文章编号:1001-5078(2017)11-1405-06

·光纤及光通讯技术 ·

基于 AMC 和 HARQ 的大气激光通信 跨层系统性能研究

王 磊,郝士琦,赵青松,张 岱 (电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽合肥 230037)

摘 要:针对大气激光通信中由大气湍流引起的系统性能下降问题,研究了基于物理层自适应 调制编码(AMC)和数据链路层混合自动请求重传(HARQ)的大气激光通信跨层系统性能。 在建立了大气湍流信道瞬时信噪比模型的基础上,建立了大气激光通信 AMC-HARQ 系统模 型,并推导了系统误包率和频带利用率公式,最后在双伽马信道模型下进行了仿真分析。仿真 结果表明,大气激光通信 AMC-HARQ 系统能够在保证一定误包性能的条件下,大大提高系统 频带利用率,提高单一应用 AMC 时的系统误包性能。随着重传次数增加,误包率和频带利用 率均提高,但频带利用率增幅随重传次数增加而减小。

关键词:大气激光通信;自适应调制编码;混合自动请求重传;频带利用率;误包率 中图分类号:TN929.1 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.11.014

Performance analysis of atmospheric laser communication based on AMC and HARQ

WANG Lei, HAO Shi-qi, ZHAO Qing-song, ZHANG Dai

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Aiming at the performance degradation of atmospheric laser communication system due to atmospheric turbulence, the performance of atmospheric laser communication crossing-layer optimization system based on adaptive modulation coding (AMC) at physical layer and hybrid automatic repeat request (HARQ) at data link layer is investigated. Firstly, a turbulent channel model is established from the viewpoint of signal layer and verified by the filed experiments. On that basis, the atmospheric laser communication system model based on AMC and HARQ is established. Secondly, the formulas of packet error rate and bandwidth utilization are derived. Finally, it is simulated in dual Gamma channel model. Simulation results show that the atmospheric laser communication based on AMC and HARQ can greatly improve the system bandwidth utilization under the condition of ensuring a certain error performance and improve the system error performance when only single AMC is applied. With the increase of retransmission times, both the packet error rate and the bandwidth utilization rate are improved but the increase of bandwidth utilization decreases.

Key words: atmospheric laser communication; adaptive modulation coding (AMC); hybrid automatic repeat request (HARQ); bandwidth utilization; packet error rate

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61571446)资助。

作者简介:王 磊(1993 -),男,硕士研究生,主要从事激光通信研究工作。E-mail:526084662@qq.com 通讯作者:郝士琦(1963 -),女,教授,主要从事卫星通信和激光通信等方面的研究。E-mail:liu_hsq@126.com 收稿日期:2017-03-28

1 引 言

大气激光通信(Atmospheric Laser Communication, ALC)因其具有信息容量大、传输速率快、保密 性好、抗电磁干扰等优点而被广泛关注,被认为是构 筑未来通信网必不可少的一种技术,在"最后一公 里"接入、局域网/城域网扩展、星地通信等领域有 着广泛的应用前景^[1]。然而,大气湍流造成的光强 闪烁、光束漂移等效应使得系统的错误率升高,频带 利用率下降,限制了大气激光通信的广泛应用^[2]。 对通信系统协议层进行跨层优化设计被认为是解决 上述问题的有效途径之一,它能够在保证一定传输 质量的前提下,最大限度地利用信道条件,提高频带 利用率。

在物理层,自适应调制编码技术(Adaptive Modulation and Coding, AMC)能够对于给定的系统 Qos (Quality of Service)要求,根据信道状态动态,调整 调制方式、编码方式等时域参数。文献[3]~[5]对 AMC 在大气激光通信中的应用进行了研究,结果表 明采用 AMC 技术的大气激光通信系统较传统单一 传输模式系统大大提高了频带利用率。在数据链路 层,混合自动请求重传技术(Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ)兼具前向纠错技术(Forward Error Correction FEC)和自动重传请求技术(Automatic Repeat reQuest, ARQ)的优点, 具有检错和纠错 的功能,提高了对信道的适应性。文献[6]~[8]对 HARQ 在大气激光通信中的应用进行了研究。文献 [6] 首次提出了将 HARQ 应用于大气激光通信中以 抵抗光强闪烁带来的系统误包率上升问题。文献 [7]研究了 CC - HARQ(Chase Combining, CC) 在二 进制脉冲位置调制(BPPM)的大气激光通信系统应 用性能。文献[8]提出了将增量冗余(Incremental Redundancy, IR)型 HARQ 应用于大气激光通信来 降低系统瞄准误差。将物理层的 AMC 与数据链路 层的 HARQ 相结合,打破固定不变的物理层结构, 能够使系统性能达到最佳^[9-10]。该技术方案在无 线通信领域中的 3G Evolution 系统得到了应用^[11], 但在大气激光通信中的应用还未见报道。此外在大 气激光通信中,湍流信道较无线通信中的高斯信道 或莱斯信道更复杂、码速率更高、调制方式不同,因 此不能完全照搬射频通信在相关领域的研究成果。

本文在对大气湍流信道分析建模的基础上,联 合大气激光通信物理层的 AMC 与数据链路层的 HARQ 进行设计,分析了系统性能,并给出了系统误 包率和频带利用率公式。仿真分析了不同参数对系 统性能的影响。本文研究内容在自适应激光通信和 星地、空地激光通信领域具有重要的理论指导意义 和应用价值。

2 大气激光通信 AMC-HARQ 系统

2.1 系统模型

大气激光通信 AMC-HARQ 系统示意图如图 1 所示。在物理层,AMC 根据接收端对信道状态--信噪比的估计,通过射频反馈信道控制发送端改变 调制阶数和编码码率,在信道质量较好时,提高传输 速率获得较大的频带利用率,而当信道质量下降时, 相应的降低传输速率,最终达到提高平均频谱效率 的目的。在数据链路层,HARQ 首先通过前向纠错 对数据包进行纠错,然后再经过检错码进行检错,若 检验结果显示数据包译码正确,接收端则向发送端 发送正确接收信号(ACK),发送端继续发送下一个 信息数据包;若纠错后的数据检验仍含有错误信息, 接收端则向发送端发送错误接收信号(NAK),发送 端根据预先确定的传送方案重新发送该信息数据 包,如此重复下去,直到信息数据包被正确接收或者 达到最大传输次数,则开始下一个新的信息数据包。 物理层的 AMC 根据信道瞬时状态选择合适的传输 参数,提供了一种对信道的粗略适应。而 HARQ 在 此基础上对传输参数精确调整,以更精确地适应信 道变化,这就实现了系统跨层优化。



图 1 大气激光通信 AMC-HARQ 系统示意图 Fig. 1 Schematic diagram of the adaptive modulation coding system for atmospheric laser communication

在物理层,发送端提供几种经优化选择的调制 编码组合,称之为传输模式。假设共有 n 组传输模 式,分别为{MSC₁,MCS₂,…,MCS_n},每一种模式的 码率和调制阶数分别为 { (r_1, M_1) , (r_2, M_2) ,…, (r_n, M_n) },传输模式的频带利用率是递增的。在 AMC 中,各传输模式的切换门限根据系统 Qos 要求 (一般指链路层误包率)设定,是决定系统性能的重 要因素。将系统信噪比划分为 (n + 1) 个区间,分 别为 [γ_1, γ_2), [γ_2, γ_3),…, [γ_n, γ_{n+1}),其中 $\gamma_{n+1} = +\infty$,每个区间对应一种传输模式,当信道估 计值 γ 落在区间 [γ_i, γ_{i+1})时,则选择 MSC_i 进行传 输。假设大气激光通信中调制方式采用脉冲幅度调制(Pulse-Amplitude Modulation, PAM),信道编码采用低密度奇偶校验码(low density parity-check codes, LDPC),则在物理层,各传输模式的误包率与 信噪比有如下关系^[4]:

$$\operatorname{PER}_{i}(\gamma) = \frac{M_{i} - 1}{M_{i} \log_{2} M_{i}} \operatorname{erfc}(\sqrt{\frac{3\gamma G_{i}}{2(M_{i} - 1)(2M_{i} - 1)}})$$

$$1.85\gamma G_{i}$$

$$\approx 0.2 \exp(-\frac{1.03 \, \gamma \sigma_i}{2^{2.19 \log_2 M_i} - 1}) \tag{1}$$

其中, G_i 表示 MSC_i 中 LDPC 码编码增益。

在数据链路层,假设 HARQ 的最大重传次数为 N_{max} ,那么对于给定的链路层目标误包率 P_{link} ,与 物理层目标误包率 P_{largel} 有如下关系:

$$P_{target}(N_{max}) = P_{link}^{1/(N_{max}+1)}$$
(2)

其中,最大重传次数 N_{max} 是由系统允许的最大延时 τ_{max} 和发送端到接收端的传输时间 τ_0 决定的。

$$N_{\max} = \lceil \frac{\tau_{\max}}{2\tau_0} \rceil \tag{3}$$

其中,「・]表示向零取整。

 $P_{target}(N_{max})$ 是在物理层和数据链路层中传递的关键参数。这个参数将数据链路层对误包率 P_{link} 和延时 τ_{max} 的要求传递到物理层中,对 AMC 的模式切换门限作精确调整。根据 $P_{target}(N_{max})$,切换门限可通过式(1)变形得到:

$$\gamma_{i} = \frac{(2^{2.19\log_{2}M_{i}} - 1)\ln(\frac{1}{5P_{target}})}{1.85G_{i}} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$
$$\gamma_{n+1} = +\infty \tag{4}$$

2.2 湍流信道瞬时信噪比模型

从信号层的角度建立湍流信道模型,研究湍流 信道下瞬时信噪比 γ。特性,对大气激光通信 AMC-HARQ 系统的性能分析至关重要。一般来说,对于 强度调制/直接检测(IM/DD)系统,大气湍流模型 主要是以接收端光强特性为研究对象,在弱湍流条 件下,接收端光强服从对数正态分布^[12];在强湍流 条件下,大多采用 K 分布^[13]。Gamma-Gamma 分 布^[14]因其能在各种湍流下较好的预测接收光强起 伏特性而广受关注。其概率密度函数为:

$$f(I) = \frac{2 (\alpha \beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta} (2 \sqrt{\alpha \beta I}) \qquad (5)$$

其中, I 表示接收端光强; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数; $K_{\alpha-\beta}$ 是修正贝塞尔函数;阶次为 $\alpha - \beta$ 。其中 α 和 β 分别 是大尺度起伏和小尺度起伏参数:

$$\alpha = \frac{1}{\exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.1\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right] - 1}$$
(6)

$$\beta = \frac{1}{\exp\left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1}$$
(7)

 σ_R^2 表示 Rytov 方差, 当 σ_R^2 < 1 时为弱湍流、 $\sigma_R^2 \approx 1$ 为中湍流, $\sigma_R^2 > 1$ 为强湍流, 在平面波条件 下 σ_R^2 满足:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \tag{8}$$

其中, C_n^2 为大气湍流折射率结构常数; $k = 2\pi/\lambda$ 为 波数, λ 为激光波长; L 为传输距离。

当激光信号通过大气湍流信道时,接收信号 r_k 可以表示为:

$$r_k = Ix_k + n \tag{9}$$

其中, x_k 表示发送端的已调数字信号; n 表示均值 为0,方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。一般来说, I 与 n 是相互独立的。

定义大气激光通信中接收端瞬时信噪比γ。:

$$\gamma_s = \bar{\gamma}g \tag{10}$$

其中, $\bar{\gamma}$ 表示系统平均信噪比; g 表示信噪比增益, 可以表示为:

$$g = \frac{\gamma_s}{\bar{\gamma}} = \frac{I^2/\sigma^2}{(\frac{1}{T}\int_0^T I^2 dt)/\sigma^2} = \frac{I^2}{\frac{1}{T}\int_0^T I^2 dt} \quad (11)$$

其中,T表示信号持续时间。

假设在 *T* 时间内, 湍流环境保持稳定,则 $\frac{1}{T} \int_{0}^{T} l^{2} dt$ 为常数。令 $\frac{1}{T} \int_{0}^{T} l^{2} dt = P_{r}$,即平均接收功 率为 *P*_r,此时瞬时信噪比 γ_{s} 可以写为:

$$\gamma_s = \frac{1}{P_r} \bar{\gamma} I^2 \tag{12}$$

将式(12)变形代入式(5)得系统瞬时信噪比概 率密度函数 $p_{y}(\gamma_{s})$ 为:

$$p_{\gamma}(\gamma_{s}) = \frac{2 (\alpha \beta)^{(\alpha+\beta)/2} P_{r}^{\frac{\alpha+\beta-2}{4}}}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \overline{\gamma}^{\frac{\alpha+\beta-2}{4}}} \gamma_{s}^{\frac{\alpha+\beta-2}{4}} K_{\alpha-\beta} \cdot \left(2 \sqrt{\alpha \beta} \sqrt{\frac{P_{r} \gamma_{s}}{\bar{\gamma}}}\right)$$
(13)

则其概率分布函数 $F_{\gamma}(\gamma_s)$ 为:

$$F_{\gamma}(\gamma_{s}) = \int_{0}^{r} p_{\gamma}(\gamma_{s}) d\gamma_{s}$$
$$= \frac{1}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha \beta \sqrt{\frac{P_{r} \gamma_{s}}{\bar{\gamma}}} \right]_{\alpha,\beta,0}^{1}$$
(14)

其中, $G_{m,n}^{p,q}(\cdot)$ 为梅耶尔 – G 函数。

2.3 性能分析

误包率和频带利用率是衡量系统性能的两个 重要指标。定义平均误包率为错误包数与传输总 包数的比值,则当系统只采用 AMC 时,系统误包 率为:

$$\operatorname{PER}_{phy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_{i} P_{r}(i) \ \overline{\operatorname{PER}_{i}}}{\sum_{i=1}^{n} R_{i} P_{r}(i)}$$
(15)

其中, R_i 表示 MCS_i 的信息比特量:

$$R(i) = r_i \log_2 M_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$
(16)

 $P_r(i)$ 表示采用 MSC_i 传输的概率,即是信道估 计值 γ 落在区间 [γ_i, γ_{i+1}] 的概率:

$$P_{r}(i) = \int_{\gamma_{i}}^{\gamma_{i+1}} p_{\gamma}(\gamma_{s}) d\gamma$$
$$= \int_{0}^{\gamma_{i+1}} p_{\gamma}(\gamma_{s}) d\gamma - \int_{0}^{\gamma_{i}} p_{\gamma}(\gamma_{s}) d\gamma$$
$$= F_{\gamma}(\gamma_{i+1}) - F_{\gamma}(\gamma_{i}) \qquad (17)$$

PER_{*i*} 表示 MCS_{*i*} 的平均误包率,根据式(1)和(17), PER_{*i*} 可以表示为:

$$\overline{\text{PER}_{i}} = \frac{1}{P_{r}(i)} \int_{\gamma_{i}}^{\gamma_{i+1}} \text{PER}_{i}(\gamma) p_{\gamma}(\gamma_{s}) d\gamma$$

$$= \frac{1}{P_{r}(i)} \int_{\gamma_{i}}^{\gamma_{i+1}} 0.2 \exp(-\frac{1.85\gamma G_{i}}{2^{2.19\log_{2}M_{i}} - 1}) p_{\gamma}(\gamma_{s}) d\gamma$$
(18)

当 AMC 与 HARQ 相结合时,由于数据包的重 传机制,系统的平均误包率为:

 $PER_{link} = PER_{phy}^{N_{max}+1}$ (19)

从式(19)可以看出,相比单一应用自适应调制 编码技术,大气激光通信 AMC - HARQ 系统通过重 传机制能够有效降低系统的误包率,提高系统的抗 干扰能力。

在 HARQ 中,平均重传次数是一个重要参数, 它决定了系统的频带利用率。令 $p = PER_{phy}$,则每 个数据包的平均重传次数 \overline{N} 为:

$$\bar{N}(p, N_{\max}) = 1 + p + p^{2} + \dots + p^{N_{\max}}$$
$$= \frac{1 - p^{N_{\max} + 1}}{1 - p}$$
(20)

从式(20)可以看出,当 N_{max} = 0 时, N(p,0) = 1,即对应着只采用 AMC 的情况。此时,系统的平 均频带利用率为:

$$S_{e phy} = \sum_{i=1}^{n} R(i) P_r(i)$$

$$= \sum_{i=1}^{n} F_{\gamma}(\gamma_{i+1}) r_{i} \log_{2} M_{i} - \sum_{i=1}^{n} F_{\gamma}(\gamma_{i}) r_{i} \log_{2} M_{i}$$
(21)

当考虑 AMC 与 HARQ 相结合时,由于每个数据包平均传输了 N次,此时,系统的平均频带利用率为:

$$S_{e\,link} = \frac{S_{e\,phy}}{\bar{N}(p, N_{max})} \tag{22}$$

3 仿真分析

假设自适应调制编码有五种传输模式,如表 1 所示。在大气湍流结构常数 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$,激 光波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$,传输距离 L = 1500 m条件下, 每一种模式的误包率仿真曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出,随着 MCS1-MCS5 的频带利用率依次 提高,其误包性能依次下降,在 PER = 10^{-4} 时,MCS5 所需信噪比 MCS1 高 3.5 dB。

表 1 MCS1-MCS5 调制阶数、码率及频带利用率 Tab. 1 Modulation order, code rate, and bandwidth utilization of MCS1-MCS5

MCS	Modulation order and code rate	Bandwidth utilization (bit/s/Hz)
MCS1	4 - PAM, r = 1/4	0.5
MCS2	4 - PAM, r = 1/2	1
MCS3	4 - PAM, r = 3/4	1.5
MCS4	8 - PAM, r = 3/4	2.25
MCS5	16 - PAM, r = 3/4	3





式(4),将数据链路层参数 *P*_{target} 传递到物理层,可得 到物理层 AMC 在不同重传次数下的传输模式切换 门限,如表 2 所示。

表2 不同最大重传次数下传输模式切换门限

Tab. 2 Switching thresholds of transmission modes with different retransmission maximum number

$N_{\rm max}$	P_{target}	γ_1	γ_2	γ 3	γ_4	γ_5
0	10 -4	7.8	8.9	9.4	10. 1	11.3
1	10 -2	6.4	7.2	8	8.4	9.7
2	0.0464	5.6	6.5	7.1	7.5	9
3	10 -1	5	5.1	6.2	7	8.4

一般来说,大气激光通信系统是根据信道最差 情况来设计调制编码方案以保证系统正常传输信 息,这就不能充分利用信道的时变特性,因此频带利 用率较低。图3给出了大气激光通信 AMC-HARQ 系统与采用单一传输模式 MCS1的大气激光通信系 统频带利用率比较,以及 AMC-HARQ 系统在不同重 传次数下的数据链路层平均频带利用率。可以看 出,无论是 AMC 还是 AMC-HARQ 系统相比于传统 单一传输模式系统都大大提高了系统的频带利用 率。在平均信噪比为 20 dB 时,频带利用率相对最 低的 AMC 系统比单一传输模式频带利用率提高了 2.1 bit/s/Hz。此外,从图3 可以看出,随着 N_{max} 的 增加,系统的平均频带利用率是增加的,但其增幅是 随着 N_{max} 的增大而减小的,因此,不能通过一味地 增加 N_{max} 来提高系统频带利用率。



numbers of retransmissions



的减小而减小,当系统只采用 AMC 技术时,即 $N_{max} = 0$,平均重传次数始终为1。随着平均信噪比 提高,平均重传次数越来越小并逐渐收敛于1。这 是因为随着信噪比的提高,信道环境逐渐变好,系统 误包率逐渐减小,因此重传的次数也逐渐减小。根 据图4所示的 $\overline{N}(p, N_{max})$ 性质,也就解释了图3中 为什么随着平均信噪比的提高,不同重传次数下的 平均频带利用率之间相差越来越小。



图 5 给出了在 N_{max} = 2 时大气激光通信 AMC-HARQ 系统在弱、中、强湍流时系统平均频带利用 率。可以看出,强湍流严重影响了系统性能,在平均 信噪比为 25 dB 时,强湍流信道下的平均频带利用 率分别比中湍流和弱湍流低 0.15 bit/s/Hz 和 0.25 bit/s/Hz。这是因为强湍流信道是最差的信道环 境,为保证系统误包率,多采用误包率性能好而频带 利用率低的传输模式且平均重传次数多,因此平均 频带利用率最低。但随着湍流强度变弱,信道环境







图 6 给出了大气激光通信 AMC-HARQ 系统在 实验湍流环境下不同重传次数的误包率。与单一应 用 AMC 相比,大气激光通信 AMC-HARQ 系统能够 进一步降低系统误包率,随着重传次数增加,系统误 包性能有很大的提高。





4 结 论

本文在对大气湍流信道建模分析的基础上,分 析了 AMC-HARQ 跨层优化技术方案在大气激光通 信系统中的应用,并推导了误包率和频带利用率公 式。仿真分析了系统性能,结果表明大气激光通信 AMC-HARQ 系统能够在满足一定误包性能的前提 下,大大提高系统频带利用率,且随着重传次数增 大,误包性能和频带利用率进一步提高。

参考文献:

- [1] Chaaban A, Morvan J M, Alouini M S. Free-Space Optical Communications: Capacity Bounds, Approximations, and a New Sphere-Packing Perspective [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(3):1-1.
- Yang L, Gao X, Alouini M S. Performance Analysis of Free-Space Optical Communication Systems With Multiuser Diversity Over Atmospheric Turbulence Channels [J].
 IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2):1-17.

- [3] Fatima K, Muhammad S S, Leitgeb E. Adaptive coded modulation for FSO links [C]// International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing. 2012:1-4.
- [4] Djordjevic I B. Adaptive modulation and coding for freespace optical channels [J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2010, 2(5):221 – 229.
- [5] Djordjevic I B, Djordjevic G T. On the communication over strong atmospheric turbulence channels by adaptive modulation and coding [J]. Optics Express, 2009, 17 (20):18250-18262.
- [6] Kose C, Halford T R. Incremental redundancy hybrid ARQ protocol design for FSO links[C] Military Communications Conference, 2009. Milcom. 2009:1-7.
- [7] Kiasaleh K. Hybrid ARQ for FSO Communications Through Turbulent Atmosphere [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(9):866 - 868.
- [8] Zedini E, Chelli A, Alouini M S. Unified performance analysis of hybrid-ARQ with incremental redundancy over free-space optical channels [C]// IEEE, International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication. IEEE, 2015:774 – 778.
- [9] ZHAO Junhui, TIAN Jingxiu, LI Xiuping. Cross-layer design with adaptive modulation and coding based on golden selection in wireless networking [J]. Journal of Applied Sciences, 2014, 32(6):566 570. (in Chinese) 赵军辉,田静秀,李秀萍.采用黄金分割法的自适应调制无线网络跨层设计[J].应用科学学报, 2014, 32 (6):566 570.
- [10] Han G, Dong Y, Guo H, et al. Cross-layer optimized routing in wireless sensor networks with duty cycle and energy harvesting [J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2015, 15(16):1957-1981.
- [11] 罗明胜,黄联芬,姚彦. 无线网络跨层设计的研究现状 及展望[J]. 移动通信,2005,(7):95-98.
- [12] Z Ghassemlooy, W Popoola, S Raybhandari. OpticalWireless communication System and Channel Modelling with-MATLAB, CRC, London, 2012.
- [13] Tsiftsis T A, Sandalidis H G, Karagiannidis G K, et al. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009,8(2):951-957.
- [14] Alhabash M A, Andrews L C, Phillips R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8):1554-1562.