

文章编号: 1001-3806(2014)04-0527-06

水下无线 LED 光通信中圆形阵列光源性能研究

汪 锋¹, 饶炯辉^{2*}, 向小梅¹

(1. 中国人民解放军 91388 部队, 湛江 524022; 2. 海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 为了研究水下无线 LED 光通信中圆形阵列光源性能, 以 6 个 LED 组成的圆形阵列光源为对象, 基于单个 LED 空气中照度分布模型推导出其相对照度分布数学模型; 以水下照度计为工具, 用点阵测量法研究其在水下的实际空间照度分布, 并分析了实验数据。结果表明, 该光源出射端口处光照度值随着加载信号的频率增加而增加, 光源的水下辐射照度整体分布不对称; 当光信号传播到一定距离后, 在光接收平面上, 照度值各向趋于均匀分布。

关键词: 光通信; 阵列光源; 相对照度; 照度分布

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.018

Research of performance of circular array light source in underwater wireless LED optical communication

WANG Feng¹, RAO Jionghui², XIANG Xiaomei¹

(1. Unit 91388, Chinese People's Liberation Army, Zhanjiang 524022, China; 2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to study the performance of circular array light source in underwater wireless light-emitting diode (LED) optical communication, the mathematical model of the relative intensity of illumination distribution was deduced choosing a circular array light source composed of 6 LEDs as the research object and based on the distribution model of a single LED illumination in the air. The actual underwater illumination distribution was measured with an illuminometer based on the dot matrix measurement method. The experimental data were analyzed. The results show that the intensity of illumination in the output port of the light source increases with the increase of the carrier signal frequency. The whole underwater illumination distribution of the light source is asymmetry. When the optical signal was transmitted to a certain distance, the illumination intensity tends to distribute more evenly in the light receiving plane.

Key words: optical communication; array light source; relative intensity of illumination; illumination distribution

引 言

水下无线光通信系统一般可应用于潜艇、无人水下航行器 (unmanned underwater vehicle, UUV)、蛙人等^[1]。随着光电子产业的发展, 很多技术门槛得到解决, 对水下无线光通信展开研究的机构越来越多, 水下可见光通信技术更是近几年才被开发和研究的一项新技术^[2]。以发光二极管 (light-emitting diode, LED) 作为光源的水下无线光通信设备具有体积小、能耗低、工作时间较长、价格便宜等特点, 尤

其适用于 UUV、蛙人等小型的水下平台^[3]。但是要实现长距离的通信要求, 则必须使得发射光束尽量窄, 这给发射机和接收机的对准造成了困难^[4]。对准是建立和维持水下无线光通信链路的基本条件, 所以在满足水下载体接收机小型化、轻量化、低功耗的前提下, 需要研究怎样的光源能在远距离实现高精度、快速的对准^[5-6]。本文中在一定的理论推导和仿真基础上, 以试验手段展开水下无线 LED 通信中圆形阵列光源性能研究。

1 LED 光源特性及 LED 圆形阵列光源的空间照度分布模型

光源是水下无线光通信的核心部件, 流明公司的 K2 绿光 LED 光源 (型号 L XK2-PM14-U00) 是

作者简介: 汪 锋 (1986-), 男, 硕士, 助理工程师, 现主要从事水下光通信信号处理技术、水声信号处理技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 13995523850@139.com

收稿日期: 2013-07-31; 收到修改稿日期: 2013-09-12

一种典型的大功率 LED, 在 1000mA 的测试电流下, 它的最小功率为 87.4mW, 典型功率为 100mW, 其主要参量如表 1 所示。以其为对象展开水下无线 LED 通信圆形阵列光源性能研究。大

功率 LED 作为一种新型光源, 它与传统的照明光源相比较有自己独特的特性。由于要分析它的光源特性, 所以先对表征 LED 光学特性的几个主要参量进行介绍^[7]。

Table 1 Parameter of LED

parameter	minimum value	typical value	maximum value	unit
optical output power	87.4	100	130	mW
laser output wavelength	520	530	550	nm
working voltage	2.79	3.42	4.23	V
working current			1500	mA
beam divergence angle			140	°

(1) 光通量: 单位时间内辐射的能量, 用 Φ 表示, 单位为流明 (lm)。

(2) 光照度: 单位面积接收的光通量, 可其表达式为:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1)$$

光照度的单位为勒克斯 (lx)。1lx = 1lm/m²。

(3) 发光强度: 点光源在给定方向上单位立体角内发射出的光通量, 其表达式为:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (2)$$

发光光强的单位为坎德拉 (cd)。

发光强度与 LED 的封装有关, 是与光照度密切相关的参量。参考文献[8]中对 LED 的发光强度分布特征有详细的论述。对 LED 光源的研究可以归类为非成像光学的范畴, 因为它不关注成像的质量, 关注的是光能量传递或对光能量进行再分布。对于 LED 光源在空气中的照度空间分布特性, MORENO 和 SUN 有深入的研究^[9]。LUXEON K2 型是绿色 LED, 由参考文献[9]可知其空间辐射的典型分布如图 1 所示, 采用 MORENO 和 SUN 建立的适用于 LK2-PM14-U00 的理论模型, 则对于单个 LK2-PM14-U00 型号 LED 光源, 其相对强度公式(采用相

对强度, 以便将辐射强度和发光强度的变化趋势归一化到一个公式)^[10]为:

$$I(\theta, \varphi) = 0.42 \exp \left[- \left(\frac{|\theta| - 62.7^\circ}{16.1^\circ} \right)^2 \ln 2 \right] + 0.88 \exp \left[- \left(\frac{|\theta| - 32.7^\circ}{30.1^\circ} \right)^2 \ln 2 \right] \quad (3)$$

$$I(\theta, \varphi) = 0.60 \exp \left[- \left(\frac{|\theta| - 62.7^\circ}{16.1^\circ} \right)^2 \ln 2 \right] + 0.70 \exp \left[- \left(\frac{|\theta| - 32.7^\circ}{30.1^\circ} \right)^2 \ln 2 \right] \quad (4)$$

(3)式对应典型上界(typical upper bound), (4)式对应典型下界(typical lower bound)。

由于光强分布是基于角度来描述, 是在极坐标中表示的, 当研究多个 LED 组合成的阵列时, 如仍然讨论光强分布, 则计算十分复杂; 而照度分布是在直角坐标中表示的, 通过计算阵列的照度分布来研究 LED 阵列性质自然简单些。为此首先将单个 LED 光辐射模型的光强转化为照度在空间的分布。设光强为 $I(\theta, \varphi)$, 接收面中心离光源中心的距离为 r , 则相对照度的分布为^[7]:

$$E(r, \theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi) \cos \theta}{r^2} \quad (5)$$

进一步以光源中心为坐标原点建立直角坐标系, 设照射面与光源的距离为 z , 则(5)式中的 θ 可以化为:

$$\theta(x, y, z) = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (6)$$

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{y}{x} \quad (7)$$

所以相对照度在空间的分布的公式为:

$$E(x, y, z) = \frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \times I[\theta(x, y, z), \varphi(x, y)] \quad (8)$$

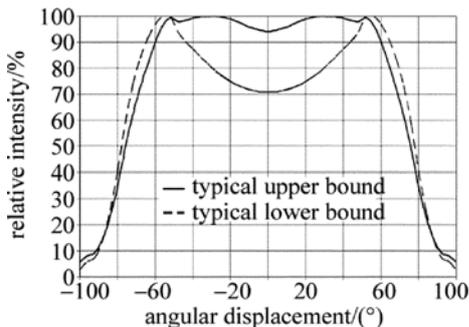


Fig. 1 Typical representative spatial radiation for green LED

因为单个 LED 无论照射距离还是光源强度在实际水下无线光通信设备中都不适用,而圆形阵列可以弥补单个 LED 的不足,本文中重点分析 6 个 LED(如图 2 所示,在半径为 R 的圆内均匀排布组成的阵列)。为了写出它的照度表达式,令其中任意一颗 LED 在 x 轴上,这样光接收面上的相对照度分布为:

$$E(x, y, z) = \sum_{i=0}^5 z \times \frac{I\left(x + R\cos\frac{2\pi i}{6}, y + R\cos\frac{2\pi i}{6}, z\right)}{\left[\left(x + R\cos\frac{2\pi i}{6}\right)^2 + \left(y + R\cos\frac{2\pi i}{6}\right)^2 + z^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

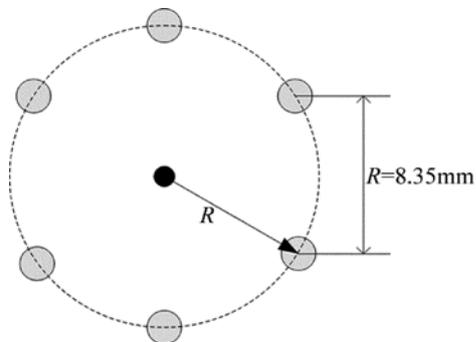


Fig. 2 6 LEDs arranged in a circle

根据(9)式,用 MATLAB 画出典型上界与典型下界分别对应 $z = 1\text{m}$, $z = 5\text{m}$, $z = 10\text{m}$ 和 $z = 20\text{m}$ 光线接收面上的相对照度 3 维分布模型,如图 3 和图 4 所示,其空间照度分布呈现对称性。

2 LED 圆形阵列光源水下空间照度分布的实验研究

以德克萨斯仪器公司的 TLC5922LED 驱动芯片为核心的驱动模块为该 LED 圆形阵列光源提供驱动电流,并在数据通信时实现对 LED 的调制,即先由数据编码模块完成加载信号的编码,以数字电平的形式送至 LED 光源及其驱动模块,再由驱动模块驱动大功率 LED 阵列发光,采用数字调制形式,驱动电路工作流程如图 5 所示。在长宽深分别为 $22\text{m} \times 5\text{m} \times 2\text{m}$ 的室内水池中进行了水下无线光通信 6 LED 圆形阵列光源水下空间照度分布实验,以水下照度计为工具,采取点阵测量法研究该光源水下空间照度分布情况,实验装置设置如图 6 所示。实验中所用照度计为上海嘉定学联仪表厂的 ZDS-10W 型水下照度计,三位半液晶显示,其使用深度为 15m ,测量范围: $0\text{lx} \sim 1999 \times 10^2\text{lx}$,共分 4 个量程,

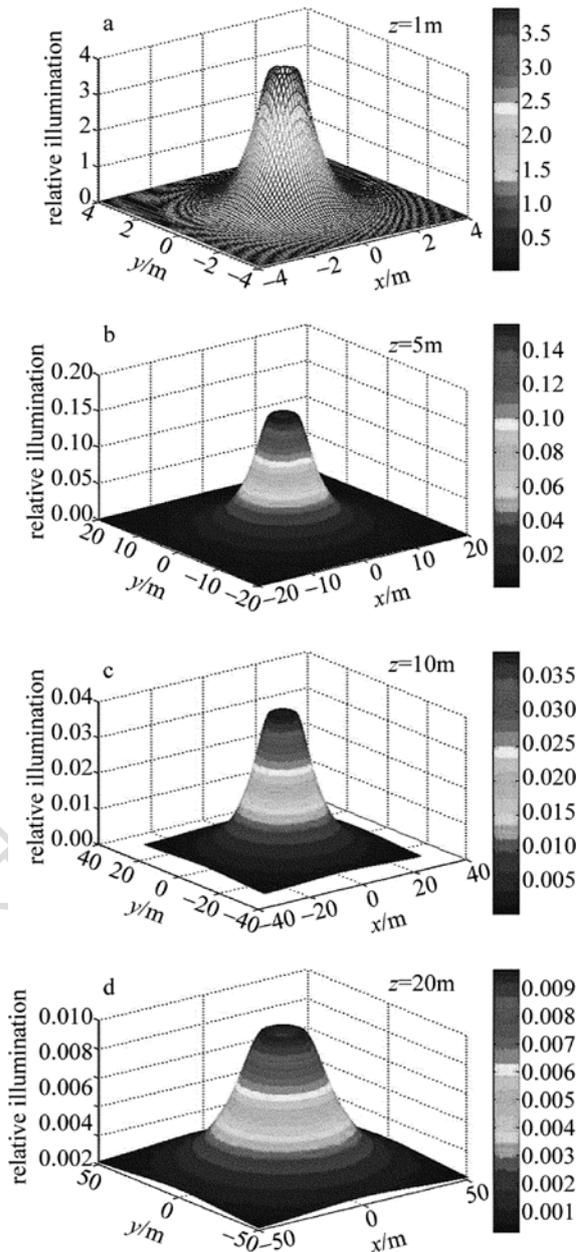


Fig. 3 3-D model of relative illumination distribution of receiving surface about typical upper bound

根据光照大小自动切换,测量精度为 $\pm 4\% \pm 1$ 个字,零点漂移为 4h 内不大于 ± 1 个字。实验时共测量 5 组数据,分别为:不加载信号直接由光源系统发光;加载 100kHz 方波信号;加载 500kHz 方波信号;加载 1MHz 方波信号;不加载信号但相对于前组数据光源顺时针旋转 90° 。标准方波信号由信号发生器产生,并由发射模块将其加载到光波上发射出去。光波经水池中的水体衰减后被水下照度计探测模块接收,直接显示出照度,每测量点多次测取数据,取平均值,以减少偶然误差。

以光源出射口中心为坐标原点 O ,与出射口等

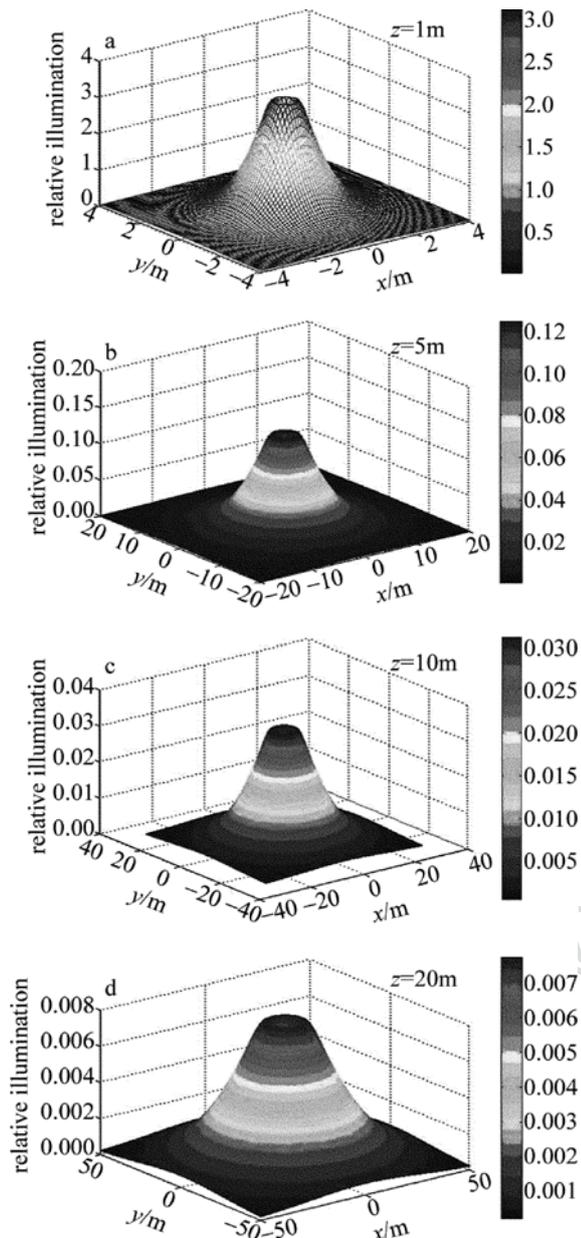


Fig. 4 3-D model of relative illumination distribution of receiving surface about typical lower bound

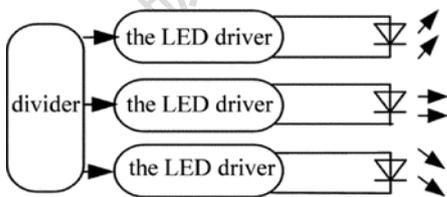


Fig. 5 Flow chart of LED drive circuit

高的水平面为 $x-O-z$ 面, 与水池短边平行的线为 x 轴, 与水池长边平行的线为 z 轴, 过原点 O 与面 $x-O-z$ 垂直的线为 y 轴, 建立空间坐标系如图 7 所示, 平面 $x-O-z$ 上各线交点即点阵的测量点, 等间距且为 0.4m , 对测量的数据进行分析。

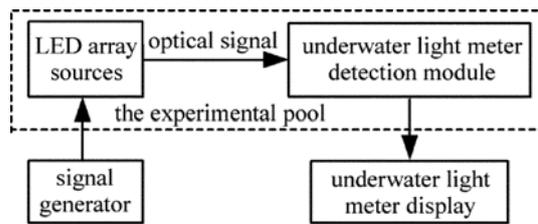


Fig. 6 Schematic diagram of experiment about underwater intensity of illumination distribution

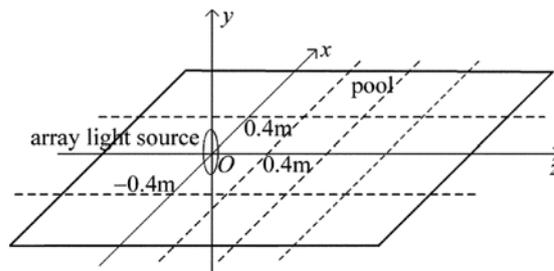


Fig. 7 Diagram of spatial coordinates

2.1 光源加载不同频率信号时在水下沿光轴的照度分布

如图 8 所示, 图中分别表示不加载信号和加载 100kHz , 500kHz , 1MHz 的方波信号时, 沿光轴方向即上述笛卡尔坐标系 z 轴正半轴向的照度的变化情况。图 8 中 4 个小图首先表明了光在水下传播时基本呈指数衰减, 到距离光源 18m 时, 照度值基本都趋于 0.5lx 或者更小, 衰减了 4000 多倍, 衰减幅度大约 80dB 左右。另外图 8b、图 8c、图 8d 中其初始照度值分别为 2700lx , 3000lx , 3650lx , 因此该光源出射端口处光照度值随着加载信号的频率增加而增加。

2.2 光源在水下其照度的空间分布

LED 圆形阵列光源在实际使用中安装了会聚透镜, 其发散角修正为 12° 。为了得到该光源在水下空间光照度分布具体情况, 进一步分析实验数据, 研究光源垂直照射面的照度分布。

图 9 中分别表示与光照射面上即 z 分别为 0.4m , 6.0m , 10.0m 和 18.0m 的平面上沿 x 轴的照度分布。因为水池的深度有限, 为了测得沿 y 轴的照度分布, 测完沿 x 轴的照度分布后, 将阵列光源顺时针旋转 90° , 即可测得图 10 中 z 分别为 0.4m , 6.0m , 10.0m , 18.0m 的光照射平面上沿 y 轴的照度分布。首先对比分析同一个 z 平面上沿 x 轴和 y 轴的照度分布, 例如 $z=0.4\text{m}$ 时, 对比图 9、图 10, x 轴和 y 轴上与光源中心即原点 O 等距处的照度值明显不等, 可以得出该光源在水下空间上的辐射能量

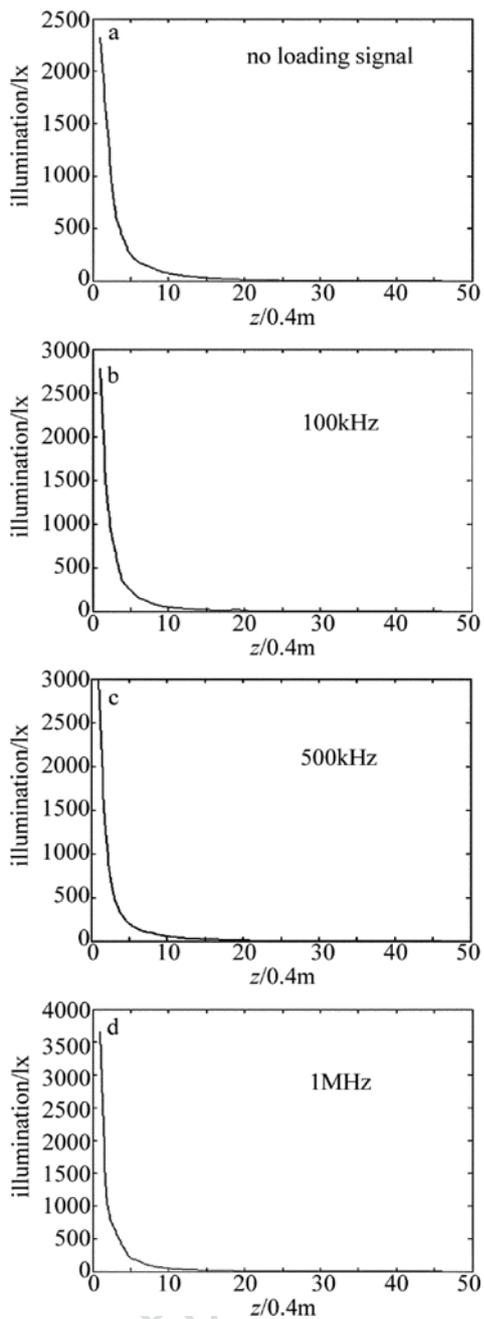


Fig. 8 Change of illumination intensity at z axis

非对称分布的结论。单独看图 9 或图 10, 因为光源存在一定发散角, 所以随着 z 值大小即沿照射面与光源中心的距离的增加, 光的辐射区域逐渐增大, 且光照射面上的光能量分布不均匀, 到 $z = 10\text{m}$ 时光接收射面上照度开始趋于均匀分布。

综上得到关于 LED 圆形阵列光源在水下空间光照度分布的 3 条结论: (1) LED 阵列光源虽然是对称的, 但水下辐射照度分布不对称, 这可能是 LED 封装、水下环境等造成的, 同时光信号在水下传播衰减极快, 在 18m 的距离内强度衰减了 80dB

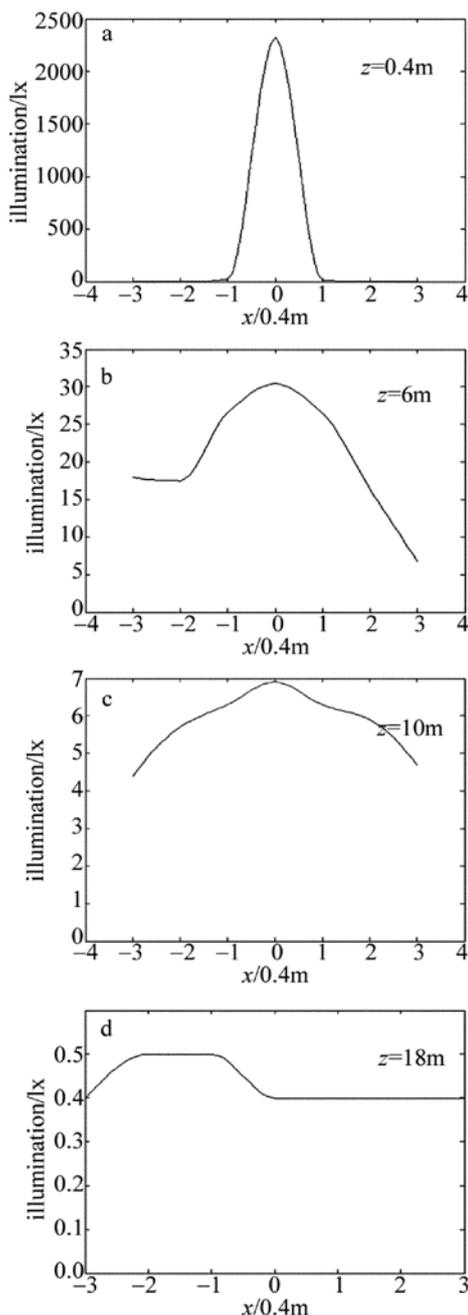


Fig. 9 Illuminance distribution in different z plane on the x axis

左右; (2) 在水体吸收和散射等影响共同的作用下, 当光信号传播到一定距离后, 在光接收平面上, 照度值是各向趋于均匀分布, 以该光源做实验得到结论为大约 10m; (3) 当光源加载不同频率的信号时, 在同样的坐标系下, 光源辐射空间内每点的照度值大小随加载信号频率的增加而增加, 这是因为随着信号频率增大, 其直流分量同时增加, 体现为照度值变大。

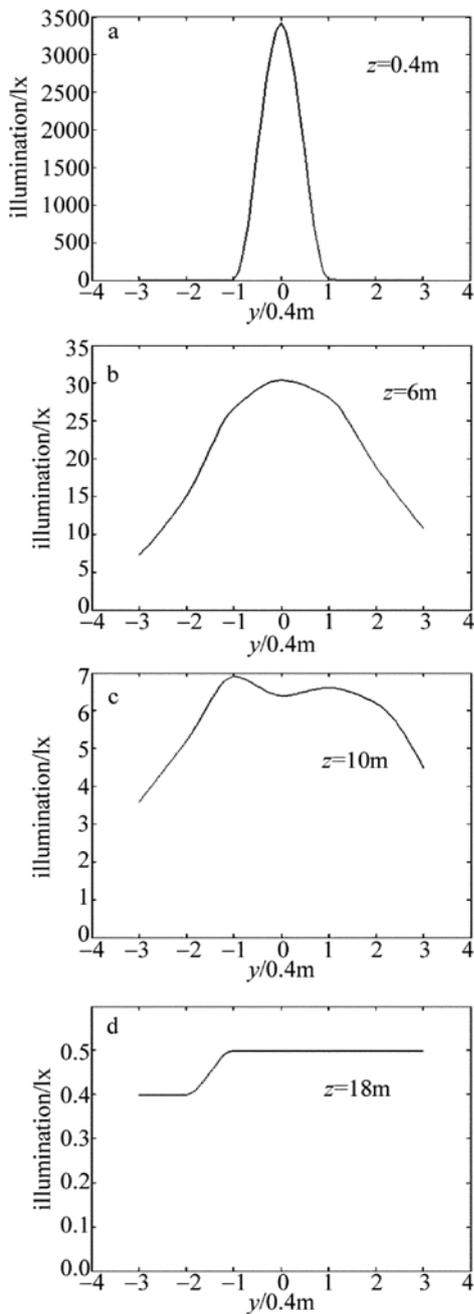


Fig. 10 Illuminance distribution on the y axis in different z plane

3 结 论

基于单个 LED 空气中照度分布模型,本文中推导出 6 个 LED 组成的圆形阵列光源的空间相对照

度分布数学模型,由仿真结果可知其在空气中空间照度分布呈对称。以水下照度计为工具,用点阵测量法研究该光源在水下的空间照度分布,由实验结果可知:光源出射端口处光照度值随着加载信号的频率增加而增加,虽然 LED 阵列光源是对称的,但水下辐射照度分布不对称;当光信号传播到一定距离后,在光接收平面上,照度值是各向趋于均匀分布;在同样的坐标体系下,光源辐射空间内每点的照度值大小随加载信号频率的增加而增加。该结论虽然只是由 6 只 K2 绿光 LED 组成的圆形阵列得出,但具有一定的代表性,对研究怎样的光源适用于水下无线 LED 光通信具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] COCHENOUR M, MULLEN L J. Optical propagation in the underwater environment [J]. *Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 33 (4): 513-521.
- [2] DENG R, RAO J H, ZHANG X H, *et al.* Convolutional code design avoiding malignant codes in underwater optical communication systems [J]. *Laser Technology*, 2011, 35 (2): 222-225 (in Chinese).
- [3] CHANCEY M A. Short range underwater optical communication links [D]. Raleigh, North Carolina, USA: North Carolina State University, 2005: 2-24.
- [4] WANG F, RAO J H. Realize variable gain amplifier in the underwater optical wireless communication system [J]. *Laser Technology*, 2012, 36 (1): 99-102 (in Chinese).
- [5] SUN Ch Y. Short range underwater visible optical communication [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008: 5-15 (in Chinese).
- [6] SUI M H. The key technology research on underwater wireless optical communication systems [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009: 11-21 (in Chinese).
- [7] CHEN Ch. Study on optical system of warship LED lamp [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2010: 10-20 (in Chinese).
- [8] TAN J J. Research on indoor MIMO visible light communication with white LED [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011: 7-30 (in Chinese).
- [9] PHILIPS LUMILEDS LIGHTING COMPANY. Technical datasheet DS51 [EB/OL]. (2009-10-02) [2013-07-30]. www.philipslumileds.com/uploads/54/DS51-pdf?
- [10] MORENO I, SUN Ch Ch. Modeling the radiation pattern of LEDs [J]. *Optics Express*, 2008, 16 (3): 1808-1819.