

逆向调制激光通信作用距离及误码率分析

任建迎,孙华燕,赵延仲,张来线
(装备学院,北京 101416)

摘要:为了分析逆向调制激光通信系统中 OOK 调制方式下的误码率特性,在分析回波功率模型和误码率性能的基础上,利用 Optisystem 仿真软件建立了逆向调制激光通信链路。链路采用 NRZ 码对不同通信距离、不同能见度下的 100 Mbps 和 1 Gbps 通信速率进行了仿真,根据所得信噪比值计算出不同条件下的误码率,并结合“眼图”特征得出不同条件下可实现的逆向通信距离。结果表明,误码率随着大气能见度的增大而减小,随着通信距离增大而增加。在大气能见度为 10 km 的条件下,系统可以实现通信速率为 100 Mbps、距离为 2 km 的逆向通信。

关键词:逆向调制;激光通信;OOK;信噪比;误码率

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.007

Analysis on distance and BER of modulating retro-reflector laser communication

REN Jian-ying, SUN Hua-yan, ZHAO Yan-zhong, ZHANG Lai-xian
(Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to analyze bit error rate (BER) characteristics of OOK modulation in modulating retro-reflector laser communication system, a modulating retro-reflector laser communication link is established by Optisystem simulation software based on the analysis of echo power model and BER performance. The communication speeds of 100 Mbps and 1 Gbps under the different communication distances and visibilities were simulated by using NRZ, and then BER under different conditions was calculated according to the obtained SNR. Finally, the retro-reflector communication distances under different conditions were gained by combining with the characteristics of eye pattern. The results show that the BER decreases with the increase of atmospheric visibility, and increases with the increase of communication distance. Under the condition of 10 km atmospheric visibility, the modulating retro-reflector system can realize the communication rate of 100 Mbps and communication distance of 2 km.

Key words: modulating retro-reflector; laser communication; OOK; SNR; bit error rate

1 引言

激光通信技术由于具有保密性好、带宽大等相对于传统无线电通信的优势,逐渐在空间通信、星地通信等领域得到广泛应用。逆向调制激光通信技术是在传统激光通信技术基础上提出的一种更加轻便简洁、廉价、保密性更强的激光通信方式,可以节省一套发射装置,大大减轻设备重量,因此可以适用于

机载、星载等对质量、保密性要求更高的场合;美国早于 20 世纪八九十年代就开始研究此项技术,目前已成功实现了从 Mbps 到 Gbps 的逆向通信试验,并建立了多条逆向调制通信试验链路^[1-2]。

在逆向调制激光通信技术的研究中,激光通信误码率是一项关键技术,其大小直接决定着通信系统性能和效果的好坏^[3-4]。已有研究,利用大气结

构常数、大气湍流强度的闪烁指数、瞄准误差和信噪比等来计算链路误码率^[5-7]。但是,这些分析都是基于单程大气激光通信链路的,且缺乏对不同大气能见度、不同通信速率下的逆向调制激光通信作用距离及误码率的研究。因此,本文即针对逆向调制激光通信链路特点,分析了不同能见度条件下的大气衰减,OOK 调制方式的误码特性,并通过 Optisystem^[8] 仿真软件建立了逆向调制激光通信链路,通过测得探测器处信噪比计算出各种条件下的误码率,结合“眼图”特征进一步得到不同能见度下的链路通信距离及误码率。

2 逆向调制激光通信回波模型分析

逆向调制激光通信系统结构如图 1 所示,分为主动端和被动端两部分^[9];系统链路的主动端发射连续激光,经过大气信道的传输到达被动端光学系统,通过逆向调制器把信号加载到入射的连续激光上,由于“猫眼效应”调制后的激光沿原路返回到主动端,经接收光学系统聚焦在探测器,探测器输出电信号经过滤波放大后恢复原始信号。

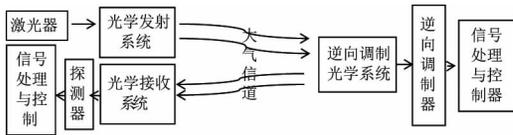


图 1 逆向调制激光通信系统结构框图
Fig. 1 Block diagram of modulating retro-reflector laser communication system

根据逆向调制激光通信系统原理^[10],逆向调制激光通信探测器接收到的信号回波功率 P_{rec} 可表示为:

$$P_{rec} = \frac{P_0 D_{rec}^2 D_{mr}^2 \tau_{tra} \tau_{atm}^2 \tau_{rec} \tau_{mr}^2 \rho_{mod} (C_{mod} - 1)}{r^4 \theta_{tra}^2 \theta_{mr}^2} \quad (1)$$

式中, P_0 为激光发射功率; D_{rec} 为接收光学系统口径; D_{mr} 为逆向调制端光学系统口径; τ_{tra} 为发射光学系统透过率; τ_{atm} 为大气透过率; τ_{rec} 为接收光学系统透过率; τ_{mr} 为调制光学系统透过率; ρ_{mod} 为逆向调制器反射率; C_{mod} 为逆向调制器调制对比度; θ_{tra} 为发射系统发散角; θ_{mr} 为逆向调制系统发散角。

假设逆向调制端的光学系统为衍射极限光学系统,则光学发散角 θ_{mr} 满足:

$$\theta_{mr} = \sin^{-1} \left(\frac{1.22\lambda}{D_{mr}} \right) \approx \frac{1.22\lambda}{D_{mr}} \quad (2)$$

则式(1)可写为:

$$P_{rec} = \frac{P_0 D_{rec}^2 D_{mr}^4 \tau_{tra} \tau_{atm}^2 \tau_{rec} \tau_{mr}^2 \rho_{mod} (C_{mod} - 1)}{1.4884\lambda^2 r^4 \theta_{tra}^2} \quad (3)$$

从上式可以得出,逆向调制激光通信接收到的

回波功率 P_{rec} 与传输距离 r 的四次方成反比,这是由于激光信号双程传输信道衰减造成的。

根据 Beer-Lambert 定律,大气透过率 τ_{atm} 为:

$$\tau_{atm}(\lambda) = \exp[-\mu_{atm}(\lambda)r] \quad (4)$$

$\mu_{atm}(\lambda)$ 为大气衰减系数:

$$\mu_{atm}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (5)$$

式中, V 是大气能见度, km; λ 是波长, nm; q 是与波长和能见度相关的常数。

$$q = \begin{cases} 0.585V^{1/3} & (V \leq 6 \text{ km}) \\ 1.3 & (6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}) \\ 1.6 & (V \geq 50 \text{ km}) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)分别对 532 nm、850 nm、1550 nm 三种波长在不同能见度下大气衰减系数进行仿真,所得结果如图 2 所示。从图中可以看出,在相同能见度条件下,波长越长大气衰减系数越小,同时大气衰减系数随着能见度的增加而减小。

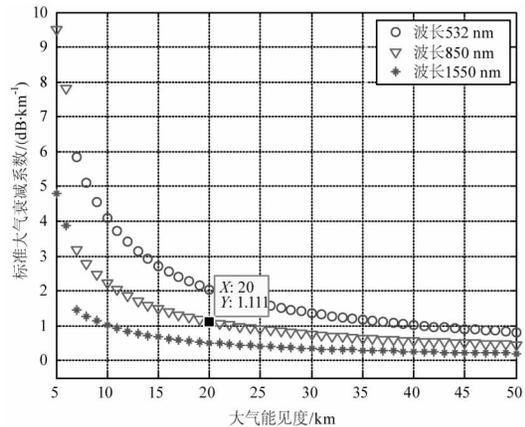


图 2 大气能见度和衰减系数关系曲线

Fig. 2 The relationship curves of atmospheric visibility and attenuation coefficient

3 逆向调制方式的误码率性能分析

目前在逆向调制激光通信中,调制器的调制方式大多是开关键控(OOK)调制方式。相比其他调制方式 OOK 调制容易实现,即“1”有光强输出,“0”无光强输出,在接收端一般采用阈值检测法进行解调。因此门限电压 m 的选择与判决正确程度密切相关,选定的 m 不同得到的误码率也不同^[12]。

(1) 当发送的码元为“1”时,错误接收为“0”(即接收电压 $V \leq m$) 的概率:

$$P_{e1} = P(V \leq m) = \int_0^m f_1(V) dV = 1 - \int_m^\infty f_1(V) dV = 1 - \int_m^\infty \frac{V}{\sigma_n^2} I_0 \left(\frac{aV}{\sigma_n} \right) e^{-\sqrt{V^2+a^2}} \sqrt{2\sigma_n^2} dV \quad (7)$$

式中, σ_n^2 是噪声方差; a 是接收信号振幅; $f_1(V)$ 是接收信号的概率密度函数。

上式中的积分值可由 Q 函数表示, 上式表示为:

$$P_{e1} = 1 - Q(\sqrt{2\text{SNR}}, m_0) \quad (8)$$

式中, $\text{SNR} = a^2/2\sigma_n^2$ 为信噪比; $m_0 = m/\sigma_n$ 是归一化门限值。

(2) 当发送的码元为“0”时, 错误接收为“1”(即接收电压 $V > m$) 的概率:

$$\begin{aligned} P_{e0} &= P(V > m) \\ &= \int_m^\infty f_0(V) dV \\ &= \int_m^\infty e^{-\frac{V^2}{2\sigma_n^2}} dV = e^{-\frac{m^2}{2\sigma_n^2}} = e^{-\frac{m_0^2}{2}} \end{aligned} \quad (9)$$

调制端发送码元“0”和“1”的概率分别设为 $P(0)$ 和 $P(1)$, 则系统的总误码率:

$$\begin{aligned} P_E &= P(1)P_{e1} + P(0)P_{e0} \\ &= P(1)(1 - Q(\sqrt{2\text{SNR}}, m_0)) + P(0)e^{-\frac{m_0^2}{2}} \end{aligned} \quad (10)$$

一般 m_0 的取值在 $\sqrt{2}$ 和 $\sqrt{\text{SNR}/2}$ 之间, 当工作在大信噪比条件下, 最佳门限取 $\sqrt{\text{SNR}/2}$ 。在发送“1”和“0”概率相同的情况下(即 $P(1) = P(0) = 0.5$), 误码率 P_E 可表示为:

$$\begin{aligned} P_E &= \frac{1}{2} [(1 - Q(\sqrt{2\text{SNR}}, m_0)) + e^{-\frac{m_0^2}{2}}] \\ &= \frac{1}{4} \text{erfc}\left(\frac{\sqrt{\text{SNR}}}{2}\right) + \frac{1}{2} e^{-\frac{\text{SNR}}{4}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\text{erfc}()$ 为互补误差函数。

4 逆向调制激光通信系统仿真链路建立及结果分析

采用 optisystem 仿真软件, 建立的逆向调制激光通信链路仿真系统如图 3 所示, 仿真链路中把伪随机码发生器产生的脉冲信号转换成 NRZ 信号, 通过幅度调制器加载到连续激光上, 接收端采用 PIN 探测器进行解调, 链路参数如表 1 所示。

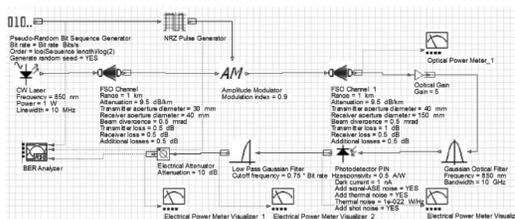


图 3 逆向调制激光通信仿真链路

Fig. 3 Modulating retro-reflector laser communication link simulation

表 1 逆向调制激光通信链路参数

Tab. 1 Modulating retro-reflector laser communication link parameter

激光器	波长 $\lambda = 850 \text{ nm}$ 功率 $P_0 = 1 \text{ W}$ 发散角 4 mrad 线宽: 10 nm
发射端光学系统	口径 30 mm 透过率 $\tau_{\text{tra}} = 0.7$ 发散角 $\theta_{\text{tra}} = 500 \mu\text{rad}$
接收端光学系统	口径 $D_{\text{rec}} = 150 \text{ mm}$ 透过率 $\tau_{\text{rec}} = 0.7$
逆向调制端光学系统	口径 $D_{\text{mr}} = 40 \text{ mm}$ 透过率 $\tau_{\text{mr}} = 0.7$
探测器	PIN 型(850 nm) 响应度 0.5 A/W 暗电流: 1 nA
逆向调制器	反射率 $\rho_{\text{mod}} = 0.5$ 调制参数 $C_{\text{mod}} = 1.95$

不归零编码(NRZ)即无电压为 0, 有电压为 1, 采样点在码元时间中间点, 判决门限为半幅度; 在 1~3 km 的通信距离上进行了通信速率为 100 Mbps 和 1 Gbps 的仿真。通过仿真链路测得探测器处信号功率和噪声功率, 并得到信噪比, 根据式(11)得出误码率, 如表 2 所示。

表 2 不同能见度条件下的信噪比和误码率

Tab. 2 SNR and BER in different visibility condition

速率	能见度/ 衰减系数	信噪比(dB)			误码率		
		1 km	2 km	3 km	1 km	2 km	3 km
100 Mbps	20km/1.1dB	58.7	44.6	16.6	0.227×10^{-8}	0.777×10^{-7}	0.87×10^{-4}
	10km/2.3dB	55.3	25.1	2.3	0.532×10^{-8}	0.989×10^{-5}	0.3522
	5km/9.5dB	28.4	-8.9	-	0.465×10^{-5}	-	-
1Gbps	20km/1.1dB	48.8	24.5	6.7	0.271×10^{-7}	0.11×10^{-4}	0.1022
	10km/2.3dB	45.1	15.1	-7.7	0.685×10^{-7}	0.13×10^{-3}	-
	5km/9.5dB	17.4	-18.1	-	0.78×10^{-4}	-	-

(1) 通信速率为 100 Mbps

能见度为 20 km、通信距离为 1 km 和 2 km 时的误码率分别在 10^{-8} 和 10^{-7} 数量级, 当通信距离增加到 3 km 时误码率上升到 10^{-4} ; 当能见度为 10 km、通信距离为 1 km 时的误码率在 10^{-8} 量级, 由此可看出能见度在 10~20 km 范围时, 通信距离为 1 km 时的误码率保持在 10^{-8} 量级; 能见度为 5 km 时, 1 km 距离上的通信误码率在 10^{-5} 量级。

(2) 通信速率为 1 Gbps

能见度为 20 km、通信距离为 1 km 时的误码率在 10^{-7} 量级, 当通信距离增加到 2 km 时误码率增加到 10^{-4} ; 能见度为 10 km、通信距离为 1 km 时的误码率在 10^{-7} 数量级, 距离增加至 2 km 时误码率升高到 10^{-3} 数量级。而当能见度为 5 km 时仅能实现误码率在 10^{-4} 数量级上的 1 km 通信。

由以上分析可得, 在相同通信距离下, 随着能见

度的下降误码率升高。能见度为 10 km、20 km, 能够实现误码率在 10^{-8} 和 10^{-7} 量级的 1 km 逆向通信。随着能见度的下降、通信距离的增加, 通信速率越高的误码率升高越快。

为了更能直观地展现不同能见度、不同速率、不同距离下的链路通信特性, 选取了放大滤波后的探测器信号“眼图”作为分析对象, 如图 4~6 所示。

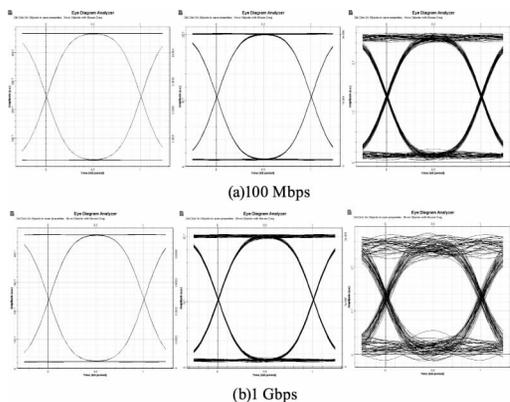


图 4 能见度为 20km 距离为 1km、2km、3km 时 100Mbps 和 1Gbps 通信速率下的眼图

Fig. 4 Visibility is 20km and distance of 1km, 2km, 3km, the eye pattern when communication rate is 100Mbps and 1Gbps

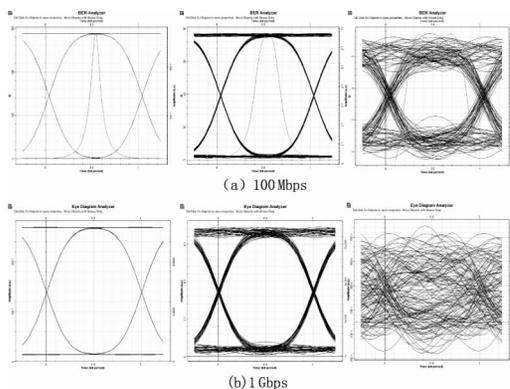


图 5 能见度为 10km 距离为 1km、2km、3km 时 100Mbps 和 1Gbps 通信速率下的眼图

Fig. 5 Visibility is 10km and distance of 1km, 2km, 3km, the eye pattern when communication rate is 100Mbps and 1Gbps

眼图的“眼睛”张开度是衡量系统通信性能的重要标准,“眼睛”张开度大、眼皮薄说明噪声较小,性能好。从图 4 和图 5 可以看出通信距离在 2 km 内时,眼图特征明显,张开度和厚度变化不大,说明此时的噪声干扰较小,通信质量较好。当通信距离为 3 km 时,可以看出随着通信速率的增加“眼皮”厚度增大,甚至“眼睛”特征消失如图 5 所示;能见度为 5 km 时,只能看到 1 km 时的“眼睛”特征(如图 6)。由此可得,随着通信距离的增大、能见度的降低噪声变大。

若系统误码率以 10^{-6} 量级为衡量标准,不引入纠错编码的情况下,系统通信速率为 100 Mbps 时,能见度大于 20 km 时可以实现 2 km 的逆向通信,能见度为 10 km 时可实现 1 km 的逆向通信;当通信速率为 1 Gbps 时,在 10 km 和 20 km 的能见度下能实现 1 km 的逆向通信。

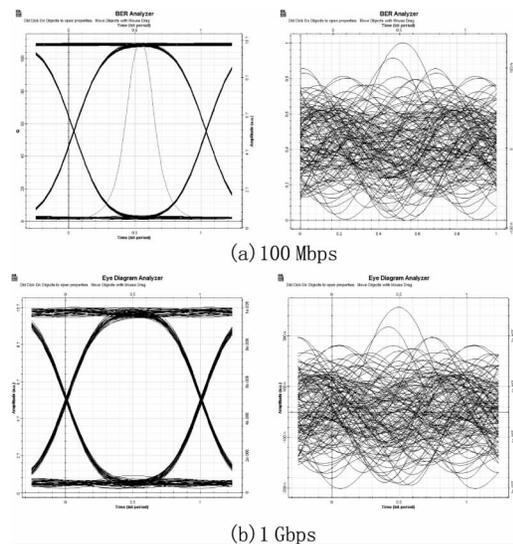


图 6 能见度为 5km 距离为 1km、2km 时的 100Mbps 和 1Gbps 通信速率下的眼图

Fig. 6 Visibility is 5km and distance of 1km, 2km, 3km, the eye pattern when communication rate is 100Mbps and 1Gbps

5 结论

本文在逆向调制激光通信回波模型和误码特性分析的基础上,建立了逆向调制激光通信链路仿真系统,结合不同条件下的仿真数据得出眼图并计算出不同误码率,进一步推算出了不同能见度下通信速率为 100 Mbps 和 1 Gbps 时可实现的通信距离及误码率量级。分析结果表明,采用功率为 1 W 的 850 nm 激光器、灵敏度为 0.5 A/W 的探测器,在 10 km 的大气能见度条件下,可以实现通信速率为 100 Mbps 距离为 2 km 的逆向通信。

参考文献:

- [1] W S Rabinovich, R Mahon, P G Goetz, et al. 45Mbps cat's eye modulating retro-reflector link over 7km[C]. SPIE, 2006, 6304: 63040Q.
- [2] ZHANG Laixian, SUN Huayan, FAN Guihua, et al. Progress in free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector [J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 681-691. (in Chinese)
张来线, 孙华燕, 樊桂花, 等. 猫眼逆向调制自由空间激光通信技术的研究进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 681-691.

- [3] WANG Defei, CHU Zhenfeng, REN Zhenglei, et al. Influence of atmospheric turbulence on BER of laser communication system[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 390 - 393. (in Chinese)
王德飞, 楚振峰, 任正雷, 等. 大气湍流对激光通信系统误码率影响的研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(4): 390 - 393.
- [4] WU Yu, ZHOU Yamin, WANG Zhongsi, et al. Bit error rate analysis on free-space laser communication under atmospheric turbulence [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(11): 1193 - 1196. (in Chinese)
吴郁, 周亚民, 王忠思, 等. 大气湍流下激光斜程通信误码率分析 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(11): 1193 - 1196.
- [5] Xing Jianbin, Xu Guoliang, Zhang Xuping. Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1850 - 1852.
- [6] Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihong. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0606002.
- [7] F M Davidson, P Nigon, G C Gilbreath, et al. Receiver performance characterization for modulating retro-reflector atmospheric optical links with pulsed lasers and optical pre-amplifiers [C]. SPIE, 2005, 58920: 58920F.
- [8] MIAO Lin. The simulation research of atmospheric laser communication data transmission [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
苗琳. 大气激光通信数据传输的仿真研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [9] SUN Huayan, ZHAO Yanzhong, ZHENG Yonghui. Research and application of active laser detection technique based on cat-eye effect [J]. *Journal of Academy of Equipment*, 2012, 23(6): 6 - 13. (in Chinese)
孙华燕, 赵延仲, 郑勇辉. 基于猫眼效应的激光主动探测技术研究与应用 [J]. *装备学院学报*, 2012, 23(6): 6 - 13.
- [10] QIU Hao, WANG Jingyuan, XU Zhiyong, et al. Modulating retro-reflector optical communication technology [J]. *Journal of Military Communications Technology*, 2015, 36(2): 29 - 33. (in Chinese)
邱灏, 汪井源, 徐智勇, 等. 逆向调制光通信技术 [J]. *军事通信技术*, 2015, 36(2): 29 - 33.
- [11] WANG Haixian, YE Ai. The influence of the coefficient of atmospheric attenuation to the capability of laser ranging [J]. *Ship Science and Technology*, 2007, 29(6): 116 - 119. (in Chinese)
王海先, 叶艾. 大气衰减系数对激光测距能力影响的研究 [J]. *舰船科学技术*, 2007, 29(6): 116 - 119.
- [12] FAN Changxin, ZHANG Puyi, XU Bingxiang, et al. Communication theory [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012: 142 - 145. (in Chinese)
樊昌信, 张甫翊, 徐炳祥, 等. 通信原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 142 - 145.