

# 水声通信技术综述\*

贾宁<sup>†</sup> 黄建纯

(中国科学院声学研究所 中国科学院水声环境特性重点实验室 北京 100190)

2014-07-24收到

<sup>†</sup> email: jianing@mail.ioa.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20141002

## An overview of underwater acoustic communications

JIA Ning<sup>†</sup> HUANG Jian-Chun

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**摘要** 受制于严重的衰减,电磁波在水中的传播距离非常有限,因此以声波为载体的水声通信是在水下实现无线信息传输的主要方式。水声通信无论是在军事方面还是在民用方面都有重要的作用,随着人类加快开发海洋的步伐,对水声通信技术的需求也变得越来越迫切。文章对水声通信技术进行了综合介绍。首先介绍了水声通信的概念和意义,着重分析了水声信道的特点以及水声通信面临的困难,然后对目前应用较多的几种典型水声通信技术进行了介绍,最后对水声通信技术的发展方向进行了展望。

**关键词** 水声通信,水声信道

**Abstract** Due to severe attenuation, the transmission distance of electromagnetic waves is significantly limited in water. Hence, underwater acoustic communication has become the dominant approach for achieving wireless communication in the ocean. Underwater acoustic communication is very important for both military and civilian usage, and with the speeding up of marine development, has seen an ever increasing demand. An overview of the challenges in underwater acoustic communications is presented in this paper. We introduce some basic concepts, emphasizing the properties of underwater acoustic channels and current challenges. Then, several typical techniques are presented. To conclude, some future developments are described.

**Keywords** underwater acoustic communications, acoustic channel

## 1 引言

马航失联客机MH370黑匣子搜索工作引起了无数人的关注,美国的“蓝鳍金枪鱼-21型战场准备自主式水下航行器”(见图1)也因此进入了人们的视线,这款自主式水下航行器能够在深度为4500 m的深海里使用侧扫声纳设备进行扫描制图,但它无法在海底行动时向海上研究人员传输

收集到的数据,图像专家必须在其结束海底搜寻任务浮上水面后才能“解读”形成的图像。究其原因,是因为无线电通信在水中传输距离受限而无法使用,水声通信是目前实现水中远距离数据传输的唯一方法,但水声通信的速率有限,无法满足侧扫声纳获取的大量图片实时传输的要求。

2012年6月,我国“蛟龙号”载人潜水器(见图2)在西太平洋马里亚纳海沟进行了7000 m下潜试验,标志着中国成为继美、法、俄、日之后世界上第五个掌握大深度载人深潜技术的国家,高

\* 国家自然科学基金(批准号: 61102152)资助项目

速水声通信技术被认为是“蛟龙号”的三大技术突破之一，实现了潜水器和水面船只之间的报文、语音和图像的实时传输。

水声通信有着什么样的特点？面临着什么样的困难和挑战？将来如何发展？本文将逐一解答。

## 2 水声通信简介

海洋蕴藏着丰富的油气、矿产和生物资源，同时也是全球运输的主要通道，近一个多世纪以来，各个国家都逐渐加大了对海洋研究的力度。随着人类开发海洋的步伐逐渐加快，在水下进行通信的需求也越来越迫切。在军事方面，水下载体(潜艇、水下机器人和水下传感器等)之间及其与水面舰船之间迫切需要一种无线的、可靠的、有较好保密性的双向信息传输方式；在民用方面，在海洋科学考察和资源调查活动中，在海上钻井平台与水下机器人之间，潜水员之间，以及在渔业资源及海洋环境监测活动中，都需要文字、声音、图像等信息的无线传输。

就目前已知的能量辐射形式而言，声波是水下无线通信的最佳载体。陆地上通常使用的无线电通信方式是以电磁波为载体，电磁波在水中传播时，被大量吸收而快速衰减，作用距离十分有限。而声波在水下有着良好的传播性能，频率范围在1 Hz到50 kHz之间的声波在水中的衰减系数约为 $10^{-4}$  dB/m到 $10^{-2}$  dB/m。使用声波作为水声通信的载体，设备简单，只需使用水声换能器将电、声信号进行转换即可实现。现阶段，以声波为载体的水声通信是实现水下无线通信的主要形式，发展水声通信技术无论是在军事方面还是在民用方面都有着重要而实际的意义。

## 3 水声信道的特点

水声信道是无线通信领域中最复杂的一种信道，这是由声波在海洋中传播过程中受到海面的波浪起伏、海底的分层不均匀和不平整、以及海水介质的非均匀性所产生的散射、折射效应而



图1 美国的蓝鳍金枪鱼-21型战场准备自主式水下航行器



图2 我国的蛟龙号载人潜器

造成的。另外，浅海水声信道的复杂性还体现在它会随着时间、空间而变化。总的来说，水声信道具有以下几个方面的特点。

### 3.1 带宽资源有限

在无线电通信中，能够使用的频段范围为2 kHz—3000 GHz，虽然目前正在使用的频段只有几十GHz，但相对水声通信的带宽资源已经相当丰富了。声波(超声波)的最高频率也可以达到5 GHz或更高，然而应用到水声通信中时，可用带宽就只有大约几十kHz的量级了，这主要是由于高频声波在海水中传播时会产生严重衰减而造成的。

声波在海水这种不均匀介质中传播时，由于吸收、波阵面的扩展以及各种不均匀性散射等原

因,会造成声波强度在传播方向上的衰减,这称为传播损失,它主要由扩展损失和衰减损失两部分组成。扩展损失是指声信号从声源向外扩展时有规律减弱的几何效应,又称为几何损失(在无限非均匀的介质空间,几何损失属于球面扩展损失,而在非均匀有限空间,几何损失则是非球面扩展损失,损失的大小与声速分布和界面条件有关)。衰减损失包括吸收、散射和声能量泄漏效应。吸收是指由于介质的粘滞、热传导以及其他弛豫过程引起的衰减;散射是由泥沙、气泡、浮游生物等悬浮粒子以及介质的不均匀性造成的。对于窄带信号,介质的吸收引起声信号幅度和能量的衰减,对于宽带信号,色散效应可以导致信号波形产生畸变。

根据经验模型计算得到的传播损失与距离和频率的关系如图3所示,可见,由于吸收系数会随着频率的增加而迅速增加,导致传播衰减急剧增加,这就严重限制了水声信道的可用带宽。比如,在几十米的短距离通信系统中,可用带宽约

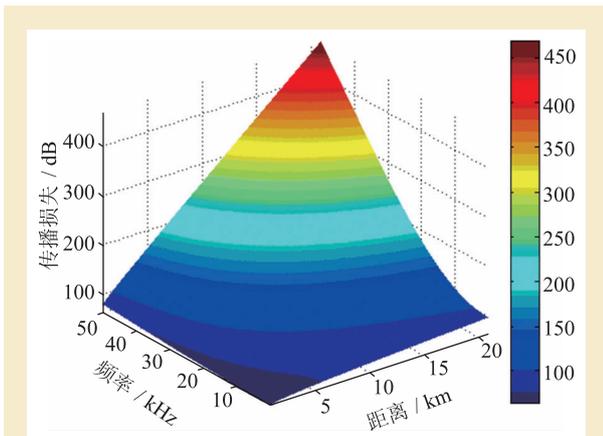


图3 传播损失与距离和频率的关系示意图



图4 环境噪声分类(其中的涌浪是指其他海区传来、或者由于当地风力迅速减小或风向改变后遗留下来的浪)

为几百 kHz,而在几十到 100 km 的远距离通信系统中,可用带宽只有不足 1 kHz。

### 3.2 海洋噪声干扰严重

海洋环境噪声是水声信道中的一种干扰背景场<sup>[1]</sup>,严重影响着水声通信系统的性能。海洋中的噪声源主要包括潮汐、洋流、海面波浪、地震活动、生物群体和交通航运等等,除了传播损失,海洋环境噪声也是限制系统接收信噪比的重要因素,水声通信系统由于受到这两个因素的同时作用,接收信噪比一般较低(相对于无线电通信而言)。《水声学》<sup>[1]</sup>一书中把环境噪声的各种构成因素进行了归纳,其结果如图4所示。

### 3.3 多径效应复杂时变

除了有限的带宽和较高的海洋环境噪声外,复杂时变的多径效应也是影响水声通信系统性能的主要因素之一。多径效应主要是由水面和海底的反射造成的,是指由于一个声源信号从不同的方向以不同的路径到达接收端,接收信号表现为发射信号不同时延、不同相位、不同幅度的叠加,信道在时域的时延扩散会引起频域的频率选择性衰落。

图5和图6分别给出了2005年4月东海1 km和2007年1月渤海4 km两组实测的水声信道结构,图中的各个尖峰就代表了不同幅度的多径,它们的相对位置就代表了多径信号的不同时延。从中可以看到水声信道的多径结构非常复杂,这些多径有时会随时间变化,这种复杂时变的多径会在接收端引起严重的码间干扰。

### 3.4 空间选择性衰落严重

空间选择性衰落是指在不同的地点与空间位置的衰落特性不一样,也就是说,接收信号的强度和相位与接收阵元的位置有关。由于这种衰落是时、频域上是慢变化的,通常又称为平坦瑞利衰落。浅海水声传输过程的复杂性,有可能形成

严重的空间选择性衰落。空间选择性衰落与海底海面的反射以及声速剖面等因素有关,尤其是在有声速跃层(声速在垂直方向上出现突变或不连续剧变的水层)的情况下,单个阵元发射或接收的系统可能会由于深度选择不合理而降低通信性能,因此使用多阵元进行接收可以提高通信系统的可靠性。空间选择性衰落在水平方向也是存在的,通过对浅海水声信道空间衰落特性的研究可知<sup>[2]</sup>,声信号的相关半径随着频率的增加而减小,其中垂直相关半径小于水平相关半径,所以在浅海水声通信中,较多地使用垂直阵进行接收,在获取信噪比的同时,提高系统的可靠性。

### 3.5 多普勒效应严重

在水声通信中,收发平台之间的相对运动和海洋环境的起伏都会造成多普勒效应。多普勒效应在水声通信中产生的影响要远大于无线电通信,这是由信号载体传输速度与收发平台运动速度的比例决定的。例如,当通信双方以15 m/s的速度做相对运动时,在水中声波的多普勒相对频移就有 $15/1500 \approx 1\%$ ,而对于无线电通信,即使是超音速运动,多普勒相对频移也只有 $340/300000000 \approx 1.13 \times 10^{-6}$ ,所以多普勒效应严重是水声通信信道的另一个重要特点。这个特点决定了水声信道中的多普勒补偿不能像无线电通信中那样仅仅跟踪载波相位或者补偿载波频率,需要在接收端估计出多普勒频移以后使用插值或者重采样的办法来补偿数据帧的展宽(或压缩)。

### 3.6 受起伏效应影响

由于海水介质的随机不均匀性,海洋中的声场也是随机起伏的,这种随机起伏效应也会影响着水声通信的性能。这种影响是由多种因素造成的,包括粗糙随机的海面,湍流和非均匀水团,海洋内波以及收发换能器的随机摇摆等<sup>[3]</sup>,这些因素是导致接收信号的幅度和相位起伏的主要原因。海洋表面经常呈现波浪、涌浪或涟漪之类的不平整性,这种不平整性表面会使声波在海

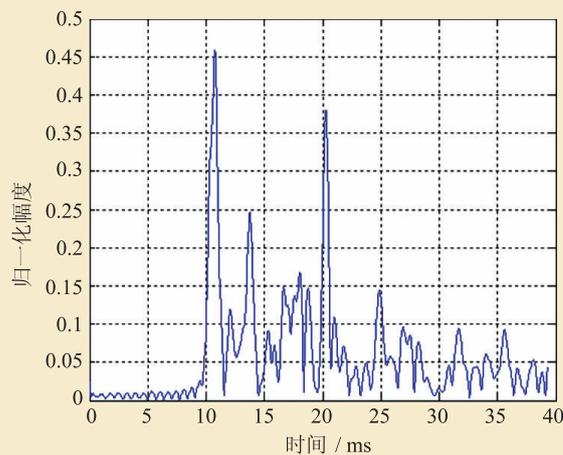


图5 2005年4月东海1 km实测信道

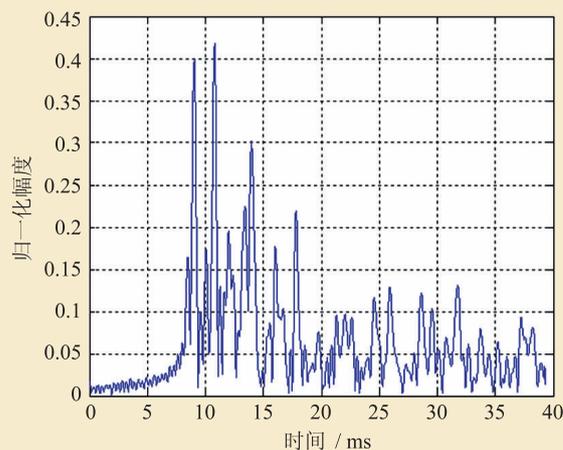


图6 2007年1月渤海4 km实测信道

面上的镜反射分量中引进随机反射或漫反射成分,从而引起海水介质中声场的随机起伏。试验指出,风速会引起不平整海面反射振幅起伏时间在秒量级。

湍流和热交换会产生温度微结构,可以粗略地看成具有不同声速或折射率的不规则水团,它们在某些自然现象(如气压、涌浪、潮汐以及地球自转等)的影响下会产生随机运动,声波通过这些水团会产生多路径的干涉效应,导致声信号起伏。

在内波作用比较明显的季节里(尤其是在夏季),内波是产生浅海声场起伏的主要因素。内波是海洋介质中非均匀水层在重力作用下的随机波动,在浅海,内波反映在水平薄层上下起伏,例如夏季浅海跃层在深度上的变化,这种变化的周期与风浪、潮汐和季节流的作用以及海面上的气压

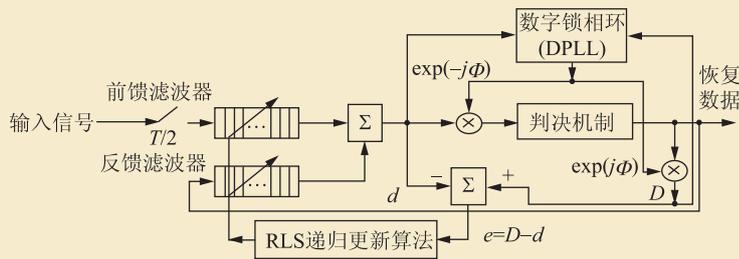


图7 单载波时域均衡器基带信号处理框图(图中的输入信号为经过解调的复基带信号,采用时间间隔为 $T/2$ ( $T$ 为符号周期),输入信号经过前馈滤波器,并与反馈滤波器的输出求和( $\Sigma$ ),使用数字锁相环对求和后的信号进行相位补偿,并通过判决机制恢复原始的发射数据,采用递归最小二乘算法对滤波器的系数进行自适应更新)

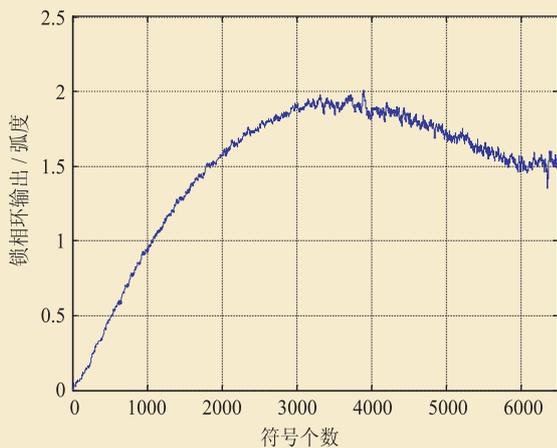


图8 相位跟踪情况

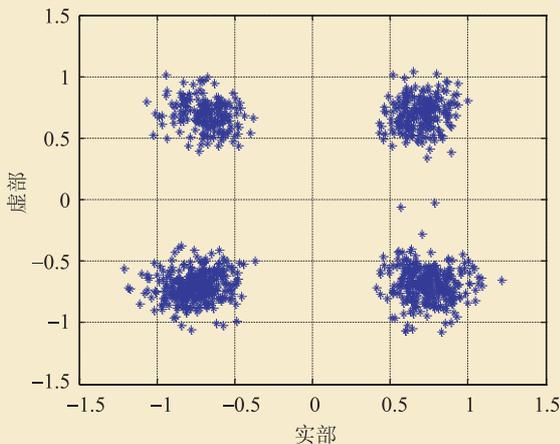


图9 均衡器输出星座图

变化有关。在一般情况下,对于单径传输过程,内波的影响主要是相位起伏,但在远场条件下,存在独立多途叠加效应,声场起伏也会反映到振幅上。

不同因素产生的声信号起伏的时空尺度是不一样的,例如季节流、潮汐等引起的起伏是大时空尺度起伏,起伏时间以“天”为量级,这种起伏或者海洋内波等引起的中尺度起伏,对通信来说可以不用考虑;一些由于气象和机械激励引起的非均匀起伏(漩涡、海面风浪等),多是小时空尺度起伏,可以考虑为随机过程,一般采用载波相位跟踪或者在均衡器中嵌入锁相环的办法在接收端进行消除。

#### 4 几种典型的水声通信技术

水声通信技术的发展起源于对潜艇通信的需求。1945年,美国海军水声实验室研制成功了第一个有实际意义的水下电话。该系统采用单边调制技术,用于潜艇间的通信,由于使用的是模拟频率调制技术,无法对抗水声信道衰落,性能较差。随着电子技术和信息科学的发展,水声通信技术开始采用数字调制技术,如幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控调制(PSK)。其中,FSK可将数字信号加载在载波频率上进行传输,接收端用窄带滤波器进行能量检测并判决。该方案不用跟踪快速变化的载波相位,实现简单,因而获得了广泛的应用。但由于它采用加入保护间隔的方法对抗多径传播造成的码间干扰,带宽利用率较低。PSK将数字信号加载在载波相位上进行传输,由于水声信道中存在着严重的随机相位起伏,PSK在水声通信中的实现起初并不被看好,直至上世纪90年代初期,嵌入二阶数字锁相环的自适应均衡技术取得了突破性的进展,才掀起了水声相干通信技术研究的热潮,由于其带宽利用率高,可以大大提高通信系统的性能。正交频分复用(OFDM)技术,由于频带利用率高,且具有良好的抗多途扩展性能,也被应用到了水声通信中,其面临的主要问题是峰均比高,对频率偏移和载波相位敏感。单载波频域均衡技术具有与OFDM相当的抗多途扩展性能,

又弥补了OFDM峰均比高的缺点，近年来获得了较广泛的应用。另外，时间反转和多输入、多输出等技术也是提高水声通信性能的重要技术，本节将进行简单介绍。

#### 4.1 单载波时域均衡技术

单载波时域均衡技术是使用单载波时域均衡器进行水声通信的技术。内嵌二阶锁相环的分数间隔采样判决反馈均衡器(FSE-DFE)<sup>[4, 5]</sup>是目前最为常用的单载波时域均衡器，其基带处理框图如图7所示，可以采用信道估计的结果对均衡器的参数进行初始化，使用训练序列对均衡器系数进行训练。图8和图9分别为某次海试中使用这种时域均衡器对正交相移键控调制(QPSK)调制信号解调时得到的相位跟踪情况图和星座图。

#### 4.2 单载波频域均衡技术

单载波频域均衡技术结合了OFDM和单载波时域均衡的优点，在复杂度和性能之间获得了折中，降低了多载波系统的峰均比和对相位噪声的敏感性，同时具有与多载波系统相当的抗多径能力，且算法计算复杂度较低。单载波频域均衡常用的数据传输帧数据区结构如图10所示，其中Syn表示块同步头，用于信号捕获、初始时间同步、多普勒捕获和初始相位同步。UW(unique word)为“特”字，与OFDM中的循环前缀作用类似，使数据块具有理想的周期性自相关特性，另一方面，阴影处的“特”字可以用来做信道估计和训练。Data表示需要传输的通信数据，图中一个FFT Block表示一个独立的数据块，ZP(zero padding)是对数据块补零，避免该数据块对下一个数据块的多径干扰。

接收端收到信号后，首先将ZP处的数据与帧头数据相加获得循环相关，然后使用UW信号进行信道估计，进而

获得某种准则下的频域均衡器系数，完成对接收数据的均衡。

#### 4.3 正交频分复用技术

正交频分复用(OFDM)技术通过相互正交的子载波将通信带宽划分为若干个子信道，高速数字信号进行串并转换后被映射到各个子载波的幅度和相位上，OFDM技术的各个子信道在频域上相互重叠，借助各子载波之间的正交性避免载波间干扰(ICI)的出现，因此能大大地提高频谱利用率；另外，由于串并转换后每个符号的周期相对较长，再加上每个符号前加入的保护间隔，OFDM技术能有效地对抗由信道多径时延引起的时间弥散。由于水声信道中多径结构较为复杂，由此带来的时间弥散尤为突出，因此OFDM技术在水声通信中的应用引起研究人员的广泛关注。图11给出了某次海试中7 km距离上使用OFDM解调得到的图片。

#### 4.4 时间反转技术

根据水声传播特性提出的时间反转技术<sup>[6, 7]</sup>，



图10 SC-FTDE的数据传输帧数据区结构



图11 某次海试使用OFDM传输的图片

充分利用了声场的线性和互易性,把海洋信道本身当作匹配滤波器,来对阵接收信号(采用多个阵元组成接收阵列,对接收信号进行处理,以获取空间增益,提高通信性能)进行合并处理,可以用来减少多径引起的信道失真影响,能有效地克服浅海多径信道对信号产生的多径扩展,实现不同途径声信号的聚焦,提高接收信号的信噪比,为降低误码率和提高通信距离提供有力的支持。时间反转技术从实现方式上可以分为被动式和主动式两种,被动时间反转技术的本质是匹配滤波,由于不需要建立发射和接收的双向链接,只需要通过数值计算和信号处理手段来实现,故不受互易特性的显著限制,因而可以把它看作是一种接收阵处理算法应用到水声通信中。首先利用接收的数据进行信道估计,然后将信道估计的结果取时间反转,并与接收信号进行卷积,如果有多个阵元接收时,则对多个阵元的结果进行求和运算,形成空间上的“聚焦”。

与平面波波束形成方法相比较,时间反转处理技术相当于采用了“特殊的阵接收加权系数”,属于一种广义的空间分集阵处理技术,可以在空间和时间上同时对信号进行聚焦,获得接近理想的空域处理增益。时间反转的性能除了与阵的孔径、阵元间距、阵元数目、布放深度有关外,还跟信道特性、声波频率有关,研究表明<sup>[8]</sup>:阵的孔径要尽量大,满足对声场的空域采样,短阵的聚焦效果比长阵差很多;在满足阵的孔径要求的前提下,阵元只要满足一定数量,就能达到满意的聚焦效果,再增加阵元,聚焦性能并不能显著提高;在不得不使用短阵的情况下,短阵所在的深度范围对聚焦性能也有影响,选择合适的深度可以达到相对较好的聚焦效果;频率越高,聚焦的主瓣越窄,空域分辨率也越高。

#### 4.5 多输入多输出技术

多输入多输出(MIMO)系统采用多阵元发射和接收,在带宽资源有限的浅海水声通信系统

中,除了可以满足多用户同时通信,还可以扩充信道容量,同时提高通信速率和系统可靠性。MIMO不等同于多用户通信系统,它为多用户同时通信提供了一种技术手段,但不是实现多用户通信的唯一办法。多用户的其他实现方式还有时分多址(time division multiple access, TDMA)、频分多址(frequency division multiple access, FDMA)和码分多址(code division multiple access, CDMA)等。无论是时分多址还是频分多址技术,都要付出时间或者带宽的代价,会降低信道的利用率,而码分多址虽然没有占用带宽和时间,却由于使用了扩频技术,从而大大降低了传输速率。

MIMO系统的核心是空时信号处理,也就是利用在空间中分布的多个天线将时间域和空间域结合起来进行信号处理。因此,MIMO可以看作是智能天线的扩展。但是传统的智能天线的智能体现在天线加权选择算法上,而MIMO系统强调的是信号的编解码处理。MIMO与智能天线的不同在于,它能够同时获得发送和接收分集增益。MIMO的关键是能够将传统通信系统中存在的多径影响因素变成对用户通信性能有利的增强因素。MIMO能有效地利用随机衰落和可能存在的多径传播来提高数据传输速率,在不额外增加所占用的带宽的前提下扩充信道容量,得到了人们越来越多的关注。

## 5 结束语与展望

对马航失联客机MH370的搜索依然没有进展。这一事件让我们沉痛,同时又让我们反思。我国在高端设备的技术水平提高和推广方面还有很多工作要做,包括雷达技术、卫星追踪与成像技术、大数据处理技术和海洋技术等等。水声通信是海洋技术中十分重要的部分,是水下平台之间以及水下平台和水面平台之间沟通的桥梁。

由于受到水声信道特性的限制,水声通信目前仍面临很多挑战,具体体现在传输速率较

低、误码率较高和传输距离较近等几个方面。目前水声通信技术的发展主要有两个方向：一个是在低信噪比下的可靠通信，要求的传输速率较低，但具有高可靠性，主要用来传输控制指令和报文等；另一个是高带宽利用率的近距离通信，要求在有限带宽内实现语音和图片等数据

的传输。

我们相信，随着水声物理、电子技术和数字通信等学科快速发展，水声通信技术也将会取得突破性进展，它在人类探索海洋、认识海洋和开发海洋中也将发挥越来越重要的作用。

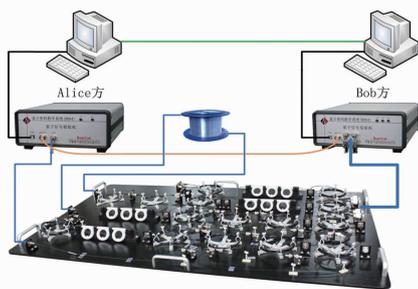
## 参考文献

- [1] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学. 北京: 科学出版社, 1981
- [2] JI. M. 布列霍夫斯基. 海洋声学. 北京: 科学出版社, 1983
- [3] 朱楚. 主动声纳检测信息原理. 北京: 海洋出版社, 1990
- [4] Stojanovic M, Captipovic J A, Proakis J G. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994, 19(1): 100
- [5] Stojanovic M, Captipovic J A, Proakis J G. J. Acoust. Soc. Amer., 1993, 94(3): 162
- [6] Kuperman W A, Hodgkiss W S, Song H C *et al.* J. Acoust. Soc. Amer., 1998, 103: 25
- [7] Fink M. Sci. Amer., November 1999, 91
- [8] Yang T C. IEEE J. Oceanic Eng., 2003, 28: 229



### QKEdu-S 量子密码教学科研系统

▶ 系统组成



— 单模光纤    — 经典网络  
— 同轴电缆    — USB数据线

▶ 组件清单

名称	数量
QKEdu-T量子信号发射机	1
QKEdu-R量子信号接收机	1
QKEdu-P光学调试平台	1
光纤盘	1
同轴电缆	1
网线	1
可选配件	
PC (Windows XP以上操作系统)	2

### QEPS小型纠缠源系统

▶ 系统组成



QEPS小型化纠缠源系统实物图

▶ 技术指标

泵浦光功率 (mW)	100
偶然符合计数率 (Hz)	< 10
单路光子亮度 (cps.)	> 100k
纠缠光子对亮度 (cps.)	> 10k
H, V偏振对比度	> 25:1
P, N偏振对比度	> 7:1
Bell不等式破坏程度	S > 2.3
可见度	92%

提供最专业的量子通信设备  
 物理专业：探测器、小型纠缠源、高亮纠缠源、多光子纠缠等。  
 通信专业：BB84教学科研系统、B92教学科研系统、可商用的量子通信保密网络。

地址：合肥市创新产业园D3楼  
 电话：400-885-0929  
 0551-65333590

销售：13395515356  
 13395515359  
 邮编：230088

传真：0551-65368589  
 邮箱：feng.liu@quantum-info.com  
 网址：http://www.quantum-info.com