

超声波水下扩频通信系统的设计

班级 **F0503602** 姓名石君霄 学号 **5050369043**

本文内容根据 CreativeCommons BY-NC 3.0 协议向公共域授权

本人承诺，遵守学术诚信，没有整段抄袭情况，设计部分完全原创

一、认识超声波

声音是一种压力波：介质分子有规律的振动，是周围的介质产生疏密变化，这就产生了声波。声音作为波的一种，可以通过傅立叶变换分解为不同频率不同强度正弦波的叠加。人耳可以听到的声音的频率范围是 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ ，高于这个范围的波动称为超声波。通常认为，超声波的频率范围是 $20\text{kHz} \sim 500\text{kHz}$ 。狗和蝙蝠等动物可以听到高达 160kHz 的声音，因此超声波只是对人而言。

超声波的传播速度与在相同介质中普通声波的传播速度相同： 0°C 海平面的空气中是 332m/s ，水中是 1450m/s ，铁中是 5000m/s 。介质密度愈大，音速愈快。在空气中，音速会依空气之状态（如湿度、温度、密度）不同而有不同数值，如一万米高空之音速约为 295m/s ，每升高 1°C 音速增加 0.607m/s 。

超声波在介质中传播时，由于超声波与介质的相互作用，会产生以下四种效应：机械效应、空化作用、热效应、化学效应。

超声波的特点：传播方向性强、能量易于集中；能在各种不同介质中传播、可传播足够远的距离；与介质的相互作用适中、易于携带有关介质状态的信息。

超声波的应用，按功率大小分为功率超声和检测超声两种：功率超声通常只发射不接收，用于焊接、钻孔、粉碎、清洗、乳化等；检测超声用于雷达定位、医用检查（但超声波不能穿透骨头、因此不能完全替代 X 光）。

二、超声波水下扩频通信理论基础

水声信道

在水下利用声波进行数字通信，其信道模型称为水声信道。水声信道是一个非常复杂时变、空变、频变的信道，其主要特征表现为：传播损失、多径效应、频散效应。

浅海中，主要的环境噪声有：海水热噪声 ($50\text{kHz} \sim 200\text{kHz}$)、水动力噪声 ($500\text{Hz} \sim 50\text{kHz}$) 等。

多径效应

在无线通信领域，多径指无线电信号从发射天线经过多个路径抵达接收天线的传播现象。多径会导致信号的衰落和相移。通过较长的路径到达接收天线的信号分量比以较短路径到达天线的信号稍迟。电视信号传输中，因为电视电子枪扫描是由左到右，迟到的信号会在

早到的信号形成的电视画面上叠加一个稍稍靠右的虚像。雷达上，单个目标会由于地形反射在雷达接收机上产生一个或多个虚像；为克服这一问题，雷达接收端需要将信号与附近的地形图相比对，将由反射产生的看上去在地面以下或者在一定高度以上的信号去除。在数字无线通信系统中，多径效应产生的符号间干扰（ISI）会影响到信号传输的质量。

超声波在水中传输，极易发生多径效应。在时域上，信道的多径效应表现为：信道的冲激响应是 sinc 函数与噪声的叠加。

由于超声波传播方向性强，在使用定向天线的情况下，多径效应的信道可以看成一个 FIR 系统与噪声的叠加。当码元速率较低时（两个码元的间隔时间 \geq FIR 系统的脉冲响应长度），多径效应就不会导致 ISI，从而可以忽略。

扩频通信

超声波易于携带有关介质状态的信息，对通信而言就是容易受到信道的干扰。为了减小干扰、噪声对通信质量的影响，本设计方案将使用扩频通信，具体扩频方案是 DSSS/CDMA；选用这个方案，在提高通信质量的同时，也提高了通信的保密性——因为 CDMA 所用的 PN 序列是别人不知道的，相当于对称加密的密钥。但是，扩频通信需要较高的码元速率码元速率，而多径效应使码元速率不可太大，这导致本通信系统可以承载的信息速率比较低。

三、系统特性参数

- 远程水声信道只能传输 10kHz 以下的信号，超声波的传输距离较近（几百米），功率可以大一些、忽略传播损失
- 二进制码元速率 1.2kbps，传送低速数字信号，此速率下多径效应不会导致 ISI，可以忽略多径效应
- CDMA 的 chip rate 是 307.2kbps，即输入数字信号码元速率的 256 倍

- 所需带宽：海洋水声信道的信噪比设为 3dB（信噪比的 dB 表示是 $10 \lg(\frac{S}{N})$ ，可反推

$$C = H * \log_2(1 + \frac{S}{N})$$

得信噪比绝对数值为 1.995)，由香农公式（带噪信道容量公式

计算得最小带宽为 194kHz。选用带宽范围是 240kHz~460kHz，这个带宽范围避开了主要的海洋环境噪声。FSK 调制在 250kHz~450kHz 范围，而在 242kHz 和 458kHz 频率上固定发送持续信号，用于多普勒频移的检测。

- 最好使用定向天线
- 允许发送端与接收端的低速移动，具有多普勒频移的检测和适应能力

本设计中，将重点关注 CDMA 扩频、多普勒频移检测的和适应，因此选择了上述特性参数及假设。

四、发送端的设计

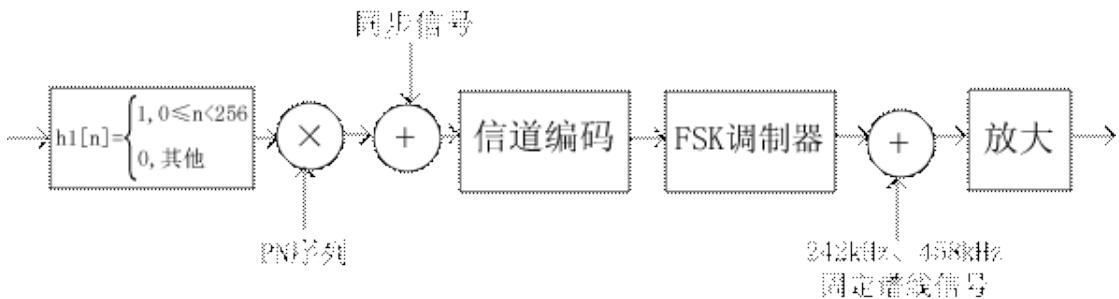
发送端的输入、中间结果、输出：

- 发送端的输入：1.2kbps 二进制数字信号
- 发送端的中间结果 1：CDMA 扩频，307.2kbps 二进制数字信号
- 发送端的中间结果 2：插入同步信号
- 发送端的中间结果 3：信道编码结果
- 发送端的输出：FSK 调制，得到 240kHz~460kHz 的超声波信号，接到超声换能器

由上可见，发送端的工作分为五步完成：

1. CDMA 扩频：将输入信号乘以 PN 序列（PN 序列总长 65536 点），每 1 点输入信号需要与 256 点 PN 序列在时域相乘并得到 256 点中间结果
2. 插入同步：每 65536 点的开头，插入同步信号，同步信号是 256 个 1；在 CDMA 扩频后的信号中，几乎不可能有 256 个连续的 1
3. 信道编码
4. FSK 调制：将 307.2kbps 的二进制信号进行 FSK 调制。串并转换，16 进制 FSK，中心频率分别为 $0 \rightarrow 256.25\text{kHz}$ 、 $1 \rightarrow 268.75\text{kHz}$ 、 $2 \rightarrow 281.25\text{kHz}$ 、 $3 \rightarrow 293.75\text{kHz}$ 、 $4 \rightarrow 306.25\text{kHz}$ 、 $5 \rightarrow 318.75\text{kHz}$ 、 $6 \rightarrow 331.25\text{kHz}$ 、 $7 \rightarrow 343.75\text{kHz}$ 、 $8 \rightarrow 356.25\text{kHz}$ 、 $9 \rightarrow 368.75\text{kHz}$ 、 $10 \rightarrow 381.25\text{kHz}$ 、 $11 \rightarrow 393.75\text{kHz}$ 、 $12 \rightarrow 406.25\text{kHz}$ 、 $13 \rightarrow 418.75\text{kHz}$ 、 $14 \rightarrow 431.25\text{kHz}$ 、 $15 \rightarrow 443.75\text{kHz}$ 。在 242kHz 和 458kHz 增加两条固定、持续的谱线，用于多普勒频移的检测。
5. 1MHz 的 D/A 转换，模拟放大，使用超声换能器发出信号

发送端的框图如下：



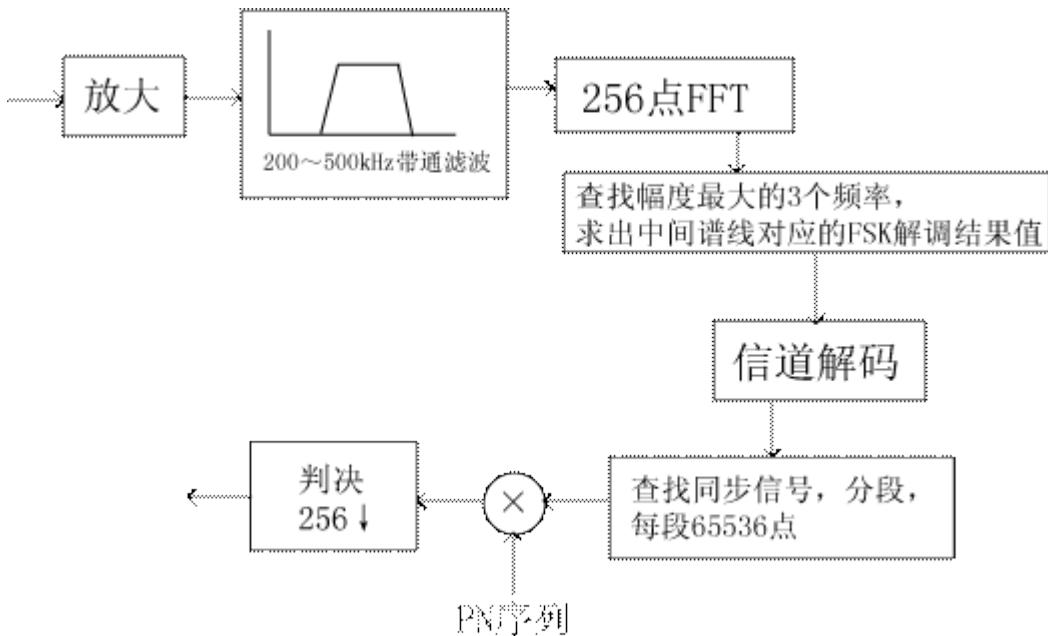
五、接收端的设计

- 接收端的输入：FSK(CDMA 信号+插入的同步信号)+叠加的噪声+多普勒频移
- 接收端的中间结果 1：经过模拟放大、滤波的输入信号
- 接收端的中间结果 2：能够适应多普勒频移的 FSK 解调获得的二进制数字信号，此信号包括(CDMA 信号+插入的同步信号+叠加的噪声)
- 接收端的中间结果 3：信道解码结果，假定几乎不含噪声干扰，只是(CDMA 信号+插入的同步信号)
- 接收端的中间结果 4：按同步信号分段为每段 65536 点的 307.2kbps 二进制数字信号
- 接收端的输出：1.2kbps 的二进制数字信号

由上可见，接收端的工作分为五步完成：

1. 超声换能器采集信号，前置模拟放大（要求低噪声、高共模抑制比）， $200\text{kHz} \sim 500\text{kHz}$ 带通滤波
2. 1MHz 的 A/D 转换，256 点 FFT 分析，找到幅度最大的三条谱线，频率低的和高的分别对应原来在 242kHz 、 458kHz 的两条固定谱线，频率中间的对应 FSK 调制结果；计算 FSK 调制所得谱线的原频率，获得对应的 16 进制值，然后并串转换。
3. 信道解码
4. 查找同步信号，分段
5. 解扩：乘以按分段对齐的 PN 序列；判决：将 256 点求和 S ， $S > 127$ 判为 1、 $S \leq 128$ 判为 0

接收端的框图如下：



六、技术指标

- ◆ 选用的 D/A 和 A/D 采样率为 1MHz，这是信号传输频率决定的。
- ◆ 作为水下通信系统，需要满足通信级可靠性指标。
- ◆ 作为类似于“短消息”的数据业务，若 DSP 芯片性能不足，可以不要求实时性，处理 1.2k 字节数据，10 秒的延迟是可以接受的。
- ◆ 作为水下通信系统，可用电力相当有限，必须注意芯片和超声换能器的功耗。尽可能选择低电压、低功耗的芯片，可以考虑超声换能器的功率根据当前信号强度自适应调整。
芯片选择：CY7C1371C 可以满足要求

七、系统仿真

由于本设计方案的很多功能相当复杂，MATLAB 并不支持，跳过这部分

八、感想和体会

本人主要开发信息系统，对通信系统、DSP 并不熟悉。因此，这个设计方案只是停留在框架层面，有很多细节没有解决，比如：PN 序列如何产生？同步信号如何插入和检测？信道编码选用何种方案？

做这个设计，需要查很多资料，参考资料列得满满的；学会查资料，是做设计的前提之一；要尊重原作者的著作权，即使是学习与研究用途，也应注明完整的出处，而不能只写“参考资料：谷歌、百度、雅虎、搜狗”。

参考资料

1. 声音 - wikipedia, <http://zh.wikipedia.org/wiki/声音>
2. 超声波 - wikipedia, <http://zh.wikipedia.org/wiki/超声波>
3. 音速 - wikipedia, <http://zh.wikipedia.org/wiki/音速>
4. 超声波_百度百科, <http://baike.baidu.com/view/32371.htm>
5. 多径 - wikipedia, <http://zh.wikipedia.org/wiki/多径效应>
6. 论 GPS 测量中的多径误差，谢世杰 种绍龙 袁铭，《测绘通报》2003 年 5 期，<ftp://202.120.203.253:8092/2003ZK05/P2/93318X/000/005/7901809.pdf>
7. 水声信道的建模与仿真研究，涂峰 黄瑞光，《微计算机信息》2003 年 5 期，<ftp://202.120.203.253:8092/2003GC19/TN6/90452X/019/005/7851186.pdf>
8. 一个水声扩频通信系统设计与实现，黄晓萍 桑恩方，《海洋工程》2007 年 1 期，<ftp://202.120.203.253:8097/2007GC120/TB4/90248X/025/001/25114609.pdf>
9. 扩频技术概述，<http://www.cnebuyer.com/bbs/tech/20071124224314.htm>
10. 频移键控调制的直序列扩频技术在水声遥控引信中的应用研究，彭纪肖 张歆 程刚，《探测与控制学报》2006 年 3 期，<ftp://202.120.203.253:8096/2006GC111/TN6/97899A/028/003/22392233.pdf>
11. 海洋环境噪声，<http://www.hoodong.com/wiki/海洋环境噪声>
12. 计算机网络基础知识——数据通信技术，<http://www.huibo.org.cn/NetworkTheory/21.htm>
13. DSP 芯片的选择 [通信技术资源网]，<http://www.edabbs.com/bbs/dispbbs.asp?boardID=48&ID=434&page=9>