

4500 米载人潜水器水声通信系统——调制方式及兼容设计

武岩波^{1,2}, 朱敏^{1,2}, 张琳园¹, 李欣国¹, 杨波¹

(1. 中国科学院声学研究所 海洋声学技术中心 北京 100190;
2. 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 在“蛟龙”号研制基础上, 4500 米载人潜水器水声通信系统对信号处理算法进行了升级, 并增加了组网及非定长数据传输功能, 操作更加灵活。4500 米载人潜水器有 4 种并存的水声通信信号体制: 相干 MPSK、非相干 MFSK、跳频、单边带调制, 可以根据传输需求改变通信体制, 并采用时间同步的方式避免与定位声纳等互相干扰。本文介绍了 4500 米载人潜水器各水声通信体制的特点以及相对于“蛟龙”号的改进, 及各种通信体制在时间同步工作模式下的兼容设计, 给出了水声通信机在浅海海上试验的效果。

关键词: 载人潜水器; 通信体系; 时间同步

Underwater acoustic communication system for 4500m manned submersible: modulation methods and design consideration

WU Yan-bo^{1,2}, ZHU Min^{1,2}, ZHANG Lin-yuan¹, LI Xin-guo¹, YANG Bo¹

(1. Ocean Acoustic Technology Center, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;
2. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: The underwater acoustic communication system for 4500m manned submersible is designed and developed, based on the techniques of the manned submersible “Jiaolong”. There are several technical improvements: the signal processing algorithms are more robust, the networking ability and the transmission of non-fixed length data are also supported, and the operation of the system is more convenient. Four communication methods are integrated to meet different transmission needs: phase-shift keying, frequency-shift keying, frequency hopping and single side band modulation. Synchronous transmission for the positioning sonar is also considered to avoid the acoustic interference. The shallow water experiment of the communication system was carried out in the South China Sea, which verified the technical improvements.

Key words: manned submersible; communication system; time synchronization

0 引言

水声通信是水下无线信息传输的首要技术手段, 广泛用于水下自主航行器(AUV)、载人潜水器(HOV)及水下传感器等水下作业场景。水声信道是复杂的时延和多普勒双扩散信道^[1], 对水声通信信号处理算法提出了较高的要求。“蛟龙”号载人潜水器水声通信系统, 采用 4 种不同的通信体制用于不同的传输需求, 实现了 7000m 深度潜器与母船间的图像、语音、数据和文字的水声通信传输^[2,3]。

4500 米载人潜水器水声通信系统是在“蛟龙”

号研制基础上进一步发展和完善, 以提高可维护性、可操作性、可靠性为目标。借鉴了“十一五”国家 863 项目“水声通信网络节点及组网关键技术”中对水声通信节点的研制经验和技術积累, 进一步提高了通信算法的性能和硬件平台的可靠性。

4500 米载人潜水器有 4 种并存的水声通信信号体制: 1) 相干(MPSK)通信, 编码算法采用喷泉码结合 turbo 码, 接收算法采用稀疏化 turbo 均衡^[4], 用于压缩图像等非定长数据传输; 2) 非相干(MFSK)通信, 编码算法采用对偶 K 码级联 Hadamard 码^[5,6]进行纠错, 采用开关键控调制(OOK)结合多载波传输, 具有好的频率分集效果, 用于传感器数据的定时更新及组网信息交互; 3) 跳频通信, 实现大噪声背景下指令消息传输; 4) 单边带调制, 用于语音传输。

收稿日期: 2015-7-13 修回日期: 2015-09-30

基金项目: 国家 863 项目(2009AA093301); 国家自然科学基金项目(61471351)

作者简介: 武岩波(1982-), 男, 山东人, 副研究员, 研究方向为水声通信

通讯作者: 武岩波, E-mail: wuyanbo@mail.ioa.ac.cn

1 4 种水声通信信号体制

和“蛟龙”号水声通信系统一致, 4500 米载人潜水器提供有 4 种信号体制, 共享 7.5kHz~12.5kHz 的通信带宽, 根据需求进行体制的灵活切换。下面分别介绍各体制的特点和改进之处。

1.1 4 种水声通信信号体制概况

1.1.1 相干 MPSK 通信制式

图 1 给出了相干 MPSK 通信制式的编码调制过程, 编码方式采用 RS 喷泉码结合 turbo 码, 星座图映射方式采用 MPSK。图 2 给出了相干 MPSK 通信制式的帧结构, 由帧同步、训练序列、数据序列和保护间隔组成。采用线性调频信号进行帧同步和多普勒检测。每个训练序列包括 200 个固定 MPSK 符号, 每个数据序列包括 1936 个 turbo 编码后 MPSK 符号。

相干 MPSK 通信制式传输速率可达 5~15kbps, 属于高速水声通信, 主要针对图像传输等数据量比较大的应用。在“蛟龙”号中, 采用小波图像压缩方式在具有误码情况下也能给出较好的图像解压缩效果。在 4500 米载人潜水器中, 采用 JPGE 图像压缩方式提高压缩率, 通过 RS 码纠正帧错误, 保证数据的正确性。

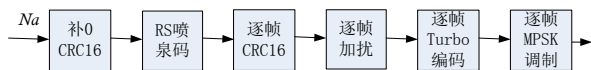


图 1 相干 MPSK 通信制式编码调制

Fig.1 Coding and modulation of the MPSK coherent communication

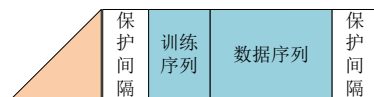


图 2 相干 MPSK 通信制式帧结构

Fig.2 Frame structure of the MPSK coherent communication

1.1.2 非相干 MFSK 通信制式

图 3 和图 4 分别给出了非相干 MFSK 通信制式的编码和调制过程, 编码方式采用对偶 K 码, 调制算法利用 Hadamard 码、OOK 调制并结合逆傅立叶变换(IFFT), 实现多载波调制, 获取较好的频率分集效果。图 5 给出了 MFSK 通信制式的帧结构, 由帧同步、前保护间隔、12 个 MFSK 符号和后保护间隔组成。每个数据帧固定传输 12 个 MFSK 符号, 每个 MFSK 符号包含 6 个 Hadamard 码, 每个 Hadamard 码携带 5 比特信息, 因而每帧传输的编码比特数为 360。在图 3 中利用对偶 K 码编码前添加 5 个比特 0 是为了使对偶 K 码编码器在每次编码结束后回到 0 状态。在非相干 MFSK 数据帧的基础上, 非相干 MFSK 命令帧为了进一步提高通信可

靠性, 在图 3 中进行交织操作之前, 进行一次重复编码, 则通信速率减半。

非相干 MFSK 通信制式传输速率相对于相干 MPSK 低一个数量级, 但鲁棒性好, 主要用于数据量比较小的传感器数据、位置信息、指令等传输。

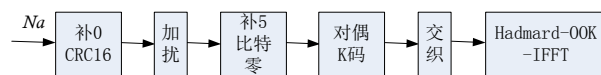


图 3 非相干 MFSK 通信制式编码

Fig.3 Coding model of the MFSK incoherent communication

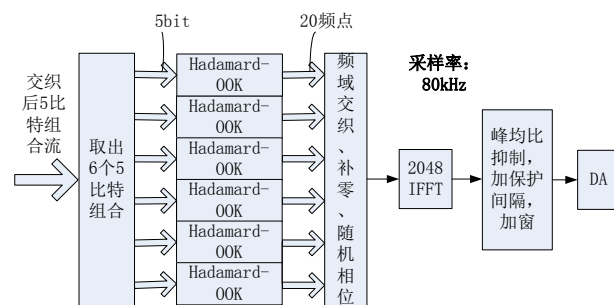


图 4 非相干 MFSK 通信制式调制

Fig.4 Modulation model of the MFSK incoherent communication

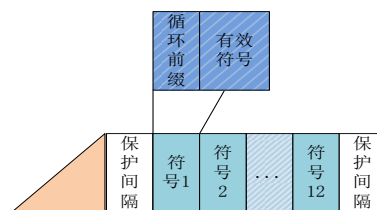


图 5 非相干 MFSK 通信制式帧结构

Fig.5 Frame structure of the MFSK non-coherent communication

1.1.3 跳频水声通信和单边带水声语音通信

当通信距离太远或通信环境太差, 跳频扩频可以发挥其抗干扰能力强的优势。跳频通信制式主要用于低信噪比时传送文字指令, 如潜水器航行时自噪声大, 但仍可以接收跳频指令。

单边带调制通信体制主要传送语音信号, 实现潜器工作人员与母船工作人员实时对话。

1.2 相对于“蛟龙”号水声通信系统的改进

表 1 给出了 4500 米载人潜水器水声通信系统相对于“蛟龙”号载人潜水器水声通信系统做出的信号处理算法改进。从表 1 可以看出, 算法可靠性更高, 增强了对浅海信道的适应能力, 可接入水下声通信网络, 系统使用更加灵活。

借鉴“十一五”国家 863 项目“水声通信网络节点及组网关键技术”中对水声通信节点的研制经验和积累, 进一步提高了通信算法的性能和硬件平台的可靠性。4500 米载人潜水器水声通信机主机的软件运行平台进行了大幅度的简化, 由原来的 PC104 及多 DSP 组成的软件运行平台, 精简为双 DSP 的处理平台。两个 DSP 负责全部软件功能,

一个为定点低功耗 Blackfin 系列的 BF547 芯片, 一个为浮点 Tigersharc 系列的 TS101 芯片。其中外围控制、网络通信、信息存储、波形采集、部分信号处理(各模式的发射及部分接收)由 BF547 完成, 而 TS101 为协处理 DSP, 完成接收信号处理中的 MPSK 译码、跳频译码部分。

表 1 信号处理算法改进

Table 1 Improvements of the signal processing algorithms

| 通信体制 | “蛟龙”号 | 4500 米 | 改进对比 |
|-------|---|---|---|
| 相干通信 | <ul style="list-style-type: none"> ● Turbo 码 ● 自适应均衡+turbo 纠错 | <ul style="list-style-type: none"> ● 喷泉码+Turbo 码+QPSK/8PSK ● 稀疏化 turbo 均衡 ● 纠正突发错误, 支持变长 | <ul style="list-style-type: none"> ● 提高浅海适应能力 ● 支持大数据广播 |
| 非相干通信 | <ul style="list-style-type: none"> ● (4,1,7) 卷积码+Hadamard 码+多载波调制 ● Hadamard 解码+Viterbi 硬判决译码 | <ul style="list-style-type: none"> ● 对偶 K 码+Hadamard 码+多载波调制 ● Hadamard 解码+Viterbi 多进制软译码 | <ul style="list-style-type: none"> ● 支持组网功能 ● 速率提升 1 倍 |
| 跳频通信 | <ul style="list-style-type: none"> ● (4,1,7) 卷积码+2FSK+跳频图案 ● 基于 Chirp 信号的同步检测 | <ul style="list-style-type: none"> ● (4,1,7) 卷积码+2FSK+跳频图案 ● 基于跳频图案的同步检测 | <ul style="list-style-type: none"> ● 支持多个跳频用户 |
| 单边带调制 | <ul style="list-style-type: none"> ● 单边带调制 ● 专用采集播和放设备 | <ul style="list-style-type: none"> ● 单边带调制 ● 数据来源和存储更灵活 | <ul style="list-style-type: none"> ● 可在局域网内进行语音的发送采集和接收广播 |

2 各种水声通信体制的兼容设计

利用潜器端和母船端的同步时钟, 4500 米载人潜水器水声通信系统采用时间同步的方式避免与定位声纳等互相干扰, 并根据传输需求改变通信体制。在时间同步工作模式下, 各种通信体制可以良好兼容。

2.1 多水声通信体制并存的信号格式

图 6 给出了相干 MPSK 与非相干 MFSK 通信制式数据包结构。从图 6 可以看出, 相干 MPSK 和非相干 MFSK 通信都是采用命令帧+数据帧的格式进行通信。命令帧采用带重复编码的非相干 MFSK 通信制式, 包含目的地址、源地址、数据帧个数、调制参数等信息。

跳频通信制式和单边带调制通信制式由于检测信噪比低, 受其它声学脉冲的影响小, 采用非同步的发射方式。

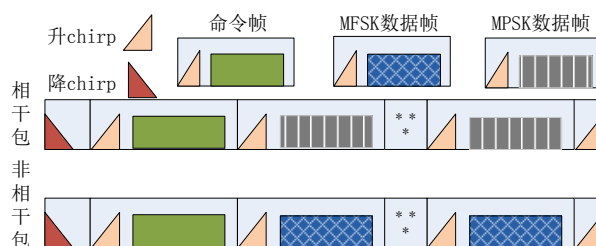


图 6 相干 MPSK 与非相干 MFSK 通信制式数据包结构

Fig.6 Packet structures of the MPSK and MFSK communications

2.2 水声通信系统时序控制

4500M 载人潜水器水声通信系统在同步时钟的辅助下, 采取时间同步工作模式。每 6 秒一个时隙, 每 8 个时隙组成一个通信周期。潜水器端定位声纳每个时隙会向母船发送一次定位信号。在没有人工干预的情况下, 潜器与母船之间每个通信周期通过 MFSK 通信制式定期交换一次数据。当需要发送图像、语音或利用跳频发送文字时, 就插入其他通信模式时间同步发送, 完成后继续 MFSK 通信制式时间同步发送。

2.2.1 非相干 MFSK 时间同步发送

默认情况下, 潜器与母船之间通过 MFSK 通信模式定期交换数据。图 7 给出了非相干 MFSK 通信制式同步发送机制。从图 7 可以看出, 每个通信周期, 潜器向母船发送状态信息和传感器数据; 母船向潜器发送潜器的地理位置信息。非相干 MFSK 数据包长度不超过一个时隙。

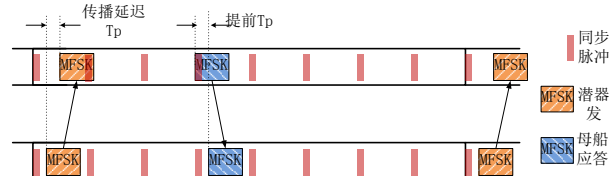


图 7 非相干 MFSK 通信制式同步发送机制

Fig.7 Synchronous transmission of the MFSK incoherent communication

2.2.2 相干 MPSK 时间同步发送

图 8 给出了相干 MPSK 通信制式同步发送机制。相干 MPSK 数据包较大, 需要占用多个时隙进行发送。因此, 为了防止定位声纳等对相干 MPSK 数据包的干扰, 相干 MPSK 数据包在发射时禁止同步脉冲传送给其它声纳。

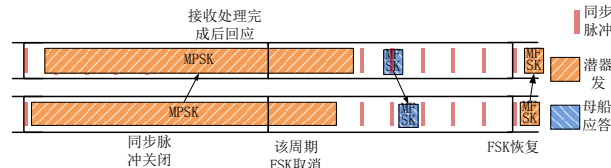


图 8 相干 MPSK 通信制式同步发送

Fig.8 Synchronous transmission of the MPSK coherent communication

2.2.3 单边带调制语音发送

图 9 给出了单边带调制通信制式同步发送方式。一般由潜器主动发起，潜器水声发完后下个通信周期不能直接发送 MFSK，要预留给母船下发调制语音。水声通信任务下达时，如潜器端存在未发送 MFSK，则直接发送单边带调制语音；潜器正在发送 MFSK，则等待发送完 MFSK，间隔 2 个通信周期后，恢复 MFSK 的定时更新传输。

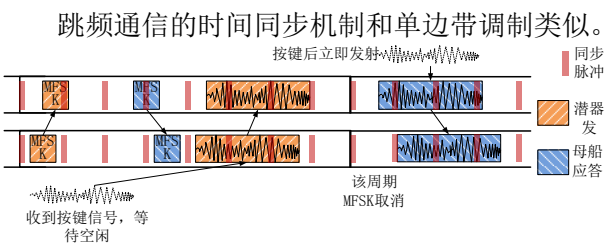


图 9 SSB 语音通信制式同步发送
Fig.9 Synchronous transmission of the SSB communication

3 水声通信的浅海试验效果

在 2014 年 4 月，对非相干、相干通信制式进行拉距试验。图 11 给出了当时的声速剖面，换能器深度在 15m 左右，在 1.5km 以远基本没有直达声线，声信号经过多次的水体折射和海底反射传播，因而信道的多径和混响严重。表 2 和表 3 分别给出了拉距通信试验中水声通信系统非相干 MFSK 和相干 MPSK 通信的实时处理效果。MFSK 经过级联码译码没有出现错误包；MPSK 各帧进行迭代 turbo 均衡，在 4.6km 且运动时误帧率较高，为 6/72，但通过包内的 RS 码纠错(1 包=8 个数据帧+4 个冗余帧)，实现零误包传输。试验验证了 4500 米载人潜水器水声通信系统的算法改进效果。

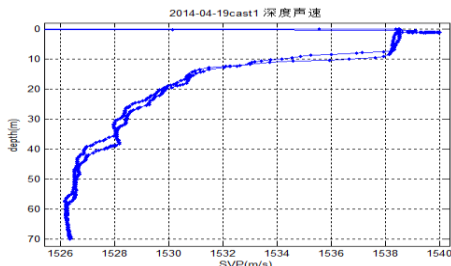


图 10 2014 年 4 月南海试验时的水声声速剖面
Fig.10 Sound velocity profile of the sea experiment in April 2014

表 2 MFSK 测试统计
Table 2 MFSK performance in the sea experiment

| 时间 | 距离范围 km | 船状态 | 总包数 | 错误包数 | 总帧数 | 错误帧数 |
|-------------|---------|-----|-----|------|-----|------|
| 10:54-11:24 | 1~1.3 | 停漂 | 61 | 0 | 671 | 0 |
| 11:43-12:14 | 1.5~2.5 | 远离 | 63 | 0 | 693 | 0 |
| 13:52-14:02 | 4 | 停漂 | 21 | 0 | 231 | 0 |
| 15:30-15:44 | 4.6 | 停漂 | 37 | 0 | 407 | 0 |

表 3 MPSK 测试统计
Table 3 MPSK performance in the sea experiment

| 时间 | 距离范围 km | 船状态 | 总包数 | 错误包数 | 总帧数 | 错误帧数 |
|-------------|---------|-----|-----|------|-----|------|
| 13:01-13:16 | 2.9 | 停漂 | 27 | 0 | 324 | 1 |
| 13:17-13:40 | 2.8-3.5 | 远离 | 43 | 0 | 516 | 8 |
| 15:27-15:30 | 4.8-4.6 | 停漂 | 6 | 0 | 72 | 6 |
| 15:45-15:47 | 4.6 | 停漂 | 5 | 0 | 60 | 1 |

参 考 文 献

[1] Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 4-27.

[2] 朱维庆, 朱敏, 武岩波等. 载人潜水器“蛟龙”号的水声通信信号处理[J]. 声学学报, 2012, 37(6): 565-573.

[3] 朱敏. 蛟龙号载人潜水器声学系统[C]. 中国声学学会第十届青年学术会议论文集, 2013, 重庆.

[4] Wu Yanbo, Zhu Min. Low complexity multichannel adaptive turbo equalizer for large delay spread sparse underwater acoustic channel[C]. 4th Pacific Rim Underwater Acoustic Conference (PRUAC), 2013, Hangzhou China.

[5] Proakis J G. Coded modulation for digital communications over Rayleigh fading channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(1): 66-73.

[6] 武岩波, 朱敏, 朱维庆等. 接近非相干水声通信信道容量的信号处理算法[J]. 声学学报, 2015, 40(01): 117-123.