

文章编号 1004-924X(2016)增-0309-07

## 自动重传请求机制在空间光通信中的性能

耿 驰<sup>1</sup>, 吴茗蔚<sup>2\*</sup>, 王振永<sup>1</sup>, 宋天宇<sup>3,4</sup>, 甘培润<sup>3,4</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 浙江科技学院 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310023;

3. 新加坡国立大学 电子与计算机工程学院, 新加坡 117583;

4. 苏州工业园区新国大研究院 先进微电子器件中心, 江苏 苏州 215123)

**摘要:**在自由空间光通信(FSO)系统中,为了公平分析使用自动重传请求机制的性能,提出了有效平均接收功率。对该系统的误比特率、吞吐量等系统性能进行了研究。通过计算自由空间光通信中数据帧重传时损耗的能量,证明了当系统在足够高的平均接收功率的条件下能获得很好的性能增益。实验结果表明:在弱湍流和强湍流的信道环境下,当平均接收功率分别高于 $-29.2$  dBm 和 $-31.7$  dBm 时,FSO 系统使用 ARQ 机制才是有效的。当传统 ARP 在弱湍流信道环境下和强湍流信道环境下分别高于 $-24.2$  dBm 和 $-17.2$  dBm 时,系统性能会有显著的提高;而当平均接收功率较低时,由于重传次数大,系统为数据帧的重传消耗大量能量,因此系统性能很差。

**关键词:**空间光通信;自动重传请求;平均接收功率;误比特率;吞吐量;有效吞吐量

**中图分类号:**TN929.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0309

## Performance of ARQ scheme over FSO system

GENG Chi<sup>1</sup>, WU Ming-wei<sup>2\*</sup>, WANG Zhen-yong<sup>1</sup>, SONG Tian-yu<sup>3,4</sup>, KAM Pooi-yuen<sup>3,4</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and  
Technology, Hangzhou 310023, China;

3. Department of Electrical and Computer Engineering, National  
University of Singapore, Singapore 117583;

4. Centre of Advanced Microelectronic Devices, NUS Suzhou  
Research Institute, Suzhou 215123, China)

\* Corresponding author, E-mail: mingweiwu@ieee.org

**Abstract:** In order to fairly analyze the performance with Automatic Repeat Request (ARQ) mechanism in Free Space Optical communications (FSO), the effective ARP is proposed. The performance of the system was studied, involving bit error probability and throughput. By evaluating the energy consumption attribute to frame retransmissions in FSO, good performance gain was achieved only for reasonably high average received power. The experimental results indicate that the ARQ scheme

收稿日期:2016-05-23;修订日期:2016-06-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61302112, No. 61571316);钱江人才计划资助项目(No. QJD1402023)

serves effectively only when ARP is higher than  $-29.2$  dBm in weak turbulence channel and  $-31.7$  dBm in strong turbulence channel. Furthermore when the conventional ARPs were higher than  $-24.2$  dBm and  $-17.2$  dBm respectively in weak turbulence channel and strong turbulence channel, the performance of the FSO system is improved significantly, whereas it is poor at low ARP due to the massive retransmissions and the huge energy consumption.

**Key words:** Free Space Optical communication(FSO); Automatic Repeat reQuest (ARQ); Average Received Power (ARP); Bit Error Probability (BEP); throughput; goodput

## 1 引 言

自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSO)是以光波作为传输载波,以自由空间作为传输介质的通信系统。由于 FSO 具有通信容量大、体积小、功耗低、传输距离远、抗干扰能力强以及光束发散小不易被截获等优点,所以在无线通信、移动网络、卫星通信等应用领域中得到了广泛的关注<sup>[1-4]</sup>。

对于 FSO 而言,大气湍流和指向误差会导致接收信号能量的波动,从而大大降低系统性能。自动重传请求(Automatic Repeat reQuest, ARQ)机制通过使用循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Check, CRC)和数据帧重传的方式,使系统的可靠性得到提升,因此广泛应用在无线通信中。将 ARQ 机制应用在 FSO 中,可以克服接收到的光信号能量波动的问题,提高系统可靠性。这方面研究始于 2000 年,研究人员针对不同 FSO 场景的几种 ARQ 传输机制进行了设计与性能分析,包括带有增量冗余的自适应混合 ARQ 机制协议设计、混合 ARQ 机制在点对点 FSO 系统中的一致性能、针对高海拔平台场景的 ARQ 分析等<sup>[5-11]</sup>。众所周知,ARQ 机制对系统性能的提升是以牺牲系统的吞吐量或带宽效率为代价的。而在成功接收一个数据包的过程中,由于重传导致的更多能量的消耗却往往被忽视。早期研究在进行误比特率性能分析时,没有将由重传消耗的能量计算在内<sup>[5-14]</sup>。虽然文献[6]中考虑了重传能量,但是它的误比特率是通过设定最大可传输次数进行计算的,而这个参数是个常数。在实际中,由于加性高斯白噪声(Addictive White Gaussian Noise, AWGN)和 FSO 信道波动变化的随机性,接收机成功接收到的每个数据帧的传输次数是一个随机变量。此外,文献[7]从信息论

的角度推导了平均传输次数的理论表达式。文献[9]推导了无检错码的误帧率。由于没有用 CRC 校验码进行检错,上述两种结果都无法反映出真实的 ARQ 性能。为了权衡吞吐量和能量消耗,Zedini 等人提出了吞吐量-能量效率<sup>[9]</sup>。

通常在 FSO 系统中,将光接收机单位时间内接收到的光束能量称为平均接收能量(Average Received Power, ARP),本文中称为传统 ARP。为了更公平地评价 FSO 中使用 CRC 的 ARQ 机制的误比特率和吞吐量性能,本文提出了有效 ARP(Effective Average Recieved Power, EARP)。本文使用了开关键控(On-Off Key, OOK)的强度调制直接检测(IM/DD)系统。通过仿真发现当传统 ARP 足够高时,只需要极少次重传就可以获得很高的性能增益;然而在传统 ARP 较低时,由于重传次数很大,误码率性能很差。

## 2 FSO 系统模型与信道模型

### 2.1 系统模型

由于相位调制和频率调制的实现难度很高,大多数 FSO 系统应用 IM/DD 方式。对于 FSO 系统,由大气湍流和指向误差引起的接收信号强度的波动会大大降低系统的传输质量。

本文使用的 FSO 系统的接收机原理如图 1 所示。记  $I$  为信号强度距离,得到光传输信号的平均功率为  $\bar{P} = I/2$ 。假设接收机对每个符号间隔为  $T_s$  的光电流进行积分,并去除所有由背景光引起的常偏差,在积分过程中假设光电流是常数。当发送机发出取值于集合  $\{0, 1\}$  的数据符号  $m(k)$  时,接收信号  $r(k)$  可以表示为<sup>[15]</sup>:

$$r(k) = \sqrt{1/T_s} R h I m(k) T_s + n(k), \quad (1)$$

式中: $R$  表示光子检测器的响应率; $h$  代表瞬时信

道增益,其波动由信道中的大气湍流和指向误差引起。由于光子检测器进行光电转换,因此热噪声是主要考虑的噪声因素。在实际接收机硬件中并不需要分析正交基  $\Phi_0(t) = \sqrt{1/T_s}$ ,这里采用正交基是为了便于后续通过标准化离散加性高斯白噪声(AWGN)  $n(k)$ 对性能分析进行简化,得到  $E[n(i)n(j)] = \delta_{ij}N_0/2$ 。定义  $A = \sqrt{1/T_s}RhIT_s$ 为接收机的瞬时电信号强度,则  $r(k)$ 可以表示为:

$$r(k) = Am(k) + n(k). \quad (2)$$

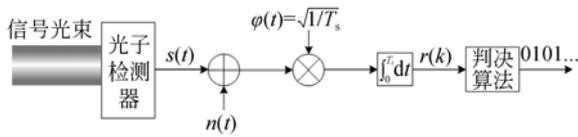


图 1 接收机原理图

Fig. 1 Principle schematic of receiver

## 2.2 信道模型

对于 OOK 系统来说,大气湍流和指向误差是引起衰落进而降低系统性能的主要问题。在上述的系统模型中,假设有 3 个参数决定  $h$ :几何扩散与指向误差  $h_p$ ,大气湍流  $h_a$ ,路径损耗  $h_l$ 。于是信道增益  $h$  可以表示为:

$$h = h_p h_a h_l. \quad (3)$$

对于弱湍流信道,  $h_a$  服从对数正态分布;对于强湍流信道,  $h_a$  服从伽马-伽马分布。由于伽马-伽马分布适用于比较广泛的湍流情况,因此这里只考虑  $h_a$  为服从伽马-伽马分布的随机变量,于是  $h_a$  概率密度函数为:

$$p_{h_a}(h) = \frac{2(a\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{a\beta h}), \quad h > 0, \quad (4)$$

式中:  $K_a(\cdot)$  是以  $a$  为级数的第二类修正贝塞尔函数,  $\alpha$  和  $\beta$  是分布形状参数。  $h_p$  的概率密度函数为:

$$p_{h_p}(h) = \frac{\gamma^2}{A_0^2} h^{\gamma^2-1}, \quad 0 < h < A_0, \quad (5)$$

式中:  $A_0$  是无指向误差时接收功率的部分,  $\gamma$  是接收机的等效光束半径与指向误差标准偏差的比值<sup>[15]</sup>。由于  $h_l$  的变化速率比  $h_p$  和  $h_a$  慢,因此可视为确定性变量,而  $h_p$  和  $h_a$  视为随机变量。设  $h_l = 1$ , 得到对于带有指向误差的湍流信道,其信道增益  $h = h_a h_p$ 。于是,  $h$  的概率密度函数为<sup>[15]</sup>:

$$p_h(h) = \int_0^\infty \frac{1}{|a|} p_{h_a}(a) p_{h_p}\left(\frac{h}{a}\right) da, \quad h > 0. \quad (6)$$

此外,FSO 系统的相关长度  $L_c$  定义为  $h$  可视为常数时的连续数据符号间隔数。对于数据速率为 Gb/s 级的系统,由于信道相关长度很大,因此数据和信道状态信息可以被同时检测和估计。

## 3 面向 FSO 的有效 ARP 参数

在 ARQ 机制的传输系统中,接收机会向发送机报告解调状态。当接收数据帧被接收机成功解调时,接收机向发送机反馈一个肯定应答(ACK),发送机就会发送下一个数据包;否则,当数据帧被检测出错误时,接收机向发送机反馈否定应答(NACK),发送机就要重传该数据帧。重传持续进行,直到发送机收到一个 ACK 或达到最大允许的重传次数为止。若后者发生,即产生误码,此时该数据帧会被丢弃。对于无线通信系统,ARQ 机制利用了检错码和数据帧的重传而获得良好的可靠性。对于 FSO 信道,可以用类似的传输方法提高通信中的性能。但 FSO 与无线通信不同的是:无线通信系统常用接收到的信噪比作为系统性能的分析参数,而在 FSO 系统中由于接收机的光子检测器接收到的光功率与输出的电流功率不是线性关系,且其单位时间内接收到的光功率是容易计算的物理量,因此光通信的接收机通常用 ARP 作为测量参数。

当系统成功接收一个数据帧时,有 ARQ 机制的系统比无 ARQ 机制的系统多消耗的能量主要有两方面来源:数据帧中校验码消耗的能量和数据帧重传所消耗的能量。由于 ARQ 机制为数据帧加入了校验码,而校验码也是消耗发送能量的因素,因此在计算接收 ARP 时需要考虑校验码的码率。假设消息序列是以  $m$  个信息比特为一组。每  $m$  个信息比特组都与  $(n-m)$  个校验位共同组成一个  $n$  位 CRC 码,并作为一帧进行传输。因此 CRC 码率为  $m/n$ <sup>[16]</sup>。假设数据帧中每个比特的能量相同,则该数据帧信息的总能量是原消息序列的  $n/m$  倍。

对于需要重传的数据帧,由于每次传输都在消耗系统能量,因此在接收机成功接收一个数据帧时,只计算一次传输所接收到的 ARP(即传统

ARP)是不合理的。为了对系统性能进行公平的分析与比较,需要考虑数据帧的总传输能量。定义平均传输次数为所有数据帧的总传输次数与接收帧个数的比值。通过在实验中记录下每个接收数据帧的传输次数,计算得到所有帧的平均传输次数  $M$ 。当系统对数据帧设定最大重传次数时,丢弃的数据帧的传输次数也应该包含于总传输次数中。一般来说,由于数据帧的多次重传可以在一个信道相关长度内完成,则系统每次重传消耗的发送能量相同,因此系统传输消耗的总能量是传输一次消耗能量的  $M$  倍。此外,由于相关长度内信道增益保持不变,于是系统每次重传接收机接收到的 ARP 相同。

综上所述,本文使用 EARP(记为  $P_s$ )来评估系统性能。 $P_s$ 定义为传统 ARP(记为  $P_c$ )、CRC 校验码码率  $n/m$  和平均传输次数  $M$  的乘积,即:

$$P_s = P_c \times n/m \times M. \quad (7)$$

ARQ 机制一般会明显降低系统的误比特率。然而,校验码和重传也会消耗更多的能量。传统 ARP 不计算由单帧多次重传消耗的能量。因此,用传统 ARP 比较使用 ARQ 机制与不使用 ARQ 机制的系统是不公平的。从式(7)可以看出有效 ARP 考虑了校验码和重传消耗的能量。因此,有效 ARP 不仅能够反映系统消耗的能量,还具备有效性,更适合作为系统性能比较的参数。

## 4 实验与结果讨论

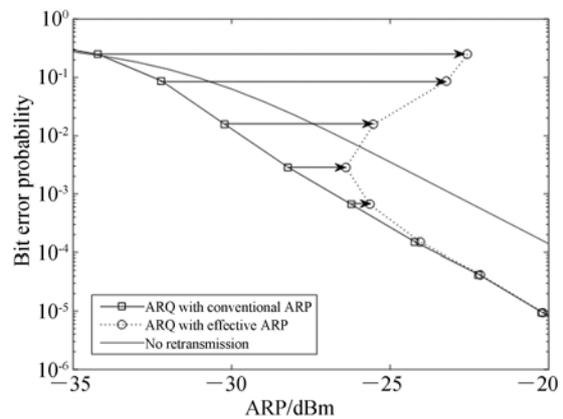
### 4.1 实验参数

为了公平比较不同传输机制的性能,实验使用与文献[15]相同的信道模型和系统参数,具体如下:对于弱湍流信道, $\alpha=17.13$ , $\beta=16.04$ ,对应的  $SI=0.1244$ ;对于强湍流信道, $\alpha=2.23$ , $\beta=1.54$ , $SI=1.3890$ 。指向误差参数可以选为  $A_0=0.0198$ 和  $\gamma=2.8071$ 。设光子检测器的响应率  $R=1$ ,信道增益的期望  $E[h]=1$ 。另外,假设系统数据速率  $R_{data}$ 为  $10 \text{ Gb/s}$ ,则信号符号间隔  $T_s=1/R_{data}=10^{-10} \text{ s}$ ,信道相关长度  $L_c$ 为  $10^4$ 个符号间隔时可视为安全。考虑典型热噪声为  $-174 \text{ dBm/Hz}$ ,通过一个  $50 \Omega$ 的接收回路。因此得到  $N_0/2 = -174 \text{ dBm/Hz} \div 50 \Omega = 7.96 \times 10^{-23} \text{ A}^2/\text{Hz}$ ,即  $N_0 = 1.59 \times 10^{-22} \text{ A}^2/\text{Hz}$ 。在 ARQ 机制中,假设每个数据帧传输 20 个信息比

特,并用 CRC-4 作为错误校验码,得到数据帧长度为 24,其码率为  $20/24$ 。

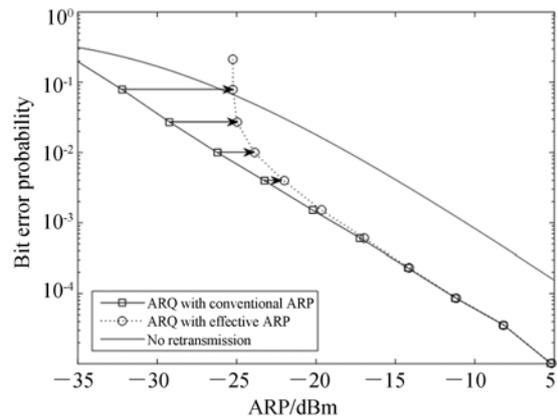
### 4.2 数值结果与讨论

图 2 描述了系统的误比特率与传统 ARP 和有效 ARP 的关系曲线,其中箭头的含义是有效 ARP 高于传统 ARP 的幅度。对于使用传统 ARP 的 ARQ 机制,ARP 的值就是接收机的检测结果;而对于使用有效 ARP 的 ARQ 机制,其 ARP 的值是将传统 ARP 和  $M$  的结果代入公式(7)中计算得到的。由于  $M$  是个变化值,因此有效 ARP 对应的误比特率曲线并不是单调递减的。



(a)弱湍流信道 $SI=0.1244$

(a)  $SI=0.1244$  in weak turbulence channel



(b)弱湍流信道 $SI=1.3890$

(b)  $SI=1.3890$  in weak turbulence channel

图 2 传统 ARP 与有效 ARP 的误比特率曲线(码率为  $20/24$ )

Fig. 2 BEP curves over conventional and effective ARP(code rate is  $20/24$ )

由此得到一个重要发现:对于弱湍流信道,当传统 ARP 低于  $-30.2$  dBm 时,对于强湍流信道,当传统 ARP 低于  $-32.2$  dBm 时,重传次数很大,导致有效 ARP 大幅提高,这意味着 ARQ-FSO 系统要耗费巨大的能量进行传输且系统性能很差。那么,只有当传统 ARP 的值高于“有效 ARP”曲线与“无重传”曲线的交点时,才值得使用 ARQ 机制,因为只有此时使用 ARQ 机制的有效 ARP 误比特率曲线才低于未使用 ARQ 机制的误比特率曲线。对于弱湍流信道,交点值为  $-29.2$  dBm;对于强湍流信道,交点值为  $-31.7$  dBm。然而,如果传统 ARP 高于这些值,误比特率就会快速降低。这是因为随着 ARP 的增加,平均传输次数  $M$  将快速地减小到接近于 1,如表 1 所示。这意味着当 ARP 足够高时,只需要很少的重传次数就可以获得很高的性能增益。从图中还可看出当传统 ARP 的值在弱湍流信道中从  $-24.2$  dBm 开始增加、在强湍流信道中从  $-17.2$  dBm 开始增加时,EARP 的误比特率曲线开始趋近传统 ARP 的误比特率曲线,此时 ARQ 机制由于重传所消耗的能量已对系统性能影响不大,可以用传统 ARP 的误比特率曲线来近似衡量系统性能。

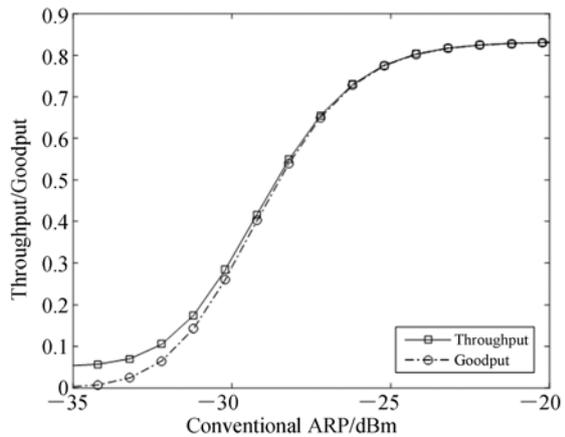
表 1 不同传统 ARP 条件下的平均传输次数  $M$

Tab.1 Average number  $M$  of transmissions for different conventional ARP

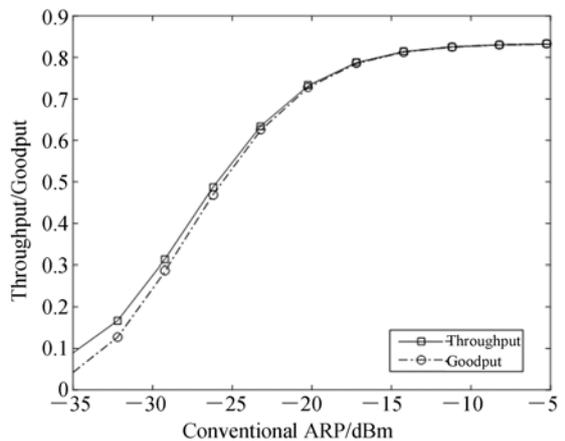
弱湍流信道 SI=0.1244			
APR/dBm	M	APR/dBm	M
-31	2.939 336	-25	1.037 803
-30	1.998 312	-24	1.019 668
-29	1.519 140	-23	1.010 356
-28	1.271 037	-22	1.005 320
-27	1.141 344	-21	1.002 819
-26	1.073 043	-20	1.001 451
强湍流信道 SI=1.389 0			
APR/dBm	M	APR/dBm	M
-33	4.999 79	-15	1.024 077
-30	2.651 285	-12	1.009 612
-27	1.708 254	-9	1.003 592
-24	1.313 270	-6	1.001 358
-21	1.138 186	-3	1.000 460
-18	1.058 802	0	1.000 170

另一对性能参数是吞吐量和有效吞吐量。吞

吐量定义为单位时间内被成功接收的信息数量与发送的信息数量的比值;有效吞吐量定义为单位时间内成功接收的正确信息数量与发送的信息数量的比值。从图 3 可以看出,吞吐量和有效吞吐量的最大值均接近 0.83,这是由于系统发送机发送的数据帧中包含校验码字的信息,而接收机在解调时会将数据帧的校验码去掉,因此系统吞吐量的最大值即为错误校验码的码率。



(a)弱湍流信道SI=0.124 4  
(a) SI=0.124 4 in weak turbulence channel



(b)弱湍流信道SI=1.389 0  
(b) SI=1.389 0 in weak turbulence channel

图 3 传统 ARP 的吞吐量与有效吞吐量曲线(码率为 20/24)

Fig.3 Throughput and goodput curves over conventional ARP(code rate is 20/24)

由图 3 可知,随着传统 ARP 在弱湍流信道中从  $-34.2$  dBm 增加到  $-23.2$  dBm、在强湍流信道中从  $-35.0$  dBm 增加到  $-11.2$  dBm 时,吞吐量和有效吞吐量都会快速增加,且有效吞吐量曲

线趋近于吞吐量曲线,而在其它范围时几乎不变。这意味着系统接收的 ARP 在上述范围增大时,系统吞吐量快速上升,误比特率快速降低,系统性能得到很大改善;而 ARP 在其它范围变化时,对系统的吞吐量性能几乎没有影响。

## 5 结 论

为了公平比较使用 ARQ 机制和未使用 ARQ 机制的 FSO 系统性能,本文提出了有效 ARP。通过实验表明,在弱湍流信道环境下,当传统 ARP 低于 $-30.2\text{dBm}$ 时,在强湍流信道环境下,当传统 ARP 低于 $-32.2\text{dBm}$ 时,由于重传次数很大,ARQ-FSO 系统要耗费巨大的能量进行传输且系统性能很差。此外,在弱湍流信道环

境下,当传统 ARP 高于 $-29.2\text{dBm}$ 时,在强湍流信道环境下,当传统 ARP 高于 $-31.7\text{dBm}$ 时,使用 ARQ 机制的 FSO 系统才是有效的,否则使用 ARQ 机制只会造成能量的浪费,而不会提高系统性能。在弱湍流信道环境下,当传统 ARP 高于 $-24.2\text{dBm}$ 时,在强湍流信道环境下,当传统 ARP 高于 $-17.2\text{dBm}$ 时,系统性能会有显著提高。随着传统 ARP 在弱湍流信道中从 $-34.2\text{dBm}$ 增加到 $-23.2\text{dBm}$ 、在强湍流信道中从 $-35.0\text{dBm}$ 增加到 $-11.2\text{dBm}$ 时,系统吞吐量快速上升,误比特率快速降低,系统性能得到很大改善。为了得到“有效 ARP”曲线与“无重传”曲线交点的精确理论值,还需要进行进一步的理论推导。本文为 FSO 系统设计 ARQ 机制奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 王绍举,金光,徐开. 高精度激光通信小卫星星座仿真平台设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(8): 1554-1559.  
WANG SH J, JIN G, XU K. Design of simulation platform for high precision laser communication small satellite constellation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1554-1559. (in Chinese)
- [2] 赵馨,王世峰,佟首峰,等. 飞机-地面间激光通信天线的初始对准[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(7): 1190-1195.  
ZHAO X, WANG SH F, TONG SH F, *et al.*. Initial alignment of antenna for laser communication system between aircraft and ground station [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1190-1195. (in Chinese)
- [3] 黎明,黄勇,曹阳,等. 移动平台上空间光通信系统性能研究[J]. 光电子·激光, 2014(7): 1310-1314.  
LI M, HUANG Y, CAO Y, *et al.*. Outage performance for mobile MIMO free-space optical systems [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014(7): 1310-1314. (in Chinese)
- [4] 庞春颖,张涛. 激光主动成像系统信噪比模型的研究[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(2):319-324.  
PANG CH Y, ZHANG T. Signal-to-noise ratio model of laser active imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):319-324. (in Chinese)
- [5] KOSE C, HALFORD T R. Incremental redundancy hybrid ARQ protocol design for FSO links [C]. *IEEE Conference on Military Communications*. IEEE Press, 2009:1-7.
- [6] KIASALEH K. Hybrid ARQ for FSO communications through turbulent atmosphere [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(9):866-868.
- [7] ZEDINI E, CHELLI A, ALOUINI M S. On the performance analysis of hybrid ARQ with incremental redundancy and with code combining over free-space optical channels with pointing errors [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4):1-18.
- [8] ZEDINI E, CHELLI A, ALOUINI M S. Unified performance analysis of hybrid-ARQ with incremental redundancy over free-space optical channels [C]. *Proc. Pers. Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, 2014:774-778.
- [9] MAI V V, THANG T C, PHAM A T. Performance of TCP over free-space optical atmospheric turbulence channels [J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2013, 5(11):1168-1177.
- [10] ABDULHUSSEIN A, OKA A, NGUYEN T T, *et al.* Rateless coding for hybrid free-space optical and radio-frequency communication [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3):907-913.
- [11] PARTHASARATHY S, KIRSTAEDTER A,

- GIGGENBACH D. Simulative performance analysis of ARQ schemes for free-space optical Inter-HAP channel model [C]. *Photonic Networks*, 2015:1-5.
- [12] MAI V V, THANG T C, PHAM A T. Cross-layer design and analysis for FSO links using automatic repeat request and adaptive modulation/coding schemes [C]. *Proc. Commun. Syst. Netw. Digit. Signal Process. (CSNDSP)*, 2014:1176-1180.
- [13] 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.
- [14] MAI V V, PHAM A T. Adaptive multi-rate designs for hybrid FSO/RF systems over fading channels [C]. *IEEE GLOBECOM 2014 Workshop-Optical Wireless Communications*, 2014: 469-474.
- [15] SONG T Y, KAM P Y. Robust data detection for the photon-counting free-space optical system with implicit CSI acquisition and background radiation compensation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 34(4):1120-1132.
- [16] WU M W, KAM P Y. ARQ with channel gain monitoring [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(11):3342-3352.

## 作者简介:



耿 驰(1993—),男,辽宁锦州人,学士,2015年于西北工业大学获得学士学位,主要从事空间光通信、最佳接收机设计方面的研究。E-mail: gengchi@126.com

## 通讯作者:



吴茗蔚(1977—),女,浙江杭州人,博士,副教授,硕士生导师,2000年、2003年、2011年于新加坡国立大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事于无线、光通信 ARQ 协议、接收机设计与性能分析等方面的研究。E-mail: mingweiwu@ieee.org