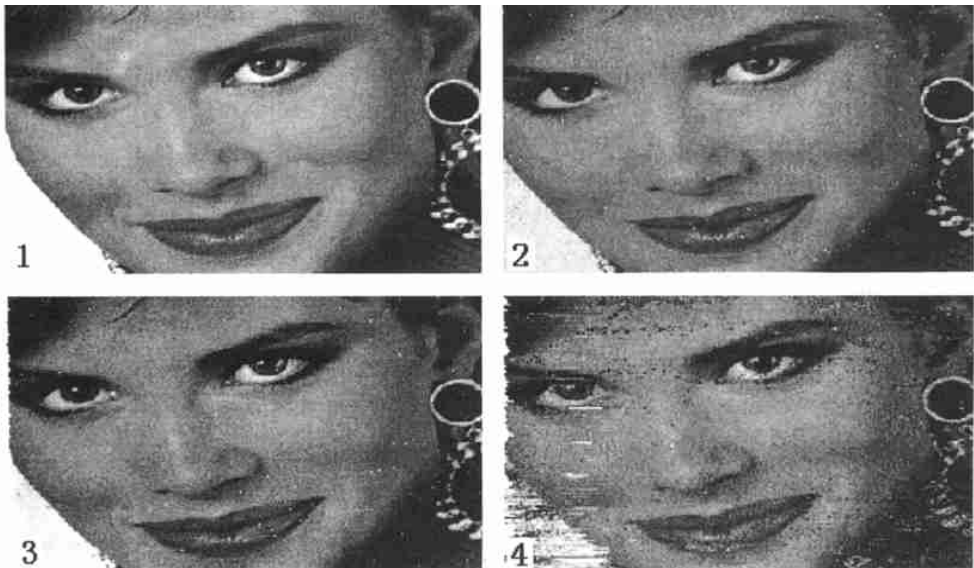


图 12 水下图像传输收发图像

1: 原始图像; 2: 4 公里接收图像; 3: 7 公里接收图像; 4: 10 公里接收图像

Fig 12 Original image and images received from different distances

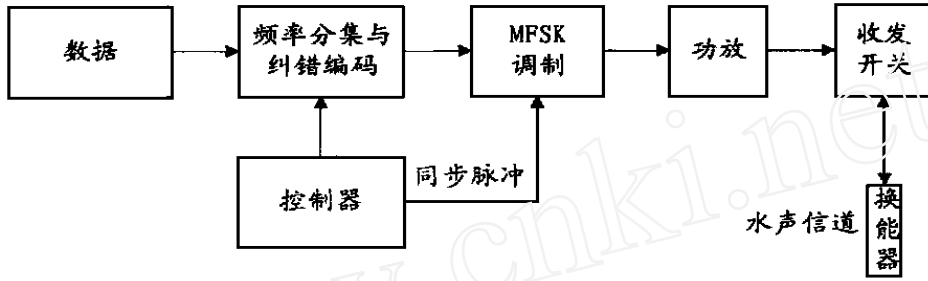


图 13 数据传输发射原理框图

Fig 13 Block diagram of underwater acoustic data communication transmitter

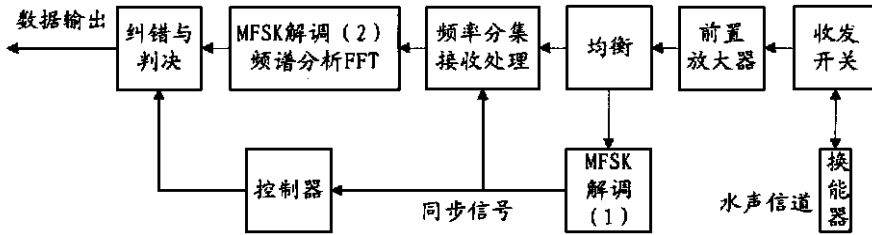


图 14 数据传输接收原理框图

Fig 14 Block diagram of underwater acoustic data communication receiver

本系统的技术指标及系统实现的技术支持是: 数据传输速率(可调)分为 600, 1 200, 2 400 b/s, 传输距离 5 000~ 10 000 m (与海况有关), 采用 16 进制频移键控(MFSK), 二重频率分集, 扩展频谱方式(频道带宽 5 kHz), 前向纠错, 数字频谱分析 FFT.

在频道带宽限制在 5 kHz 条件下, 上述诸项严重地相互制约着, 给实现上带来很大的困难, 但它们几乎都是数据高速率水声传输为抗不确定性的多径干扰所必须的. 这里为 Bill Schweber 所说: “你试试看达到 2 400 b/s(不过, 这是在水中)就知其难”一语作了注释.

4 结 语

水声是水下无线中、远距离的通信当前唯一的手段, 实现水声通信最为主要的障碍是随机多径干扰. 迄今为止, 只有极少数的国家(如美国)在水声通信领域取得突破进展, 达到有实用意义的程度. 本研究成果与国际上在这领域近于同水平同步地进展. 今后研究重点除进一步提高可靠性外, 侧重于陆-海-空移动互联通信网技术研究.

致谢: 参与本研究的还有许水源、许惠英、许肖梅、许鹭芬副教授, 许俊、许祥滨等博士研究生, 以及刘智辉等几十位硕士研究生.

参考文献:

- [1] Schweber B. Underwater modem meets the challenge of a difficult channel—but slowly[J]. *END*, 2001: 39-40
- [2] Schroppe M. The net gets wet[N]. *Business 2.0*, 2000-10-24
- [3] Phillips S. US Navy Emulates Denizens of the Deep[N]. *Financial Times* London, 2000-10-04
- [4] Meinecke G, Ratmeyer V, Wefer G. DOMEST project: data access to the deep sea[J]. *Sea Technology*, 2000, 41(7): 25-29
- [5] 张仁和,等. 负跃层浅海中信号波形的多途结构[J]. *海洋学报*, 1981, 3(1): 57-69
- [6] Proakis J G, Biglieri E, Shamai S. Fading channels: information-theoretic and communications aspects[J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1998, 44: 2619-2692
- [7] Daniel B, Kilfoyle, Arthur B, et al. The state of the art in underwater acoustic telemetry[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(1): 4-27.

Underwater Acoustic Wireless Communications

XU Ke-ping¹, XU Tian-zeng², XU Ru¹, CHENG En¹,
WANG Qing-chi², NIAN Bao-qing²

(1. Dept. of Electr. Eng., Xiamen Univ., 2. Dept. of Oceanog.,
Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

Abstract: The methods and the implementations of underwater acoustic (UWA) communications in the stochastic acoustic multipath propagation channels have been studied. The ocean underwater stochastic acoustic propagation channels with their time-, space-, and frequency-varying multipath have demonstrated the great complexities and difficulties for wireless communications. In addition, there are many other problems encountered in UWA channels, such as large ambient noise, limited bandwidth, low carrier frequency, and extended propagation latency. All of these substantially limit the data rates of underwater digital communications. The paper describes the methods of underwater communications, as well as the key supporting technologies of the implementations based on the considerations to overcome the difficulties stated above. We have designed three different systems for the applications of audio, video and data underwater transmission respectively. The performance of the systems has been investigated on the experimental trials in real ocean environments. Presented results indicate the superior quality of the systems tested, and the systems have been proven to be suitable for the practical applications in real ocean environments. Of late, a great deal of valuable research work has gone into the field of UWA communications in a number of technologically leading nations. Nevertheless, it is only until lately, a very small number of them have reached the major breakthrough. It has been demonstrated that our research work results are equivalent to the current ones obtained in those leading nations.

Key words: ocean; underwater acoustic; wireless communications