

水声通信教学大纲

课程名称：水声通信

面向对象：研究生

学分：1.5 周学时：3

一、课程介绍（100-150 字）

（一）中文简介

本课程从水声信道的物理特性出发，重点传授水声通信的基础理论，引导学生通过基础理论的数学推演反思物理含义，并通过理论和算法的 Matlab 编程实现加深对理论的理解和提升科研探索能力。主要内容包括（1）讲述由水声的物理传播特性带来的水声通信的挑战以及和传统陆上电磁波无线通信的差异；（2）介绍水声的物理传播特性带来的水声信道数学模型；（3）推演基于水声信道数学模型的水声通信调制方式、信道估计、均衡和解码等理论与算法；（4）引导理解水声通信理论与算法背后的物理含义；（5）传授实现水声通信仿真与实验的基本 Matlab 编程。

（二）英文简介

Based on the physical characteristics of underwater acoustic channels, this course focuses on the basic theories of underwater acoustic communications, guides students to reflect the physical meaning through the mathematical deduction of basic theories, and deepens their understanding of theories and exploration of scientific research through Matlab programming. The main contents are as follows: (1) Describe the challenges of underwater acoustic communications caused by the physical propagation characteristics of underwater acoustic and the differences from traditional land-based electromagnetic wave wireless communications; (2) Introduce mathematical underwater acoustic channel models based on the physical propagation characteristics of underwater acoustics; (3) Deduce the theories and algorithms of underwater acoustic communications based on mathematical channel models, such as channel estimation, equalization and decoding; (4) Guide the students to understand of the physical meaning behind the theories and algorithms of underwater acoustic communications; (5) Realize basic Matlab programming for underwater acoustic communication simulations and experiments.

二、教学目标

（一）学习目标

通过选修本课程，使学生：（1）掌握水声通信的基本原理，了解与传统陆上电磁波无线通信的异同；（2）掌握水声信道的物理和数学模型，以及由此带来的水声通信基本调制解调

理论；(3) 掌握用于水声通信仿真和实验的基本 Matlab 编程，并以程序实现加深对理论的理解；(4) 培养水声通信方向科研探索的兴趣，具备该方向初步科研能力。

(二) 可测量结果

(1) 掌握基本的数字通信理论，以及对应的数学推导和物理含义。包括调制方式、基函数、最优解码、误码性能等。

(2) 掌握水声信道基本物理特性和对应的数学表达，以及基于水声信道数学模型的通信调制和解调信号处理方法。包括单载波、正交频分复用、扩频、信道估计、均衡等。

(3) 掌握软件无线电系统的基本原理和实现方法，掌握水声通信仿真和实验的基本 Matlab 编程。

(4) 掌握基本的阅读水声通信英文论文文献的能力，具备初步的水声通信科研能力。

注：以上结果 (1) (2) (3) 以课堂互动问答、课后作业、闭卷考试的形式测量，(3) 以课后编程作业的形式测量，(4) 以课程论文的形式测量。

三、课程要求

(一) 授课方式与要求

授课方式：(1) 教师讲授。讲授核心内容、总结、按顺序提示今后内容、答疑、公布课程论文主题等。(2) 课堂互动。课堂问答，讨论，并将课堂互动情况计入总成绩。(3) 课后作业。课后作业分理论推导作业和编程作业两部分。每次课后均布置作业，下次上课时花几分钟讲解解题思路。(4) 课程大作业。布置领域内经典优秀的长英文论文给学生阅读，请学生写出对论文中理论的理解和发散性思考。(5) 闭卷考试。

课程要求：熟悉水声通信基本理论知识，提高外文文献的阅读能力，培养从物理到数学的归纳能力和从数学到物理的演绎能力，从而形成水声通信方向的基本科研能力。

说明：课程具有非常强的理论性，理论都需要数学来解释推导，而这些数学又是从水声的基本物理特性出发的，因此授课教师将 (1) 特别重视物理和数学的交互，加深理论的理解 (2) 特别重视课堂思维的引导，一环扣一环的理论推演传授。

(二) 考试评分与建议

出勤 5 分、课堂讨论 10 分、作业 30 分、课程大作业占 20 分、期末闭卷考试 40 分，共计 105 分，得分大于 100 分的最后期末得分按 100 分计。

严格按照各部分得分计算最后得分，不做为及格拉分， $59 \neq 60$ 。如班级最高分小于 95，则班级第一名至少拉到 95 分，其余人按比例拉分。

四、教学安排

预备知识要求

必备前序课程：线性代数、概率论与统计、信号与系统

推荐前序课程：数字信号处理、统计信号处理、通信原理

每周 3 学时，具体每周内容见附件

第一周：水下通信技术概论、课程介绍、和数字通信的衔接

第二周：调制方式和最优解码器

第三周：水声信道 LS、MMSE 估计

第四周：匹配追踪算法

第五周：水声信道多普勒扩展与时间反转信号处理

第六周：多输入多输出水声通信

第七周：正交频分复用通信

第八周：软件无线电

附录：授课内容概要

第一周：水下通信技术概论、课程介绍、和数字通信的衔接

主要内容：

陆地上通信方式的发展；各种通信方式的应用；陆上通信方式在水下的局限性；水声通信的必要性以及应用；国内外研究现状；简单的通信原理入门。

选择声学进行水下通信的机理；水声通信的特点；与无线通信的异同之处；信息的传输机制；典型的调制方式；星座图的原理。

阅读材料：

樊昌信，《通信原理》（第七版），国防工业出版社。第七章

陈鹰，《海洋技术教程》（第一版），浙江大学出版社。第三章

思考题：

BPSK, QPSK, BFSK, QFSK 是否有星座图？如果有，请画出。

第二周：调制方式和最优解法器

主要内容：

在通信技术上，载波是由振荡器产生并在通信信道上传输的电波，被调制后用来传送语音或其它信息。改变载波以便它能以适合传输的形式表示数据，就是我们常说的调制。在水声通信系统里，调制方式主要分为两种，一种是单载波调制，另一种是多载波调制。

在单载波调制里主要的调制方式有 OOK（开关键控）、PSK（相移键控）、FSK（频移键控），其它的方法都是由以上方法的改进或组合，例如：正交振幅调制 QAM 就是调幅和调相的组合；MPAM 是对 OOK 进行的改进。在多载波调制里，主要的调制方式有 MFSK（多进制数字频率调制）和 OFDM（正交频分复用）。

确知信号最佳接收是信号检测中的一种理想情况。实际中，由于信道噪声的存在，造成接收波形的随机畸变，可能导致错误判决而产生误码。这里主要讲授通信系统中使错判概率达到最小的判决准则，包括 MAP（最大后验概率准则）、ML（最大似然准则）、最小欧氏距离准则，以及各准则的条件。

阅读材料：

John G. Proakis. Digital Communications Fifth Edition. Publishing House of Electronics Industry, 2009: chapter 4.

思考题：

分别画出 2FSK、4FSK 的星座点，它们是哪几维的？请分别写出它们的一组正交基。

请在 MATLAB 上使用最大后验概率准则进行信号检测的仿真。

第三周：水声信道 LS、MMSE 估计

主要内容：

在水声信道中，信道是随时间变化的。为了恢复出原始信号，需要通过信道估计技术获得信道的冲击响应。一般采用的是基于导频信号的信道估计方法，通过发射端发送已知信号，利用接收到的相应信号进行信道估计。常用的算法包括最小平方（Least Square, LS）算法，最小均方误差（Minimum Mean Squared Error, MMSE）算法。

LS 信道估计是在不考虑噪声的条件下，根据最小平方准则估计信道的冲击响应 \hat{H}_{LS} ，获得信道状态信息的方法。假设 Y 表示接收到的导频符号向量， X 是发送的导频信号。LS 信道估计可表示为

$$\hat{H}_{LS} = X^{-1}Y$$

基于 MMSE 准则的信道估计就是求得使信道均方误差 J 最小的信道响应函数 \hat{H} 。其相应的计算公式为

$$J = E \left\{ \left| H - \hat{H} \right|^2 \right\}$$

LS 和 MMSE 信道估计算法各自优缺点分析比较。

阅读材料：

Wikipedia contributors. "Least squares." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 19 Dec. 2017. Web. 28 Dec. 2017.

Wikipedia contributors. "Minimum mean square error." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2 Oct. 2017. Web. 28 Dec. 2017.

第四周：匹配追踪算法

主要内容：

水声多径信道通常具有明显的稀疏特性，信道时延大，反射径数目较多，但信道能量增益较大的路径较少，信道特性表现为稀疏。传统信道估计方法未能充分利用水声信道具有的稀疏特性这一先验条件，基于压缩感知理论的信道估计方法应运而生。

基于压缩感知理论的匹配追踪算法可以充分利用水声信道所具有的稀疏特性。一方面，在保证得到相同信道估计准确性的前提下，可望显著减少所需的导频符号或训练序列，使得传统信道估计算法中用于传输导频符号的子载波能够用于传输数据，从而提高系统数据传输的有效性。另一方面，在使用相同数量的导频符号进行信道估计时，采用就匹配追踪算法可望得到更加准确的信道估计结果，明显提高水声通信系统的数据传输可靠性。

思考题：

当字典矩阵中的列向量不是正交的时候，每次迭代的结果不是最优的。如何改进匹配追踪算法，使其在非正交的情况下也能有较好的表现。

第五周：水声信道多普勒扩展与时间反转信号处理

主要内容：

水声信道多普勒扩展产生的原因；如何估计水声信道的多普勒扩展；如何处理水声信道的多普勒扩展对数据传输产生的影响。

信道均衡的定义，信道均衡的目的。信道均衡的其中一种方法为时间反转，包括主动时间反转和被动时间反转。讲述两种时间反转的区别和联系，以及理论推导和代码实现。

思考题：

假设有 M 个发送端， N 个接收端，每个发送端发送的信号都不一样。

- 1、在接收端使用被动时反均衡求解发送信号。
- 2、当信道每个抽头都是独立同分布的高斯信道的时候，调制方式为 PSK，求出信干比；
是否可以使用主动时反均衡，给出理由。

第六周：多输入多输出水声通信

主要内容：

从单输入单输出（SISO）系统时反信道均衡方法在多输入多输出（MIMO）系统中的应用切入。首先回顾 SISO 系统的局限，并引出 MIMO 系统在利用空间分集对抗衰落方面的原理，并以数学推导系统信干比（SIR）的方式证明其较之 SISO 系统的优势。接着，拓展 SISO 中的系统模型，介绍如何使用“矩阵拼接”的方式表示 MIMO 系统的数学输入输出模型，及其常用信道估计方式。最后，演示在 MATLAB 中进行 MIMO 系统的仿真。

阅读材料：

Roy S, Duman T M, Mcdonald V. High-Rate Communication for Underwater Acoustic Channels Using Multiple Transmitters and Space-Time Coding: Receiver Structures and Experimental Results[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 32(3):663-688.

思考题：

完善课堂中编写的 MIMO 系统的 MATLAB 仿真程序，并完成信道估计，绘制信道估计的 MSE-SNR 的曲线图；在课堂程序的基础上，编写在一个 2 发 10 收的 MIMO 系统程序，在接收端使用被动时反方法进行信道均衡，绘制恢复符号的 ber-SNR 的曲线图，并对结果做讨论。

第七周：正交频分复用通信

主要内容：

单载波通信方式受信道时延影响严重，OFDM 可有效解决这个问题。OFDM 通信将信道划分为若干正交子信道，通过 IFFT/FFT 实现调制解调，每个子信道带宽远小于信道相关带宽，可视为等效平衰落，从而解决 ISI 问题。然而，在水声信道中，严重的多普勒效应等因素导致 OFDM 通信性能受载波间干扰(ICI)的影响。实际使用时，OFDM 还存在均峰比(PAPR)过高的问题。本次课将阐明 OFDM 的基本原理，相对单载波通信的优势，分析 OFDM 在水声通信中的难点和应对方法，着重介绍 OFDM 通信的信道估计，包括导频设计、载波频偏

(CFO) 消除、LS 信道估计等内容。此外，本次课还将介绍 OFDM 通信的扩展内容——正交频分多址 (OFDMA) 技术，讲解 OFDMA 的独特优势及其在多用户通信中的应用。

阅读材料:

John G. Proakis. Digital Communications Fifth Edition. Publishing House of Electronics Industry, 2009: chapter 11.

樊昌信, 曹丽娜. 通信原理 (第 6 版). 国防工业出版社, 2006: 第 8 章.

第八周：软件无线电

主要内容:

软件无线电概述；软件无线电理论基础；软件无线电体系结构；软件无线电硬件平台设计；软件无线电信号处理。

软件无线电是无线电工程领域一种新的设计思想，突破了传统无线电台功能单一、可扩展性差、以硬件为核心的设计局限，其应用软件具有可升级、可配置的特点，用户可以在同一硬件平台上通过配置不同的应用软件来满足需求，极大地节省了硬件投资，缩短了产品开发周期，在电子工程领域得到了广泛应用。

主要介绍软件无线电的体系结构，包括其硬件平台设计，以及对软件无线电相比于现有的通信系统优势进行分析。

阅读材料:

楼才义,等.软件无线电原理与应用,电子工业出版社, 2014

思考题:

软件无线电在无线电工程领域得到了广泛应用，调研软件无线电在水声通信中的实际应用案例，通过案例分析，阐述软件无线电面临的挑战，并对其优缺点进行评价。