

doi: 10.7690/bgzdh.2013.12.014

水下电场通信研究综述

曹发阳^{1,2}, 王伟², 谢广明², 罗文广¹

(1. 广西科技大学电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 由于水环境的特殊性, 传统通信方法在水下难以有效工作, 必须发展适当的水下通讯方法。介绍了几种常用的水下通信方法, 对这些方法的特点进行了比较分析。进一步着重介绍了适用于近距离水下通信的电场通信方法, 对其工作原理和实现过程进行了阐述和说明, 并对今后的发展趋势做了展望。

关键词: 水下通信; 电场; 多机通信

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Survey of Underwater Electric Field Communication

Cao Fayang^{1,2}, Wang Wei², Xie Guangming², Luo Wenguang¹

(1. College of Electrical & Information Engineering, Guangxi University of Science & Technology, Liuzhou 545006, China; 2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Traditional communication methods are ineffective in the water due to the particularity of hydrodynamic environment, so suitable underwater communication methods should be developed. In this paper, we first introduce several popular underwater communication methods and compare their characteristics. Then, the short distance underwater electric field communication method is introduced. Specifically, its working principle and realization process are mainly described. Finally, the direction of future development and application prospect are discussed.

Key words: underwater communication; electric field; multi-machine communication

0 引言

人类社会的发展需要各种资源的持续供应, 随着陆上资源的日益紧张, 海洋成为了人类获取能源、矿产、生物等资源的重要空间。然而海洋资源的开发需要一系列技术和设备的支撑, 水下机器人作为人类大脑和肢体在水下的延伸, 能够在人类所无法到达的水下深度和广度上进行探测、识别和作业; 因此, 水下机器人在海洋石油开发、矿藏调查、打捞作业等领域具有广阔的应用前景。

水下机器人按其作业方式可分为遥控水下机器人和自主水下机器人^[1], 其中自主水下机器人因其活动范围大、智能水平高、作业费用低等优点, 代表了未来水下机器人技术的发展方向。

水下环境的恶劣性使得传统的通信方法在水下难以有效工作。为了实现水下无线近距离通信, 可以采用光学通信、无线电通信、声学通信、电场通信等多种方法^[2]。笔者介绍各种方法的特点, 对其进行比较, 并回顾了水下电场通信的研究过程。

1 水下有效的通信信道

不同的通信实现方法, 其信道在水下会受到不同程度的影响, 例如通信带宽、通信速率、通信距

离等性能指标。在水下能够通信的信道有: 水下电缆信道、水下光学信道、水下无线电信道、水下磁场信道、水下电场信道。

1.1 水下电缆信道

水下电缆是常用的水下通信链路, 能够实现可靠稳定的高带宽的通信链路, 也是常用的水下通信解决方案^[3]。电缆一般由可以发送电信号的导体和发送光信号的光纤组成。电缆的优点是具有传输电能的能力。在母船通过电缆远程控制航行器的实例中, 电缆还可以被用作重新回收航行器的安全绳索。在远程操作航行器时, 电缆的主要问题是长电缆的重量, 以及会受到水流的拖拽。尤其在深海中, 通常需要数千米的电缆, 严重影响了航行器的工作范围, 并降低了航行器的灵活性。

因此, 在水下领域, 任何实际的通信系统必须是无线的, 既可以是电磁的、光学的, 又可以是声学的。即使在浅水当中, 操作电缆也非常困难, 会限制活动范围和产生额外的危险。

1.2 水下无线电信道

许多常用的通信方法在空气中能建立很好的数字通信, 但在水中不能工作。例如蓝牙、无线宽带

收稿日期: 2013-07-14; 修回日期: 2013-10-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10972003); 广西车辆零部件先进设计制造重点实验室开放基金重点项目(2012KFZD03)

作者简介: 曹发阳(1989—), 男, 江西人, 硕士, 从事智能机器人、微弱信号检测研究。

等无线电模块，它们的工作频率在 2.4 GHz 左右，高频无线电在水中衰减严重^[4]，尤其在电导率高的海水当中。假设海水的平均电导率为 4 S/m，淡水的电导率为 0.05 S/m。2.4 GHz 的频率在海水中衰减 1 600 dB/m 左右，在淡水中衰减 190 dB/m，在水中以高频率通信显然不现实^[5]。同时，信号强度随发送者和接收者之间的距离增加而呈指数衰减，这就意味着发射功率必须指数增加，才能扩展通信距离，并且在天线与水的边界处有额外的耦合损失。

通常，低频无线电在水中衰减很小，但在低载波频率的同时，又限制了有效的数据带宽。设计有效宽带低频天线是困难的、复杂的，特别在有效空间受到限制时。例如，对于 10 kHz 的载波频率，在真空中的波长接近 3 km，在水中传播时波长为它的 1/3，小型水下航行器外部拖拽长天线不可行^[5]。这意味着天线难以与媒介耦合，但对于短距离通信依然具有可行性。

1.3 水下光学信道

以光波作为信息载体的水下光学通信方法是近年来发展起来一种近距离高速通信方法，该方法克服了水声通信传输速率慢、传输的时延大等不足，具备很强的信息承载能力，可以实现水下大容量数据传输。

即使光通信具有高带宽和可忽略的延迟时间，但受到海水、悬浮颗粒、浮游生物等对光波的吸收衰减、散射等因素的影响，该方法的使用环境受到限制^[6]。此外，为了有效地工作，光通信装置必须对齐放置，当在海底工作时，这是一个艰巨的任务。

1.4 水下声学信道

最常用的水下通信方法为水声通信法，其技术成熟，使用范围也最为广泛。机械波在水中能够传播很远的距离，可利用声波在水下良好的传播性来实现水下远距离通信。几种无线通信方式比较如表 1。水声通信法根据使用的水环境和具体用途，各有其特点。水声信道有以下特点^[3]：

- 1) 盐度、温度、压力影响传播速度，使传递媒

- 介高度折射；2) 在高频声波频率时，即使短距离都具有强烈的衰减；因此，在带宽和损耗间必须找到一个妥协方案；3) 海床的地质结构和水面形成一个不明的回响环境；4) 水声信道的时变和多路径；5) 接收信号的多普勒频移，即使发送器和接收器不移动；6) 发送器的布置限制，虽然没有光发送器那么严格，但依然是一个问题；7) 发送器的低效率；8) 不一样的噪声来源，更低的频率具有更高的噪声。

1.5 水下电场信道

一般而言，当电流随着时间发生变化时，必须同时考虑到传导电流和位移电流。但是在时间变化很小的情况下，位移电流是可以被忽略掉的。当导体中存在稳定电流的时候，电流场和电磁场的关系就如同传导电流和位移电流的关系一样，在某些情况下电磁场也是可以忽略掉的。以上描述的电流场称之为准静电场^[7]。

电磁波的产生和传播是由于电流场的变化引起的，也就是说，在媒介中的位移电流相对于电介质、海水的电导率要大得多；因此，在海水中，可以忽略位移电流，主要以传导电流为主。海水中的电流场为准静电场。

水下电场通信在近距离通信中的优势包括^[7]：

- 1) 由于海水温度或密度变化以及障碍物引起的反射和折射，水声通信存在多径效应和盲区等方面的问题，在海水介质分层明显的区域，往往很难通信。电场通信根本不存在这些问题，传输信号稳定，更不会因为海水分层而突然中断。
- 2) 海水对电磁波的吸收、发射和折射较大，频率越高，衰减越大，在高密度区域往往通信较困难。
- 3) 与水声通信相比，水下电场通信是低噪声系统，原则上，在不增加功率的条件下，增加电流，可以扩大有效通信范围。
- 4) 电场通信方式既实现了无线通信，又不必架设庞大的天线，简便而具有相当的灵活性。

无线通信系统的一个通常问题就是自主供电问题，因为充电和更换电池是极其困难的^[8]。功耗控制在这样的通信系统当中也是必须要解决的问题。

表 1 几种无线通信方式比较

通信方式	通信距离	载波频率	通信速率	受环境因素影响	通信延迟
水声通信	几十千米	几十千赫兹	kbit/s	发射、多路径影响	比较大
光学通信	数十米	兆赫兹	Mbit/s	水质影响	几乎没有
无线电通信	数米	兆赫兹	kbit/s	电磁噪声影响	几乎没有
电场通信	数米	几十千赫兹	kbit/s	电磁噪声影响	几乎没有

2 水下电场实现近距离通信

通常海洋环境下的通信有其独特的特点。由于

海水的良好导电性，电磁波在海水中的传播衰减很大，要想在海水中传播较大的距离，就必须采用极

低的频率和很高的发射功率，要架设很高很长的天线，这难以实现，因此电磁波无法用在中等以上距离的信息传递；但在非常低的频率(200 Hz 以下)，声波在海水中却能传输几百公里，即使 20 kHz 的声波在水中的传输衰减也只有 2~3 dB/km，所以，声波为在水下传输数据提供了较好的解决方案^[9]。

水声通信也有其固有特点，水声信道是一多途、色散和时变的信道，声波在其中的传播行为十分复杂。由于声波的吸收大体上与频率的平方成正比，通信可用的带宽很窄，又由于声速很慢，传播速度只有大约 1 500 m/s，这给水声通信技术带来很多困难。影响水声通信的物理因素很多，主要是传播延迟长和延迟方差大、传播损失大、多途严重、浅海环境噪声强、多普勒频散严重等。尤其在小范围有限场的水域当中，水声信道受多径效应影响严重，通信误码率非常高。所以，在要求通信速率高、时间延迟小短距离通信的应用场合，水声通信不太适用，或者实现起来难度非常大。

在仿生机器鱼的研究过程当中，如何解决水下与机器鱼之间通信的问题是难点。以光波作为信息载体的水下光学通信方法是近年来发展起来的一种近距离高速通信方法，该方法克服了水声通信传输速率慢、传输的时延大等不足，具备很强的信息承载能力，可以实现水下大容量数据传输。但受到海水、悬浮颗粒、浮游生物等对光波的吸收衰减、散射等因素的影响，该方法的使用环境受到限制。同样，水下电场通信是低噪声系统，完全可以实现近距离的水下无线通信，而且由于水下的电噪声非常低，与水声通信相比，利用水下电场实现水下近距离的无线通信具有一定的优势。近年来，利用电场通信技术进行探测和通信的研究已有一些成果，如穿透岩层的地下电场通信信道的相关研究；水文缆道采样器无线遥控的实现等^[10]。利用水下电场通信方法实现机器鱼水下近距离通信具有可行性。

2.1 研究现状

水下电场研究始于 20 世纪 70 年代初期^[11-13]，研究领域比较多^[14]。在 1971 年，由美国康涅狄格大学的 Schultz C W 发表于会议上的一篇文章^[15]。该文章简要介绍了水下电场工作原理，还介绍了一个基于此原理的潜水员水下通信装置，该装置能够实现潜水员在水深 30 m，距离 100 m 之间的语音通信，通信装置的功耗 10 W 左右。水下电场通信最具有代表性意义的文献是在 1976 年由日本海洋科学与技

术研究中心发表的一篇文章^[16]，该文章从理论上说明了水下电场通信原理，给出了比较精确的物理模型。该文章的研究背景是想把水下电场通信技术用在潜艇上面，包括潜艇与母船之间和潜艇与潜水员之间的通信。文章最后没有具体说明其研究结果，但是给出了一些验证性实验。验证水下电场通信距离与哪些因素有关，该文章提出了影响水下电场通信距离的因素：发射和接收电极板的间距、发射电流、接收装置的检测微弱信号的能力。水下电场通信的关键在于如何降低发射功耗和如何增加通信距离。20 世纪 70 年代到 21 世纪初这方面的文献报道很少，或许是相对于传统的水声通信技术在通信距离和功耗方面不具有竞争力。直到 2007 年，新加坡通信研究院 1 篇关于水下电场通信的文章^[17]，利用此原理在水下实现了近距离数字通信，该文章重点研究了如何提高通信距离，通过实验验证了一种最优电极板布置结构能够提高某一方向的通信距离。2010 年，新加坡通信研究院在其 2007 年发表的文章研究基础之上^[18]，重点研究了水下电场通信信道问题，实验得出很多参数对于设计水下电场通信具有重要参考意义。

国内对水下电场通信的基础研究很少，更多的是应用研究。最具代表性的是西北工业大学发表于 2010 年的文章^[19]，该文章在新加坡 2007 年发表文章的研究基础上，设计了一套基于 DSP 的水下电场通信系统，设计目的重在实现传感器数据快速的回收，同时也进一步验证了水下电场通信的可行性。文章最后也说明了进一步的研究方向，探索该方法在中远距离通信的可行性，进一步降低功耗和提高通信速率。同年，海军工程大学发表 1 篇关于这方面的文章^[7]，该文章在国内外研究的基础上，介绍了水下电场通信原理，并根据电场的特点提出了利用恒流场模型作为水下电场通信的模型，得到了输入输出之间的关系，分析了电场通信方式的优势，探讨了水下电场通信系统设计中需要注意的几个问题，得到如下结论：通信频率最好选择在甚低频；增大某一方向通信距离；收发两点电极的垂直平分线重合或电极基线重合；利用窄带、能量利用率高的调制解调方式以达到抗干扰的方法，为进一步研究水下电场通信系统提供一定的参考。

2.2 发展趋势

水下电场通信具有以下特点：

1) 水下电场通信速率高。由于与传统的水声通

信原理不一样, 水下电场通信的载波频率可以高达 1 MHz, 信息承载能力强。

2) 水下电场通信延迟小。电场在水中的传播速度接近光速, 不会存在像水声通信的延迟现象。

3) 水下电场通信功耗大。这是由水下电场通信原理固有属性决定的。发射电极板周围必须形成电场, 接收电极板才能检测到电势差。

4) 水下电场通信距离近。发射电极板周围形成的电场强度与其距离的立方成反比。与发射电极板距离远的地方, 电场信号强度非常微弱, 在具有噪声干扰的情况下难以有效检测电场信号。只有在近距离的情况下, 才具备通信的可能性。

基于此, 水下电场通信应该找到一个合适的应用场合才能体现出它的优点。水下电场通信原理实现简单, 更多的工作量集中在工程实现上。在具体的设计过程当中, 要考虑许多实际的因素。

为了在实际应用当中更好地发挥此通信技术的优点, 可以从以下几方面做深入的研究:

1) 为了增加通信距离, 必须提高检测微弱电场信号的能力。如何有效检测微弱电场信号, 如何在环境噪声当中提取出微弱电场信号并对其进行信噪比提升。微弱信号不仅意味着信号的幅度很小, 而且主要是指被噪声淹没的信号, 微弱是相对于噪声而言的。只靠放大是不能把微弱信号检测出来的, 微弱信号检测技术的首要任务是提高信噪比, 这就需要采用电子学、信息论、计算机和物理学的方法, 从强噪声中检测出有用的微弱信号^[20]; 所以, 对水下电场通信的研究从某种意义上来说是对微弱信号检测技术的研究。只有在有效地抑制噪声的条件下增大微弱信号的幅度, 才能提取出有用信号。

2) 为了在实际使用过程当中抵抗环境干扰, 研究一种全新的调制解调技术, 并在工程上实现。调制解调模式既能有效地抗干扰, 又容易在工程上实现, 这都是需要深入研究的内容。

3) 为了实现水下多机器人之间通信问题^[21], 怎样保证它们之间的信号不干扰。是采用物理的办法, 如频率捷变等技术解决, 还是利用相关的通信协议解决这个问题, 都是有待研究的问题。

3 总结

水下电场通信是低噪声系统, 完全可以实现近距离的水下无线通信。由于水下的电噪声非常低, 与水声通信相比, 利用水下电场实现水下近距离的无线通信具有一定的优势。

参考文献:

- [1] 刘甜甜, 秦峰, 朱晓勇, 等. 水下自主导航机器人系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(11): 66-72.
- [2] 郭威, 崔胜国, 赵洋, 等. 一种遥控水下机器人通信系统[J]. 电气自动化, 2008(1).
- [3] Poncela J, Aguayo M C, Otero P. Wireless Underwater Communications[J]. Wireless Personal Communications. 2012: 1-14.
- [4] Jiang S, Georgakopoulos S. Electromagnetic wave propagation into fresh water[J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. 2011, 3(7): 261-266.
- [5] Schill F S. Distributed communication in swarms of autonomous underwater vehicles[D]. The Australian National University, 2007.
- [6] 隋美红, 于新生, 刘西锋, 等. 水下光学无线通信的海水信道特性研究[J]. 海洋科学, 2009(6).
- [7] 汪丹丹, 王永斌, 陈斌. 设计水下电流场通信系统需注意的几个问题[J]. 舰船科学技术, 2010.
- [8] 祖翔宇, 杨勃锋, 张效民. 低功耗水下通信系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(1): 234-235.
- [9] Yusof M A B, Kabir S. Underwater Communication Systems: A Review[J]. 2011.
- [10] 李攀峰, 高云婷, 陈富安. 电流场通信技术在黄河小浪底水文作业的应用[J]. 人民黄河, 2011(1).
- [11] Swain W. An electric field aid to underwater navigation: Engineering in the Ocean Environment-Digest of Technical Papers, 1970 IEEE International Conference on[Z]. IEEE, 1970: 122-124.
- [12] Gordon A. Detection of static magnetic and electric dipoles located near the sea bottom: Engineering in the Ocean Environment, IEEE 1971 Conference on[Z]. IEEE, 1971: 161-166.
- [13] Tucker M J. Conduction signalling in the sea[J]. Radio and Electronic Engineer. 1972, 42(10): 453-456.
- [14] Walther J. Applications of underwater fields: Engineering in the Ocean Environment, IEEE 1971 Conference on[M]. IEEE, 1971: 167-170.
- [15] Schultz C W. Underwater communication using return current density[J]. Proceedings of the IEEE, 1971, 59(6): 1025-1026.
- [16] Momma H, Tsuchiya T. Underwater communication by electric current: OCEANS'76[Z]. IEEE, 1976: 631-636.
- [17] Joe J, Toh S H. Digital underwater communication using electric current method: OCEANS 2007-Europe[Z]. IEEE, 2007: 1-4.
- [18] Chee W K, Ee L, Syed N A A. Channel characterization for underwater electric conduction communications systems: OCEANS 2010[Z]. 2010: 1-6.
- [19] 吴志强, 李斌. 基于电流场的水下高速数字通信方法及实现[J]. 传感技术学报, 2010.
- [20] 李炳新, 祖海娇. 一种微弱光信号相关检测方法的硬件实现[J]. 微型机与应用, 2010(1).
- [21] Frater M R, Ryan M J, Dunbar R M. Electromagnetic communications within swarms of autonomous underwater vehicles: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks[Z]. ACM, 2006: 64-70.