

激光与光电子学进展

基于自由曲面的水下 LED 全向发射天线设计

贺锋涛, 杨雅伊, 张建磊*, 杨祎, 韦鹏程

西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121

摘要 针对水下无线光通信系统对准困难以及光斑均匀性较差的问题, 基于自由曲面设计理论设计了一种能产生矩形光斑的光学天线。仿真结果表明, 当透镜与目标面的距离为 10 m 时, 该自由曲面透镜能产生均匀度达到 87.3% 的矩形光斑, 光能利用率为 93.4%。将该自由曲面透镜应用于水下发射天线, 当接收机灵敏度为 -30 dBm、接收孔径为 50 mm 时, 浑浊海水的最大通信距离为 2.3 m, 纯水、清澈海水的最大通信距离大于 10 m。用三组自由曲面透镜组成的 360° 全覆盖全向光学发射天线产生的光斑边缘均匀度相比单一发射天线由 17.4% 提高到 35.2%, 提高了水下光通信链路的稳定性, 为解决水下无线光通信中的对准问题提供了新思路。

关键词 光通信; 矩形光斑; 自由曲面透镜; 光学天线

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0106008

Design of Underwater LED Omni-Directional Transmitting Antenna Based on Free-Form Surface

He Fengtao, Yang Yayi, Zhang Jianlei*, Yang Yi, Wei Pengcheng

School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China

Abstract In this paper, an optical transmitting antenna is designed using free-form surface design theory, which can generate a uniform rectangular spot to solve the problems of difficult alignment and poor spot uniformity in underwater wireless optical communication systems. The simulation results show that when the distance of the target plane is 10 m, the free-form lens can produce a rectangular spot with 87.3% uniformity and the light energy utilization rate is 93.4%. The free-form lens is applied to the underwater transmitting antenna, when the receiver sensitivity is -30 dBm and the receiving aperture is 50 mm, the maximum communication distance of the turbid water is 2.3 m, and the maximum communication distance of the pure and clear sea water is greater than 10 m. Compared with the single antenna, the edge uniformity of the spot produced by the 360° omni-directional optical transmitting antenna composed of three sets of the free-form lens increases from 17.4% to 35.2%. The transmitting antenna improves the stability of the underwater optical communication link and provides a new technical idea for solving the alignment problem in underwater wireless optical communication.

Key words optical communications; rectangular spot; free-form surface lens; optical antenna

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-04-26; 录用日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61805199)、水下信息与控制国家重点实验室项目、陕西省技术创新引导专项(2020TG-001)

通信作者: *zhangjianlei@xupt.edu.cn

1 引言

水下无线光通信作为一种新型通信技术,在水文检测、水下勘探等方面都发挥着重要的作用,近年来受到了人们的广泛关注与研究^[1-3]。由于海水介质的吸收、散射以及海水通信信道的随机多变性,在发射端与接收端之间的通信需要十分严格的传输条件,因此,需要对光学发射天线进行二次光学设计,研制出合适的光学天线系统,最大限度提高系统的通信性能。

光学天线是用来接收或发射无线光信号的设备,包括发射光学天线和接收光学天线两部分。发射天线在 LED 发射端,一般采用非成像光学方法对 LED 进行二次光学设计,以改变 LED 的光能分布,实现增大光线覆盖面积或增加传输距离等目的^[4]。按照配光方式可将光学发射天线分为准直型发射天线、均匀照明型发射天线和聚焦型发射天线等。目前,国内外学者针对 LED 的二次光学设计进行了深入研究,可利用自由曲面透镜形成矩形光斑或圆形光斑^[5-8]。Jian 等^[9]用规则二次曲线作为初始模型,并结合 TracePro 软件中的编程语言和优化引擎实现对局部自由曲线的控制和优化,相较传统优化方法的照明均匀性和能量利用率均有显著提高。Xu 等^[10]提出了一种光源-目标光强映射方法构造矩形照明的自由曲面透镜,当接收面的尺寸为 40 m × 12 m 时,该透镜的均匀度能达到 69.7%。Chen 等^[11]利用光源-目标能量映射方法求解自由曲面形状,并设计了一种圆形光斑的均匀照明透镜,该透镜的底面直径为 10.8 mm、厚度为 10 mm,仿真结果表明,该透镜产生的光斑均匀度可达到 80%,光能利用率为 90%,但视场角仅有 ±45°。Chen 等^[12]提出了一种由自由曲面微光学透镜阵列集成的光束整形装置,可在不考虑入射光源初始状态的情况下实现规定的矩形照明模式,具有良好的空间均匀性。谢洪波等^[13]利用单个 LED 实现了远距离均匀照明系统的设计,在 3 m~3 km 范围内的光斑均匀度大于 90%,但其光能利用率不理想。曾翌等^[14]针对常规照度照明系统中存在的透镜过厚、照度不均匀问题,设计了距高比(DHR)为 3 的双自由曲面透镜,相比单自由曲面透镜,该透镜的厚度减小了 2.95%,透镜的横向尺寸减小了 10.5%。Wu 等^[15]针对点光源提出了一种双自由曲面透镜,并给出了双自由曲面的一般公式,但设计过程复杂。Babadi

等^[16]设计了一种全内反射聚光器,可在矩形区域内产生均匀(均匀度达到 90%)照明,但该聚光器的曲面由多个不连续曲面拼接而成,实际加工比较复杂。

上述研究都是基于非成像光学理论中的自由曲面设计透镜,目的是提高光斑均匀度或增加光能利用率,对于水下无线光通信中的自由曲面透镜研究较少。因此,本文针对用于水下通信的 LED 光源,设计了一种可以产生矩形均匀光斑的自由曲面透镜。仿真结果表明,该自由曲面透镜的辐照均匀度为 87.3%,光能利用率为 93.4%。将该透镜作为发射天线应用于水下光通信中,灵敏度为 -30 dBm、接收孔径为 50 mm 的接收机可在纯水、清澈海水 10 m 内实现光通信。针对收发端对准困难的问题,为了使光信号达到均匀全覆盖,用三个自由曲面透镜设计了一种全向发射天线,该结构可以达到 360°的光斑全覆盖。

2 矩形光斑光学系统的设计

在水下通信传输中,LED 发出的光在接收平面上存在分布不均匀、光能利用率低等问题。用均匀照明型光学天线作为光学系统发射端可获得均匀分布的辐照度,从而提高光能利用率^[4],因此,用自由曲面设计方法中的网格划分法设计了一种能产生矩形均匀光斑的透镜。网格划分法设计自由曲面透镜的思路:首先,划分网格,定义光源与接收面的一一映射关系;然后,结合光源和接收平面的能量划分结果,利用迭代求解法求解透镜表面所有离散点的坐标和法向矢量;最后,将所有离散点导入三维(3D)软件建立透镜模型。

2.1 设计原理

矩形光斑具有轴对称性,因此,只需求解自由曲面的四分之一面型即可。根据光源与目标接收面的特点建立不同的参考坐标系,如图 1 所示。图 1(a)为 LED 光源的空间坐标,其中, i 为光线, I_0 为沿 Z 轴方向的中心光强, φ 为光线与 Y 轴的夹角, θ 为光线与 Y 轴所在平面与 Z 轴的夹角;沿光线 i 方向的光强为中心光强和光线与 Z 轴夹角余弦的乘积,即 $I_0 \cos \theta \sin \varphi$ ^[17]。图 1(b)为接收面的网格划分示意图,假设接收面与 LED 的距离为 h ,矩形接收面的长为 a ,宽为 b ,LED 光源的总光通量为 ϕ ,接收面的平均照度为 E_c (总光通量除以接收面面积),中心光强 $I_0 = \phi / \pi$ 。接收面沿 X 轴方向、Y 轴方向分别以

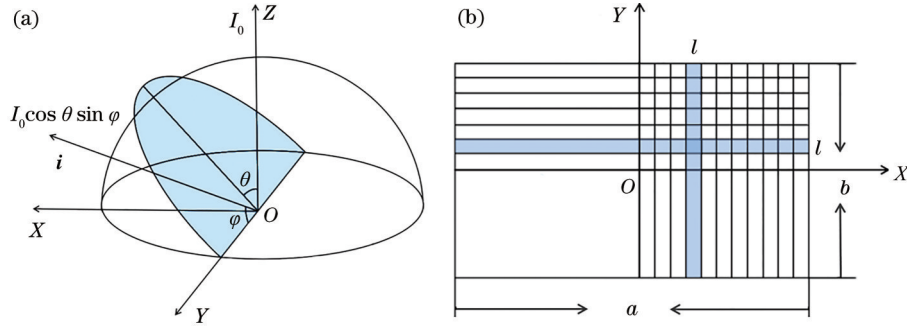


图 1 网格划分的原理。(a) LED光源的空间坐标;(b)接收面上的网格划分

Fig. 1 Principle of the grid division. (a) Spatial coordinates of the LED light source; (b) grid division on the receiving surface

步长 l 等分成 m 份和 n 份,从而将接收面划分成 $m \times n$ 个等面积的正方形网格,对应于接收面在第一象限的划分,即将角度 θ 、角度 φ 在空间上分别等分成 m 份和 n 份。

对光源与接收平面进行能量的对应划分,具体步骤如下。

1) 建立光源光线与接收面上点的一条纵向对应关系,并求解光源光线的步长 $\Delta\theta_1, \dots, \Delta\theta_m$,接收面 X 轴方向上每条矩形区域对应的能量 $E(\Delta x)$ 可表示为^[18]

$$E(\Delta x) = E_v \cdot l \cdot b, \quad (1)$$

结合能量守恒关系,推导出初始光线 (θ_0, φ_0) 对应的步长 $\Delta\theta_1$ 为^[18]

$$\Delta\theta_1 = E(\Delta x) / \left(\cos\theta_0 \int_0^\pi \sin^2\varphi d\varphi \right). \quad (2)$$

令 $\theta_1 = \theta_0 + \Delta\theta_1, x_1 = x_0 + \Delta x$, 得到光线 (θ_1, φ_0) 与接收面上点 (x_1, y_0) 的能量对应关系。依次迭代计算出 $\Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_m$ 以及 $\theta_2, \dots, \theta_m$, 得到光源光线与接收面上点的能量纵向对应关系 $(\theta_i, \varphi_0) \rightarrow (x_i, y_0)$, 其中, $i = 1, \dots, m$ 。

2) 将步骤 1) 中纵向对应关系上的点作为初始点,建立 $m+1$ 条光线和接收面上点的能量横向对应关系,求解光源光线之间的步长 $\Delta\varphi_1, \dots, \Delta\varphi_n$ 。选取能量纵向对应关系 $(\theta_i, \varphi_0) \rightarrow (x_i, y_0)$ 中的初始点 (x_0, y_0) 和初始步长 Δy , 则 $(\Delta x, \Delta y)$ 范围内的能量 $E(\Delta x, \Delta y)$ 可表示为^[18]

$$E(\Delta x, \Delta y) = E_v \cdot l^2, \quad (3)$$

结合能量守恒关系,推导出初始光线 (θ_1, φ_0) 对应的步长 $\Delta\varphi_1$ 为^[18]

$$\Delta\varphi_1 = E(\Delta x, \Delta y) / \left(I_0 \int_{\theta_2}^{\theta_1} \cos\theta d\theta \cdot \sin^2\varphi_0 \right). \quad (4)$$

令 $\varphi_1 = \varphi_0 + \Delta\varphi_1, y_1 = y_0 + \Delta y$, 得到光线 (θ_0, φ_1) 与接收面上点 (x_0, y_1) 的能量对应关系。依次计算出 $\Delta\varphi_2, \dots, \Delta\varphi_n$ 以及 $\varphi_2, \dots, \varphi_n$, 得到光源光线与接收面上点的能量横向对应关系 $(\theta_0, \varphi_j) \rightarrow (x_0, y_j)$, 其中, $j = 1, \dots, n$ 。

3) 按照步骤 2) 进行循环迭代,计算纵向对应关系上 $m+1$ 个初始点的 $n+1$ 个能量横向对应关系,得到光源发出的光线与目标平面上点坐标间的对应关系 $(\theta_m, \varphi_n) \rightarrow (x_m, y_n)$ 。

2.2 矩形光斑透镜的设计及模型建立

2.2.1 矩形光斑的透镜设计

图 2 为矩形光斑透镜表面的生成示意图,可表示透镜表面数据点的迭代求解过程。初始入射光线 I_{00} 经折射点 S_{00} 后与接收面相交于点 P_{00} , 入射光线 I_{10} 经折射后与接收面交于点 P_{10} (P_{20}), 入射光线 I_{01} 经折射后与接收面交于点 P_{01} 。 S_{00} 为自由曲面的初始点, S_{10}, \dots, S_{m0} (S_{01}, \dots, S_{0n}) 为需要迭

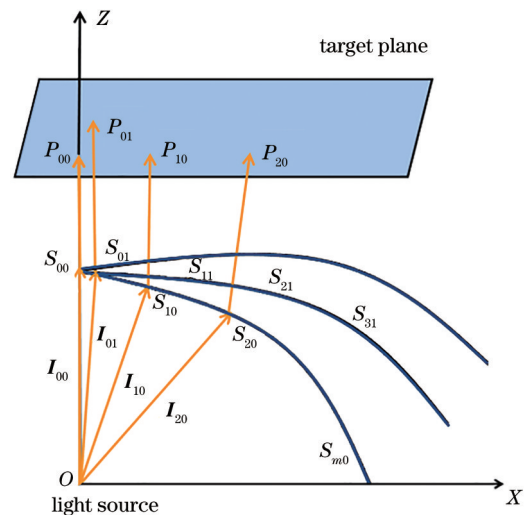


图 2 透镜表面的生成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the lens surface generation

代求解的透镜表面数据点。设置初始坐标点 S_{00} 以及点 P_{00} , 得到初始入射光线的单位向量 \mathbf{I}_{in} 和折射光线的单位向量 \mathbf{I}_{out} , 透镜的折射率 n 为 1.4935, 根据非成像光学理论中的斯涅耳定律, 得到的法向量满足

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{I}_{out} - n\mathbf{I}_{in}}{\sqrt{[1 + n^2 - 2n(\mathbf{I}_{out} \cdot \mathbf{I}_{in})]}} \quad (5)$$

自由曲面透镜表面数据点的求解步骤如下。

1) 选择一条初始光线 $\mathbf{I}_{00}(\theta_0, \varphi_0)$ 及其在接收面上对应的初始位置 $P_{00}(x_0, y_0)$, 设置透镜的初始点坐标为 S_{00} 。利用(5)式计算出 S_{00} 处的法向量 \mathbf{N}_{00} 、切平面 \mathbf{T}_{00} 。根据光源与接收面的能量纵向对应关系 $(\theta_i, \varphi_i) \rightarrow (x_i, y_i)$ 选择第二条入射光线 $\mathbf{I}_{10}(\theta_1, \varphi_1)$ 及其在接收面上对应的位置 $P_{10}(x_1, y_1)$, 求出光线 \mathbf{I}_{10} 经传播与切平面 \mathbf{T}_{00} 的交点位置 S_{10} , 结合点 $P_{10}(x_1, y_1)$ 求出点 S_{10} 的出射光线方向矢量及法向量。按照上述方法, 依次选择入射光线 $\mathbf{I}_{20}, \dots, \mathbf{I}_{m0}$ 求解出一条纵向曲线上的离散数据点 S_{00}, \dots, S_{m0} 及每一点对应的出射光线法向量, 从而确定出透镜表面的一条纵向曲线 l_1 。

2) 以 l_1 上的离散点作为初始点, 求解透镜表面的 $n+1$ 条横向曲线; 取点 S_{00} 作为第一条横向曲线的初始点, 根据光源与接收面的能量横向对应关系 $(\theta_0, \varphi_j) \rightarrow (x_0, y_j)$ 在光源上选择 S_{00} 邻近的一条入射光线 $\mathbf{I}_{01}(\theta_1, \varphi_0)$ 及其在接收面上对应的点 $P_{01}(x_1, y_0)$, 求出光线 $\mathbf{I}_{01}(\theta_1, \varphi_0)$ 经过传播与切平面 \mathbf{T}_{00} 的交点位置 S_{01} ; 结合点 $P_{01}(x_1, y_0)$ 求出过点 S_{01} 出射光线的方向矢量及法向量。按照上述方法, 依次选择入射光线 $\mathbf{I}_{02}, \dots, \mathbf{I}_{0n}$ 求解出以 S_{00} 为初始点的一条横向曲线上的离散数据点 S_{00}, \dots, S_{0n} , 从而确定出透镜上的一条横向曲线。

3) 将步骤 1) 求解出的离散点 S_{10}, \dots, S_{m0} 作为初始点, 按照步骤 2) 进行循环求解, 得到以离散点 S_{00}, \dots, S_{m0} 为初始点的 $n+1$ 条横向曲线上的离散点及其对应的法向量, 可表示为

$$\begin{aligned} S_{00}, \dots, S_{0n} &\rightarrow N_{00}, \dots, N_{0n} \\ S_{10}, \dots, S_{1n} &\rightarrow N_{10}, \dots, N_{1n} \\ &\dots \\ S_{m0}, \dots, S_{mn} &\rightarrow N_{m0}, \dots, N_{mn} \end{aligned} \quad (6)$$

求解完四分之一透镜表面上的所有数据点及其法向量后, 通过这些离散点坐标及法向量确定出自由曲面透镜的表面面型。

2.2.2 矩形光斑透镜模型的建立

假定接收面的长为 40 m, 宽为 10 m, 与光源的距离为 10 m, 利用 Matlab 软件计算出四分之一面型上的离散点坐标, 结果如图 3 所示。

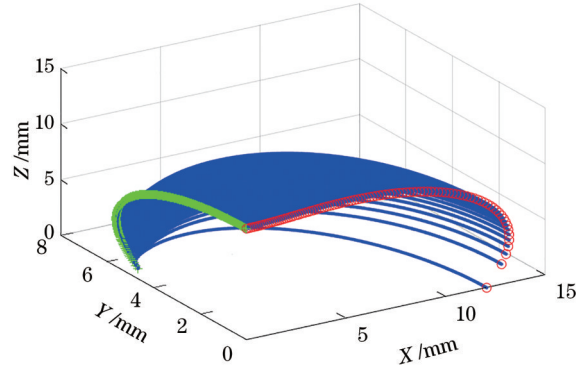


图 3 均匀矩形光斑的自由曲面数据

Fig. 3 Free-form surface data of the uniform rectangular spot

将面型曲线的离散值导入 SolidWorks 中进行拟合, 并对自由曲面的底部进行平面缝补, 形成透镜实体模型, 如图 4 所示。该透镜的长为 26 mm, 宽为 15 mm, 高为 12 mm, 下表面是一个半径为 3 mm 的半球体, 用以放置 LED 光源。

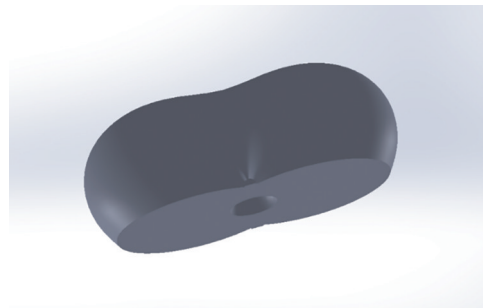


图 4 矩形光斑透镜的实体模型

Fig. 4 Solid model of the rectangular spot lens

2.3 矩形光斑透镜的仿真分析

利用 TracePro 软件进行模拟仿真, 设置透镜材料为 PMMA, 折射率 n 为 1.4935, 接收面的长为 40 m, 宽为 10 m, 透镜与光源的距离为 10 m。用面积为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 LED 面光源, 经过 200 万条光线追迹模拟, 得到接收面上的辐照度分布如图 5 所示。可以发现, 该自由曲面透镜的光能利用率为 93.4%, 光斑形状为矩形, 辐照均匀度(有效区域内辐照度平均值与最大值的比)达到 87.3%, 变化比较平缓。这表明该自由曲面透镜能很好地产生矩形均匀光斑, 实现提高光能利用率、增加光斑均匀度、扩大出射光线覆盖面积的目的。

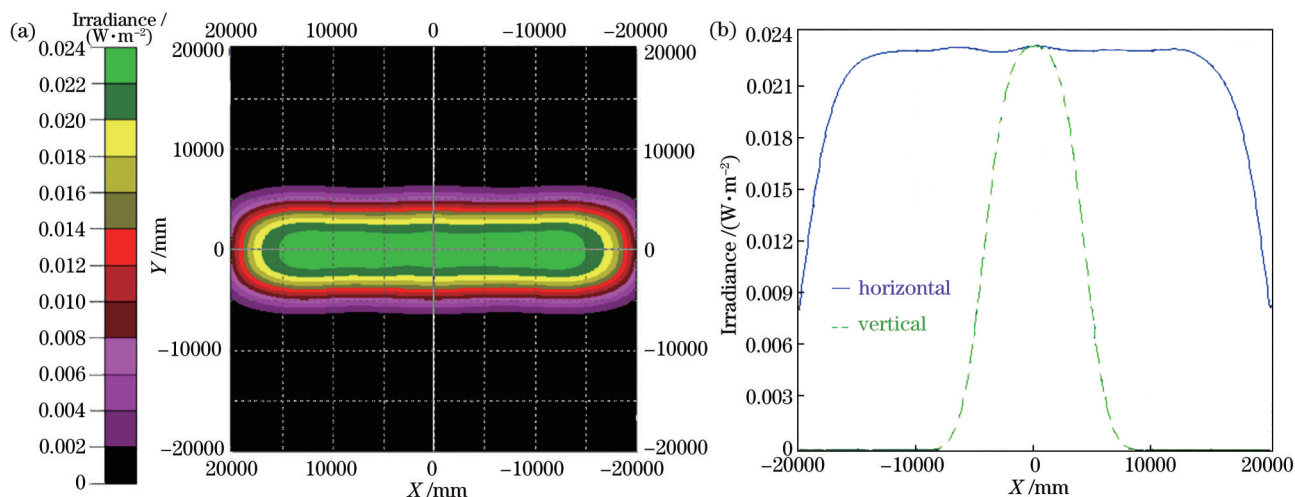


图 5 接收面的辐照度分布及轮廓。(a)辐照度;(b)轮廓

Fig. 5 Irradiance distribution and profile of receiving surface. (a) Irradiance; (b) profile

2.4 基于矩形光斑透镜的水下LED通信实验

将矩形光斑透镜用于水下LED通信发射天线,发射机采用圆柱形不锈钢壳体进行水密封装,前端透明窗口选用石英玻璃材料,接收机孔径为50 mm。图6为发射天线的实验仿真框图。利用

TracePro 仿真该发射天线在纯水、清澈海水、浑浊海水三种水质下不同传输距离的接收光功率,其中,LED的波长 λ 为 $0.532 \mu\text{m}$,接收机的接收灵敏度为 -30 dBm ,输入光功率为 1 W ,光线追迹数为100万条,光路图如图7所示。

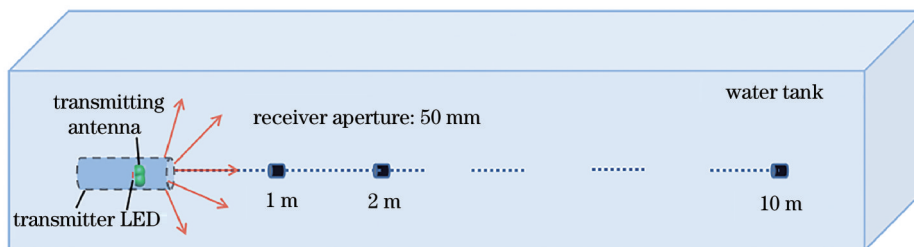


图 6 水下LED发射天线实验的仿真框图

Fig. 6 Simulation diagram of the underwater LED transmitting antenna experiment

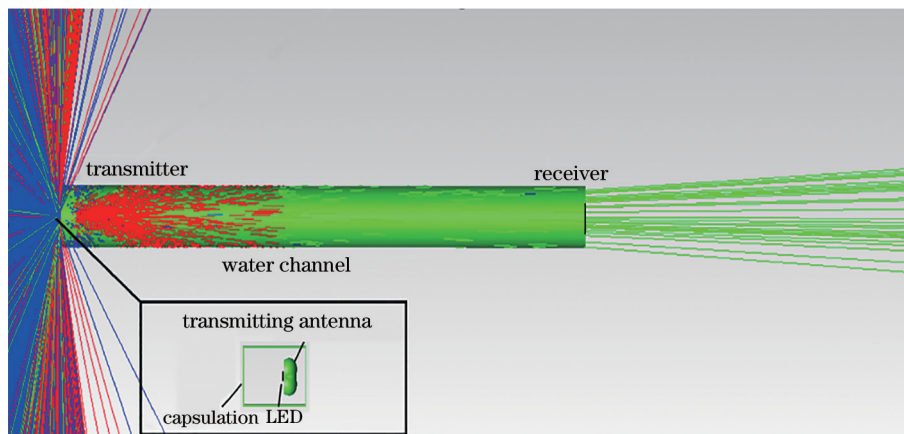


图 7 水下LED发射天线实验的光路图

Fig. 7 Light path diagram of the underwater LED transmitting antenna experiment

图8为发射天线在三种水质下不同距离处接收机接收到的光功率,其中, c 为海水的衰减系数。可

以发现,当接收机的灵敏度为 -30 dBm 时,浑浊海水的最大通信距离为 2.3 m ,纯水、清澈海水的最大

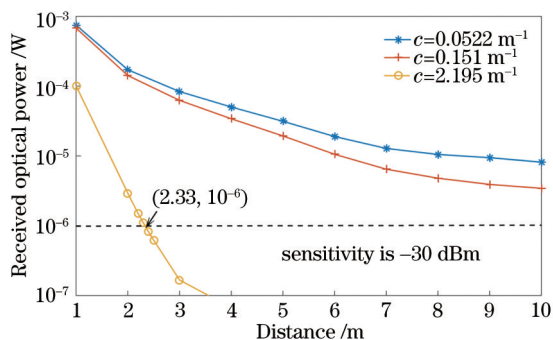


图 8 不同介质下接收机的接收光功率

Fig. 8 Received optical power in different media

通信距离大于 10 m, 验证了该发射天线应用于水下无线光通信中的可行性。

3 全向光学发射天线的设计原理与仿真结果

3.1 全向发射天线的结构设计

从单个自由曲面透镜的仿真情况来看, 光束在 10 m 处可达到 120° 均匀覆盖, 针对单一发射单元视场覆盖面有限的问题, 利用三个自由曲面透镜组成一个全向发射天线。将三个 LED 按图 9(a) 的方式分别放入三个透镜中, 三个自由曲面透镜按图 9(b) 的方式放置^[18], 组成具有三组发射通道的全向发射天线, 该组合方式能够紧凑光源, 缩小发射天线的体积。

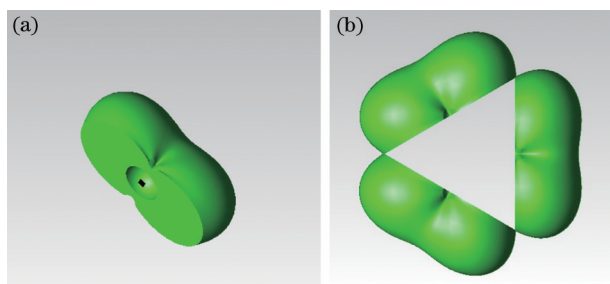


图 9 发射天线的结构。(a) 自由曲面透镜的结构; (b) 全向发射天线的结构

Fig. 9 Structure of the transmitting antenna. (a) Structure of the free-form surface lens; (b) structure of the omnidirectional transmitting antenna

将光源视为点光源, 为了保证三组光源到相应接收面的垂直距离为 10 m, 将接收面设置成长为 11.5 m, 宽为 10 m 的矩形薄片, 组成正六边形, 以接收各个方向上的光线。对三个 LED 在相同光源参数条件下进行光线追迹和辐照度分析, 结果如图 10 所示。其中, A、B、C 代表三组发射通道。

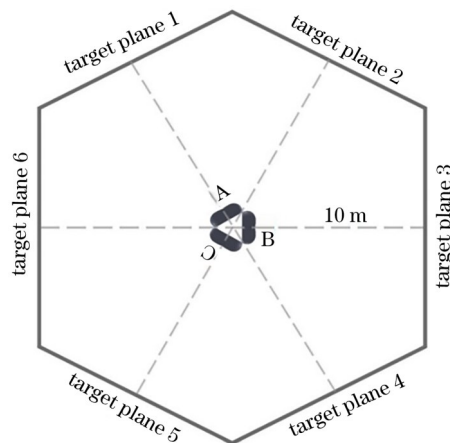


图 10 自由曲面透镜的整体结构

Fig. 10 Overall structure of the free-form surface lens

3.2 单透镜与双透镜在同一接收面上的仿真对比分析

对于发射通道 B, 其在接收面 2 上的辐照度分布如图 11 所示。可以发现, 光斑为不规则形状, 光束经过该发射通道的光能利用率为 14.5%, 辐照均匀度为 17.4%, 能量利用率较低, 在接收面上分布不均匀且无法达到全覆盖。

图 12 为发射通道 A、B 同时在接收面 2 上的辐照度分布, 可以发现, 光斑形状为矩形, 尺寸约为 12 m × 10 m, 可在接收面上达到均匀全覆盖。光束同时经过发射通道 A、B 时的光能利用率为 34.3%, 辐照均匀度为 35.2%, 相较单个发射通道的光能利用率、光斑均匀性均有所提升。这表明多发射通道可增加出射光线的覆盖面积, 提高光斑边缘的均匀性, 且增加了光能利用率, 有利于光学天线实现宽范围内的光能均匀分布。

3.3 全向发射天线的仿真分析

对图 10 中的结构进行仿真分析, 图 13 为接收面 1 上的辐照度分布, 可以发现, 光斑形状为矩形, 尺寸约为 12 m × 10 m, 能量利用率为 25.4%, 辐照均匀度为 79%, 可在接收面 1 上实现均匀全覆盖。图 14 为接收面 3 上的辐照度分布, 可以发现, 光斑形状仍为矩形, 尺寸约为 12 m × 10 m, 能量利用率为 28.2%, 辐照均匀度为 77.4%, 可在接收面 3 上实现均匀全覆盖。对比图 12~图 14 可以发现, 接收面 1、2、3 上的光斑实现了 180° 全覆盖, 由于该光学系统是对称结构, 接收面 4、5、6 上的光斑也能实现 180° 全覆盖, 这表明该光学发射天线可在 10 m 范围内实现 360° 的光能覆盖, 且光斑边缘的辐照均匀度与单一发射通道相比有所提升。

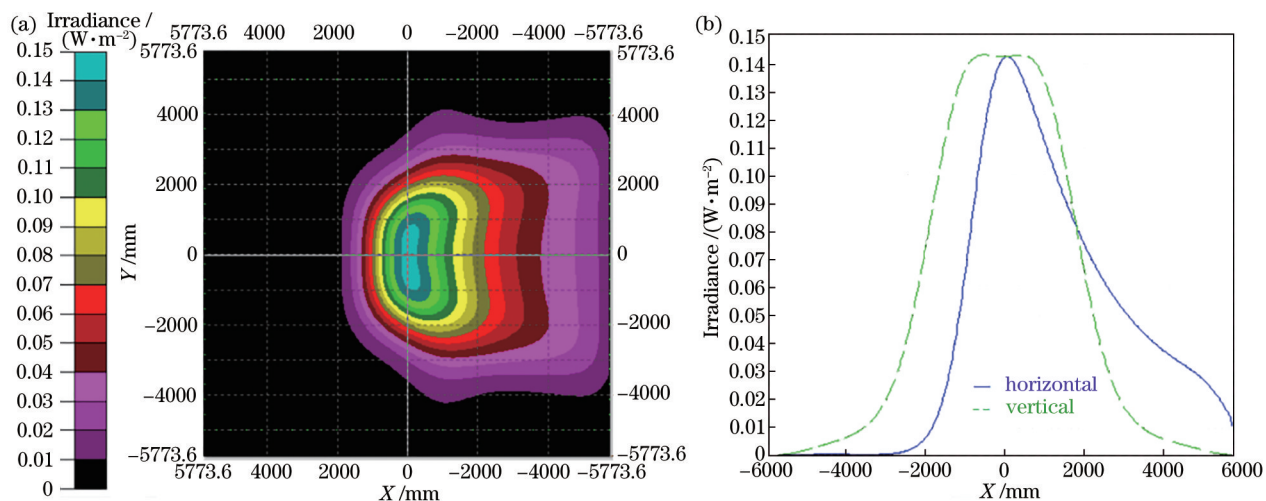


图 11 单发射通道在接收面 2 上的辐照度分布和轮廓。(a)辐照度;(b)轮廓

Fig. 11 Irradiance distribution and profile of single transmitting channel on the receiving surface 2. (a) Irradiance; (b) profile

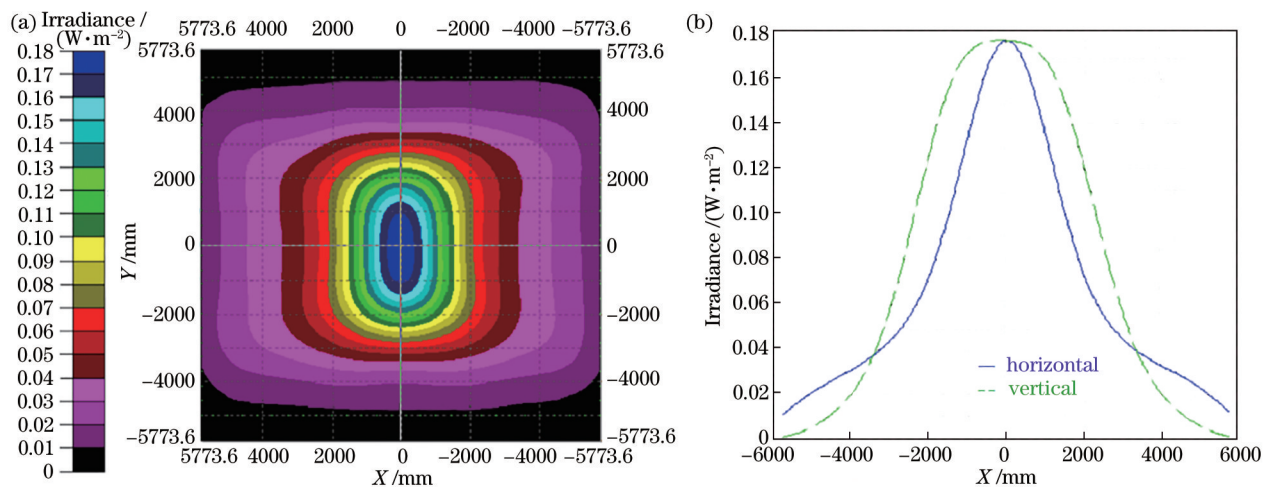


图 12 双发射通道在接收面 2 上的辐照度分布和轮廓。(a)辐照度;(b)轮廓

Fig. 12 Irradiance distribution and profile of dual transmitting channel on the receiving surface 2. (a) Irradiance; (b) profile

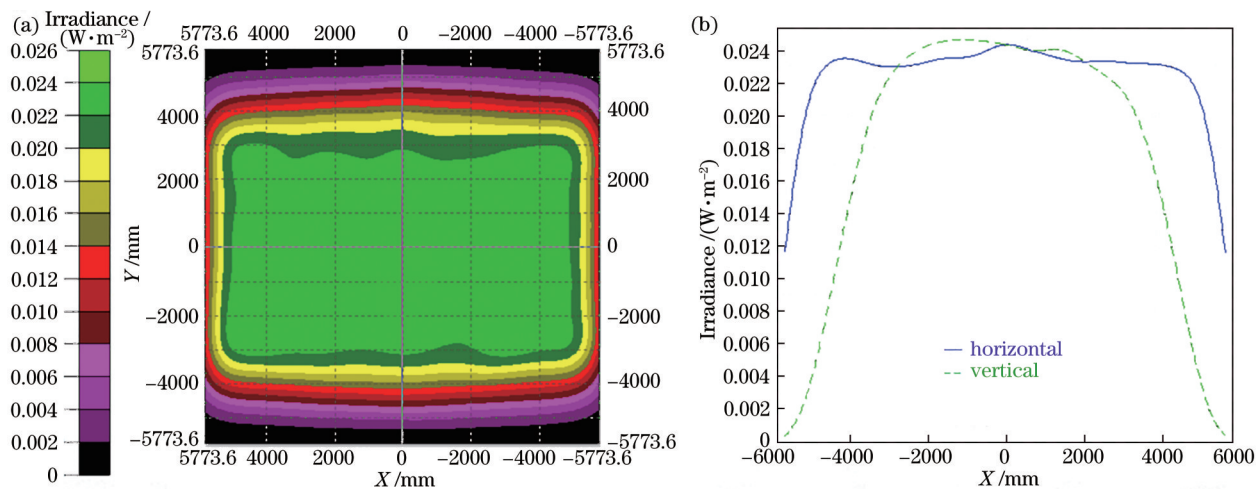


图 13 接收面 1 上的辐照度分布和轮廓。(a)辐照度;(b)轮廓

Fig. 13 Irradiance distribution and profile on receiving surface 1. (a) Irradiance; (b) profile

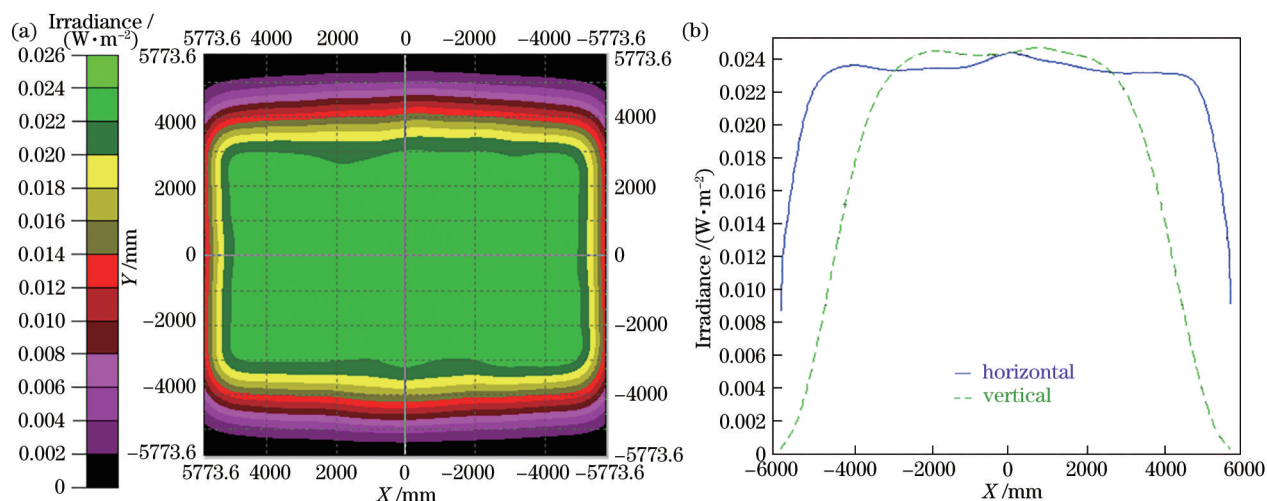


图 14 接收面 3 上的辐照度分布和轮廓。(a)辐照度;(b)轮廓

Fig. 14 Irradiance distribution and profile on receiving surface 3. (a) Irradiance; (b) profile

4 结 论

利用非成像光学中的自由曲面设计理论设计出一种应用于水下 LED 通信的光学发射天线, 相比常规发射天线, 该发射天线克服了水下无线光通信中的对准困难问题, 提高了水下光通信的性能。该矩形光斑透镜可以产生均匀的矩形光斑, 光能利用率为 93.4%, 辐照均匀度为 87.4%。将其作为发射天线的水下仿真实验结果表明, 当接收机灵敏度为 -30 dBm、接收孔径为 50 mm 时, 浑浊海水的最大通信距离为 2.3 m, 纯水、清澈海水的最大通信距离大于 10 m。为了增加边缘光斑的辐照均匀度, 增大出射光线的覆盖面积, 利用三组自由曲面透镜设计出一种全向光学发射天线。仿真结果表明, 该发射天线的均匀性良好, 360°均可以接收到光信号, 没有盲区, 降低了对外界环境的要求, 为提高水下 LED 的通信性能提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Zeng Z Q, Fu S, Zhang H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 204-238.
- [2] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547.
- [3] Spagnolo G S, Cozzella L, Leccese F. Underwater optical wireless communications: overview[J]. Sensors, 2020, 20(8): E2261.
- [4] Wu N, Yang A Y, Feng L H, et al. Research of optical antenna technology in visible light communication [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2017, 9(2): 151-158.
- [5] Zhou Y C, Guo L, Chen Z T, et al. Design of collimating lens with multiple freeform surfaces based on total internal reflection structure[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0422003.
- [6] Hu X J, Qian K Y. Optimal design of optical system for LED road lighting with high illuminance and luminance uniformity[J]. Applied Optics, 2013, 52(24): 5888-5893.
- [7] Hu R, Gan Z Q, Luo X B, et al. Design of double freeform-surface lens for LED uniform illumination with minimum Fresnel losses[J]. Optik, 2013, 124(19): 3895-3897.
- [8] Shi Y, Li B C, Zhao M T, et al. The design of LED rectangular uniform illumination lens system[J]. Optik, 2017, 144: 251-256.
- [9] Jian H, Ke H L, Wang Y, et al. A new optimization method of freeform surface lens based on non-imaging optics for led source[J]. Optik, 2017, 134: 128-134.
- [10] Xu C Y, Cheng H B, Feng Y P. Optical design of rectangular illumination with freeform lenses for the application of LED road lighting[J]. Frontiers of

- Optoelectronics, 2017, 10(4): 353-362.
- [11] Chen J J, Huang Z Y, Liu T S, et al. Freeform lens design for light-emitting diode uniform illumination by using a method of source-target luminous intensity mapping[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): E146-E152.
- [12] Chen E G, Huang J M, Guo T L, et al. A laser beam shaper for homogeneous rectangular illumination based on freeform micro lens array[J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(4): 253-256.
- [13] Xie H B, Jiang M, Yang L, et al. Design of uniform and long distance illumination system based on single LED[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(4): 543-548.
- 谢洪波, 江敏, 杨磊, 等. 单颗 LED 实现远距离均匀照明系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 543-548.
- [14] Zeng Y, Zhao H F, Duan W J. Design of optical system with illumination uniform and high distance-height ratio based on double freeform-surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2422001.
- 曾翌, 赵会富, 段文举. 基于双自由曲面高距高比照度均匀的光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2422001.
- [15] Wu R M, Chang S Q, Zheng Z R, et al. Formulating the design of two freeform lens surfaces for point-like light sources[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1619-1622.
- [16] Babadi S, Ramirez-Inguiez R, Boutaleb T, et al. Producing uniform illumination within a rectangular area by using a nonimaging optic[J]. Applied Optics, 2018, 57(31): 9357-9364.
- [17] Wang L, Qian K Y, Luo Y. Novel LED navigation lamp design[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(12): 124-128.
- 王霖, 钱可元, 罗毅. 新型 LED 航标灯光学系统[J]. 光电工程, 2007, 34(12): 124-128.
- [18] Zhang Q H. Study on optical design methods for high-power LED lighting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- 张奇辉. 大功率 LED 照明系统光学设计方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.