

# 水声通信技术研究进展与技术水平现状

王海斌 汪 俊 台玉朋 张仁和

(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:** 人类对海洋的深入探索和利用推动了水声通信技术的快速发展, 特别是最近二十年, 水声通信技术水平大幅提高, 技术发展也呈现了一些新的趋势。本文综合国内外最新发表的学术论文与实验结果, 梳理了水声通信技术发展历程以及未来趋势, 重点在调制方式、编码方法等方面总结出当前水声通信领域的的前沿研究方向。在此基础上, 本文归纳得出当前水声通信科研实验水平和商用系统性能的上界, 这对于衡量水声通信技术的发展水平具有一定的参考意义。

**关键词:** 水声通信; 单载波调制; 多载波调制; 信道编码

**中图分类号:** TN919.72      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2019.09.001

**引用格式:** 王海斌, 汪俊, 台玉朋, 等. 水声通信技术研究进展与技术水平现状[J]. 信号处理, 2019, 35(9): 1441-1449. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2019.09.001.

**Reference format:** Wang Haibin, Wang Jun, Tai Yupeng, et al. Development and the State of the Art in Underwater Acoustic Communication[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(9): 1441-1449. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2019.09.001.

## Development and the State of the Art in Underwater Acoustic Communication

Wang Haibin Wang Jun Tai Yupeng Zhang Renhe

(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In recent years, further exploration of the ocean facilitates the quick development of the technique of underwater acoustic communication (UAC). The technical level of UAC has been improved significantly, and new tendencies have emerged over the last couple of decades. Based on the latest published research papers and experimental results, we summarize the development history of UAC and anticipate its future tendency, especially in the following three cutting-edge aspects: single-carrier modulation, multi-carrier modulation, and error control coding. We further draw a preliminary conclusion on the upper performance limit of both research UAC results and commercial UAC systems. This conclusion has certain reference significance for evaluating the development level of the UAC technique.

**Key words:** underwater acoustic communication; single-carrier modulation; multi-carrier modulation; error control coding

## 1 引言

人类的海洋活动日益增多,对水下信息传输提出更多更高的需求。水下无线通信技术的发展推动了人类海洋活动模式的演进与变革,应当引起足够重视。声波是水下无线通信首选的信息载体,水声通信一般是指水下的移动体与固定体之间,或者移动体相互之间通过声波信道进行的通信。

水声信道特性十分复杂,一般来讲具有多途、频散、环境噪声高、信道带宽窄、多普勒频移大等特点。特别是海洋中存在各种时间和空间尺度的海洋动力过程,引起了水体的非均匀性,加之海面的随机波动性和海底的不平整性等因素,均会对水中的声波传播造成影响,因此水声信道存在显著的空间差异和时间起伏,这会严重影响到水声通信设备对信号的可靠检测和解码,实现稳健水声通信的难度很大。

近二十年来,研究人员在认知水声传播规律和信道特性、提高水声通信速率和距离、对抗信道衰落和起伏等方面进行了大量的研究探索;同时,得益于信号处理理论技术的突破和计算机性能的跃升,联合均衡译码<sup>[1-2]</sup>、近香农限信道编译码、多载波调制<sup>[3]</sup>、多输入多输出<sup>[4]</sup>等一系列先进的通信信号处理技术先后涌现并得以引入到水声通信领域,取得了许多性能优异的实验结果,部分技术已经开始转入工程化应用。

本文将按以下结构对当前水声通信的技术水平与技术发展趋势进行梳理:第 2 节,简要梳理水声通信技术发展脉络,并重点介绍当前水声通信的几个研究热点和最新进展情况。第 3 节,主要通过归纳近二十年具有代表性的水声通信科研实验结果与典型水声调制解调器 (Modem) 的性能指标,分别总结当前水声通信科研水平与商用化产品发展水平。第 4 节,对全文进行总结。

## 2 水声通信研究进展及发展趋势

### 2.1 概述

水声通信技术的发展始于上世纪四十年代,最初的水声通信系统采用的是模拟调制方式。20 世纪 70 年代后,数字调制逐步取代模拟调制,成为水声通信主流的调制方式。早期的数字水声通信系统基本都采用非相干调制方式,其中频移键控 (Frequency-Shift Keying, FSK) 调制技术最为常用。1981 年,美国麻省理工学院和伍兹霍尔海洋研究所在其联合开发的数字声遥测系统上采用水声通信技术进行测量数据的无线传输,其中水声通信模块利用多进制频移键控技术 (Multifrequency-Shift Keying, MFSK) 进行调制,测试实验中,在 200 m 左右的距离上成功进行了数据率为 1.2 kbps 的水声通信<sup>[5]</sup>。

上世纪 80 年代,针对不断增长的水下高速率数据传输需求,相干调制技术被引入水声通信领域,并得到迅速发展。此时的相干水声通信一般采用诸如相移键控 (Phase-Shift Keying, PSK)、正交幅度调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 等单载波调制方式。具有里程碑意义的是,1993 年,美国东北大学的 M. Stojanovic 等人提出了基于判决反馈均衡 (Decision Feedback Equalization, DFE) 和二阶数字锁相环 (Digital Phase Lock Loop, DPLL) 的相干水声通信接收机结构<sup>[6]</sup>,较好地解决了时变水声

信道匹配和码间干扰问题,这项开创性的工作将水声通信研究推向了一个新的阶段。

进入 21 世纪以来,研究人员在对抗信道衰落与起伏和提高通信速率方面进行了大量的研究与探索,同时,得益于计算设备与信号处理算法的发展,一系列先进的通信信号处理技术被提出或引入到水声通信领域,取得了许多性能优异的实验结果,部分技术已经开始转入工程化应用。总的来说,当前水声通信技术呈现以下几个重要的发展趋势:

一方面,为进一步提高通信可靠性,需要更好的克服水声信道复杂的多途衰落,在这一方向上,将信道均衡与信道译码相结合的联合均衡译码方法是当前较为先进的信道补偿技术,具有较高的实用价值与应用前景。

另一方面,为满足更加多样化的高数据率应用需求,新型高效调制方式、多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 等技术被引入到中近程水声通信中来,显著提高了水声通信速率,成为一个新的研究热点。

此外,随着陆上无线电通信技术的突破,一些先进的信源信道编码技术也被引入到了水声通信技术中,成为一个重要的水声通信技术发展方向。

本文接下来将分别从单载波系统、多载波系统以及通信编码技术几个方面对水声通信技术当前的发展趋势进行详细的梳理与分析。

### 2.2 单载波调制水声通信技术

由于单载波系统便于设计实现快速、精细的自适应信道估计与均衡,故而广泛应用于信道复杂且时变严重的水声通信中<sup>[7]</sup>。当前对于单载波水声通信的研究热点集中在如何更好地补偿时变多途衰落上,其中,联合均衡译码方法是当前该方向的一个重要研究热点。

传统的 DFE 和 DPLL 相结合的均衡器虽然能够较好地对抗复杂时变水声信道的衰落,但当信道衰落严重时,其性能仍然难以满足水声通信应用的可靠性需求。因此,研究人员开始探索利用信道译码增益提高均衡器性能的方法<sup>[8]</sup>。早在 1989 年 IBM 苏黎世研究实验室的 P. R. Chevillat 等人就提出了基于网格编码调制技术 (Trellis Coded Modulation, TCM) 的联合均衡译码方法<sup>[9]</sup>,该方法在接收端采用最大似然序列估计算法进行联合均衡译码,其性能优于传统的均衡器与译码器分离模式。然而,该

方法的复杂度随信道响应长度呈指数增长,当信道存在长延时码间干扰时难以应用,随后此方向的研究陷入停滞。

直到1995年,受到Turbo编码迭代译码思想的启发,法国西布列塔尼大学的Douillard等人提出了Turbo均衡算法<sup>[10]</sup>。Turbo均衡在接收端将均衡器与信道译码器看作级联结构,在两者之间迭代交换软信息,从而达到联合均衡译码的目的。2001年,美国东北大学的Sozer等人采用最大后验Turbo均衡在1.5 km上进行了浅海水声通信实验,其结果优于DFE均衡器<sup>[11]</sup>,但是最大后验Turbo均衡算法的复杂度仍然较高,工程化应用难度较大。为了降低算法复杂度,1997年,法国国立布列塔尼高等电信学院Glavieux等人将最小均方误差(Minimum mean-square error, MMSE)均衡器应用到Turbo均衡中,首次提出了线性MMSE-Turbo均衡方法<sup>[12]</sup>,实验表明,在满足一定信噪比门限的条件下,经过多次迭代,该算法渐进地收敛到理想MMSE干扰抵消均衡器的性能。西北工业大学的何成兵等人采用多路频域预均衡器级联时域Turbo均衡器的方式在丹江口10.8 km距离上实现了4 kbps的可靠通信,实验结果表明该方法比现有频域Turbo均衡方法具有更高的输出信噪比<sup>[13]</sup>。中国科学院声学研究所的鄢社峰等人提出双向Turbo均衡方法,有效抑制了传统单向Turbo均衡算法中的误差传播,降低了通信误码率<sup>[14]</sup>。中国科学院声学研究所的王海斌等人,在西太平洋多个距离上进行了深海水声通信实验,结果显示采用MMSE-Turbo均衡可以获得显著优于传统时间反转判决反馈均衡器的性能<sup>[15]</sup>。联合均衡译码算法优异的性能,使其成为了当前水声通信领域的研究热点<sup>[16-17]</sup>。

随着研究的深入,研究人员发现,在将Turbo均衡应用于单载波水声通信的过程中仍然存在着一些问题:首先,由于采用了交织迭代结构,Turbo均衡需要较长的码块长度才能达到理想的性能,码长受限会导致Turbo均衡的性能显著下降<sup>[18]</sup>;其次,由于采用了迭代结构,导致Turbo均衡的性能仅在接收信号信噪比高于某一门限时才开始收敛。文献[19]指出当信道频率选择性衰落较强或者对于自适应信道估计存在误差时,Turbo均衡的信噪比门限较高。

针对Turbo均衡的以上问题,中国科学院声学研究所的王海斌等人提出了一种基于递归混沌全

息码的最大似然联合均衡译码方法。该方法采用联合网格图实现均衡与译码的直接联合处理,无需迭代与交织,该方法在输入的码块长度较短时仍能获得优良性能,且在低信噪比情况下也能获得较高的均衡译码增益;此外,需要强调的是,该方法巧妙地利用递归混沌码随机编码特性,在保证均衡译码性能的基础上,将算法复杂度控制为与编码块长度和信道响应长度均呈线性关系,解决了联合均衡译码算法复杂度高的难题;并在南海海域开展了与传统Turbo均衡方法的海上比对试验,实验结果表明,本方法在低信噪比条件下实现了可靠的低频远程通信,误码率性能优于传统Turbo均衡方法。

## 2.3 多载波调制水声通信技术

多载波系统本身天然地具有一定抵抗信道多途的能力,且均衡算法复杂度较低,更适合于信道相对稳定且对数据率要求较高的中近程通信场景。进一步提高频带利用率是当前多载波水声通信的一个重要研究方向,结合多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)的新型多载波调制方式是当前该领域的一个研究热点。

多载波调制技术可将高速串行传输转化为低速并行传输,增加了码元持续时间,使码间干扰程度大为降低;相关技术已被广泛应用于无线通信,并成为新一代的无线通信标准。多载波调制在水声通信中的应用研究始于上世纪90年代。随着精细的子载波干扰抵消算法等关键算法<sup>[20-23]</sup>的突破,以正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)为代表的多载波高效水声通信技术体系已经日趋成熟<sup>[24-26]</sup>。2005年,美国康涅狄格大学的Shengli Zhou等人提出了补零OFDM水声通信方案,并成功实现了距离为2.5 km的水下高数据率传输,数据率达到了22.7 kbps,误码率低于 $10^{-2}$ <sup>[27]</sup>。

然而,传统OFDM技术在水声通信应用中仍然存在峰均功率比高、频谱泄漏、载波间干扰以及符号间干扰等问题。为此,研究人员对新的水声通信多载波调制方式开展了探索性研究。东南大学的J. Tao提出通过离散傅里叶变换预编码的手段来降低OFDM水声通信信号的峰均功率比<sup>[28]</sup>。华南理工大学的Miaowen Wen等人将索引调制OFDM(Index Modulation OFDM)引入到水声通信领域,并对其进行了改进,有效提高了系统对抗载波间串扰(Inter-Carrier Interference, ICI)能力<sup>[29]</sup>。2014年,日

本筑波大学的 Ebihara 等人进行了一项综合性的水池实验,验证了正交信号分割复用(Orthogonal Signal Division Multiplexing, OSDM)水声通信系统优于采用 DFE 的 OFDM 系统<sup>[30]</sup>;随后 Ebihara 等人还提出了一种多普勒弹性的 OSDM(D-OSDM)技术,实验表明,D-OSDM 系统能够在延迟、多普勒频移严重的水声信道上进行可靠的信息传输<sup>[31-32]</sup>;针对子载波间干扰和频谱泄漏等问题,美国犹他大学的 P. Amini 等人提出了一种适用于水声通信的滤波器组多载波(Filter Bank Multicarrier, FBMC)调制方案,并进行了试验验证<sup>[33]</sup>。印度 BMS 工程学院的 R. Hebbar 等人对广义频分复用(Generalized frequency division multiplexing, GFDM)调制技术在水声通信中的应用前景进行了分析和研究<sup>[34]</sup>。可见,当前多载波水声通信领域,在对 OFDM 技术的改进与衍生调制方法的研究正成为该领域一个研究热点<sup>[35-37]</sup>。

此外,将 MIMO 技术与多载波调制结合起来,可以最大限度地利用水声信道有限的带宽,提高通信速率,同时利用分集增益和复用增益,降低通信误码率,这也是当前高速率水声通信技术重要的发展趋势之一<sup>[38-40]</sup>。中国科学院声学研究所的王海斌等人提出了一种基于子带分割的 MIMO-FBMC 水声通信方案,有效提升了发射信号平均功率,从而使通信系统获得了更好的误码率性能<sup>[41]</sup>。

## 2.4 水声通信中的编码技术

随着以 Turbo 码为代表的近香农限信道编码方法的提出,各类先进的信道编码技术成为了通信领域研究的热点。无论是单载波系统还是多载波系统,与此类先进的信道编码技术相结合也成为了当前水声通信技术的一个新的发展趋势。

信道纠错编码在保证水声通信可靠性方面有重要的作用。初期的数字水声通信一般采用 BCH 码、RS 码(Reed-Solomon Code)、卷积码等传统信道编码方法<sup>[42]</sup>。直到 1993 年,法国国立布列塔尼高等电信学院的 Berrou 等人提出了误码率性能逼近香农限的 Turbo 码<sup>[43]</sup>,引发了信道编码领域的革命。Turbo 码的编码端由多个分量码级联构成;在译码端,采用迭代译码的思想,对每个分量码单独译码,并在各分量码译码器之间迭代交换软信息,使译码结果逼近最大似然译码;迭代译码的思想使得 Turbo 码在计算复杂度较低的情况下达到了接近

香农限的性能。2011 年,中国科学院声学研究所的朱敏等人在蛟龙号载人潜水器的水声通信机中采用 Turbo 码作为信道编码,在垂直距离 5 km,水平距离 1 km 处实现了图像传输<sup>[44]</sup>。受到 Turbo 码的启发,上世纪 90 年代,低密奇偶校验码(Low Density Parity Check, LDPC)被再次“发现”,LDPC 码通过稀疏的奇偶校验矩阵构造,译码时常采用基于置信度传播的译码算法,同样达到了接近香农限的性能<sup>[45-46]</sup>。中国科学院声学研究所的武岩波等人在 2013 年将 LDPC 码应用于水声通信,并进行了实验研究,实现了可靠通信<sup>[47]</sup>。

前面提到的传统信道编码技术,其编码的码率一般是固定的,无法随信道的优劣变化自适应调节。当信道环境发生变化时,会导致通信系统效率下降。为了解决这一问题,1998 年,美国麻省理工学院的 Luby 提出了喷泉码的概念。喷泉码是一种无码率的编码,对于每一段信息序列,喷泉码都能产生任意长度的码字,码字中的任一段都包含原始信息序列的全部信息;通信过程中,发送端持续发送编码码字,当接收端接收到足够多的码字后即可成功译码,从而使喷泉码的码率可以随信道变化自适应调节。无码率的特性使喷泉码在水声信道这种时变信道下有着较好的应用前景。目前主要的喷泉码有 LT 码(Luby Transform Code)、Raptor 码、Strider 码等。近几年,喷泉码在水声网络方面(如水声广播、中继网络等)的应用也逐渐得到了重视<sup>[48-50]</sup>。中国科学院声学研究所的王海斌等人提出了一种适用于水声通信信道的递归混沌全息码,该方法采用多级递归混沌映射将信息充分混合,使得每一个编码符号均包含全部已编码符号的部分信息,提高了编码的纠错能力,在仿真和实验中均取得了理论预计的良好结果。

此外,在通信系统中,待发送的符号序列通常先经过信源编码映射为二进制序列,并进行压缩,去除其中的冗余信息,从而达到提高通信系统效率的目的。传统的通信系统中,信源编码和信道编码是分别独立设计的。在实际应用中,由于计算复杂度和译码时延的限制,信源编码后仍存在一定的残留冗余信息。将信源编码和信道编码联合设计,利用信源编码中的残留冗余信息提高信道编码的纠错能力,可以进一步提高通信系统的性能<sup>[51-52]</sup>。中国科学院声学研究所针对水声通信信道复杂,系统

可靠性要求高的特点,提出了一种信源信道联合译码算法,将信源建模为马尔科夫模型,在递归混沌全息码的译码过程中,联合信源转移和信道转移两部分信息作为译码度量,利用信源编码中的残留冗余信息进一步提高信道编码的纠错能力。研究表明,采用信源信道联合译码方法可以进一步提高通信系统的性能。

### 3 水下通信技术发展水平

#### 3.1 水下通信方式

水下通信主要有电磁波、光波和声波等几种信息载体,图1为几种主要水下通信方式的通信距离与通信速率性能比较。由于水体对于电磁波具有明显的屏蔽作用,水下的电磁波通信距离一般仅在百米以内;光波在蓝绿波段对于水下通信存在一个可用窗口,可在百米量级上实现高数据率的数据通信,但继续提高通信距离难度很大;低频声波在水中的传播损失较小,当前可实现最大通信距离上千公里,最大通信速率10~100 bps的数据传输,这也使得水声通信成为百米以深的海区中当前唯一成熟可用的远距离通信方式。

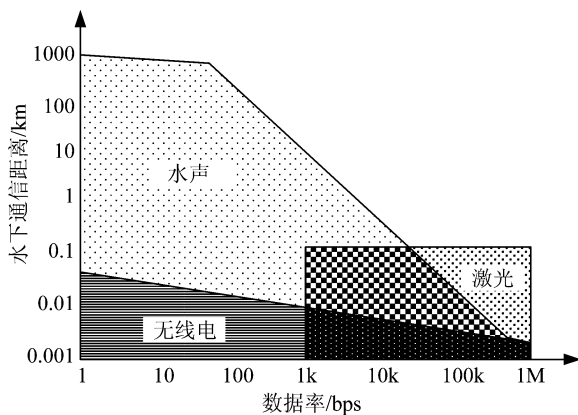


图1 几种主要水下无线通信方式

Fig. 1 Some main methods for wireless communication in underwater environment

#### 3.2 水声通信科研实验水平

2000年,美国麻省理工学院的Baggeroer等人以 $I = \text{最大通信距离} \times \text{通信速率}$ 为考察标准,总结以往水声通信系统性能,给出了2000年以前水声通信系统性能经验性的上界: $I = 40 \text{ km} \times \text{kbps}$ <sup>[53]</sup>,这也成为了水声通信领域衡量整体技术发展水平的重要量化指标。随着水声通信技术的快速发展,21世纪

的水声通信系统性能已经发展到了一个新的水平,西北工业大学的黄建国教授对2000~2017年的通信距离30 km以内的水声通信科研实验结果进行统计分析,得到水声通信系统性能上界已经接近 $I = 100 \text{ km} \times \text{kbps}$ 的结论<sup>[54]</sup>。

本文在文献[54]统计结果的基础上,对通信距离30~1000 km的最新研究实验结果进行了总结归纳,得到如图2所示的通信距离-数据率性能的散点图,可见,当前在各个距离上的水声通信系统性能上界均已经接近 $I = 100 \text{ km} \times \text{kbps}$ ,部分实验结果甚至已经超过了 $I = 150 \text{ km} \times \text{kbps}$ ,整体技术水平相比二十年前已有较大进步。

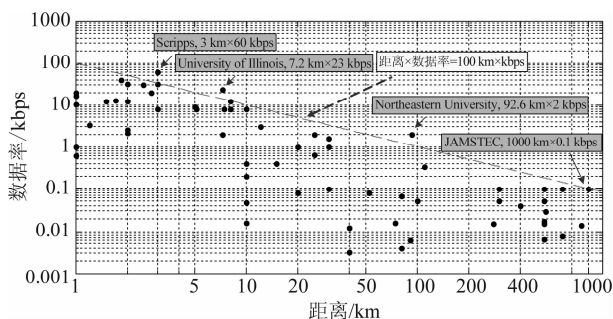


图2 近20年水声通信实验技术发展水平

Fig. 2 The development level of underwater acoustic communication in recent two decades

其中,近程水声通信方面,2007年,美国东北大学的B. S. Li等人采用OFDM和MIMO相结合的方法,在较近的距离上成功实现了125 kbps的可靠水声通信<sup>[4]</sup>;同年,西北工业大学采用8PSK和32QAM调制方法和内嵌二阶锁相环的自适应判决反馈均衡器技术进行了海试,在30 km的距离上实现了速率为1.6 kbps的可靠通信<sup>[55]</sup>;2010年,伊利诺伊大学的Riedl利用Turbo均衡和递归的多普勒补偿方法在7.2 km距离上实现了23 kbps的可靠通信<sup>[56]</sup>;加利福尼亚大学的H. C. Song等人于2011年的海试实验中,使用时间反转判决反馈均衡器和正交幅度调制技术,以60 kbps的数据率在3 km距离上实现了可靠通信<sup>[57]</sup>。

中远程水声通信方面,2010年9月,美国Scripps海洋研究所的H. C. Song等人于加利福尼亚南部深海海域进行了一次远程水声通信实验,实验中发送了多种信号,其中,采用DFE均衡器加2阶锁相环的接收机结构,结合LDPC编码,在550 km距离上实现了误比特率为0.3%的100 bps水声通信<sup>[58]</sup>;

采用 OFDM 调制方式结合 LDPC 编码,在距离为 550 km 时通信速率达到 15 bps,通信距离为 700 km 时通信速率达到 7.5 bps<sup>[59]</sup>。2008~2012 年间,日本 JAMSTEC 的 Takuya Shimura 等人联合美国、法国科研人员,在日本岛南部深海海域,利用长航程 AUV 搭载发射换能器配合垂直声接收阵,位于海深 1000 m 左右的声道轴进行了多次远程水声通信实验。其中,2012 年,Takuya Shimura 等人采用法国的 JHB 换能器实现了最大通信距离 1000 km,通信速率 100 bps 的低频水声通信<sup>[60]</sup>。2015 年,美国伍兹霍尔海洋研究所的 Lee Freitag 等人在北冰洋利用冰层下独特的声速跃层结构,采用中心频率为 900 Hz 的 PSK 信号,在 560 km 的距离上实现了 29.6 bps 的通信导航<sup>[61]</sup>。

总的来说,理论上的不断创新正推动当前的水声通信技术逐步突破水下高效稳定信息传输难题,实现通信性能质的飞跃。

### 3.3 商用水声通信设备性能水平

水声通信调制解调器是大多数水声通信系统的主要应用形式,一般应用于海洋监测、水下各类平台设备的遥控、遥测等,要求具有较高的通信稳健性,一般采用较为成熟的水声通信技术,因此,商用水声通信设备的性能普遍低于上述最新的科研实验水平。本文归纳了当前主流的商用水声通信设备性能指标,并绘制了如图 3 所示的通信性能散点图,可以看出,商用水声通信设备的技术水平已经从早些年  $I=20\text{ km}\times\text{kbps}$ ,发展到  $I=40\text{ km}\times\text{kbps}$ 。其中,美国 LinkQuest 公司,通过采用宽带扩频技术来提高稳健性,可以在多途干扰严重的浅海环境中获得较好的性能;美国的 Teledyne Benthos 公司,通过采用卷积码来提高纠错性能;德国 Devologics 公司,通过采用两阶段的多普勒补偿技术,实现了在最大相对运动速度达到 12 m/s 时的良好通信;

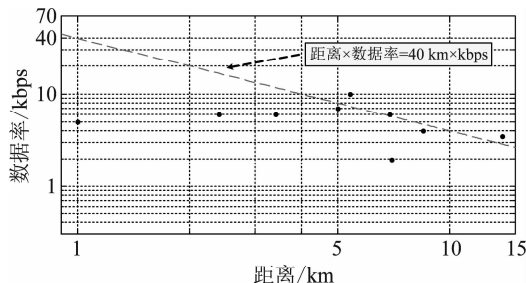


图 3 近 20 年水声通信设备技术发展水平

Fig. 3 Technology development level of underwater acoustic communication equipment in recent two decades

Evologic 公司,则采用 S2C (Sweep-Spread Carrier) 技术,以扫频信号作为载波来对抗多途干扰。总的来说,从水声设备的通信体制来看,目前主流水声通信调制解调器多采用稳健的扩频和 MFSK 体制,同时单载波 PSK 和 OFDM 体制也逐渐进入市场。随着水声通信科研水平的不断提高,未来水声通信商用设备的性能仍有较大的提高空间。

## 4 结论

近几十年来,在人类认知海洋水平提高的基础上,以及开发利用海洋的迫切需求推动下,水声通信技术水平取得了长足的进步,各种新技术层出不穷。本文分析总结出以下几个当前水声通信研究的发展趋势:

在提高通信可靠性方面,时变的多途衰落是该方向需解决的主要难点问题,将均衡器与译码器进行联合优化的联合均衡译码方法已被充分验证可有效提高系统抵抗时变多途衰落的能力。未来,基于水声环境效应机理,归纳水声信道多途结构特性与信道时空变规律,并将之与水声信道均衡算法相结合,有望能进一步提高水声通信系统的鲁棒性并降低通信误码率。

在提高通信速率方面,当前,高数据率的多载波调制技术已逐步走向成熟。未来,将 MIMO 等手段与新型多载波调制相结合,有望进一步提高信道利用率,为图像传输等高数据率水下通信应用提供技术支撑。

从国内外公开的水声通信实验数据统计结果来看,当前水声通信科研实验的性能上界已由二十年前的  $I=40\text{ km}\times\text{kbps}$  提升至  $I=100\text{ km}\times\text{kbps}$ ,未来随着各项新技术的日趋成熟,稳健的水声通信水平预计将达到  $I=150\text{ km}\times\text{kbps}$ ,部分深海远程科研实验水平有望突破  $I=200\text{ km}\times\text{kbps}$ 。同时,随着部分经过充分验证的水声通信新技术已经开始加快推进实用化进程,相信商用化的水声通信设备性能水平在不远的将来也会发生跨越的提升。

## 参考文献

- [1] Tüchler M, Koetter R, Singer A C. Turbo equalization: principles and new results[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(5): 754-767.
- [2] Koetter R, Singer A C, Tüchler M. Turbo equalization [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(1):

- 67-80.
- [3] Radosevic A, Ahmed R, Duman T M, et al. Adaptive OFDM Modulation for Underwater Acoustic Communications: Design Considerations and Experimental Results[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(2): 357-370.
  - [4] Li Baosheng, Huang Jie, Zhou Shengli, et al. MIMO-OFDM for High-Rate Underwater Acoustic Communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34(4): 634-644.
  - [5] Baggeroer A, Koelsch D, Von d H K, et al. A Digital Acoustic Telemetry System for Underwater Communications [C]//Oceans. IEEE, 1981: 55-60.
  - [6] Stojanovic M, Catipovic J A, Proakis J G. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994, 19(1): 100-111.
  - [7] Kim H, Kim S, Choi J W, et al. Bidirectional equalization based on error propagation detection in long-range underwater acoustic communication[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(SG): SGGF01.
  - [8] Eyuboglu M V, Qureshi S U H. Reduced-state sequence estimation for coded modulation of intersymbol interference channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1989, 7: 89-995.
  - [9] Chevillat P R, Eleftheriou E. Decoding of trellis-encoded signals in the presence of intersymbol interference and noise[J]. IEEE Transactions on Communications, 1989, 37(7): 0-676.
  - [10] Douillard C, Michel Jézéquel, Berrou C, et al. Iterative correction of intersymbol interference: Turbo-equalization [J]. European Transactions on Telecommunications, 1995, 6(5): 507-511.
  - [11] Szer E M, Proakis J G, Blackmon F. Iterative equalization and decoding techniques for shallow water acoustic channels[C]//Oceans, MTS/IEEE, 2001.
  - [12] Glavieux A, Laot C, Labat J. Turbo equalization over a frequency selective channel[C]//Proc. Int. Symp. Turbo Codes. ENST de Bretagne, 1997, 33: 96-102.
  - [13] He Chengbing, Jing Lianyou, Xi Rui, et al. Time-Frequency Domain Turbo Equalization for Single-Carrier Underwater Acoustic Communications[J]. IEEE Access, 2019.
  - [14] Xi Junyi, Yan Shefeng, Xu Lijun. Direct-adaptation based bidirectional turbo equalization for underwater acoustic communications: Algorithm and undersea experimental results[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(5): 2715-2728.
  - [15] 杨晓霞. 水声通信信道均衡理论与关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2014.
  - Yang Xiaoxia. Equalization in Underwater Acoustic Communications[D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
  - [16] Peng H, Li J. Turbo Equalization in Blind Receiver[C]//Communications and Intelligence Information Security (IC-CIIS), 2010 International Conference on. IEEE Computer Society, 2010.
  - [17] Zheng Y R, Wu Jingxian, Xiao Chengshan. Turbo equalization for single-carrier underwater acoustic communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(11): 79-87.
  - [18] Tüchler M, Koetter R, Singer A C. Turbo equalization: principles and new results[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(5): 754-767.
  - [19] Brink T, S. Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(10): 1727-1737.
  - [20] Tu K, Fertoni D, Duman T M, et al. Mitigation of Inter-carrier Interference for OFDM Over Time-Varying Underwater Acoustic Channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(2): 156-171.
  - [21] Berger C R, Zhou S, Preisig J C, et al. Sparse Channel Estimation for Multicarrier Underwater Acoustic Communication: From Subspace Methods to Compressed Sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1708-1721.
  - [22] Huang Jianzhong, Zhou Shengli, Huang Jie, et al. Progressive Inter-Carrier Interference Equalization for OFDM Transmission Over Time-Varying Underwater Acoustic Channels[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(8): 1524-1536.
  - [23] 李程程, 李有明, 吕新荣, 等. 水声通信中脉冲干扰和载波频偏联合估计算法的研究[J]. 信号处理, 2015, 31(11): 1473-1478.
  - Li Chengcheng, Li Youming, Lv Xinrong, et al. Joint Impulsive Noise and Carrier Frequency Shift Estimation in Underwater Acoustic Communication[J]. Journal of Signal Processing, 2015, 31(11): 1473-1478. (in Chinese)
  - [24] Lu Qin, Hu Xiaoyi, Wang Deqing, et al. Parallel combinatorial multicarrier modulation in underwater acoustic communications[J]. IET Communications, 2017, 11(9): 1331-1337.
  - [25] Ma Lu, Zhou Shengli, Qiao Gang, et al. Superposition coding for downlink underwater acoustic OFDM[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 42(1): 175-187.

- [26] Amar A, Avrashi G, Stojanovic M. Low complexity residual Doppler shift estimation for underwater acoustic multi-carrier communication[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 65(8): 2063-2076.
- [27] Li B, Zhou S, Stojanovic M, et al. Non-Uniform Doppler Compensation for Zero-Padded OFDM over Fast-Varying Underwater Acoustic Channels[C]//OCEANS 2007-Europe. IEEE, 2007.
- [28] Jun Tao. DFT-Precoded MIMO OFDM Underwater Acoustic Communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(3): 805-819.
- [29] Wen Miaowen, Cheng Xiang, Yang Liuqing, et al. Index modulated OFDM for underwater acoustic communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 132-137.
- [30] Ebihara T, Mizutani K. Underwater Acoustic Communication With an Orthogonal Signal Division Multiplexing[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1): 47-58.
- [31] Ebihara T, Leus G J T. Doppler-Resilient Orthogonal Signal-Division Multiplexing for Underwater Acoustic Communication[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(2): 408-427.
- [32] Ebihara T, Ogasawara H, Leus G. Underwater Acoustic Communication Using Multiple-Input-Multiple-Output Doppler-Resilient Orthogonal Signal Division Multiplexing[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019.
- [33] Amini P, Chen R R, Farhang-Boroujeny B. Filterbank Multicarrier Communications for Underwater Acoustic Channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(1): 115-130.
- [34] Hebbar R P, Poddar P G. Generalized Frequency Division Multiplexing for Acoustic Communication in Underwater Systems[C]//2017 Int. Conf. Circuits, Control. Commun., IEEE, 2017: 86-90.
- [35] Han Jing, Zhang Lingling, Zhang Qunfei, et al. Low-complexity equalization of orthogonal signal-division multiplexing in doubly-selective channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(4): 915-929.
- [36] Han Jing, Wang Yujie, Zhang Lingling, et al. Time-domain oversampled orthogonal signal-division multiplexing underwater acoustic communications[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145(1): 292-300.
- [37] Bocus M J, Doufexi A, Agraftiotis D. Performance evaluation of filterbank multicarrier systems in an underwater acoustic channel[C]//2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2016: 1-6.
- [38] Duan Weimin, Tao Jun, Zheng Y R. Efficient adaptive turbo equalization for multiple-input-multiple-output underwater acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(3): 792-804.
- [39] Qin Zhen, Tao Jun, Wang Xiaoyan, et al. Direct adaptive equalization based on fast sparse recursive least squares algorithms for multiple-input multiple-output underwater acoustic communications[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145(4): EL277-EL283.
- [40] Zhou Yuehai, Jiang Weihua, Tong F, et al. Exploiting joint sparsity for underwater acoustic MIMO communications[J]. Applied Acoustics, 2017, 116: 357-363.
- [41] Wang Yueyue, Tai Yupeng, Wang Haibin, et al. The Research of MIMO-FBMC in Underwater Acoustic Communication[C]//The 13th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems, Shenzhen China, ACM, 2018.
- [42] Freitag L, Grund M, Singh S, et al. Acoustic communication in very shallow water: results from the 1999 AUV Fest[C]//Oceans. IEEE, 2000.
- [43] Berrou C, Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding: turbo-codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(10): 1261-1271.
- [44] Zhu Weiqing, Zhu Min, Wu Yanbo, et al. Signal processing in underwater acoustic communication system for manned deep submersible "Jiaolong"[J]. Chinese Acoust., 2013, 23(1): 1-14.
- [45] Richardson T J, Shokrollahi M A, Urbanke R L. Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 619-637.
- [46] Zhao Shunde, Zhang Xin, Zhang Xiaoji. Iterative frequency domain equalization combined with LDPC decoding for single-carrier underwater acoustic communications[C]//Oceans. IEEE, 2016.
- [47] Wu Yanbo, Zhu Min, Zhu Weiqing, et al. Nonbinary LDPC code for noncoherent underwater acoustic communication and its experiment results[C]//Oceans. IEEE, 2014.
- [48] Cui Yinming, Qing Juan, Guan Quansheng, et al. Stochastically optimized fountain-based transmissions over underwater acoustic channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 2108-2112.
- [49] Chen Weiqi, Yu Hua, Guan Quansheng, et al. Reliable and opportunistic transmissions for underwater acoustic networks[J]. IEEE Network, 2018, 32(4): 94-99.
- [50] Barreto G, Simão D, Pellenz M, et al. Energy-Efficient



- Channel Coding Strategy for Underwater Acoustic Networks[J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 728.
- [51] Vembu S, Verdu S, Steinberg Y. The source-channel separation theorem revisited[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(1): 44-54.
- [52] Hassanin M, Garcia-Frias J. Analog joint source channel coding over non-linear acoustic channels[C]//2013 47th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). IEEE, 2013: 1-6.
- [53] 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.
- [54] Huang J, Wang H, He C, et al. Underwater acoustic communication and the general performance evaluation criteria [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2018, 19(8): 951-971.
- [55] 吴芳菲, 黄建国, 何成兵. 远程高速水声通信及实验研究[J]. *计算机测量与控制*, 2010(8): 1837-1839. Wu Fangfei, Huang Jianguo, He Chengbing. Experimental Research on Long-Range High-speed Underwater Acoustic Communication [J]. *Computer Measurement & Control*, 2010(8): 1837-1839. (in Chinese)
- [56] Riedl T, Singer A. MUST-READ: Multichannel sample-by-sample turbo resampling equalization and decoding [C]//OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE. IEEE, 2013.
- [57] Song H C, Hodgkiss W S. Efficient use of bandwidth for underwater acoustic communication[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2013, 134(2): 905-908.
- [58] Song H C, Cho S, Kang T, et al. Long-range acoustic communication in deep water using a towed array [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 129(3): EL71-EL75.
- [59] Kang T, Song H C, Hodgkiss W S. Long-range multi-carrier acoustic communication in deep water using a towed horizontal array[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(6): 4665-4671.
- [60] Shimura T, Watanabe Y, Ochi H, et al. Long-range time reversal communication in deep water: Experimental results[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 132(1): EL49-EL53.
- [61] Frédéric M, Guillaume M, Takuya S. Low-frequency source for very long-range underwater communication[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133(1): 61-67.
- [62] Freitag L, Ball K, Partan J, et al. Long range acoustic communications and navigation in the Arctic[C]//OCEANS

2015-MTS/IEEE. Washington: IEEE, 2015: 1-5.

## 作者简介



**王海斌** 男, 1974 年生, 江苏人。

中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 中国科学院特聘研究员, 声场声信息国家重点实验室主任, 博士生导师, 2002 年毕业于中国科学院研究生院, 获信号与信息处理专业博士学位, 2008 至 2009 年在法国 TELECOM Bretagne 大学作高级访问学者, 2012 年任中国科学院科技创新交叉团队负责人, 重点研究方向包括水声通信、探测和导航定位等。

E-mail: whb@mail.ioa.ac.cn



**汪俊** 男, 1978 年生, 安徽人。

中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 研究员, 声场声信息国家重点实验室副主任, 2000 年于中国科学技术大学获得学士学位, 2006 年于中国科学院声学研究所获得博士学位, 主要研究方向为水声通信、导航和数字信号处理, 通过理论分析揭示了新型混沌调制信号的重要性质; 研究提出了多项远程水声通信导航新技术。

E-mail: wangj@mail.ioa.ac.cn



**台玉朋** 男, 1989 年生, 黑龙江人。

中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 助理研究员, 2017 年毕业于中国科学院研究生院, 获信号与信息处理专业博士学位, 2015 至 2016 年在法国 TELECOM Bretagne 大学作联合培养博士。从事水声通信领域理论、技术和工程方面的研究, 重点研究方向包括水声通信信道均衡与通信编译码等。

E-mail: typ@mail.ioa.ac.cn



**张仁和** 男, 1936 年生, 重庆人。

中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 水声物理学家, 中国科学院院士, 博士生导师, 实验室首席科学家, 创新研究团队带头人。现任国际声学委员会(ICA)委员、西太平洋声学委员会主席、中国声学学会名誉理事长, 主要研究方向为浅海与深海的水声物理规律, 在中国沿海和西北太平洋进行海上实验上百次, 取得大量的实验数据和资料, 开展了“平滑平均声场理论”、“浅海声场统一理论”和“远程声传播理论与应用”等一系列研究。

E-mail: zrh@mail.ioa.ac.cn