

基于光电阵列的水下定位通信一体化系统设计

马春波, 吴宜欣, 敖珺*

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对无人潜航器(UUV)在水下容易受复杂环境的干扰而造成相对光源姿态偏转,使定位与通信受影响的问题,提出了一种基于曲面阵列的水下定位通信方案,依此方案设计了一套基于现场可编程门阵列(FPGA)为处理核心的水下定位通信系统,并对系统进行了测试。测试结果表明:此系统能够精确估计出接收端相对光源的姿态并做出调整,在调整姿态后其通信性能具有明显提升。

关键词: 无人潜航器; 水下定位通信; 曲面阵列; 光通信; 姿态调整

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)07-0007-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.07.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of underwater positioning communication integrated system based on photoelectric array

MA Chunbo, WU Yixin, AO Jun*

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: For the problem that unmanned underwater vehicle (UUV) is easy to be interfered by the complex environment, which results in relative light source attitude deflection and affects positioning and communication, an underwater positioning communication scheme based on curved surface array is proposed, and a set of underwater positioning communication system based on field programmable gate array (FPGA) is designed and tested. The test results show that the system can accurately estimate the attitude of the receiver relative to the light source and adjust it. After adjusting the attitude, the communication performance of the system is improved obviously.

Key words: unmanned aerial vehicle; underwater positioning communication; curved surface array; optical communication; posture adjustment

0 引言

随着对海洋环境探测的不断深入,人们对处理水下任务(如管道检查)、水深探测以及军事行动(例如扫雷、海港监视和反潜战)的要求越来越高。然而,无人潜航器(UUV)在返航时易受到水下浮力或外界复杂因素的干扰,导致姿态发生变化而无法进入对接站和探测器,与光源轴线相对角过大,造成误码率升高

而无法通信。因此,对 UUV 在返航时的定位并调整姿态就显得尤为重要。

自 20 世纪 90 年代以来,人们针对关于水下 UUV 与对接站的归航设计提出了许多方案,由于声呐的定位能力不足,应用最广的是结合用于远距离归航的声呐定位和用于近距离的光学定位进入对接站的方案。但是,使用四象限器或平面阵列最多只能测量 3 个自由度的运动状态,而不是 UUV 的全部机动能力。因此,光学检测的设计至关重要。由于曲面阵列具有几何形状构造(曲率和扁率)的特点,曲面阵列更适合感知在相对光源姿态发生变化时的光场。目前,曲面阵列上光电探测器分布规则大多为等间距分布,而定位精度与曲面阵列上探测器的分布间距密切相关。针对定位精度问题,本文提出一种光电探测器在曲面阵列

收稿日期: 2020-02-12。

基金项目: 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA294056)资助。

作者简介: 马春波(1975—),男,教授,博士后,硕士研究生导师,先后主持和承担国家自然科学基金、国防预研基金、电子部重点和企事业单位合作等项目 20 余项;主要从事光通信技术、通信系统安全技术和网络安全方面的研究工作。

* 通信作者: 敖珺(E-mail: junjunao1@263.net)。



上呈非等间距分布的方案,并设计一套基于曲面阵列的水下定位通信系统。

1 基于曲面阵列的水下定位技术

基于曲面阵列的定位技术其核心思想是根据接收端阵列上探测器的功率分布去估计与光源的相对位置,步骤如下:①假定曲面阵列上有 n 个探测器,分别为 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ 。当曲面阵列探测到光源发出的光时,此时收集了 n 个采样值。对这 n 个采样值进行排序,找到采样值最大的一个探测器 $r_{\max}$ 。②对探测器 $r_{\max}$ 所在行与列的所有探测器进行采样值的比较(若 $n=m \times m$,假定 $r_{\max}$ 是处在第三行第四列的探测器,则分别对第三行、第四列的探测器采样值进行比较)。③比较后判断 $r_{\max}$ 的采样值是否为所在行与所在列的极值点。若是极值点,则根据探测器 $r_{\max}$ 与阵列中心探测器 r_c 的行与列分别相隔了几个探测器,便可知偏航角与俯仰角的偏转角度。④若 $r_{\max}$ 的采样值不是极值点,说明偏转角度较大,则根据所在行与列采样值分布的单调性判断往哪个方向有偏转,逐渐往此方向回调,直到找到极值点,否则返回步骤③。由于海水对光的衰减将严重影响光的传输距离,因此分析海水信道光传输模型变得尤为重要。

1.1 海水信道光传输模型

由于海水的多样性与复杂性,在不同海域与不同深度选择不同的通信距离,都会对探测器接收到的光功率造成不同程度的衰减。根据海水衰减系数,本文构建在不同海域和采用不同波长的光信号在海水信道中的传输模型。假定接收器的接收面积足够大,发光二极管(LED)光在海水信道进行传输时,则光学接收系统的光功率可表示为^[1-2]:

$$P_r(\theta, d, N) = \eta_e \cdot \eta_r \cdot \eta_t \cdot I_{\text{peak}} \cdot f(\omega) \cdot \frac{e^{-k_c(\lambda) \cdot d}}{d^2} \cdot A_p \cdot L(\varphi) \cdot S(\theta) \quad (1)$$

其中, P_r 表示在海水信道中探测器获得的光功率; θ 为接收探测器与光轴的夹角; ω 为 LED 光源的角辐射相对夹角, $f(\omega)$ 为在当前角辐射相对夹角下的光功率效率; $S(\theta)$ 为接收探测器的相对角灵敏度函数,取值为 $0 \sim 1$; A_p 为接收探测器的面积; I_{peak} 为单位面积上的峰值光强; φ 为探测器上获得的照度, $L(\varphi)$ 为探测器照度与产生电流的函数关系式; d 为探测器与光源轴线的距离; $k_c(\lambda)$ 为海水的总衰减系数。考虑到海水环境并不是理想非时变系统,所以用 η 来描述这些因海水环境带来的影响, η_e 、 η_r 分别为发射效率和接收效率。

1.2 曲面阵列光电探测器分布

为了更好地还原光强分布,本文用三维高斯光强来模拟接收端阵列接收面上的光强分布^[3-4],如图 1 所示。

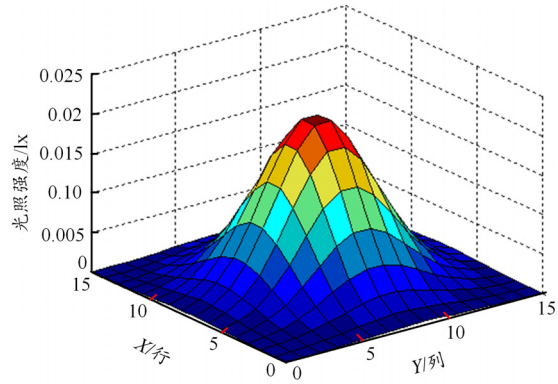


图 1 三维高斯光强

由于光电探测器的响应度特性并非理想的曲线,曲面阵列上各个探测器相对光源的倾斜角不相同,所以实际通过光电探测器得到的光强分布并非如图 1 所示^[5]。曲面上探测器的分布间距是决定定位精度的关键。因此,本设计对曲面上探测器采用了非等间距的方案以期达到最佳的定位精度。其分布规则如下:

首先,在曲面的中心安置一个探测器,定义为**中心探测器 r_c ;其次,根据最大偏转角度安置边界探测器 r_e ,如 UUV 的相对光源的最大偏转角度为 θ ,则在曲面圆心角 θ 处安置一个探测器,以保证在最大偏转角度下依然能获取光信号。

UUV 最大偏转角度下的姿态如图 2 所示,边界探测器在 UUV 最大偏转时与光源轴线的相对角为 0° ,意味着能以最大的接收效率在此处进行光/电转换^[6]。假定目前 σ_n 代表了阵列中边界探测器这一支路的噪声,那么边界探测器光/电转换后的电压需要大于噪声 σ_n ,以便准确提取此处光场的分布特征。同时,边界探测器对应位置的光强可由三维高斯光强分布特性确定。在某一海域中使用已知的光源与光电探测器件(器件、海水信道相关的具体参数已知),根据式(1)可以确定此海域中特定探测器能接收到信号时发射光源所需要的峰值功率 I_{peak} ^[7-8]。

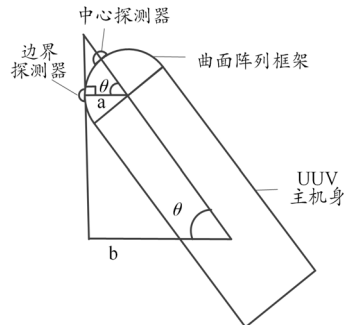


图 2 UUV 最大偏转角度下的姿态

由图 2 可知, 根据三角形的相似性, 线 a 与线 b 平行, 则边界探测器与中心探测器的角度和 UUV 偏转的角度都为 θ 。确定了光源峰值功率 I_{peak} 后由中心探测器开始逐步向外确定其余探测器的位置。根据所选用光电探测器的响应度曲线与相对角灵敏度曲线可知, 在未发生偏转时, 中心探测器与光源轴线的相对角为 0° , 此时中心探测器的接收光功率为^[9]:

$$P_{r_c} P_{rc(\theta, d, 0)} = \eta \cdot \eta_t \cdot \eta_r \cdot I_{\text{peak}} \cdot f(0) \frac{e^{-k_s(\lambda) \cdot d}}{d^2} \cdot A_p \cdot L(I_{\text{peak}} \cdot f(0)) \cdot S(0) \quad (2)$$

与中心探测器相邻的探测器 r_1 的接收光功率定义 P_{r_1} , 则 P_{r_1} 的功率为:

$$P_{r_1}(\theta, d, N) = \eta \cdot \eta_t \cdot \eta_r \cdot I_{\text{peak}} \cdot f(N) \frac{e^{-k_s(\lambda) \cdot d}}{(d)^2} \cdot A_p \cdot L(I_{\text{peak}} \cdot f(N)) \cdot S(N) \quad (3)$$

其中, N 表示探测器 r_1 与中心探测器 r_c 之间的圆心角, 由于 r_c 在曲面的位置是确定的, 所以只要确定 N 就可以确定探测器 r_1 的位置^[10]。在 $P_{r_c}(d, 0) > P_{r_1}(d, N) + \delta_{\text{max}}$ 中, 中心探测器 r_c 处的功率 P_{r_c} 大于与其相邻的探测器 r_1 的功率 P_{r_1} 和这一支路噪声的最大值 δ_{max} , 满足条件最小的 N 即为相邻探测器的分布间距。以此类推, 不断寻找下一个探测器的分布位置, 直到确定与边缘探测器相邻的探测器的位置。这种分布规则的核心思想是根据不同偏转角度下对应的光功率去设计探测器间距, 使得在任意偏转角度下各个探测器的功率具有区分度且分布最紧凑, 然后根据这些探测器功率呈现的分布特性估计偏转角度。

2 基于光电阵列的水下定位通信一体化系统

2.1 系统方案

本系统由发射机和接收机 2 部分组成, 其设计框图如图 3 所示。发射机由现场可编程门阵列 (FPGA) 信号处理模块、LED 驱动模块和 LED 光源组成; 接收机由曲面光电阵列探测器、轮巡模/数 (A/D) 转换采样模块、FPGA 信号处理模块和云台控制模块组成。

在发送端, 计算机通过串口发送数据至 FPGA 信号处理模块, 该处理模块对数据进行脉冲幅度调制 (PPM) 并封装成帧后发送。在接收端, 曲面光电阵列探测器将光信号转换为电信号, 并对其进行电流/电压转换与 A/D 采样后送给 FPGA 信号处理模块进行帧同步判决、时隙调整、相对姿态估计与调整以及 PPM 解调。

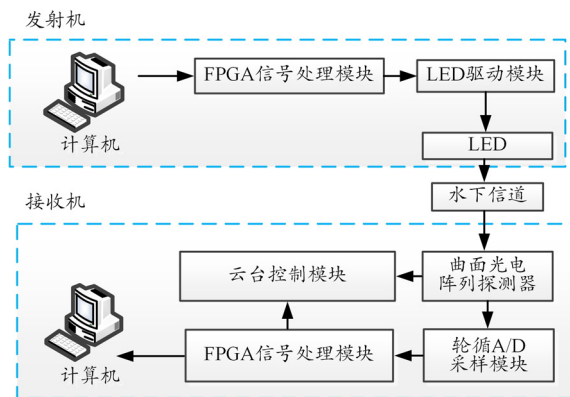


图 3 光定位通信系统硬件框图

2.2 系统硬件设计

基于光电阵列的水下定位通信一体化系统选用 ALTERA 公司的 EP2C40Q240C8 型号的 FPGA 作为信号处理核心。曲面光电阵列模块采用 32 个光电三极管 (3DU5C) 检测光信号; 轮巡芯片是 ADG1606; A/D 采样模块的芯片是 CA3318, 其量化位宽为 8 位, 最大时钟采样频率为 15 MHz。其中, 曲面光电阵列使用柔性电路制作而成, 根据 3DU5C 的响应度与相对角灵敏度以非等间距的方法将光电探测器安置在柔性电路板上, 再将柔性电路板覆盖在半球形曲面上, 半球的直径为 8 cm, 曲面阵列实物如图 4 所示。

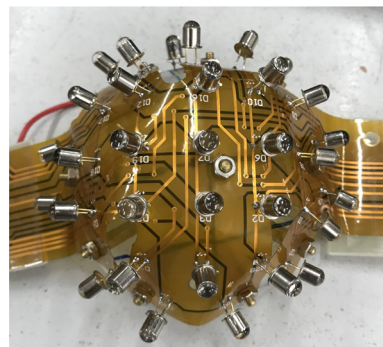


图 4 曲面阵列实物图

为了更好地展示本系统定位与通信的效果, 本文使用了云台对曲面阵列的姿态调整, 并在调整后进行沟通, 系统的整体构造如图 5 所示。

3 系统仿真及测试分析

为了在不同偏转角度下对曲面阵列与平面阵列进行误码分析, 仿真时采用调制阶数为 4 的脉冲位置调制 (4PPM), 仿真性能如图 6 所示。结果表明: 在不同偏转角度下使用曲面阵列完成姿态调整后光电探测器与光源的相对偏转角更小, 误码率下降, 性能明显优于平面阵列的通信系统性能。

本文按照图 3 的设计方案搭建了系统, 选用 FPGA (EP2C20Q240C8) 作为信号处理主片, 使用 1.8 m×

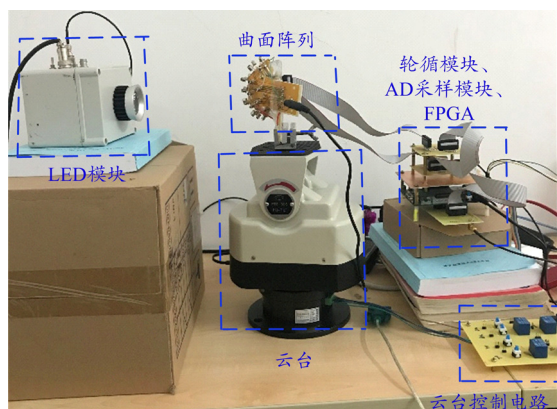


图5 系统的整体构造

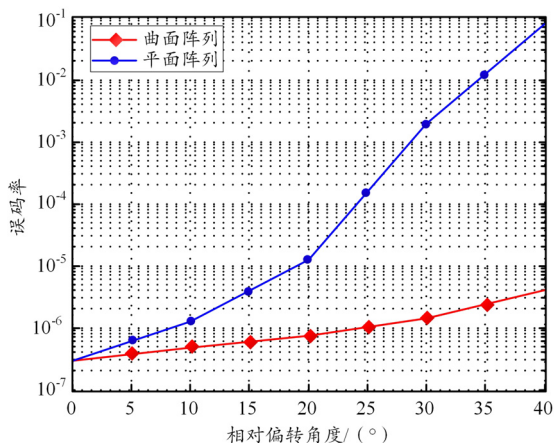


图6 不同偏转角度下的通信性能

0.5 m×0.5 m(长×宽×高)的水槽来代替海水环境,对整个LED定位通信系统硬件平台和算法的可行性进行了测试。为了准确测试系统误码率和定位能力,本文基于该系统设计了误码测试的上位机软件,该软件可以设定发送的时间间隔和数据长度。前5帧光信号用于姿态调整,发送间隔为5 s,在5帧以后加载发送信息文本并进行误码分析。测试结果表明:曲面阵列可在仅俯仰、仅偏航和同时俯仰与偏航这3种偏转姿态下完成调整,3种偏转姿态的可调整范围在0°~90°。在不同的偏转角度下的定位精度分别如下:在偏转角度为65°~90°的定位精度为20°,在30°~65°的定位精度为15°,在偏转角度为0°~30°的定位精度为10°。考虑到超调的情况,在任意偏转角度下至多需要调整5次即可将姿态调整在10°以内。实验观察了多个不相同的偏转姿态与角度下的调整情况,最终的姿态偏转均不超过10°。因此,使用器件3DU5C的曲面阵列定位精度为10°,达到了仿真对定位精度的预期。同时,对滨松公司型号为S13773的光电二极管进行定位精度仿真,定位精度可达到2°。

4 结束语

本文设计了一种能达到最佳定位精度的水下曲面阵列接收机模型,该模型可满足不同应用领域(如水下定位、通信)的需求,并对比仿真了其在不同偏转角度下的通信性能。同时,基于该水下定位技术设计了一套基于光电阵列的水下定位通信一体化系统,对系统进行了定位和通信测试(采用4PPM调制,每个时隙的脉冲宽度为500 μs),在完成姿态调整后开始通信,通信距离为40 cm。以上实验参数根据所使用光电器件的特性设定,若采用响应度特性更优的器件,通信距离与通信速率均能提升,并且通信误码率可进一步降低。

参考文献:

- [1] DONIEC M, ANGERMANN M, RUS D. An end-to-end signal strength model for underwater optical communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(4): 743–757.
- [2] 姚灿. 水下光通信 OOK 调制解调系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] CURTI H J, ACOSTA G, CALVO O A. Autonomous underwater pipeline inspection in autotracker project: The simulation module[C]//Proc. IEEE/OCEANS'05 Eur. Conf, Jun. 21–23, 2005, Brest, France. Brest: IEEE, 2005: 384–388.
- [4] DONIEC M, ANGERMANN M, RUS D. An end-to-end signal strength model for underwater optical communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(4): 743–757.
- [5] HAMILTON M, KEMNA S, HUGHES D T. Antisubmarine warfare applications for autonomous underwater vehicles: The GLINT09 field trial results[J]. Field Robot, 2010, 27(6): 890–902.
- [6] HURTO S N, MALLIOS A, PALOMERAS N, et al. LOON-DOCK: AUV homing and docking for high-bandwidth data transmission[C]//Oceans 2017-Aberdeen, June 19–22, 2017, Aberdeen, UK: IEEE, 2017: 1–7.
- [7] CURCIO J, LEONARD J, VAGANAY J. Experiments in moving baseline navigation using autonomous surface craft [C]//Proc. OCEANS MTS/IEEE, Sep. 18–23, 2005, Washington, USA. Washington: IEEE, 2005: 730–735.
- [8] HOBSON B W, MCEWEN R S, ERICKSON J. The development and ocean testing of an AUV docking station for a 21 AUV [C]//Proc. IEEE OCEANS, Sep. 29–Oct. 4, 2007, Vancouver, Canada Vancouver: IEEE, 2007: 1–6.
- [9] SORER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of oceanic engineering, 2000, 25(1): 72–83.
- [10] BOONE B G, BRUZZI J R, MILLARD W P. Optical communications development for spacecraft applications: Recent progress at JHU/APL [C]//Proc. IEEE Aerosp. Conf, Big Sky, Mar. 5–12, 2005, Bozeman, USA. Bozeman: IEEE, 2005: 1570–1582.