

海水信道下抵达光信号散射成份的比例特性分析

王伟^{1,2}, 李晓记^{1,2*}, 刘致宏³, 杜卫海^{1,2}, 高天^{1,2}

(1.桂林电子科技大学 认知无线电与信息处理教育部重点实验室,广西 桂林 541004;

2.广西信息科学实验中心,广西 桂林 541004; 3.桂林电子科技大学 海洋工程学院,广西 北海 536000)

摘要:针对海水光信道的散射效应问题,选择 Henyey-Greenstein 函数产生散射角,基于蒙特卡洛(MC)仿真方法分析了 I 类水质和 II 类水质信道下,传输距离和接收视场角(FOV)对抵达光信号散射成份的比例特性的影响。分析结果表明: I 类水质信道下,散射成份只占小于 1.2% 的比例; II 类水质信道下散射成份明显增加,此时,FOV 的取值对散射成份比例特性的影响明显;尤其在 II 类水质(港口)信道下,当传输距离大于 6.0 m 时,散射成份几乎占抵达光信号的 100%。

关键词:海水信道;抵达光信号;散射成份;比例特性;蒙特卡洛

中图分类号:TN929.1 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)04-0058-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Proportion characteristics analysis of scattering components of arriving optical signal under seawater channel

WANG Wei^{1,2}, LI Xiaoji^{1,2*}, LIU Zhihong³, DU Weihai^{1,2}, GAO Tian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing of Ministry of Education, Guilin University of Electronic Technology,

Guilin Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin Guangxi 541004, China;

3. School of Marine Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Beihai Guangxi 536000, China)

Abstract: Aiming at the scattering effects of seawater optical channel, the Henyey-Greenstein function is selected to generate the scattering angle. Based on the Monte Carlo (MC) simulation method, the effects of transmission distance and field of view (FOV) on the proportion of scattering components of arriving optical signal under case I seawater and case II seawater channels are analyzed successively. The results show that the proportion of scattering components of arrival optical signal under case I seawater is less than 1.2%. The scattering components is significantly increased under case II seawater channels, and the value of FOV has an obvious effect on the proportion characteristics of scattering components. Especially for the case II seawater (harbor) channels, the proportion of scattering components is approaching to 100% when the transmission distance is longer than 6.0 m.

Key words: seawater channel; arrival optical signal; scattering components; proportional characteristics; Monte Carlo

0 引言

海洋占地球面积的 70% 以上,蕴藏着极其丰富的

收稿日期:2019-09-20。

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:61761014)资助;广西信息科学实验中心项目(编号:PT1604)资助;广西研究生教育创新计划项目(编号:YCSW2019152)资助;桂林电子科技大学研究生优秀学位论文培育项目(编号:17YJPYSS38)资助。

作者简介:王伟(1990—),湖南湘乡人,男,硕士研究生,主要研究方向为水下无线光通信。现就读于桂林电子科技大学,参与国家自然科学基金项目 1 项,其它科研项目 1 项,主持广西研究生教育创新计划项目 1 项,学位论文获桂林电子科技大学研究生优秀学位论文培育项目资助,参加国际学术会议 1 次,以第一作者身份发表论文 3 篇。

*通信作者:李晓记(E-mail: 46941917@qq.com)。



自然资源,随着人类加快了探索海洋的脚步,对于可靠、高速和安全的水下信息传输提出了新的需求。然而,水声通信传输带宽有限,无线电波在海水中传播时衰减过快,均难以满足上述需求。现有研究已经证明蓝绿波段的可见光在海水环境下传播损耗较低,适宜用于水下短距离高速信息传输^[1-3]。蒙特卡洛(MC)仿真方法是研究散射媒介中光波辐射传输方程的通用方法,也常用来追踪光子的传播轨迹。相对于实验方法,它在灵活调整光信号的各种参数和统计大量的光子或光子包的基础上,全面准确地揭示水下光信道的散射特征^[4-7]。

文献[4-19]主要集中报道了水下光信号的时域、空间和总衰减特性等方面的研究情况,为分析散射海

水信道中激光信号抵达接收平面时的空时分布特性提供了一定的理论参考。然而,由于海水光信道的散射特性,抵达光信号一定会包含一部分被散射一次以上的光子,该部分光子即为抵达光信号的散射成份,其对抵达光信号特性的影响非常重大。另一方面,检测器接收视场角(FOV)应与散射光子的到达角相匹配。根据文献[20]的海水分类标准,开阔海域可定为Ⅰ类水质,沿岸和港口水域可定为Ⅱ类水质。因此,本文基于上述分类,研究水质类型、传输距离和FOV对海水信道下抵达光信号散射成份的比例特性产生的影响,为应用于水下光通信系统的光电检测接收设备FOV的设计与研究提供数据参考。

1 MC 仿真方法

采用MC仿真方法模拟海水中光子的传播轨迹时,需要确定6个关键参量,即光子的初始发射坐标 (x_0, y_0, z_0) 、极角 θ_0 和方位角 φ_0 ,每次散射的步长 d 、散射角 θ_s 和散射方位角 φ_s 。本文根据文献[10]所述的方法确定 (x_0, y_0, z_0) 、 θ_0 、 φ_0 、 d 和 φ_s 。

不同于大气信道,水下光链路中含有大量悬浮粒子,如叶绿素、溶解盐、矿物质和溶解有机物等,这些会引起光的吸收与散射,尤其在海岸和港口海水中,散射系数占衰减系数的主要部分。散射相函数被用来表征光子在水下传播时的角向能量分布,其中,Henyey-Greenstein(HG)函数与实际海水散射相位的匹配度较高,且其反函数具有解析表达式。因此,本文选择HG函数计算光子的散射角,其表达式如式(1)所示:

$$\beta(\theta_s) = \frac{1-g^2}{4\pi(1+g^2-2g\cos\theta_s)^{-3/2}} \quad (1)$$

其中, g 为非对称因子。由于 $\beta(\theta_s)$ 的反函数具有如式(2)所示的解析式,因此,本文使用其反函数的解析式直接计算散射角。

$$\theta_s = \arccos \left[\frac{1}{2g} \left[1+g^2 - \left(\frac{1-g^2}{1-g+2g\xi} \right)^2 \right] \right] \quad (2)$$

其中, ξ 为 $[0,1]$ 内均匀分布的随机数。

光子的初始方向向量 $(\mu_{x0}, \mu_{y0}, \mu_{z0})$ 、每次散射的方向向量 $(\mu'_x, \mu'_y, \mu'_z)^{[2]}$ 的计算分别根据文献[10]中式(6)、式(11)和式(12)确定。

设传输距离(收发直线距离)为 Z_0 ,式(3)成立是判定光子抵达接收平面的条件,然而光子的每一次散射的散射步长在光轴上投影的矢量之和 L_z 并不总是等于 Z_0 。光子抵达接收平面的位置关系示意图如图1

所示。 ΔL 为光子 M 次散射步长之和减去光子实际传播距离, $(x_{M-1}, y_{M-1}, z_{M-1})$ 为光子抵达接收平面(即 xOy 平面)之前的坐标, (x_M, y_M, z_M) 为光子抵达接收平面的坐标。但是,当 $L_z > Z_0$ 时,根据MC仿真方法求得的光子坐标通常为 (x'_M, y'_M, z'_M) 。因此,需要对光子的抵达坐标进行修正,即需要修正图1所示 ΔL 造成的坐标计算偏差,具体如式(4)、式(5)所示:

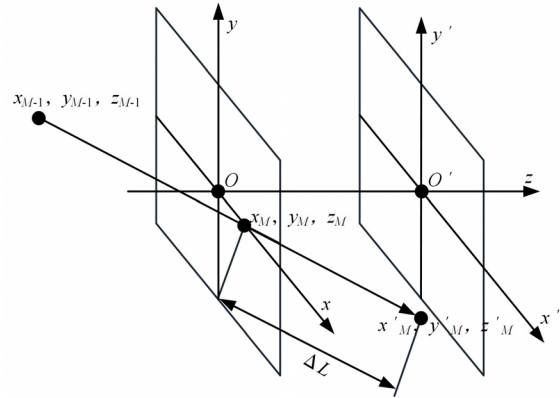


图1 光子抵达接收平面的位置关系示意图

$$L_z = z_0 + \sum_{i=1}^M \mu'_{zi} d_i \geq Z_0 \quad (3)$$

$$\Delta L = (L_z - Z_0) / \mu'_{zM} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_M = x_0 + \sum_{i=1}^M \mu'_{xi} d_i - \Delta L \mu'_{xM} \\ y_M = y_0 + \sum_{i=1}^M \mu'_{yi} d_i - \Delta L \mu'_{yM} \\ z_M = z_0 + Z_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, M 为光子传播过程中所经历的散射次数, μ'_{zM} 为光子抵达接收平面时沿 z 方向的方向余弦分量, (x_0, y_0, z_0) 为光子在光源处发射位置, $(\mu'_{xi}, \mu'_{yi}, \mu'_{zi})$ 为第 i 次散射后光子的单位方向向量, d_i 为第 i 次散射的步长。

当光子抵达接收面或其阈值低于设定值时,判定光子终止或湮灭。设接收平面为正方形,以平面的中心为原点建立 xyz 三维坐标系。其中, z 轴为光信号的光轴,平面的半径长度为 R_{PD} ,FOV为 Ψ_R ,当抵达接收面的光子坐标落在接收平面以内且到达角(与 z 轴的夹角)在 $|\Psi_R/2|$ 以内,则认为光子被接收。

2 仿真结果分析

海水信道下抵达光信号的成份分为散射成份和非散射成份,前者是指在传播过程中光子至少被散射一次以上而抵达接收平面的光信号强度,后者是指光

王伟,李晓记,刘致宏,等:海水信道下抵达光信号散射成份的比例特性分析

子发射以后,直接抵达接收平面光信号强度。设 I_s 为散射成份的强度, I_0 为非散射成份的强度,则散射成份比例 P_s 可定义为:

$$P_s = \frac{I_s}{I_s + I_0} \quad (6)$$

根据 MC 仿真方法基本原理及上述 P_s 的定义,本文分析了水质类型、传输距离和 FOV 对海水信道下抵达光信号的散射成份比例特性造成的影响。设光源分布为高斯分布,波长为 532 nm,波束束腰为 5×10^{-3} m,发散角为 10 mrad,光子在水下的传输速度为 $0.75 \times 2.9979 \times 10^8$ m/s^[10],仿真光子数为 5×10^7 ,散射相函数为 HG 函数,非对称因子 $g=0.924$,光子湮灭阈值为 10^{-10} 。信道的吸收系数 a 、散射系数 b 和衰减系数 c 等参数如表 1 所示^[5]。

表 1 海水信道参数配置

信道参数	参数数值			
	I (纯净)	I (清洁)	II (沿岸)	II (港口)
a/m^{-1}	0.053	0.069	0.088	0.295
b/m^{-1}	0.003	0.08	0.216	1.875
c/m^{-1}	0.056	0.15	0.305	2.170
Z_0/m	0~70	0~50	0~30	0~10

I 类水质(纯净)信道下 P_s 与 Z_0 关系曲线图如图 2 所示,描述了 0~70 m I 类水质(纯净)信道下 $\text{FOV}=6^\circ$ 、 3° 、 2° 和 1° 时的 P_s 与 Z_0 关系曲线。表 2 给出了相应曲线的 Z_0 主要节点处 P_s 的数据。从图 2 和表 2 可以看出 I 类水质(纯净)信道下, $Z_0 < 70$ m 时 P_s 的值极小,即小于 0.4%。

I 类水质(清洁)信道下 P_s 与 Z_0 关系曲线图如图 3 所示,描述了 0~50 m I 类水质(清洁)信道下 $\text{FOV}=12^\circ$ 、 6° 、 3° 和 2° 时的 P_s 与 Z_0 关系曲线。表 3 给出了相应曲线的 Z_0 主要节点处 P_s 的数据。从图 3 和表 3

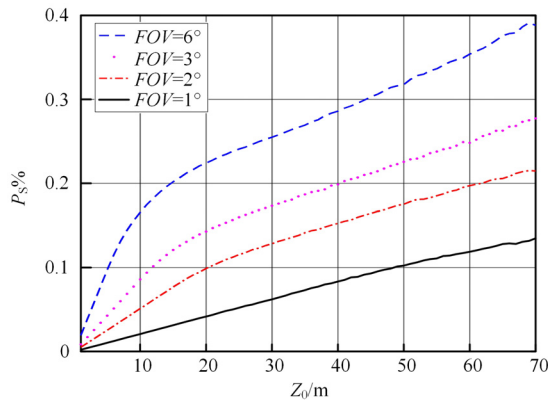


图 2 I 类水质(纯净)信道下 P_s 与 Z_0 关系曲线图

表 2 I 类水质(纯净)信道 $P_s\%$

Z_0/m	$P_s\%$			
	$\text{FOV}=6^\circ$	$\text{FOV}=3^\circ$	$\text{FOV}=2^\circ$	$\text{FOV}=1^\circ$
1	0.020	0.009	0.005	0.002
10	0.167	0.086	0.051	0.021
20	0.224	0.143	0.099	0.042
30	0.255	0.173	0.128	0.062
40	0.286	0.199	0.152	0.083
50	0.317	0.256	0.175	0.102
60	0.354	0.248	0.197	0.119
70	0.388	0.277	0.245	0.135

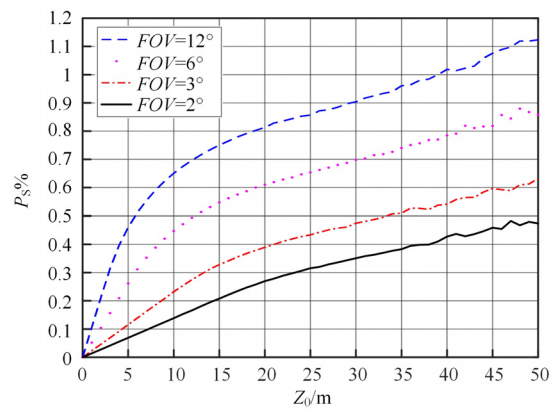


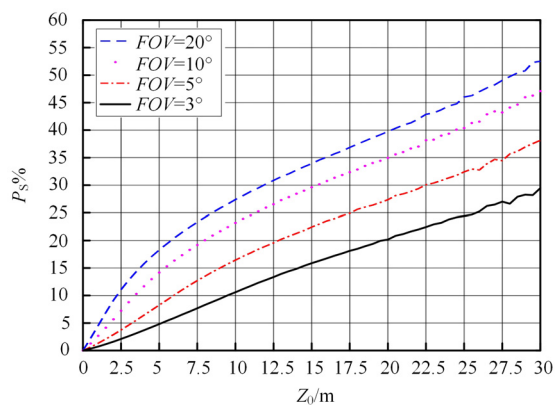
图 3 I 类水质(清洁)信道下 P_s 与 Z_0 关系曲线图

表 3 I 类水质(清洁)信道 $P_s\%$

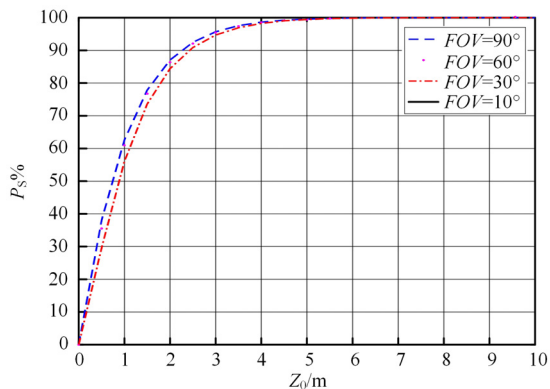
Z_0/m	$P_s\%$			
	$\text{FOV}=12^\circ$	$\text{FOV}=6^\circ$	$\text{FOV}=3^\circ$	$\text{FOV}=2^\circ$
1	0.105	0.052	0.023	0.014
10	0.651	0.447	0.232	0.138
20	0.813	0.610	0.389	0.270
30	0.904	0.698	0.475	0.351
40	1.013	0.785	0.541	0.428
50	1.124	0.859	0.632	0.474

可以看出 I 类水质(清洁)信道下, $Z_0 < 50$ m 时 P_s 的值仍然非常小,即小于 1.2%。

II 类水质(沿岸)信道下 P_s 与 Z_0 关系曲线图如图 4 所示,描述了 0~30 m II 类水质(沿岸)信道下 $\text{FOV}=20^\circ$ 、 10° 、 5° 和 3° 时的 P_s 与 Z_0 关系曲线。表 4 给出了相应曲线的 Z_0 主要节点处 P_s 的数据。从图 4 和表 4 可以看出 II 类水质(沿岸)信道下,随着 Z_0 的增加, P_s 的取值迅速增加,最终超过了 30%,这主要是因为 II 类

图4 II类水质(沿岸)信道下 P_s 与 Z_0 关系曲线图表4 II类水质(沿岸)信道 $P_s\%$

Z_0/m	$P_s\%$			
	$FOV=20^\circ$	$FOV=10^\circ$	$FOV=5^\circ$	$FOV=3^\circ$
1	4.555	2.673	1.132	0.729
5	18.275	14.175	8.265	4.799
10	27.389	23.190	16.435	10.594
15	33.904	29.621	22.431	15.874
20	39.765	34.946	27.357	20.170
25	46.021	40.382	32.418	24.431
30	52.532	47.095	38.149	29.464

图5 II类水质(港口)信道下 P_s 与 Z_0 关系曲线图

水质(沿岸)中的悬浮颗粒物的浓度明显增大,加剧了海水光信道的散射效应。

II类水质(港口)信道下 P_s 与 Z_0 关系曲线图如图5所示,描述了0~10 m II类水质(港口)信道下 $FOV=90^\circ$ 、 60° 、 30° 和 10° 时的 P_s 与 Z_0 关系曲线。表5给出了相应曲线的 Z_0 主要节点处 P_s 的数据。从图5和表5可以看出II类水质(港口)信道下, $Z_0 < 10$ m时,随着 Z_0 的增加, P_s 的取值急剧增加,最终均趋近或等于

表5 II类水质(港口)信道 $P_s\%$

Z_0/m	$P_s\%$			
	$FOV=90^\circ$	$FOV=60^\circ$	$FOV=30^\circ$	$FOV=10^\circ$
1	62.581	60.978	56.023	40.612
2	87.052	86.363	84.416	75.933
3	95.684	95.441	94.688	91.486
4	98.641	98.534	98.242	97.188
5	99.556	99.379	99.439	99.157
6	99.886	99.848	99.846	99.774
7	99.975	99.959	99.933	99.943
8	99.994	99.988	99.977	99.962
9	99.988	100.000	100.000	100.000
10	100.000	100.000	100.000	100.000

100%,主要原因是II类水质(港口)信道中悬浮颗粒物浓度急剧增大,严重加剧了海水光信道的散射效应。当 $Z_0 > 6.0$ m时,光子不经散射而抵达接收平面的概率几乎为0。除此之外,还可以观察到 $FOV=90^\circ$ 和 60° 的曲线几乎一致,这表示抵达光信号散射成份的到达角主要集中在 30° 以内。

根据图2~图5和表2~表5及上述分析,可以观察到I类、II类水质信道及各FOV取值下,海水信道下抵达光信号的 P_s 关于 Z_0 的曲线变化趋势总体上都呈现出先以较大的斜率增长,当 Z_0 增大到一定时曲线递增趋势变缓的规律。这是由于当 Z_0 较小时, I_s 随着 Z_0 递增;当 Z_0 增大到一定程度时, I_s 随着 Z_0 递减。由于 Z_0 增大必然会导致光信号被散射的概率增大,从而导致 I_0 随 Z_0 递减。因此,当 I_s 递增时, P_s 以较大斜率增长;当 I_s 递减时,由于 I_0 递减的趋势更明显,所以 P_s 的递增趋势变缓,最终趋近于100%。

3 结束语

本文选择HG函数产生散射角,基于MC仿真方法分析了I类水质和II类水质信道下,传输距离和FOV对抵达光信号散射成份的比例特性的影响。研究发现:当 Z_0 较小时,散射海水信道下抵达光信号的 P_s 均以较大的斜率增长,随着传输距离的增大, P_s 的增长斜率变缓;I类水质信道下, P_s 只占小于1.2%的比例,此时,水下无线光通信系统的光电检测接收器件的设计可忽略FOV的取值;II类水质信道下, P_s 明显

王伟,李晓记,刘致宏,等:海水信道下抵达光信号散射成份的比例特性分析

增加,尤其在Ⅱ类水质(港口)信道下,当 $Z_0 > 6.0$ m时,各FOV取值下抵达光信号的 P_s 几乎占100%,此时,信道损耗十分明显,在最优接收信噪比条件下,设计光电检测接收器件时应尽可能扩大FOV。综上所述,本文的相关研究可为应用于水下无线光通信系统的光电检测接收器件FOV的设计与研究提供技术参考。

参考文献:

- [1] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater Optical Wireless Communication [J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518–1547.
- [2] WILLNER A E, ZHAO Zhe, REN Yongxiong, et al. Underwater Optical Communications using Orbital Angular Momentum-based Spatial Division Multiplexing [J]. Optics Communications, 2018, 408: 21–25.
- [3] ZENG Z, ZHANG H, DONG Y, et al. A Survey of Underwater Wireless Optical Communication [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 204–238.
- [4] LI J, MA Y, ZHOU Q Q, et al. Channel Capacity Study of Underwater Wireless Optical Communications Links based on Monte Carlo Simulation [J]. Journal of Optics, 2012, 14(1): 015403-1–015403-7.
- [5] GABRIEL C, MOHAMMAD A K, SALAH B, et al. Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(1): 1–12.
- [6] COX W, MUTH J. Simulating Channel Losses in an Underwater Optical Communication System [J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, 2014, 31(5): 920–934.
- [7] DALGEISH F R, CAIMI F M, VUORENKOSKI A K, et al. Efficient Laser Pulse Dispersion Codes for Turbid Undersea Imaging and Communications Applications [C]//2010 Ocean Sensing and Monitoring II, Apr. 20, 2010, Orlando, USA. Orlando: SPIE, 2010: 1–12.
- [8] HALTRIN V. Chlorophyll-based Model of Seawater Optical Properties [J]. Applied Optics, 1999, 38(33): 6826–6832.
- [9] LIU W, ZOU D, WANG P, et al. Wavelength Dependent Channel Characterization for Underwater Optical Wireless Communications [C]//2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Aug 5–8, 2014, Guilin, China. Guilin: IEEE, 2014: 1–5.
- [10] HUANG A, TAO L. Monte Carlo Based Channel Characteristics for Underwater Optical Wireless Communications [J]. IEICE Transactions on Communications, 2017, E100-B(4): 612–618.
- [11] 关云静,贺锋涛,杨伟,等.基于蒙特卡罗海洋水下激光通信信道特性分析[J].光通信技术,2016,40(12):52–54.
- [12] 王菲,阴亚芳,杨伟.海水信道激光传输距离对接收功率的影响分析[J].光通信研究,2017(2):23–26.
- [13] QADAR R, KASI M K, AYUB S, et al. Monte Carlo-based Channel Estimation and Performance Evaluation for UWOC Links under Geometric Losses [J]. International Journal of Communication Systems, 2018, 31(6): e3527: 1–18.
- [14] 贺锋涛,王敏,杨伟.激光光束在海水中的空间传输特性分析[J].激光与红外,2018,48(11):1346–1351.
- [15] DONG F, XU L, JIANG D, et al. Monte-Carlo-Based Impulse Response Modeling for Underwater Wireless Optical Communication [J]. Progress in Electromagnetic Research M, 2017, 54: 137–144.
- [16] JASMAN F, ZAITON A M, AHMAD Z, et al. Scattering Regimes for Underwater Optical Wireless Communications using Monte Carlo Simulation [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2018, 8(4): 2571–2577.
- [17] QUANG V S, 冯鹏,汤斌,等.基于米氏散射理论的水中悬浮颗粒物散射特性计算[J].激光与光电子学进展,2015,52(1):231–238.
- [18] 魏巍,张晓晖,饶炯辉,等.水下无线光通信接收光功率的计算研究[J].中国激光,2011,38(9):103–108.
- [19] ZHANG H, DONG Y. General Stochastic Channel Model and Performance Evaluation for Underwater Wireless Optical Links [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1162–1173.
- [20] 李景镇.光学手册(下)[M].西安:陕西科学技术出版社,2010.
- [21] COX W. Simulation, Modeling, and Design of Underwater Optical Communication Systems [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.

新书推荐

《高速可见光通信关键技术》是国家重点研发计划项目“可见光通信关键技术及系统研发”研究团队的集体成果,是国之重器出版工程系列书之一。作者迟楠是该领域的知名专家,多次得到中央电视台、凤凰台和英国BBC等媒体的报道。

该书主要介绍了基于LED的高速可见光通信的技术原理。首先,给出了可见光通信的基本概念,对其发展历史进行了追溯,同时对其研究趋势进行了展望;其次,分别从高速可见光的系统结构、信道建模、调制技术、均衡技术和编码技术、复用技术和新材料技术等方面具体介绍了实现高速可见光通信所采用的先进技术和关键算法;接着,介绍了高速VLC通信系统实验,给出了本研究团队基于本书介绍的技术理论基础之上的实验成果;最后,对高速可见光通信技术的未来进行了展望。

本书适合从事通信领域尤其是可见光通信研究的工程技术人员,以及高等院校通信工程等相关专业的研究生和教师阅读。

