

尹建军<sup>1</sup> 刘宏展<sup>1</sup> 黄蓉<sup>1</sup> 高争光<sup>1</sup> 韦中超<sup>1</sup>

# 基于 PPM 硬判决的 ARQ-FSO 系统误码性能分析

## 摘要

基于 PPM (Pulse Position Modulation) 硬判决检错的 ARQ-FSO (Automatic Repeat Request-Free Space Optical) 通信系统结合了 PPM 硬判决和新的 ARQ 协议. 该系统以 PPM 硬判决的结果代替了传统 ARQ 的监督码元作为数据的检错依据, 同时只重传数据包里面译码失败部分的 PPM 符号, 消除了传统 ARQ 中用来检错的信息冗余, 提高了系统的效率. 理论分析表明该方案能够有效地改善硬判决误码率, 其通过率也优于传统 ARQ, 适用于较低误码率、低复杂度的自由空间光通信场景.

## 关键词

无线光通信; 脉冲位置调制; 硬判决; 自动重传请求

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

## 0 引言

自由空间光通信 (FSO) 因其信道容量大、传输速率快、低成本等优势, 近年来受到广泛的关注<sup>[1]</sup>. 但 FSO 系统的性能在大气传输的过程中, 受到大气散射、大气吸收和大气湍流效应的制约, 其中大气湍流是导致信号衰减、系统性能降低的主要因素<sup>[2]</sup>. 为了减轻湍流效应的影响, 脉冲位置调制被广泛应用于自由空间通信.

脉冲位置调制 (PPM) 是将一组  $M$  二进制比特数据映射为  $L$  个时隙组成的时间段上的单脉冲信号的调制方式. 在实际应用中, PPM 的解调判决方法主要有两种, 一种是硬判决译码, 通过阈值检测进行判决; 另一种是软判决译码, 通过最大后验概率 (MAP) 或者最大似然判决 (ML) 进行判决<sup>[3]</sup>. 软判决的误码率性能优于硬判决, 因此 PPM 在湍流信道下的应用通常选用软判决. 但采用 PPM 软判决的接收机通常以 FPGA 电路<sup>[4]</sup> 或者基于 EDWA/PLCs<sup>[5]</sup> 实现, 其硬件结构比硬判决更复杂而且能耗更多.

为了得到更好的误码性能, 关于 FSO 通信的研究不再局限于单一的调制技术. 自动重发请求协议 (ARQ) 作为一种非常有效的差错控制技术被用于 FSO 通信. 目前, 已经有大量的研究聚焦于 ARQ 的理论分析以及 ARQ 与其他技术的结合 (比如前向纠错码、自适应速率传输<sup>[6]</sup> 等), 但这些研究没有考虑调制技术. 因此, PPM 与 ARQ 的组合方案开始被综合考虑, 并最先出现在文献 [7]. 文献 [7] 采用 PPM 重复率编码和 ARQ 协议的红外通信系统在室内环境进行性能分析, 其优势在于不需要在数据包中增加额外的监督码元, 缺点是数据包中所有 PPM 符号都重复, 利用率不高; 文献 [8] 提出了组合 PPM 重复编码和 SR-ARQ 无线红外通信系统, 其特点是系统能根据链路状态自动改变传输速率, 适用于不利的信道条件; 文献 [9] 则对 BPPM 结合 HARQ 在弱湍流信道下的差错性能进行了研究, 但 HARQ 协议在进一步改善误码性能的同时也增加了系统的开销和复杂度. 此外, 上面提到的研究中, 若数据包中任一个 PPM 符号译码失败, 则整个数据包都需要重发, 会造成资源浪费. 因此, 通过对 ARQ 和 PPM 调制技术的综合考虑, 本文提出了一种基于 PPM 硬判决检错的 ARQ-FSO 系统. 该系统将 ARQ 的检错与 PPM 判决解调过程结合, 在 PPM 判决时对 PPM 符号检错再返回错误的符号序列数. PPM 符号检错的依据是基于 PPM 符号的特点, 当接收机对一个 PPM 符号硬判决后出现非单个

收稿日期 2017-02-10

资助项目 国家自然科学基金 (61475049); 国家重点基础研究发展计划 (2013CB29204)

作者简介

尹建军, 男, 硕士生, 研究方向为自由空间光通信. yinjianjun\_mail@163.com

刘宏展 (通信作者), 男, 博士, 教授, 研究方向为空间激光通信. lhzsenu@163.com

<sup>1</sup> 华南师范大学 信息光电子科技学院, 广州, 510006

脉冲(0个或者多个)就判定该 PPM 符号需要重发.因此,该系统不需要额外的监督码元,消除了传统 ARQ 的信息冗余,节省了奇偶校验所需的时间和开销;同时,重传时只发送数据包里面译码失败部分的 PPM 符号,提高了系统的效率.

### 1 基于 PPM 硬判决检错的 ARQ-FSO 系统

光信号在大气传输中最主要的影响来自大气湍流,湍流效应会导致信号强度的随机变化<sup>[2]</sup>.目前关于湍流信道的数学模型主要有 Log-normal 分布、Gamma-Gamma 分布和 Negative Exponential 分布等,其中 Gamma-Gamma 分布适用于弱、中、强湍流的情况.因此,本文选用 Gamma-Gamma 分布作为湍流信道模型分析,其概率密度函数<sup>[10]</sup>为

$$f_I(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), \quad (1)$$

式中,  $I$  为接收光强度,  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数,  $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$  是第二类修正贝塞尔函数,  $\alpha$  和  $\beta$  仅与大尺度湍流和小尺度湍流对数光强起伏方差有关.

基于 L-PPM 硬判决检错的 ARQ-FSO 光通信系统(下文简称 ARQ-FSO 系统)结构如图 1 所示.本文中 L-PPM 以  $L=256$  为例.ARQ-FSO 系统在传输过程中将比特数据分成固定长度为  $P$  的数据包,  $P$  是  $M(M = \log_2 L)$  的整数倍.以通信终端 A 发起通信为例,固定长度  $P$  的数据包存储至发送缓存器,再经过发射机 PPM 调制发送给通信终端 B.通信终端 B 的接收机接收信号进行 PPM 硬判决解调,如果一个 PPM 符号出现非单个脉冲(0 个或者多个)就判定该 PPM 符号需要重发.然后通信终端 B 的 ARQ 控制器将不需要重发数据存入接收缓存器中,需要重发数

据的序列号经过发射机 PPM 编码发送给通信终端 A.通信终端 A 的接收机接收信号硬判决解调后, ARQ 控制器读取发送缓存器中相应序列号的 PPM 符号数据继续发送给终端 B.当通信终端 B 的 PPM 硬判决结果全部都不用重发或者重发达到了最大重发次数时,接收缓存器输出为最终数据.

### 2 差错性能分析

根据上节提到的系统模型和信道模型,光电探测器接收信号的表达式如下<sup>[11]</sup>:

$$y = sx + n = \eta Ix + n, \quad (2)$$

其中  $y$  是光电探测器接收的信号,  $s$  是即时的强度增益,  $\eta$  为探测器的光电转换效率,  $I$  是湍流影响的光照强度,  $x$  是 PPM 调制后的激光信号,  $n$  是高斯白噪声即  $n \sim N(0, N_0/2)$ .在 Gamma-Gamma 信道下,在时间  $t$  时,  $I$  的值是定值,接收采用硬判决的瞬时误时隙率<sup>[3,11]</sup>:

$$P_{sle,t} = P(0) Q\left(\frac{\alpha_T}{\sqrt{N_0/2}}\right) + P(1) Q\left(\frac{I\sqrt{E_s} - \alpha_T}{\sqrt{N_0/2}}\right), \quad (3)$$

式中,  $Q(x)$  为  $0.5\text{erfc}(x/\sqrt{2})$ ,  $\alpha_T$  是判决的阈值.  $P(0)$  和  $P(1)$  是  $c_k$  分别为 0 和 1 的概率.又根据  $I$  的概率分布函数,则在湍流信道下误时隙率为

$$P_{sle} = \int_0^\infty f_I(I) P_{sle,t} dI, \quad (4)$$

当  $\alpha_T = 0.5I\sqrt{E_s}$ , 依据  $K_\nu(x)$  和  $\text{erfc}(x)$  函数的 Meijer G 函数形式,等式(4)近似为

$$P_{sle} \approx \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^\infty G_{1,2}^{2,0}\left(\frac{E_s I^2}{4N_0} \middle| 0 \quad \frac{1}{2}\right).$$

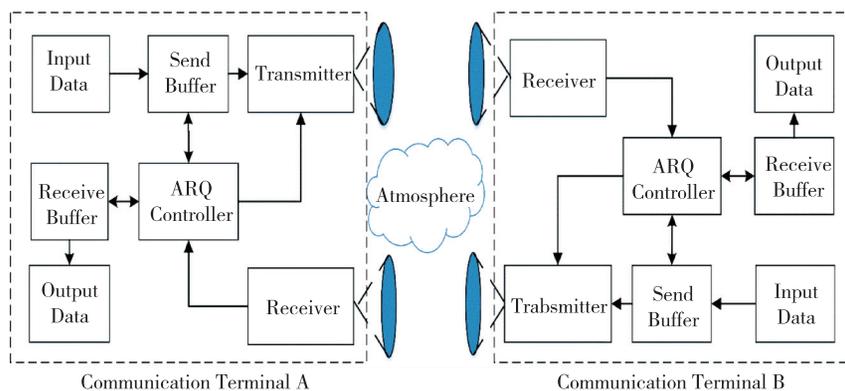


图 1 基于 L-PPM 硬判决检错的 ARQ-FSO 光通信系统结构

Fig. 1 Block diagram of FSO/ARQ communication systems using L-PPM hard decision

$$G_{0,2}^{2,0} \left( \alpha\beta I \left| \begin{matrix} - \\ \alpha - \beta & \beta - \alpha \\ 2 & 2 \end{matrix} \right. \right) I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} dI, \quad (5)$$

再依据文献[12]中的等式(21),式(5)可表示为

$$P_{\text{slc}} = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi^{\frac{3}{2}} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \cdot G_{5,2}^{2,4} \left( \frac{E_s}{(2\alpha\beta)^2 N_0} \left| \begin{matrix} 1-\alpha & 2-\alpha & 1-\beta & 2-\beta \\ 2 & 2 & 2 & 2 \end{matrix} \right. \begin{matrix} 1 \\ 0 & 1 \\ 2 \end{matrix} \right), \quad (6)$$

可得硬判决的误码率为

$$P_{\text{ber}} = \frac{L/2}{L-1} (1 - (1 - P_{\text{slc}})^L). \quad (7)$$

当采用 ARQ-FSO 系统时,直接求解系统的误码率比较困难,可先推导系统的正符号率.当接收机接收后判断需不需要重发,不需要重发的 PPM 符号即只有一个时隙超过阈值,假设接收的符号中唯一超过阈值的时隙是由发送端的时隙 1 发送的概率为  $P_{\text{E1}}$ ,接收机唯一超过阈值的时隙是由发送端的时隙 0 发送的概率为  $P_{\text{E0}}$ :

$$P_{\text{E1}} = \int_0^\infty f_1(I) \left( 1 - Q \left( I \sqrt{\frac{E_b M}{2N_0}} \right) \right)^L dI, \quad (8)$$

$$P_{\text{E0}} = \int_0^\infty f_1(I) (L-1) Q \left( I \sqrt{\frac{E_b M}{2N_0}} \right)^2 \cdot \left( 1 - Q \left( I \sqrt{\frac{E_b M}{2N_0}} \right) \right)^{L-2} dI, \quad (9)$$

从而 PPM 符号不需要重发的概率为  $P_E$  ( $P_E = P_{\text{E0}} + P_{\text{E1}}$ ).接收机在重传第  $i$  次时当次改善的正符号率

$$S_i = (1 - P_E)^i (1 - P_{\text{syce}_H}) P_{\text{E1}}. \quad (10)$$

根据等比数列求和,接收机重传  $i$  次的系统正符号率  $P_{\text{syce}_{\text{ARQ}}}$ :

$$P_{\text{syce}_{\text{ARQ}}} = P_{\text{E1}} + \frac{P_{\text{E1}}(1 - P_E)(1 - P_{\text{syce}_H})(1 - (1 - P_E)^i)}{P_E}. \quad (11)$$

由式(7)可得接收机接收  $i$  次的系统误码率  $P_{\text{ber}_{\text{ARQ}}}$ :

$$P_{\text{ber}_{\text{ARQ}}} = \frac{L/2}{L-1} (1 - P_{\text{syce}_{\text{ARQ}}}). \quad (12)$$

当系统多次重传后,最理想的情况就是数据包中所有的 PPM 符号都不需要重传.系统最理想的误码率  $P_{\text{ber}_{\text{ARQ}_{\text{optimal}}}}$  近似为

$$P_{\text{ber}_{\text{ARQ}_{\text{optimal}}}} = \frac{L/2}{L-1} \left( \frac{P_{\text{E0}} + P_{\text{E1}}(1 - P_E) P_{\text{syce}_H}}{P_E} \right). \quad (13)$$

通过率是评价 ARQ 系统利用率的重要参数,是接收端正确接收的信息比特数与发送端传送的总的的数据比特数之比.传统的 SR-ARQ 通信系统的通过率  $\eta_{\text{SR-ARQ}}$  计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$\eta_{\text{SR-ARQ}} = P_C R = (1 - P_{\text{ber}})^n \frac{k}{n}, \quad (14)$$

$P_C$ 是整个数据包正确的概率,由误码率可求得, $R$ 是码率,是信息码元  $k$  和总码元  $n$  之比.ARQ-FSO 系统不需要监督码元,且以 PPM 符号为单元检错.因此 ARQ-FSO 系统的通过率  $\eta_{\text{SR-ARQ}}$  根据定义计算可得:

$$\eta_{\text{ARQ-FSO}} = P_{\text{syce}} P_E. \quad (15)$$

### 3 数值仿真与讨论

在这一节,对系统差错性能进行仿真和分析,选用 ARQ-FSO 系统和单独的硬判决,在 Gamma-Gamma 模型的 3 种不同强度的湍流信道下进行误码率比较,其具体的湍流参数如表 1 所示.

表 1 不同湍流强度的参数<sup>[10]</sup>

Table 1 Turbulence parameters in weak to strong turbulence regimes

参数	湍流强度		
	弱	中	强
$\sigma_I^2$	0.2	1.6	3.5
$\alpha$	11.6	4.0	4.2
$\beta$	10.1	1.9	1.4

湍流强度越强,对信号的干扰越严重.所以先分析 ARQ-FSO 系统在强湍流时的性能,并与直接硬判决的误码率进行比较.如图 2 所示,其仿真结果表明本方案在强湍流下对 PPM 硬判决的差错性能有很大的改善.在相同的比特信噪比  $E_b/N_0 = 60$  dB 时,直接硬判决的误码率只有  $5 \times 10^{-3}$ ;最大重传次数  $i=1$  的 ARQ-FSO 系统误码率是  $6 \times 10^{-5}$ ;最大重传次数  $i=2$  和  $i=3$  的 ARQ-FSO 系统误码率降低至  $4 \times 10^{-5}$ ,远低于硬判决.当误码率为  $10^{-3}$  时,直接硬判决需要的信噪比是 68 dB,而 ARQ-FSO 系统只需 50 dB. ARQ-FSO 系统和直接硬判决相比,获得了大约 18 dB 增益.此外,ARQ-FSO 系统重传次数  $i=2$  和  $i=3$  两条线基本重合.因为系统只会重传错误的 PPM 符号,所以能以极少的重传次数达到其理想性能.因此,在强湍流信道下 ARQ-FSO 系统显著改善了 PPM 硬判决的误码性能,且信噪比越大,ARQ-FSO 系统的性能优势就越明显.同时,ARQ-FSO 系统所需的重传次数非常少.

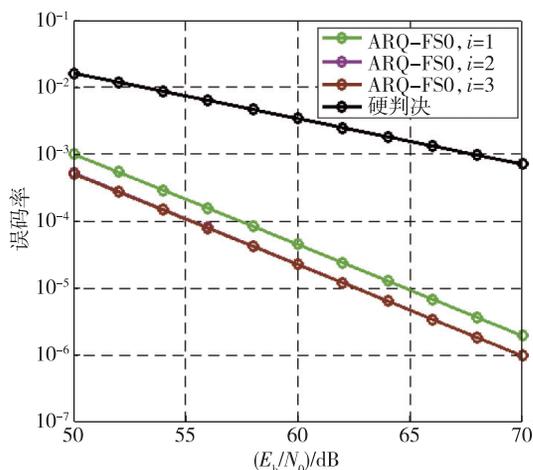


图2 强湍流下 ARQ-FSO 系统和硬判决的误码率对比  
Fig. 2 BER comparison between ARQ-FSO system and hard decision under strong turbulence

图3是 ARQ-FSO 系统与直接硬判决在不同湍流强度的误码率,其中 ARQ-FSO 系统的最大重传次数为2.当  $E_b/N_0 = 60$  dB,直接硬判决和 ARQ-FSO 系统中湍流情况下的 BER 大约是  $5 \times 10^{-4}$  和  $10^{-7}$ .对比中和强两种湍流情况,可以验证当湍流强度越强,对信号的干扰越严重这一结论.当误码率为  $10^{-6}$  时,在弱湍流情况下,ARQ-FSO 系统相比直接硬判决获得了大约 10 dB 增益.而同样的误码率在中湍流下,ARQ-FSO 系统获得了大约 30 dB 增益,这表明湍流强度越强,ARQ-FSO 系统的改善效果越明显.此外当处于强湍流、低信噪比的情况下,ARQ-FSO 系统的优势将不再明显.因为在极端恶劣的通信情况下,每次重传的过程依然会导致非常多的误码.

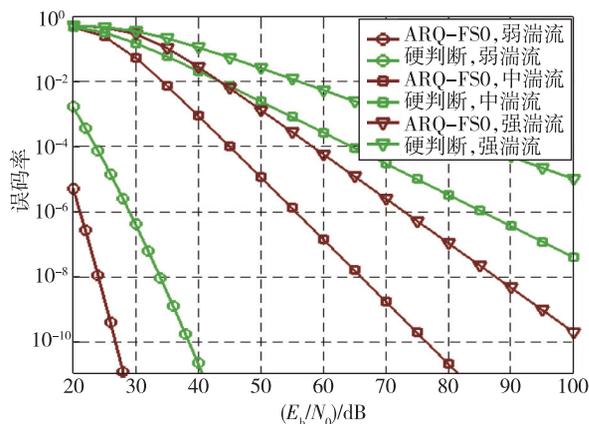


图3 ARQ-FSO 系统和硬判决在不同湍流情况下的误码率对比

Fig. 3 BER comparison between ARQ-FSO system and Hard decision under different turbulences

ARQ-FSO 系统和 SR-ARQ 系统在不同湍流情况下的通过率对比如图4所示.从图4中可以看到本方案的通过率在3种湍流强度下都优于传统的 SR-ARQ 系统.以通过率为0.5为例,ARQ-FSO 系统在弱、中、强3种湍流强度下所需的信噪比分别比 SR-ARQ 系统少了10、30和40 dB.这表明虽然随着湍流强度的增加,信号收到的扰动越大,但 ARQ-FSO 系统在通过率方面相对于传统 SR-ARQ 系统,其优势会随着湍流强度增加而更加显著.

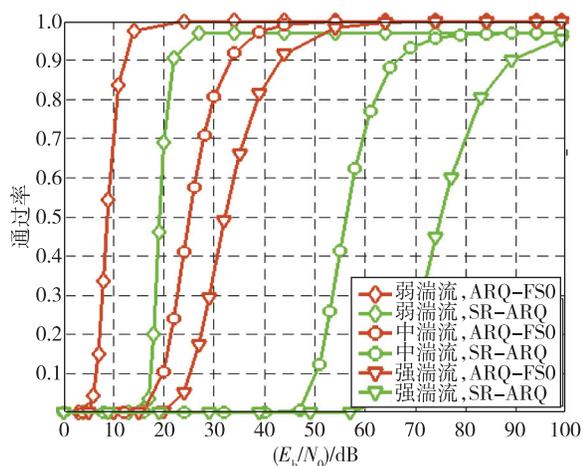


图4 ARQ-FSO 系统和 SR-ARQ 系统在不同湍流情况下的通过率对比

Fig. 4 Throughput efficiency comparison between ARQ-FSO system and SR-ARQ systems

## 4 结论

本文根据自由空间光通信的特性和 PPM 解调判决的硬件特点,提出了一个基于 PPM 硬判决检错的 ARQ-FSO 光通信系统.该系统不需要额外的监督码元,重传时只发送数据包里面译码失败的 PPM 符号,提高了系统的效率.通过该方案在不同湍流下的差错性能分析,推导出 Gamma-Gamma 信道下误码率和通过率公式.理论分析和仿真结果表明 ARQ-FSO 系统能够有效地改善硬判决误码率,并且以极低的重传次数就能达到 ARQ-FSO 系统下的理想性能.此外,ARQ-FSO 系统在通过率方面也优于传统的 ARQ 系统.

## 参考文献

### References

[1] Khalighi M A, Uysal M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16

- (4):2231-2258
- [ 2 ] Zhu X M, Kahn J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [ J ]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50 ( 8 ) : 1293-1300
- [ 3 ] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications: System and channel modelling with MATLAB [ M ]. London: CRC Press, 2012
- [ 4 ] Baiguanysh S B, Mirmanov A B, Alimbaev A S, et al. Implementation of PPM modulation and demodulation using NI digital electronics FPGA board [ C ] // International Siberian Conference on Control and Communications, 2015: 1-4
- [ 5 ] Mendez A J, Hernandez V J, Gagliardi R M, et al. Design of optical pulse position modulation ( PPM ) translating receiver [ C ] // IEEE Leos Annual Meeting Conference, 2009: 18-19
- [ 6 ] Mai V V, Pham A T. Cross-layer designs and analysis of adaptive-rate transmission and ARQ for free-space optical communications [ J ]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8 ( 1 ) : 1-15
- [ 7 ] Ozugur T, Naghshineh M, Kermani P, et al. Performance evaluation of L-PPM links using repetition rate coding [ C ] // The Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1998, 2: 698-702
- [ 8 ] Samaras K, O'Brien D C, Edwards D J. Combination of repetition-coded PPM with SR-ARQ for wireless infra-red communication [ J ]. Electronics Letters, 1998, 34 ( 23 ) : 2199-2201
- [ 9 ] Kiasaleh K. Hybrid ARQ for FSO Communications through turbulent atmosphere [ J ]. Ieee Communications Letters, 2010, 14 ( 9 ) : 866-868
- [ 10 ] Popoola W O, Ghassemlooy Z. BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27 ( 8 ) : 967-973
- [ 11 ] Kiasaleh K. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence [ J ]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53 ( 9 ) : 1455-1461
- [ 12 ] Adamchik V S, Marichev O I. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in REDUCE system [ C ] // International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, 1990: 212-224
- [ 13 ] Lin S, Costello D J J, Miller M J. Automatic-repeat-request error-control schemes [ J ]. IEEE Communications Magazine, 1984, 22 ( 12 ) : 5-17

## Performance of ARQ-FSO system based on PPM hard decision in turbulence channel

YIN Jianjun<sup>1</sup> LIU Hongzhan<sup>1</sup> HUANG Rong<sup>1</sup> GAO Zhengguang<sup>1</sup> WEI Zhongchao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006

**Abstract** We present an ARQ-FSO system, which consists of pulse position modulation ( PPM ) hard decision and a novel automatic repeat request ( ARQ ) protocol. Instead of traditional ARQ 's data error detection, the PPM hard decision results are used to find data error. Then the transmitter only retransmits the failed decoded portion of the packet. These measures can eliminate the information redundancy of traditional ARQ and enhance the system efficiency. Theoretical analysis shows that the ARQ-FSO system can effectively improve the BER performance of the direct hard decision PPM system. Additionally, the proposed system significantly improves the average throughput efficiency compared with traditional ARQ systems. These characteristics make this ARQ-FSO system suitable to apply in low BER and low complexity FSO communications.

**Key words** free space optical ( FSO ) communications; pulse position modulation ( PPM ); hard decision decoding; automatic repeat request ( ARQ )