

水下激光通信最大比合并分集接收性能分析及仿真

胡思奇^{1,2} 周田华^{1*} 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 受海水吸收和散射的影响,长距离水下通信时信号幅度下降,信噪比(SNR)降低,最终导致水下激光通信系统的误码率(BER)提升,最远通信距离受限。为此,提出将最大比合并(MRC)分集接收技术应用于水下激光通信系统。分析和研究了在水体吸收和散射的综合作用下,MRC空间分集接收技术相对于等增益合并(EGC)空间分集接收技术对水下激光通信系统接收器性能的改善。推导了MRC加权系数分配方式,分析了接收支路数目与系统BER性能的关系,采用蒙特卡罗法对波长为532 nm的绿光在IB型水质下100 m处六路分集接收器中MRC相对于EGC的性能改善进行了仿真,并仿真了在Jerlov IB和II类水质下两种分集合并技术BER随通信距离的变化。由理论分析和仿真结果可知,MRC可以根据各路接收SNR情况更合理地分配加权系数,达到合并后的最佳SNR。在同等BER要求下,MRC可以提高水下激光通信的最远传输距离,在同等传输距离下,MRC可以降低通信系统的BER,为水下长距离激光通信系统的工程化提供了一种解决方案。

关键词 光通信; 水下激光通信; 最大比合并分集接收; 蒙特卡罗法

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1206003

Performance Analysis and Simulation of Maximum Ratio Combining in Underwater Laser Communication

Hu Siqu^{1,2} Zhou Tianhua¹ Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Due to the influence of absorption and scattering of seawater, the amplitude of received signal reduces and the signal-to-noise ratio (SNR) reduces during long distance underwater communications, which leads to the bit error rate (BER) of underwater laser communication systems rise, and eventually limits the distance of communication. For this reason, the maximum ratio combining (MRC) diversity reception technology applied in the underwater laser communication system is put forward. The improvement of MRC spatial diversity reception technology compared with the equal gain combining (EGC) spatial diversity reception technology is analyzed under the influence of absorption and scattering of water. Weighting coefficient distribution of MRC is deduced. The relationship between receiver number and system BER performance is analyzed. Monte Carlo method is used to simulate the performance improvement of MRC based on 532 nm laser at transmission distance of 100 m in Jerlov IB water with six receivers. In the IB and II type water, the relationship between BER and transmission distance is given for MRC and EGC. The theoretical analysis and simulation results show that MRC can distribute gain coefficients more reasonably according to SNR in each receiving branch, to achieve the optimal SNR. Under the requirement of same BER, MRC can realize the longest transmission distance of underwater laser communication. Under the requirement of same transmission distance, MRC can reduce BER of communication system. An

收稿日期: 2016-08-01; 收到修改稿日期: 2016-09-03

基金项目: 国家 863 计划(2014AA093301)、中国科学院国防创新基金

作者简介: 胡思奇(1991—),男,博士研究生,主要从事水下激光通信方面的研究。E-mail: siqihu@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—),男,博士,研究员,主要从事空间激光方面的研究。E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: siomzth@siom.ac.cn

engineering solution for long distance underwater laser communication system is provided.

Key words optical communications; underwater laser communication; maximum ratio combining; Monte Carlo method

OCIS codes 060.4510; 220.4830; 010.3310; 010.4450

1 引 言

近年来,水下激光通信由于其通信速率高、保密性好、带宽高等优点,被广泛应用于水下航行器之间的通信,空中飞行器与水下移动平台之间的通信^[1-3]。长距离水下激光通信所面临的关键问题是激光信号在水体中传输时容易受到水体散射和吸收的影响,随着传输距离的增加,激光能量下降,从而导致接收端信噪比(SNR)降低,进而影响通信的稳定性^[4-5]。在这种情况下,为了延长激光信号的传输距离,降低误码率(BER),一方面在发射端激光器采用海水传输窗口的蓝绿波段激光,并且配合脉冲位置调制(PPM)的调制方式提高激光的峰值功率^[6];另一方面则是提高接收端的灵敏度^[7]。为了提高接收端的灵敏度,本文将最大比合并(MRC)分集接收技术应用于水下通信系统,理论推导了 MRC 加权系数的分配方式,分析了接收支路数目与系统误码率性能之间的关系。本文采用蒙特卡罗法对波长为 532 nm 的绿光在 IB 类水质下 100 m 处六路分集接收中 MRC 相对于等增益合并(EGC)的性能改善进行了仿真,分析了在 IB 和 II 类水质下 MRC 分集合并技术与 EGC 分集合并技术 BER 随通信距离增加的差异,目的在于改善水下激光通信系统接收端的灵敏度,增强系统稳定性,从而提高水下激光通信距离,降低误码率。

2 空间分集接收理论及系统模型

2.1 系统模型

分集合并技术是将接收端携带同一信息的多个相互独立的信号副本进行特定合并处理的技术,接收系统配置多个光电探测器,通过将每个光电探测器接收的信号副本进行特定的合并处理来获得分集增益,从而达到改善系统性能的目的^[8]。水下激光通信分集接收系统如图 1 所示。激光器发送经过编码、调制后的 PPM 信号,激光信号经过水体的散射和吸收后到达接收器,被不同的光电倍增管接收并转化为电信号供高速模数转换器(ADC)采集,采集到的各路电信号再传给控制电路板,电路板按照不同的加权系数将各路信号进行合并,合并后的信号再进行解调、译码后传送给上位机^[9]。

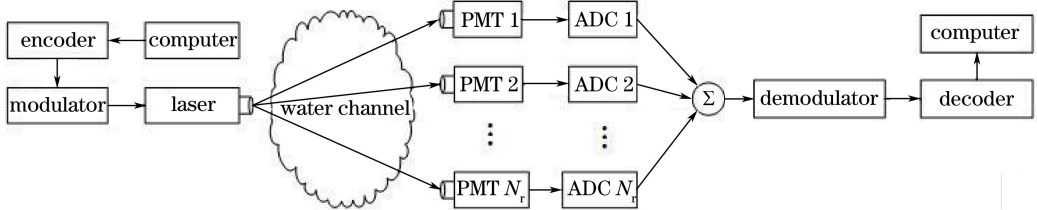


图 1 水下激光通信分集接收系统示意图

Fig. 1 Schematic of underwater laser communication diversity reception system

2.2 MRC 加权系数分配方式

水下通信设备的噪声满足高斯分布,对于 N_r 路接收,将每路信号处的采样均值记为 a_n ,非信号位置的采样均值记为 b_n ,标准差记为 δ_n ,加权系数记为 x_n ,则信噪比 R 可以表达为

$$R = \frac{\sum_{n=1}^{N_r} x_n (a_n - b_n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2}} \quad (1)$$

分集接收是利用各路噪声相互独立的特点,根据中心极限定理分开接收后再合并来提高信噪比^[1]。等增益合并是按各路加权系数相等进行合并,即 $x_1 = 1, x_2 = 1, \dots, x_{N_r} = 1$ 。当各路信噪比相同时,等增益合并可以将信噪比提高 $\sqrt{N_r}$ 倍^[10-11]。在水下激光通信的实际应用中,由于发射端与接收端存在对准偏差,各路光电探测器摆放位置不相同,器件灵敏度也存在差异,加之接收到的光信号路径不相同,探测器噪声也不相同,从

而造成各路接收信噪比不相同。在这种情况下,按照等增益合并来分配加权系数不是最佳的加权系数分配方式^[12]。为使信噪比得到最高的增益,应寻找最佳加权系数 x_1, x_2, \dots, x_{N_r} , 使合并后的信噪比达到最大值。

将信噪比 R 视为关于 x_1, x_2, \dots, x_{N_r} 的多元函数,则在信噪比最大处对任意 x_j 有

$$\frac{\partial R}{\partial x_i} = \frac{(a_i - b_i) \sqrt{\sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2} - \frac{\delta_i^2 x_i \sum_{n=1}^{N_r} x_n (a_n - b_n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2}}}{\sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2} = 0, \quad (2)$$

$$(a_i - b_i) \sqrt{\sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2} - \frac{\delta_i^2 x_i \sum_{n=1}^{N_r} x_n (a_n - b_n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2}} = 0, \quad (3)$$

$$(a_i - b_i) \sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2 - \delta_i^2 x_i \sum_{n=1}^{N_r} x_n (a_n - b_n) = 0. \quad (4)$$

同理对 x_j 求偏导

$$(a_j - b_j) \sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2 - \delta_j^2 x_j \sum_{n=1}^{N_r} x_n (a_n - b_n) = 0. \quad (5)$$

由(4)式乘以 $\delta_j^2 x_j$ 减去(5)式乘以 $\delta_i^2 x_i$ 可得

$$(a_i - b_i) \delta_j^2 x_j \sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2 - (a_j - b_j) \delta_i^2 x_i \sum_{n=1}^{N_r} (x_n \delta_n)^2 = 0, \quad \frac{x_i}{x_j} = \frac{(a_i - b_i) \delta_i^2}{(a_j - b_j) \delta_j^2}. \quad (6)$$

将(6)式代入(1)式可得 MRC 的信噪比为

$$R = \frac{\sum_{n=1}^{N_r} \frac{(a_n - b_n)^2}{\delta_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_r} \frac{(a_n - b_n)^2}{\delta_n^2}}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_r} R_n^2}. \quad (7)$$

从以上分析可得,按照(6)式,各路加权系数按各路的信号幅度与噪声功率之比进行分配,能使合并后的信噪比达到最大值。

2.3 MRC 性能分析

以四路分集接收为例,在 PPM 调制方式下对 EGC 与 MRC 的性能作分析对比。分析条件为四路噪声相互独立且满足 $X \sim N(0, 10^2)$, 其中 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 表示期望为 μ 、标准差为 σ 的高斯分布。四路信号幅度分别按照 $\mu_1 = i^{1.1}$ 、 $\mu_2 = i^{1.2}$ 、 $\mu_3 = i^{1.3}$ 和 $\mu_4 = i^{1.4}$ 递增,其中 i 从 0 到 20 递增,通信系统误码率要求小于 10^{-5} 。对比结果如图 2 所示,从图中可以看出,EGC 需要单路平均信噪比达到 12.55 dB,而 MRC 要求单路平均信噪比为 11.73 dB。采用 MRC 可以在同等通信系统误码率指标下降低对单路平均信噪比的要求。

随着分集接收路数的增加,合并后的误码率性能会提升,但同时也会造成接收系统的成本增加。在 PPM 调制方式下,对不同数目接收器条件下的最大比合并性能作分析对比。分析条件为各路噪声相互独立且满足 $X \sim N(0, 10^2)$, 各路信号幅度分别按照 $\mu_1 = i^{1.1}$ 、 $\mu_2 = i^{1.2}$ 、 $\mu_3 = i^{1.3}$ 、 $\mu_4 = i^{1.4}$ 、 $\mu_5 = i^{1.5}$ 、 $\mu_6 = i^{1.6}$ 、 $\mu_7 = i^{1.7}$ 和 $\mu_8 = i^{1.8}$ 递增,其中 i 从 0 到 20 递增,通信系统误码率要求小于 10^{-5} 。图 3 给出了不同数量接收器下 MRC 的误码率性能比较。从图中可以看出, $N = 2$ 时需要单路平均信噪比达到 13.09 dB, $N = 3$ 时需要 12.41 dB, $N = 4$ 时需要 11.73 dB, $N = 5$ 时需要 11.25 dB, $N = 6$ 时需要 10.97 dB, $N = 7$ 时需要 10.71 dB, $N = 8$ 时需要 10.5 dB。可见随着接收器数目的增加,合并后所需的单路平均信噪比逐渐降低,但是合并后性

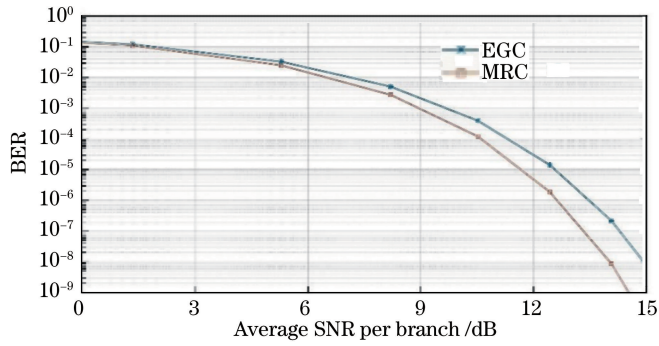


图 2 EGC 与 MRC 误码率对比

Fig. 2 Comparison of bit error rate between EGC and MRC

能的改善效果逐渐减小,当 $N > 6$ 时,误码率性能的提升已不再明显。从合并后性能的提升以及系统设计成本及复杂度考虑,以六路合并作为水下通信系统的最优方案。

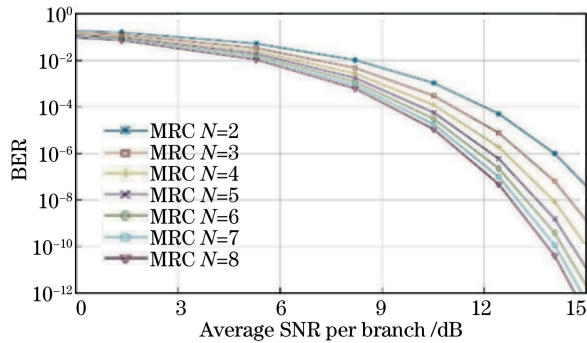


图 3 不同接收器数量下 MRC 的误码率性能比较

Fig. 3 Bit error rate performance of MRC for different receiver numbers

3 水下信道蒙特卡罗仿真

3.1 仿真模型

海水对激光具有吸收和散射作用,这会造成远场激光空间分布展宽,不同位置的探测器接收的信号会有差异,因而采用最大比合并分集接收技术能够提高合并后的信噪比。本文采用蒙特卡罗法仿真激光水下传输后的特性。蒙特卡罗法用统计量来描述光子传输的规律,包括光子在两次散射点之间的运动距离的几率分布,散射发生时光子偏转角的几率分布,通过模拟大量光子在介质中的传输轨迹,可以得到辐射能量在介质中的传输过程和分布状况^[13]。

蒙特卡罗法仿真时所需的参数主要分为激光脉冲参数、信道参数和接收条件三类。激光脉冲参数主要包括波长、单脉冲能量、光斑大小、远场发散角和初始脉冲宽度。考虑到技术条件和结果的通用性,将激光波长 λ 设定为 532 nm,单脉冲能量为 1 mJ,光斑半径 $r_0 = 1$ mm,远场发散角 $\theta_0 = 2$ mrad,初始脉冲宽度 $\tau_0 = 10$ ns,光子包个数为 10^8 ,每个光子包含有 10^8 个光子。与蒙特卡罗仿真有关的信道参数包括衰减系数 c 、单次反照比 ω 以及不对称因子 g 。1968 年,Jerlov 根据海水清澈度(从清澈到浑浊)将其分为 I、IA、IB、II 和 III 5 类水质,对于波长为 532 nm 的激光,表 1 给出了典型的 Jerlov IB、II、III 类水的水质参数值^[14]。对于 g ,文献[15]指出, $g = 0.924$ 可以很好地符合绝大多数情况。仿真中,对于表 1 所示的三种不同水质, g 都取固定值 0.924。

表 1 Jerlov IB、II、III 类水的水质参数值

Table 1 Water parameters of Jerlov IB, II, III water

Type of water	Jerlov IB	Jerlov II	Jerlov III
c / m^{-1}	0.144	0.303	0.556
ω	0.58	0.75	0.81

三种水质下激光能量随传输距离的变化如图 4 所示,横坐标 L 表示水下传输距离,纵坐标表示能量衰减,其中 E_R 表示发射端激光能量, E_T 表示接收端激光能量。可以看出三类不同水质下,激光单脉冲能量随着传输距离的增加都呈指数型减少,随着水质的吸收和散射系数增大,激光能量的衰减愈加剧烈。IB 类水质下 100 m 处光场空间分布如图 5 所示,图 5 中 x 轴和 y 轴所在平面垂直于激光传播方向, z 轴为光场归一化能量分布。在 IB 类水质下 100 m 处接收面收到的总能量衰减到 -31.4 dB,单脉冲能量为 1 mJ,波长为 532 nm 的绿光到达水下 100 m 处时只有 0.72 μ J 的能量。这 0.72 μ J 的光场能量归一化空间分布如图 5 所示,以光轴方向为中心,呈高斯状分布在一个半径为 44.2 m 的圆域内。

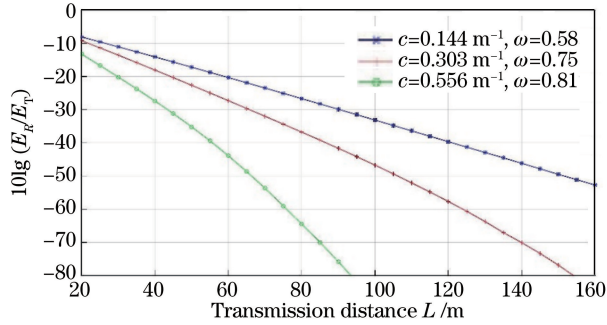


图 4 三种水质下激光能量随传输距离的变化

Fig. 4 Laser energy versus transmission distance under three kinds of water quality

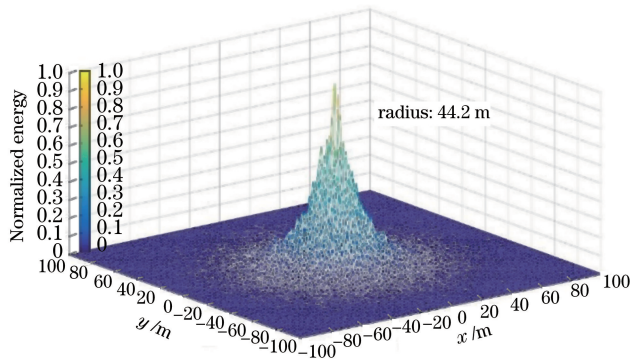


图 5 IB 类水质下 100 m 处的光场空间分布

Fig. 5 Spatial laser distribution at 100 m transmission distance in IB water

3.2 水下信道中 MRC 与 EGC 性能对比

从图 5 中可以看出,当接收器摆放在不同位置时,接收到的激光信号强度会不同,各处的光子包路径相互独立,因此接收到的脉冲展宽也不相同。另外,探测器的灵敏度、放大器噪声、各处的背景光均相互独立,最终造成摆放在光场各处的接收器接收信号的信噪比并不相同。当六路接收半径为 0.1 m、接收视场角为 15°的接收器按照图 6 所示五边形摆放时,其中心位置位于图 5 所示坐标(20,0)处,假设六路接收器的噪声(单位为 W)相互独立且满足 $X \sim N(0, 0.1^2)$ 。六路接收器的接收情况如图 7(a)~(f)所示,等增益合并加权系数分配为 1:1:1:1:1:1,接收情况如图 7(g)所示,最大比合并按照(4)式分配加权系数,接收情况如图 7(h)所示,图 7 中横坐标表示接收时间,纵坐标表示接收归一化能量。

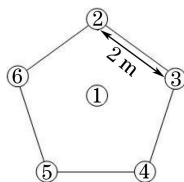


图 6 六路接收器摆放位置示意图

Fig. 6 Placement sketch of six receivers

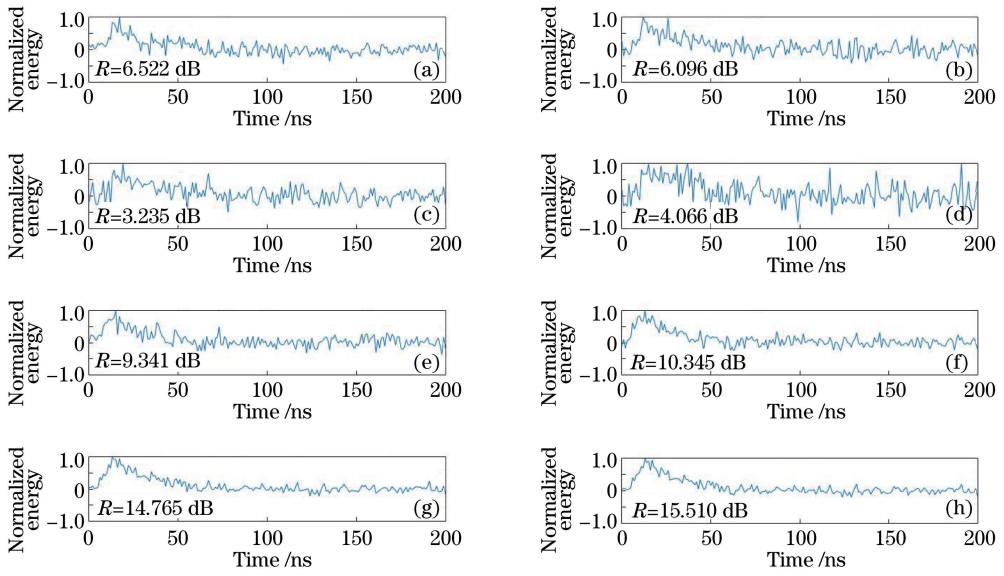


图 7 100 m 处 6 个接收器信号及 EGC, MRC 信号对比

Fig. 7 Comparison of signals of six receivers, EGC and MRC signals at transmission distance of 100 m

两种合并方式的加权系数分配对比如表 2 所示,从表中可以看出,MRC 可以更合理地分配加权系数,给予信噪比更好的接收器,更高的加权系数,信噪比越差,接收器加权系数越低。各路及合并信噪比对比如表 3 所示,EGC 的信噪比为 14.765 dB,其误码率为 $10^{-4.034}$,MRC 的信噪比为 15.510 dB,其误码率为 $10^{-5.027}$ 。在同等接收环境下,MRC 可以将误码率从不满足通信要求的 $10^{-4.034}$ 降低到满足要求的 $10^{-5.027}$,提高了系统的误码率性能。

表 2 加权系数分配

Table 2 Weighting coefficient distribution

Receiver	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
EGC	1	1	1	1	1	1
MRC	0.9636	0.9607	0.6179	0.7086	1.2448	1.5043

表 3 信噪比对比

Table 3 Comparison of signal-to-noise ratio

Receiver	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	EGC	MRC
SNR /dB	6.522	6.096	3.235	4.066	9.341	10.345	14.765	15.510

3.3 MRC 与 EGC 在 IB 和 II 类水质下的误码率随传输距离的变化

分别在 IB 和 II 类水质下探讨最大比合并与等增益合并接收方式的差异。六路接收器的摆放位置及噪声分布与 3.2 节中相同,两类不同水质下的误码率随传输距离的变化如图 8 所示。

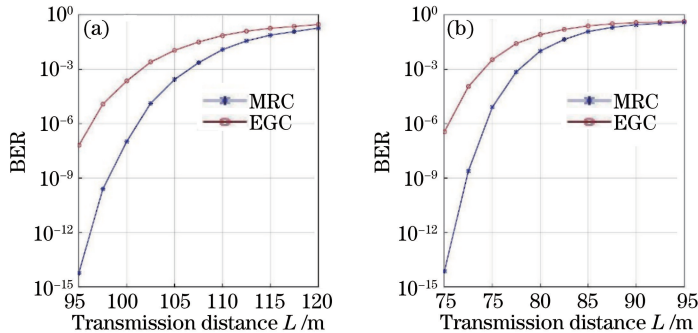


图 8 EGC 与 MRC 在(a)IB 和(b)II 类水质下的误码率随传输距离的变化关系

Fig. 8 Bit error rate of EGC and MRC versus transmission distance under (a) IB and (b) II type of water

由图 8(a)可知,在 Jerlov IB 类水质下,当通信系统要求误码率小于 10^{-5} 时,最大比合并相对于等增益合并可以将最远水下通信距离从 97 m 增加到 102 m;当针对水下通信距离为 100 m 时,最大比合并相对于等增益合并可以将误码率从 $10^{-3.644}$ 降低到 $10^{-6.986}$ 。由图 8(b)可知,在 Jerlov II 类水质下,当通信系统要求误码率小于 10^{-5} 时,最大比合并相对于等增益合并可以将最远水下通信距离从 72 m 增加到 75 m;当针对水下通信距离为 75 m 时,最大比合并相对于等增益合并可以将误码率从 $10^{-2.468}$ 降低到 $10^{-5.092}$ 。

4 结 论

研究了在 Jerlov IB 和 II 类水质下采用最大比合并分集接收技术的水下激光通信性能。推导出最大比合并的加权系数按各路信号幅度与噪声功率之比进行分配可使合并后的信噪比最优。通过理论分析结合仿真结果可知,最大比合并分集接收技术相对于等增益合并分集接收技术可以更合理地根据各路信噪比情况进行加权系数分配,信噪比越好的接收器分配越高的加权系数,信噪比越低的接收器分配越低的加权系数,从而达到合并后的最佳信噪比。增加分集接收的支路会使合并后的性能提升,但是随着支路数目进一步增加,性能的提升逐渐不明显,结合成本及系统复杂度考虑,选取六路接收器为最佳。最大比合并分集接收技术在 IB 和 II 类水质下均可在满足通信系统要求的误码率下增加水下通信距离,可在针对特定距离水下激光通信时降低误码率。最大比合并分集接收技术应用于水下激光通信系统可以有效地降低误码率,增加最长水下通信距离,为水下激光通信系统接收器的工程化提供一种新的解决方案。

参 考 文 献

- Lanzagorta M. Underwater communications[J]. Synthesis Lectures on Communications, 2012, 5(2): 1-129.
- Wang Wenpeng. The analysis of channel characteristics in the underwater laser communication[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
王文朋. 水下激光通信系统中信道特性分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- Hu Xiuhan, Hu Siqi, Zhou Tianhua, *et al.* Rapid estimation of the maximum communication distance for an underwater laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805007.
胡秀寒, 胡思奇, 周田华, 等. 水下激光通信系统最大通信距离的快速估计[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805007.
- Li Xiaochuan. Blue and green laser scattering properties and depolarization in seawater[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.
李小川. 蓝绿激光在海水中的散射特性及其退偏研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- Li Jinwei, Bi Weihong, Ren Yanhui. A method for simulating time-domain broadening of laser pulse in the underwater laser communication[J]. Optical Technique, 2012, 38(5): 569-572.
李仅伟, 毕卫红, 任炎辉. 水下激光通信中脉冲时域展宽的模拟计算方法[J]. 光学技术, 2012, 38(5): 569-572.
- Wei Liying. PPM modulating of space optical communication[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007.
魏丽英. 空间激光通信系统 PPM 调制技术的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
- Wang Jun. Research on high-speed, high-sensitivity and width band receiver technology of atmospheric laser communication system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
王 俊. 高速率高灵敏度宽带大气激光通信接收技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- Zhang Huiying, Li Hongzuo, Xiao Dongya, *et al.* Performance analysis of spatial-diversity reception over combined effects of atmospheric turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0405002.
张慧颖, 李洪祚, 肖冬亚, 等. 大气湍流综合效应下空间分集接收性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0405002.
- Hu Xiuhan, Zhou Tianhua, He Yan, *et al.* Design and analysis of underwater optical communication transceiver system based on digital signal processor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305003.
胡秀寒, 周田华, 贺 岩, 等. 基于数字信号处理机的水下光通信收发系统设计及分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305003.
- Li Zhaoxun, Dou Dongdong, Ren Xiukun, *et al.* Performance analysis of equal gain combining receiving system in double-Rayleigh fading[J]. Journal of Information Engineering University, 2011, 12(1): 37-42.
李兆训, 窦冬冬, 任修坤, 等. 双瑞利衰落下等增益合并接收系统性能分析[J]. 信息工程大学学报, 2011, 12(1): 37-42.

- 11 Hu Xiuhan. Research of adaptive digital array receiving technology in underwater optical communication system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
胡秀寒. 水下光通信系统中的自适应数字化阵列接收技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- 12 Wang Yi, Da Xinyu, Li Yanhua. The Rayleigh fading channel maximum ratio combining modeling simulation [J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(2): 70-73.
王 轶, 达新宇, 李艳华. 相关瑞利衰落信道最大比合并建模仿真研究 [J]. 舰船电子工程, 2008, 28(2): 70-73.
- 13 Li Jing. Research on modulated-carrier underwater wireless laser communications based on analytic Monte Carlo methods [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
黎 静. 基于解析蒙特卡洛方法的载波调制水下激光通信研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- 14 Jerlov N G. Marineoptics [M]. Amsterdam: Elsevier, 1976.
- 15 Gabriel C, Khalighi M A, Bourenane S, *et al.* Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(1): 1-12.