

单位代码: 10293 密 级:

南京邮电大学
硕 士 学 位 论 文



论文题目: 基于多种调制方式的相干
FSO 系统仿真研究

| | |
|-------------|-------------------|
| 学 号 | <u>1016030921</u> |
| 姓 名 | <u>代瑞楠</u> |
| 导 师 | <u>徐宁</u> |
| 学 科 专 业 | <u>光学工程</u> |
| 研 究 方 向 | <u>光通信</u> |
| 申 请 学 位 类 别 | <u>工学硕士</u> |
| 论 文 提 交 日 期 | <u>2019/3</u> |

Study on performance of Free space Optical Communication using coherent detection based mutli-modulation

Thesis Submitted to Nanjing University of Posts and
Telecommunications for the Degree of
Master of Engineering



By

Dai Ruinan

Supervisor: Prof. Xu Ning

March 2019

南京邮电大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京邮电大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

本人学位论文及涉及相关资料若有不实，愿意承担一切相关的法律责任。

研究生学号：_____ 研究生签名：_____ 日期：_____

南京邮电大学学位论文使用授权声明

本人承诺所呈交的学位论文不涉及任何国家秘密，本人及导师为本论文的涉密责任并列第一责任人。

本人授权南京邮电大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档；允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索；可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本学位论文。本文电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。论文的公布（包括刊登）授权南京邮电大学研究生院办理。

非国家秘密类涉密学位论文在解密后适用本授权书。

研究生签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

摘要

通信可以分为有线通信和无线通信两大类，目前有线通信作为主流通信手段具有速率快容量高的优点，但在不易敷设有线路的地区受限。自由空间光通信技术（Free Space Optical, FSO）以其设备安装灵活、保密性强且无需申请高昂的频谱资源的优点，被用作有线通信和微波通信的补充和备份。本文简要地介绍了自由空间光通信技术的背景与研究现状，分析了地-地自由空间光通信技术的基本工作原理以及本身的优缺点。由于大气信道的随机性和复杂性限制了系统的传输性能，可选用合适的调制方式和接收方式抑制大气信道对光信号的影响，从而提高 FSO 系统性能。

（1）首先，本文研究了近地大气层中的固体粒子与气溶胶粒子引起的吸收损耗、大气湍流运动引起的光强闪烁效应、不均匀尺度的湍流引起的相位漂移效应。除大气信道的影响之外，作为点对点通信的自由空间光通信系统，发射端与接收端不可避免的存在瞄准问题。以大气湍流光强起伏模型 Gamma-Gamma 概率分布函数为基础，联合大气粒子吸收损耗、瞄准误差以及不均匀湍流引起的相位漂移效应建立了大气联合信道模型。

（2）调制技术是自由空间光通信技术的关键技术之一。从提高信息传输容量的角度分析，正交频分复用调制技术（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）采用多子载波调制方式，大大提高了系统通信容量。从减少大气对调制方式的影响的角度分析，激光在大气链路中远距离传输时偏振态信息较稳定，偏振调制技术(Polarization shift keying, Polsk)有效降低了系统误码率。本文对基于几种调制的 FSO 系统原理以及系统性能做了详细分析，并仿真分析了理想信道下和联合信道下几种调制方式的 FSO 系统平均误码率和平均通信容量。

（3）使用 Optisystem 仿真软件搭建了基于偏振调制的 FSO 系统，对直接接收、零差相干、外差相干接收三种接收方式进行了比较。仿真分析了大气衰减、通信距离以及本振光源与信号光之间的相位误差对相干接收系统性能的影响；定量分析了湍流强度、信噪比、归一化阈值、归一化抖动系数和归一化束宽对相干 FSO 系统误码率和中断概率的影响。

本文分析了 FSO 系统的几种调制方式，在联合信道的基础上仿真对比了几种调制方式。仿真结果表明 PSK-OFDM 调制有效提高了系统通信容量和平均误码率性能，但系统性能更易受相位漂移的影响；Polsk 调制方式更好的抑制了大气对信号的干扰，提高了系统的可靠性。并为偏振调制相干 FSO 系统的参数给出了建议，优化了系统性能。

关键词：自由空间光通信，联合大气信道，调制方式，相干接收，误码率

Abstract

Communication can be divided into two categories: wired communication and wireless communication. As the mainstream means of communication, wired communication has the advantages of fast speed and high capacity, but it is limited in areas where cable and optical fiber are not easy to lay. Free space optical communication technology is widely used as supplement and backup of wired and microwave communications in military and commercial communications due to its advantages of flexible installation, strong confidentiality and no need to apply for high frequency resources. This paper briefly introduces the background and research status of FSO technology, and analyses the basic working principle of ground-to-ground FSO technology and the advantages and disadvantages of the technology itself. Due to the randomness and complexity of the atmospheric channel, it is impossible to select appropriate modulation mode at transmitter modulation and reception mode at receiver for suppressing the influence of atmospheric channel and improving the performance of FSO system. The main work and achievements of this paper are as follows:

- (1) Firstly, in this paper ,for the ground-to-ground FSO communication system , the absorption and scattering effects of light by solid particles and aerosol particles in the near-Earth atmosphere, the scintillation effect of light intensity caused by atmospheric turbulent motion, and the phase drift effect caused by non-uniform scale turbulence are studied. In addition to the influence factors in the atmospheric channel, the free space optical communication system as point-to-point communication inevitably has the aiming problem at the transmitter and receiver after long-distance transmission. In this paper, Gamma-Gamma probability distribution model of atmospheric turbulence intensity fluctuation, which is consistent with the measured data, is used to establish a joint atmospheric transmission channel model combined with the effects of atmospheric particle absorption and scattering, aiming error and phase drift caused by inhomogeneous turbulence.
- (2) Modulation technology is one of the key technologies of free space optical communication technology. At present, most of FSO systems use intensity modulation technology and phase modulation technology. The effect of phase drift caused by turbulence of non-uniform scale on

the performance of phase modulation system is simulated and analyzed. From the point of view of improving the transmission capacity of instant information, orthogonal subcarrier modulation (OFDM), a multi-carrier modulation technology, greatly improves the system capacity. From the point of view of reducing the influence of atmosphere on modulation mode, the polarization of light in FSO link is less disturbed by atmosphere. In this paper, the principle and performance of FSO system based on OOK, BPSK, PSK-OFDM and Polsk modulation are analyzed in detail, and the average BER and average communication capacity of FSO system with several modulation modes under ideal channel and atmospheric joint channel are simulated and analyzed.

- (3) In order to provide theoretical basis for the receiving mode of polarization modulation free space optical communication system, a FSO system based on polarization modulation/coherent reception is built by using Optisystem simulation software. The system is built on the platform of Optisystem software. The effects of atmospheric attenuation, communication distance and phase error between local oscillator source and signal light on coherent receiving system are simulated and analyzed. The direct reception, zero-difference coherence and heterodyne coherence reception are compared. The effects of turbulence intensity, signal-to-noise ratio, normalized threshold, normalized jitter coefficient and normalized beam width on BER and outage probability of coherent FSO system are quantitatively analyzed by simulation.

The research results of this paper can be used in the simulation research and system construction of FSO communication system, and provide a theoretical basis for the performance of free space optical communication system and related modulation technology, reception technology research.

Key words: Free space optical communication, atmospheric channel, modulation technology, Coherent reception, BER

目录

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第一章 绪论..... | 1 |
| 1.1 研究背景及意义..... | 1 |
| 1.2 关键技术与研究现状..... | 3 |
| 1.2.1 自由空间光通信关键技术..... | 3 |
| 1.2.2 自由空间光通信技术发展现状..... | 4 |
| 1.3 FSO 系统特点与应用领域..... | 6 |
| 1.4 FSO 系统性能指标 | 7 |
| 1.5 本文主要研究内容..... | 8 |
| 第二章 大气信道..... | 10 |
| 2.1 大气基本特性 | 10 |
| 2.1.1 大气结构 | 10 |
| 2.1.2 大气成分 | 11 |
| 2.2 湍流大气中光传播效应 | 11 |
| 2.2.1 幅度衰减 | 12 |
| 2.2.2 相位漂移 | 14 |
| 2.3 瞄准误差 | 15 |
| 2.4 大气联合信道 | 15 |
| 2.4.1 忽略相位漂移的联合信道模型 | 16 |
| 2.4.2 考虑相位漂移的联合信道模型 | 16 |
| 2.5 本章小结 | 17 |
| 第三章 自由空间光通信系统调制技术..... | 18 |
| 3.1 幅度调制 | 18 |
| 3.1.1 基于 OOK 调制的 FSO 系统..... | 18 |
| 3.1.2 OOK 调制性能分析 | 19 |
| 3.2 相位调制 | 20 |
| 3.2.1 基于 BPSK 调制的 FSO 系统..... | 20 |
| 3.2.2 BPSK 调制系统性能分析..... | 20 |
| 3.3 正交频分复用调制..... | 21 |
| 3.3.1 基于 PSK-OFDM 调制的 FSO 系统..... | 22 |
| 3.3.2 PSK-OFDM 调制系统性能分析..... | 23 |

3.4 偏振调制24

 3.4.1 基于 Polsk 调制的 FSO 系统.....25

 3.4.2 Polsk 调制系统性能分析.....26

3.5 不同调制方式的误码率性能比较.....26

 3.5.1 理想信道下误码率性能比较.....26

 3.5.2 大气联合信道下误码率性能比较27

3.6 本章小结28

第四章 相干 FSO 系统仿真.....29

 4.1 FSO 系统的接收方式仿真分析29

 4.1.1 相干接收方式的原理29

 4.1.2 直接接收与相干接收仿真分析30

 4.2 相干 FSO 系统仿真分析.....34

 4.2.1 信噪比35

 4.2.2 平均误码率分析36

 4.2.3 中断概率分析.....38

 4.3 本章小结40

第五章 总结与展望41

 5.1 本文的主要工作.....41

 5.2 展望.....42

参考文献.....43

附录：攻读硕士学位期间发表的文章.....46

致谢47

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

自牛顿时代起，人们对光的传播规律的进行了长期的深入研究，光的特性以及本质已基本被人们了解，光在均匀介质（如光纤）中的传播规律也已基本被人掌握，但光在非均匀介质中的传播规律还在探索中。上世纪中激光技术的问世，拉开了一场具有划时代意义的信息革命序幕，自由空间光通信的概念以及光纤通信技术都被提出，但当时由于光纤的制作工艺复杂且损耗系数极大，相比之下自由空间光通信技术凭借系统简单、操作灵活、保密性强等优点更被人们看好，自由空间光通信技术在军工秘密通信方面得到研究并在一定条件下得以应用。

自由空间光通信技术的研究工作主要集中在美日欧等国家的国家军事机构以及无线通信公司如 AStroTerra 公司、AirFiber 公司、Hamamatus 公司、Lucent 公司等。国内对自由空间光通信技术的研究起步比较晚，但经数代优秀学者的研究已有许多研究机构取得了一定研究进展。上世纪 90 年代，美国宇航局在实验室环境下搭建并完成了传输速率为 750Mbps 的激光通信演示系统，后来美国的 AstroTerra 公司成功研制了全双工无线激光通信系统，系统上行码率为 155Mbps，下行码率高达 1.24Gbps^[1,2]。1995 年，日本搭建了工程试验卫星 ETSVI 与地面站之间的地-空卫星链路的无线激光通信平台并进行了通信实验。1974 年，桂林三十四所成功研制出了传输速率为 8Mbps，传输距离为 4km 的自由空间光通信样机。西安理工大学自 2000 年起开始自由空间光通信的研究，研制出了时视频图像传输的 FSO 系统，该系统可实现传输距离为 1km，传输速率为 20Mbps 的全双工的工作模式的稳定传输^[3,4]。2010 年，中国电子科技集团第三十四研究所推出了有效传输距离为 500~5000m，通信速率为 155Mbps~2.5Gbps 的 FSO 通信设备——Fiberless 系列，该系列多种产品已取得入网许可并逐渐投入商业化运营。

1966 年，英国标准电信实验室的华裔科学家高琨（Charles Kuen Kao）和他的同事在国际上首次提出降低光纤中杂质的含量，可以使得光纤损耗系数达到长距离通信的标准^[5]。由于对自然大气信道的研究不足以及 FSO 系统元器件的发展缓慢，FSO 技术的发展速度被大大局限。而在此阶段光纤通信技术日新月异，大放异彩，尤其在最近几年光纤通信技术以惊人的

速度高速发展，以光纤通信为骨干网络的基站逐一建成，使得光纤通信已成为当代通信的主要手段之一。但作为有线通信技术，光纤通信的应用场景受到诸多限制，FSO 技术作为有线通信的补充和备份再次成为研究热点。

根据应用场景的不同，自由空间光通信技术作为无线光通信技术可分为空-空卫星通信、地-空卫星通信、地-地点对点通信、以及室内短距离通信。受光器件的发展以及实验条件的影响，星际自由空间光通信系统的实现受到限制。地-地自由空间光通信技术作为一种新型光接入手段进入当代宽带接入市场，特别是那些通常不易敷设有线路的地区^[6]。在地-地自由空间光通信系统信号传输中，大气信道是随机的，作为光波传输介质的的大气的光学性质是影响激光信号的最重要的因素。大气对光最重要的影响就是光谱的吸收和散射，除此之外大气温度等特性的起伏引起的空气介质的折射率的起伏破坏了光的相干性，主要表现在光束随机漂移、相位随机起伏、能量集中度的下降以及由此引起的强度起伏，严重制约了自由空间光通信技术的发展^[7]。其中大气信道模型问题一直是大气光学的核心问题，光波在自由空间大气中的传播规律是了解和解决这些影响的理论基础，利用这些传播规律可以发展各种高效的技术手段进行 FSO 系统的研究。鉴于实验研究的局限性，光传播的数值模拟研究由于其独特的优越性（主要包括参数的可控性和统计的系统），数值模拟不仅验证了已有的理论研究结果和实验结果，而且也揭示了一些新现象，并得到实验的验证，证明数值模拟有进一步的发掘潜力，研究人员利用数值模拟对大气湍流进行数学建模分析。上世纪 40 年代数学家和物理学家 Andri 提出了激光在大气扰动中的光场分布数学统计模型，此后许多研究人员在此数学模型的基础上不断的补充和完善，研究出了以下几种常用的大气湍流模型：对数正态分布模型、K 分布模型、负指数分布模型和 Gamma-Gamma 分布模型^[8]。

随着通信需求和无线激光通信设备技术的发展，自由空间光通信系统器件、实验手段日趋完善，实验方法与时俱进，实验结果越来越精确。自由空间光通信技术凭着自由的通信方式与超大的通信容量重新走上光通信的舞台，再次成为研究热点^[9]。目前国际上已完成了自由空间光通信系统通信链路的概念研究，解决了 FSO 系统通信的关键技术与核心器件，成功搭建了基于强度调制的近地层无线激光通信平台以及地-空无线激光通信平台，同时研制出了无线激光链路系统评估测试平台及分析、仿真的软件，带动了自由空间光通信系统理论研究的蓬勃发展。

1.2 关键技术与研究现状

FSO 是一种以激光作为载体，自然空间大气作为信道的光通信技术，FSO 系统由三个部分组成，分别是负责信号调制与发射的发射部分、大气信道部分、以及负责信号的接收与解调的接收部分。

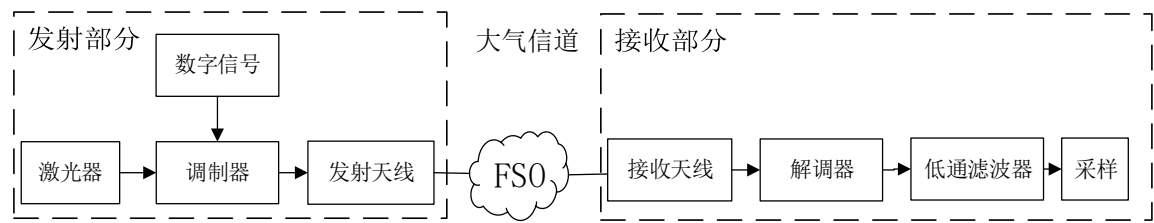


图 1-1 自由空间光通信系统原理示意图

图 1-1 就是常见的 FSO 系统，从图上可以看出来 FSO 系统的发射部分、大气信道部分、以及接收部分，其中发射部分包括信源、激光器、调制器以及发射天线，接收部分包括接收天线、解调器与信号处理器等，大气信道是指激光在自然大气环境中的传输通道。FSO 系统的工作原理为激光光源输出的光波作为光信号载体，经调制器把数字信号调制到光波上作为光信号，传入到大气信道中受到大气湍流及其他自然大气环境影响，由接收部分接收，把调制后的信号经过解调模块后被解调出来，解调出来的值一般是能够直接反映被测物理量大小的值如振幅、相位、频率、偏振态等，这就是整个自由空间光通信系统的工作原理。

1.2.1 自由空间光通信关键技术

(1)大气信道

近地大气层中微粒以及大气湍流运动对激光信号的衰减效应和相位漂移效应对光强和相位信息有很大影响，分析大气信道对激光信号的影响对提高 FSO 系统性能具有重要的研究意义^[10]。大气分子及悬浮粒子对光信号的吸收和折射、散射主要造成了光束能量的衰减，与天气条件的相关度非常大。本文调研了不同天气条件下的衰减系数。除此之外，还研究了大气湍流效应对 FSO 系统性能的影响：不均匀尺度的湍涡引起的相位漂移、光强闪烁效应。目前学者提出的湍流数学模型中常用的湍流模型有弱湍流下的对数正态分布信道模型、强湍流下的 K 分布信道模型，以及适应描述大部分湍流强度的 Gamma-Gamma 分布信道模型等，在本

文基于 Gamma-Gamma 湍流的基础上研究了大气运动和大气中的成分对 FSO 系统性能所造成的影响。

2) 调制方式

调制技术作为对通信技术重要的研究热点，在自由光通信系统中，不同的调制技术受大气运动的影响也不同。作为信号载体的激光具有幅度、频率、相位和偏振态等多个特性，这些特性均可用来加载数字信号以进行信息传输。应用最为广泛的是强度调制/直接探测 IM/DD，其中 OOK 调制方式最为简单，但易受幅度衰减影响，难以在长距离或恶劣天气下正常通信。除了常用的运用于单载波系统的 IM/DD 方式，提出了许多新的调制方式，与 IM/DD 调制方式相比，相位调制在一定程度上减弱了幅度衰减在 FSO 系统中带来的影响，但大气湍流引入的相位漂移和相位噪声严重影响了基于相位调制的 FSO 系统性能。随着社会的发展进步，人们对通信系统的应用场景、通信容量以及通信速度需求日益加大。从抑制衰减与相位漂移的影响的角度，偏振调制技术在 FSO 系统中的应用被提出。从系统通信容量的角度考虑，一种多子载频分复用调制技术——正交频分复用调制技术被提出应用于 FSO 系统，多子载波的调制方式使 FSO 系统通信容量大大提升了^[11,12]。本文基于幅度、相位和偏振态等几种调制方式的 FSO 系统进行了比较。

3) 接收方式

通信系统的接收端一般采用直接强度探测接收和相干接收两种接收方式。由于自由空间光通信的无线通信的特点，自由空间相干光通信系统的接收端不能简单地套用光纤相干通信系统的接收端，还需要对自由空间相干接收系统进行研究。直接强度接收方式结构相对简单，技术比较成熟，然而光接收机的灵敏度相对较低。相干光通信的接收原理是采用本振光与信号光在光混频器内进行混频，根据本振源信号与光信号之间是否存在相位差又分为零差或采用外差。直接强度接收方式是对发射端采用强度调制，接收端直接采用光脉冲探测的方式。而相干光通信的接收方式能够有效的提高相干接收机的灵敏度，实现长距离的数据传输。本文对基于偏振调制的 FSO 系统接收端采用直接、零差相干、外差相干三种接收方式时的系统性能进行了研究分析。

1.2.2 自由空间光通信技术发展现状

自上世纪年代以来，在应急通信、局域网互连、基站互联和热点区接入等领域得到了广泛的应用。特别是进入 21 世纪以来，随着市场需求和无线光通信器材的发展，FSO 系统在传

输距离、传输容量、系统可靠性等方面得到了很大的提高。

目前被广泛用于自由空间光通信系统中的调制方式有强度调制方式(Intensity Modulation, IM)、相位调制方式。Ahmed A. Farid 推导了大气湍流与瞄准误差的联合信道模型下基于 OOK 调制的 FSO 系统的中断概率闭合表达式, 分析了发送功率与归一化束宽与中断概率的关系^[13]; 韩立强等人推导了 Gamma-Gamma 湍流下基于 OOK 调制/直接检测技术的全光中继自由空间光通信系统的误码率与中断概率^[14]; Zedini E 等人研究了大气湍流和瞄准误差的联合信道模型下基于 OOK 调制的自由空间光通信系统的平均误码率、中断概率的闭合表达式^[15]。Kamran, H.Samimi 等人对 PSK 调制相干 FSO 系统进行了研究^[16,17], 张慧颖对 Gamma-Gamma 湍流下基于 PSK 调制的 FSO 系统误码率性能进行了研究, 并与 OOK 调制方式进行了比较^[18]。

由于大气信道的多样性使得自由光通信系统的性能被大大抑制, 激光信号的振幅和相位信息容易受大气湍流的影响, 为抑制大气对系统性能的影响, 自由光通信技术接收端新的调制方式被陆续提出, 如正交频分复用调制方式和偏振调制方式。上世纪 60 年代 R.W.Chang 基于模拟器件首次提出了 OFDM 的概念^[19], 随后 S.B.Weinstein 基于傅里叶变换与傅里叶逆变换原理真正实现了 OFDM 技术的调制与解调。随着光集成器件的发展, 到 90 年代末 OFDM 技术的商用化价值吸引了电信业的目光, 至今都是通信领域的研究热点。2003 年 Tomoaki Ohtsuki 首次提出了基于多载波调制的 FSO 通信系统的概念^[20]; 2006 年, Shieh W, Athaudag C 等人提出了基于相干检测的 OFDM 系统(CO-OFDM)^[21]; 2007 年, Y.Tang, X.Yi, W.Shieh, R.Evans 对相干 OFDM 系统进行优化, 实现了在光通信系统中应用的理论研究^[22,23], 同年 Ivan B.Ojordjevic, Bane.Vasie 研究发现自由空间光通信正交频分复用(FSO-OFDM)技术具有抑制光散射的影响、相同带宽下码速率高等优点^[24]; 2008 年, 美国 NEC 实验室首次提出在 FSO 系统中采用基于 QPSK 调制的 OFDM 技术, 传输速率达到 10Gb/s, 传输距离达到 2.5km, 且系统接收机灵敏度比 OOK 调制/直接探测技术信号提高了 3dB, 表明 FSO-OFDM 技术能够很好的抑制由大气信道引起的随机衰落效应^[25]; 2012 年, M Selvi and K Murugesan 等人研究发现弱湍流下 OFDM-FSO 系统采用 OFDM-PSK 调制比 OFDM-QAM 调制的性能更好^[26]。2015 年, H. E. Nistazakis, A. N. Stassinakis 等人研究了不同湍流强度下基于 QAM 或 PSK 调制的 FSO-OFDM 系统的误码率与中断概率^[27]。目前国内对基于 OFDM 调制技术的 OFDM 研究还比较少, 主要研究机构有西安理工大学, 哈尔滨工程大学。

当信号光在大气信道中传输时, 光的幅度和相位对湍流起伏很敏感, 而光的偏振态受大气影响比较小。国内外研究人员陆续展开了对偏振调制技术的研究, 对基于偏振调制的直接

探测大气通信系统原理和光信号在传输中的偏振变化进行了理论分析^[28-30]；Z. Ghassemlooy 等人对湍流信道下基于偏振调制的直接探测 FSO 系统进行了实验研究^[31]，研究发现采用 Polask 调制能够更好地抑制大气极端天气的影响，更适用于 FSO 系统；林日钊、Yuwei Su 等人研究了不同湍流强度下基于 Polask 调制和 OOK 调制的 FSO 系统性能，表明相同条件下基于 Polask 的大气通信系统综合性能明显优于 OOK 系统^[32-35]。王怡理论分析了大气湍流下零差相干的偏振调制的 FSO 系统误码率和通信容量等系统性能并进行了数值仿真^[36-37]，而没有对偏振调制的相干接收系统进行系统仿真分析。

此外最近几年，美国对 FSO 相干通信体制的研究也有所增加，包括国家物理实验室和大学。我国对空间光通信系统的研究尚处在起步阶段，对于相干体制的空间光通信的研究目前还处于方案论证阶段北京大学在对相干接收技术的研究中探索出一种新型接收方案，即采用多量子阱光折变器件的相干无线光通信。强度调制（IM）和偏振态调制（Polask）可采用直接接收和相干接收，相位调制采用相干接收解调。未来随着相干光通信技术的日趋成熟，将会被越来越广泛的运用到军事和商业的各个方面。

1.3 FSO 系统特点与应用领域

近年来的商业需求和空间信息公路、信息高速公路的发展，对通信系统的通信质量以及应用场所的要求更加广泛。通信技术可分为有线通信和无线通信两大类，有线介质中达到高速很容易，但其应用场景由于有线线路也受到限制，因此对无线通信的需求更加迫切，空中传播部分也是移动通信发展的瓶颈所在。自由空间光通信具有许多传统无线电通信以及有线光通信所不具备的优点：

- (1) 速度高、频带宽。目前可实现商用的 FSO 系统可实现 2.5Gb/s 速率和传输距离为 5km 的信息传输，但在实验室环境下已有 1.28Tbps 和传输距离为 210m。随着科技的发展，自由空间光通信系统在商用领域有可能达到更大的速度和带宽。
- (2) 光波频段宽阔，可以利用的光波资源丰富。与电磁波通信相比，FSO 通信无需购买价格相当高昂的频谱资源。其中 1550nm 波段的光常用于 FSO 的长距离通信中。
- (3) 不受电磁干扰，不会和其他的无线通信系统如卫星通信等发生相互干扰的情况，传输安全性和保密性强。
- (4) FSO 通信设备尺寸小，安装方便灵活且迅速，受场地限制很小，链路部署快捷，特别适用于一些不宜敷设光纤的地区，比如海岛之间、高楼与高楼之间以及一些应急场合。

这些优势使得自由空间光通信技术在现代通信中表现非常突出，可以说 FSO 技术一方面克服了光纤通信不方便安装、设备复杂等的缺点，另一方面又突破了传统无线电通信在传输速率方面无法突破的瓶颈，为未来高速率通信网络的实现提供了新的手段。但大气中的雪雾粒子以及大气湍流造成的激光信号的衰减和失真问题，以及光通信的接收端对准问题，使得激光在大气环境下长距离传播时信号中断概率很大，从而制约了自由空间光通信技术的发展，也促使了人们对激光在自由空间大气中的进一步深入研究。

FSO 技术的优点和缺点决定了 FSO 系统的应用场景，下面是针对一般 FSO 系统的主要应用场景：

- (1) 提供高速稳定的接入方案，补充现有的通信网络以解决‘最后一公里’的通信，如楼与楼之间、河流两岸等不方便铺设有线线路的应用场所。
- (2) 作为微波通信在雨天条件下的补充方案。雨天微波通信信号衰落大，但 FSO 通信激光信号在雨天衰很小，保证的通信质量，增大通信系统的可靠性。
- (3) 作为应急方案，在出现大型灾难时，FSO 技术安装快捷迅速的特点可帮助人们快速的搭建起紧急通信系统，且目前研制出的相干接收机体积和普通摄像机相差不大，极大的方便了通信器材的运输和搭建。
- (4) 作为光纤通信的冗余链路，起到备份的作用，既节约了网络开销，又提高了商用网络的安全性。

自由空间光通信技术接入作为一种宽带的技术，已经逐渐成为现实，其主要的特点是能以非常灵活的无线方式，在较短的距离内，用很低的投入，获得很高的传送的容量。在不方便铺设光缆或安装微波的条件下，FSO 技术可作为一种全新的选择。在气候条件允许的城市的高楼大厦之间、学区内、军事上也有较高的使用价值。相信不久的将来，激光通信将取代微波通信成为星际间通信的主要手段。无线电系统和光无线系统在许多方面可互为补充，光无线系统能提供小区域的高速连接，而无线电系统能提供大区域内低速通信。各种系统的无缝连接将能使用户得到更方便的服务。为了满足军事和商业的需要，空间光通信系统必须向小型化、低功耗、集成化、高速率的研究方向发展。

1.4 FSO 系统性能指标

首先分析影响自由空间光通信系统性能的技术发展的主要因素：

- (1) 当前技术的发展水平，以及关键元器件的发展水平。

- (2) 大气信道的状态。大气中的微粒粒子与大气湍流对 FSO 系统性能的影响严重,不同的天气条件对光信号造成的衰减也不同,对大气信道的研究有利于抑制大气造成的光信号衰减以增强 FSO 系统性能。
- (3) 接收系统对光束的瞄准误差。FSO 系统属于点对点通信系统,接收系统与发射系统的对准问题与湍流造成的光束抖动问题,都是影响 FSO 系统性能的重要因素,通过研究不同抖动误差对系统的影响,选择合适的束宽与接收端孔径对 FSO 系统的性能进行优化。
- (4) 通信距离。通信距离首先要考虑链路,卫星链路的通信距离高达上万公里,而近地 FSO 链路由于光功率以及信噪比的限制,其通信距离范围在几十米到几千米内。

衡量 FSO 系统通信性能的几个性能指标:

- (1) 误码率: 误码率是指信号在传输过程中发生错误的概率 (误码率=错误码元数/总的码元数),是数字通信中衡量通信质量的一个关键标准。误码率随着信噪比的增大而减小,除了受信噪比的影响,。
- (2) 平均信道容量: 在信息论中,信道能够传送的最大信息量就是该信道的信道容量。它等于信道输入与输出互信息的最大可能值,其取值大小是由信道本身的性质所决定的。本文主要是研究经过大气信道传输后在大气湍流和瞄准误差等作用下系统的性能,所以我们所指的道容量是在给定的时间段内信道所能够传输的平均信息量。
- (3) 中断概率: 中断概率是一种保证通信可靠性传输的度量,中断概率为系统误码率大于某一目标误码率的概率,也就是系统信噪比低于某一目标信噪比门限值时的概率。
- (4) 眼图: 眼图是利用示波器测试接收端数字信号的时域时得到的‘眼睛’一样波形的图形,‘眼睛’越大约标准,系统通信情况越好,‘眼睛’越小越杂乱,系统通信情况越坏,是实验和仿真中简单直观估量系统性能的方法。

1.5 本文主要研究内容

自由空间光通信系统的信道是大气,由于大气的随机性,激光信号受大气湍流与大气介质的影响产生的衰减、抖动、漂移都是不可避免的,因此对大气信道的研究具有重要意义。除此之外,在联合大气信道下选择合适的激光信号调制方式、以及发射端与接收端的瞄准参数对优化 FSO 系统性能也具有重要研究意义。因此本文主要研究了大气湍流下 FSO 系统性能的相关问题,并在以下几个方面进行了理论研究和仿真分析:

第一章：介绍了自由空间光通信的研究背景与研究现状，简要说明了 FSO 系统的原理，并给出了本课题研究的 FSO 系统的关键技术与性能指标；

第二章：主要介绍了作为自由空间光通信系统激光信号传输信道的大气结构与成分，以及近地层中导致 FSO 系统性能的影响因子：近地大气层中大气分子与气溶胶粒子、雨雪雾等粒子对光信号的吸收和散射效应，近地大气湍流引起的光强起伏（闪烁）效应以及不均匀尺度的湍流造成的相位漂移效应。采用适用范围更广的 Gamma-Gamma 湍流光强概率分布函数，在此基础上考虑到大气吸收损耗、接收端与发射端的瞄准误差推导得到了光强衰减联合信道模型。另外又考虑到不均匀尺度的湍流引起的相位漂移对激光信号相位信息的影响，联合相位漂移效应推导出了大气衰减与相位漂移的联合信道模型。

第三章：鉴于激光信号中可以用来被调制的物理量有很多，如振幅、相位、频率、偏振态等，本章分析了基于 OOK、BPSK、PSK-OFDM、Polask 等不同调制方式的几种 FSO 系统。推导了大气湍流引起的衰减、相位漂移以及接收端瞄准误差的联合信道下 FSO 系统误码率与平均通信容量，并通过数值仿真对比分析了几种调制方式下的 FSO 系统平均误码率性能。

第四章：基于 Optisystem 软件搭建了基于偏振调制的相干 FSO 系统。分析了雾、霾和雪等天气条件下通信距离和相干接收引入的相位误差对系统通信性能的影响。对比分析了采用零差相干接收、外差相干接收和直接接收三种接收方式下 FSO 系统性能。定量分析了大气湍流强度、归一化束宽以及接收端归一化抖动系数对相干 FSO 系统性能的影响。

第五章：总结与展望。

以上内容在全文会详细展开，简要来说第二章介绍了大气信道，并推导了联合光强衰减与不均匀尺度的湍流引起的相位漂移的大气信道概率密度分布模型；第三章推导了联合信道下 OOK、BPSK、PSK-OFDM、Polask 等几种调制方式下的 FSO 系统性能；第四章首先基于 Optisystem 软件搭建了偏振调制 FSO 系统模型，仿真对比了接收端采用直接接收、零差相干接收、外差相干接收三种接收方式时 FSO 系统性能，并在第三章推导的归一化闭合公式的基础上对偏振调制/相干接收的 FSO 系统参数进行了优化。

第二章 大气信道

大气作为 FSO 系统的传输信道，我们把其看作一个具有特定参数的光波传播介质。但实际大气环境十分复杂，受空气运动、人类活动与太阳辐射等影响，其成分与结构一直在发生变化。尤其近地大气层具有非常复杂的特性，大气湍流运动与大气介质中的固体粒子如液态的雨滴、雾和固态的雪粒子、冰晶粒子等因素，是自由空间光通信中大气信道研究最为关注的地方。大气对近地自由空间光通信的影响主要在下面两个方面：一种是光信号遇到大气分子及悬浮在大气中的微粒所发生的吸收、散射现象所导致的光束能量的衰减，称为大气衰减效应，大气衰减效应导致信号光在不同大气浑浊情况下有不同的衰减系数；另一种是大气湍流随机运动对光束波前的扰动所引起的光束漂移和光强闪烁等现象，称为大气湍流光强闪烁效应。不均匀尺度的湍流会导致使得不同的相位延迟被附加到光束不同位置的光场，使得在接收端会表现为相位的随机起伏，使得光信号的相位发生漂移。这些影响使得经过大气传输后的光信号强度和相位都受到严重的扰动，因而需要分析建立相应的大气信道模型并进行相应的研究。

本章主要介绍大气信道对自由空间光通信的影响，重点分析了大气信道中大气粒子吸收效应，以及大气湍流引起的光强闪烁效应和相位起伏效应，除此之外还有接收系统瞄准误差等参数对 FSO 系统性能的影响，并联合大气衰减、相位漂移以及瞄准误差建立了大气湍流与瞄准误差的联合大气传输信道模型。

2.1 大气基本特性

大气可以划分为由微粒组成的离散浑浊大气介质和由热运动造成的湍流大气介质。作为自由空间光通信系统的信道，大气的结构和运动给 FSO 系统性能的影响是巨大的，下面我们主要对大气的结构与近地通信中大气微粒对激光信号的影响进行探讨。

2.1.1 大气结构

大气结构的分层方法有很多种，一般可划分为在垂直、水平和时间三维上。在垂直方向上，在流体动力学平衡的假设下，大气被认为是分层均匀的，将大气从地面依次分为对流层、

平流层、中层、热层以及外大气层（外溢层）；在水平方向上，由于太阳的作用，大气水平分布结构与地理维度关系密切，尤其是湿度和温度；在时间维度上，时间上分为冬季和夏季，一般冬季温度低、湿度小，夏季相反。比较而言，大气在水平和时间维度的变化比较复杂，在垂直方向上的变化规律性比较强。

由于地球引力的作用，近地大气层的密度最高，气压最大。对流层是大气垂直结构分层中距地面最近的一层，也是最稠密的一层，占地球大气总质量的 80%，对流层内的大气垂直混合过程因对流和湍流活动而快速进行，几乎所有的天气现象都发生在对流层，近地自由空间光通信所占用的大气信道也在这一层。

2.1.2 大气成分

地球大气的主要成分是气体，气体由约 78%的氮气、21%的氧分子和 1%的惰性气体分子组成，其中不到 1%的气体分子（如水汽、二氧化碳、臭氧等）对光辐射吸收起主要作用，吸收损耗很小。除了作为主体的气体成分外，对流层大气中还存在着各种液态和固态以及液态和固态混合的粒子，最常见和最主要的粒子是液态水构成的雨、雾以及雪粒子。

由于近地大气中液态和固态粒子的存在，造成了可见距离的改变。可见距离直观的表达了大气的浑浊程度，国际上用气象视距作为观测标准对不同天气状况下的大气浑浊情况进行了分类。Nabousi 研究了在 690~1550nm 范围内雾天气引起的损耗与可视距离之间的关系，微雪、小雪到暴风雪所引起的典型损耗为 3~30dB/km^[38-40]，表 1 列举了几种常见天气下的衰减与气象视距。

表 1 1550nm 激光各种天气条件下的气象视距与衰减系数

| 天气条件 | 气象视距范围 | 衰减系数 (dB/km) |
|--------|-----------|--------------|
| 雾霾 | 2~4km | 4 |
| 薄雾 | 1~2km | 7 |
| 轻雾/小雪 | 500~1000m | 10 |
| 中雾/ 中雪 | 200~500m | 20 |
| 浓雾/大雪 | 50~200m | 30 |

2.2 湍流大气中光传播效应

通常所说的大气湍流都是指大气风速起伏所对应的动力湍流，大气湍流相关的物理量无疑是随机分布的，但对光学性质起影响作用的主要是因大气密度起伏引起的大气折射率起伏所对应的光学湍流。大气密度主要由温度决定，所以一般大气湍流特性主要由大气温度场特

性决定。当激光在近地湍流大气中传播时，大气温度场变化引起的折射率起伏导致了激光波阵面的畸变，破坏了激光的相干性，而相干性的破坏严重减弱了激光的光学质量，引起光线的随机漂移、激光能量在光束截面上的重新分布、一定接收面积上的光强起伏。激光束的随机漂移给接收端带来了困难，接受面积上的光强起伏给通信信号引入了噪声。这些问题在长距离传输和强湍流下尤为显著，严重制约了自由空间光通信的发展。

近地大气湍流对激光相干性的破坏主要体现光学质量的下降，发生光强衰减、闪烁、以及相位漂移，表现在激光一系列的参数的改变上如与振幅相关的量和与相位相关的量，降低了 FSO 系统的稳定性和可靠性^[41]。大气湍流效应受大气湍流介质密度起伏引起的大气折射率起伏影响，因此对大气湍流的强度研究大多是基于大气湍流介质密度的随机波动而提出的。由于激光光束幅度分布随着大气湍流强度呈现一定规律的起伏分布，从而理论研究出了无线激光信号在大气湍流效应下光强概率密度分布函数。为更好的研究大气湍流效应对自由空间光通信系统性能的影响，国内外许多研究学者提出了很多针对不同天气条件下的大气湍流信道光强分布数学统计模型。在自由空间光通信系统仿真实验中常用的模型有：对数正态分布模型、K 分布模型以及 Gamma-Gamma 模型，其中对数正态分布模型是作为一种模拟弱起伏条件下湍流对激光信号光强强度影响被提出的，K 分布数学模型则更适用于模拟强起伏条件的情况下大气湍流效应对激光信号的影响，Gamma-Gamma 分布模型中大气湍流对激光信号光强的影响由湍流内尺度和外尺度两个参数共同决定，能较为准确的模拟大部分湍流强度下的光强起伏统计特性，适用范围更加广泛，且多处论文已验证 Gamma-Gamma 光强概率密度分布函数的模拟结果与实验研究相当吻合。因此本文考虑大气湍流效应强度对激光信号光强的影响时选用 Gamma-Gamma 湍流模型。

2.2.1 幅度衰减

激光信号在大气中的衰减主要来自两个方面：一个是大气吸收造成的光功率损耗；一个是大气湍流运动引起的光强闪烁造成的光功率损耗。激光束在大气信道中传输产生的吸收损耗，由朗波-比尔定律可知：

$$h_1(l) = \frac{P(l)}{P(0)} = \exp(-\sigma l) \quad (2.1)$$

其中 $h_1(l)$ 为传输距离为 l 时的损耗， $P(l)$ 为传输距离为 l 时的功率， σ 为介质衰减系数。在大气中长距离的吸收损耗约为一个恒定值。

除大气吸收损耗外，激光信号还会受大气湍流的影响引起光强起伏现象，光强起伏现象在大自然中也有体现，晴朗的夜空中星光闪烁可以说是最常见的大气湍流引起的光强闪烁现象之一。我们把一个个湍涡假设为不同焦距的透镜，发射光经不同尺度的湍流聚焦或散焦造成抖动，在接收口径不同位置入射的光各自抖动，这些各不相同的抖动同时落在眼睛底部不同的位置，就形成了光强闪烁。近地大气层的湍涡尺度约为 $1\text{mm}\sim 1\text{m}$ ，湍涡内外折射率差值约为 $10^{-6}\sim 10^{-8}$ ，则近地湍涡焦距约为 $10^3\sim 10^8\text{m}$ ，而一般的近地 FSO 系统传输距离约为 $10^3\sim 10^4\text{m}$ 远小于近地湍涡的焦距。

牛顿最初对天文观测中的起伏现象作了初步的科学解释，20 世纪中期开始了对 FSO 系统的光在大气湍流中的传播研究，Obukhov 应用 Rytov 的平缓扰动法得到了随机波方程，Tatarskii 引入湍流统计理论中的有关湍流谱的结果得到了闪烁强度与传播距离的关系，准直高斯光束为平面波，对于平面波通常用 Rytov 指数 σ_0^2 来衡量湍流引起的光强起伏条件^[45]：

$$\sigma_0^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.2)$$

其中 C_n^2 为大气折射率常数； $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数； L 为传输距离。研究表明当 $\sigma_0^2 < 1$ 时为弱湍流，当 $\sigma_0^2 \cong 1$ 时为中湍流，当 $\sigma_0^2 > 1$ 时为强湍流。

1999 年，Andrews 等科学家在 Rytov 光场理论的基础上对大气湍流扰动模型进一步改进与完善，从而提出了一种能适用于大多数情况下大气扰动指数的分布模型，即 Gamma-Gamma 分布数学模型，其概率分布数学表达式^[43]：

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{[(\alpha+\beta)/2-1]} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}h_a) \quad (2.3)$$

其中 h_a 为大气湍流引起的光功率损耗， $K_\nu(\cdot)$ 为第二类贝塞尔修正函数，可化为 MeijerG 函数形式； $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数，在平面波情况下，内尺度为零时， α 和 β 分别表示为^[48]：

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0.49\sigma_0^2}{(1+1.11\sigma_0^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.4)$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0.51\sigma_0^2}{(1+0.69\sigma_0^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.5)$$

2.2.2 相位漂移

大气湍流在影响振幅的同时，也破坏了光波的相位使之相位漂移。主要原因是激光在非均匀介质如大气中传播时，若相位在初始入射光截面具有相同的相位，进入非均匀介质后，由于存在光程差，各处的相位便发生了改变。截面上任意两点间的相位差与两点间的距离以及介质的不均匀尺度的大小有关。

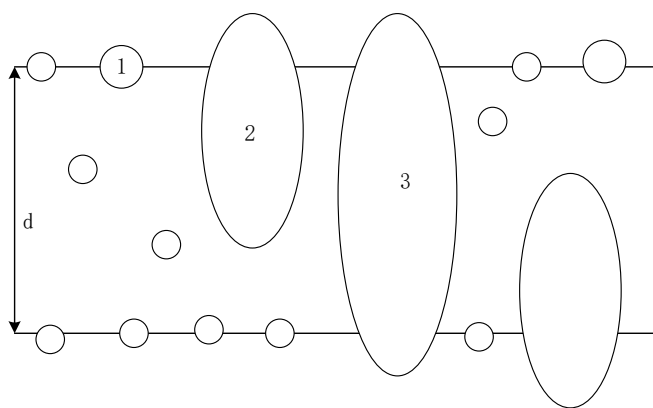


图 2.1 不均匀介质与两点间距的相对关系

如图 2.1 所示，设两点间距离为 d ，介质的不均匀尺度为 ρ ，两点间的不均匀介质尺度与两点间距离大小的关系可分为以下三种情况：

情况 1： $d \gg \rho$ ；由于起伏小且在较长的距离传输中，两条光线所经历的这种小尺度不均匀在统计数量上应该相差不大，所以这种小尺度的不均匀对两点间的相位差的影响不大，可忽略。

情况 2： $d \approx \rho$ ；由于光线相对与不均匀区域的位置的不同以及两条光路上不均匀区域其数量的差别，所以这种和两点间距离相仿的不均匀尺度对两点间的相位差的影响最大。

情况 3： $d \ll \rho$ ；由于一般覆盖了两条光线的传播路径，可以认为两条光线的相位变化相同，所以对两点间相位差的影响可忽略。

作为随机过程的光波起伏，概率分布是统计特征的最基本描述方法。由于相位起伏是大气的非均匀尺度的湍流介质造成的，大气湍流的随机性使得大气湍流引起的相位起伏伴随产生的相位噪声也是随机的。随机噪声的概率密度函数被描述为零均值的高斯分布函数，当大气湍流折射率起伏服从正态分布时，大气湍流引起的相位漂移分布模型可以表示为^[47]：

$$f_{\varphi}(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\varphi^2/2\delta^2} \quad (2.6)$$

其中， δ^2 是相位漂移的均方差。

2.3 瞄准误差

此外，系统的发送端和接收天线未对准而造成的瞄准误差也是影响系统性能的重要因素。与微波等无线通信方式不同，FSO通信采用点对点的通信方式，对发射端和接收端的对准有很高的要求，但即使发送机和接收机对准以后，在湍流和其它因素的作用下，激光束仍然会存在一定的抖动误差，因此为自由光通信系统中选择合适的发射端的激光束宽以及接收端的接收孔径大小对优化系统性能具有重要意义。根据光束的传播特性、波束宽度、探测器的孔径大小和抖动方差，研究人员提出了一个由于发送机和接收机之间瞄准问题造成的瞄准误差的数学统计模型，瞄准误差的函数为^[45,46]：

$$f_{h_p}(h_p; \omega_z) = \frac{\gamma^2}{A_0 \gamma^2} h_p^{\gamma^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (2.7)$$

其中 $A_0 = [\text{erf}(\theta)]^2$ ； ω_z 为传输距离为 Z 时的光束半径； $\gamma = \omega_{zep} / 2\sigma_s$ ，表示接收端处等效波束半径与瞄准误差之间的比值。等效波束半径的表达式为： $\omega_{zep}^2 = \omega_z^2 \sqrt{\pi} \text{erfc}(v) / [2v \exp(-v^2)]$ ， $v = \sqrt{\pi} r / (\sqrt{2} \omega_z)$ ， r 为接收端探测器的半径， ω_z/r 为归一化束宽。

2.4 大气联合信道

经过前面两小节的研究，我们了解到在自由空间光通信系统中，作为通信信道的自然空间大气中有许多因素是引起激光信号的衰减的原因，除了大气信道中微粒粒子对光信号的吸收造成的功率衰减，由于大气层中不同位置、不同空间的温度和压力的不均匀性导致的大气湍流，在近地层无线激光通信中光信号受大气湍流光强闪烁效应极大影响，在不同的大气状况下FSO通信系统中光信号强度的衰减也会不同。同时不均匀尺寸的湍涡导致了光信号的相位波动。此外，激光信号在发射机和接收机之间的抖动导致的误差也会极大的限制自由空间光通信系统的传输性能。因此本文综合考虑大气吸收损耗、大气湍流光强闪烁效应和相位漂移效应以及激光信号在发射机和接收机之间瞄准损耗提出了联合大气信道模型。其中大气吸收

损耗为 h_l ，大气湍流引起的损耗为 h_a ，接收端对准接收天线未对准引起的瞄准误差损耗为 h_p ，不均匀尺度的湍流引起的光信号相位漂移为 h_φ 。

2.4.1 忽略相位漂移的联合信道模型

若忽略相位漂移的影响，只考虑光功率的衰减。大气吸收损耗、Gamma-Gamma光强衰减模型以及接收端瞄准误差的总的损耗为：

$$h = h_l h_a h_p \quad (2.8)$$

则忽略相位漂移的大气联合信道模型为：

$$f_h(h; \omega_z) = \int f_{h|h_a}(h | h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a \quad (2.9)$$

其中：

$$f_{h|h_a}(h | h_a) = \frac{1}{h_a h_l} f_{h_p}\left(\frac{h}{h_a h_l}\right) = \frac{\gamma^2}{A_0 \gamma^2 h_a h_l} \left(\frac{h}{h_a h_l}\right)^{\gamma^2-1}, 0 \leq h \leq A_0 h_a h_l \quad (2.10)$$

把式(2.10)代入(2.9)可以得到：

$$f_h(h; \omega_z) = \frac{\gamma^2}{(A_0 h_l)^{\gamma^2}} h^{\gamma^2-1} \times \int_{h/(A_0 h_l)}^{\infty} h_a^{-\gamma^2} f_{h_a}(h_a) dh_a \quad (2.11)$$

代入 Gamma-Gamma 湍流光强概率分布模型式(2.3)，大气衰减联合信道模型为：

$$f_h(h; \omega_z) = \frac{2\gamma^2 (\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{(A_0 h_l)^{\gamma^2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} h^{\gamma^2-1} \times \int_{h/(A_0 h_l)}^{\infty} h_a^{[(\alpha+\beta)/2-1-\gamma^2]} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) dh_a \quad (2.12)$$

(2.12)式中 $K_n(\cdot)$ 可用 MeijerG 函数表示为：

$$K_n(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} [x^1 |_{0,1/2}] \quad (2.13)$$

忽略相位漂移的大气衰减联合信道闭合表达式为^[51]：

$$f_h(h; \omega_z) = \frac{\alpha\beta\gamma^2}{A_0 h_l \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_l} h^{\gamma^2} \middle|_{\gamma^2-1, \alpha-1, \beta-1} \right] \quad (2.14)$$

2.4.2 考虑相位漂移的联合信道模型

由于大气湍流的不均匀尺度的湍流，光信号在湍流大气中长距离传输时会产生相位漂移。考虑到激光信号的相位信息对基于相位调制的通信系统具有相当重要的影响，本小节结合大

气吸收衰减、Gamma-Gamma湍流衰减模型、接收端瞄准误差衰减以及不均匀尺度的湍流引起的相位漂移推导了联合信道损耗：

$$h = h_l h_a h_\phi \quad (2.15)$$

考虑大气相位漂移的大气信道的联合信道模型为：

$$f_h(h; \omega_z) = \int f_{h|h_a}(h|h_a) f_{h_a}(h_a) f_\phi(\phi) dh_a \quad (2.16)$$

代入公式(2.10)，可得：

$$f_h(h; \omega_z) = \frac{\gamma^2}{(A_0 h_l)^{\gamma^2}} h^{\gamma^2-1} \times \int_{h/A_0 h_l}^{\infty} h_a^{-\gamma^2} f_{h_a}(h_a) f_\phi(\phi) dh_a \quad (2.17)$$

再代入Gamma-Gamma湍流幅度衰减公式(2.3)与相位噪声公式(2.6)，可得联合信道的概率密度函数：

$$f_h(h; \omega_z) = \frac{2\gamma^2 (\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{(A_0 h_l)^{\gamma^2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} h^{\gamma^2-1} \times \int_0^{\infty} \int_{h/(A_0 h_l)}^{\infty} h_a^{[(\alpha+\beta)/2-1-\gamma^2]} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) dh_a dh_\phi \quad (2.18)$$

化为MeijerG函数得到考虑相位漂移的大气联合信道闭合表达式：

$$f_h(h; \omega_z) = \frac{\alpha\beta\gamma^2}{A_0 h_l \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times \sum_{i=1}^N \omega_i G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_l} h \cos(\sqrt{2}\sigma x_i) \right]_{\gamma^2-1, \alpha-1, \beta-1} \quad (2.19)$$

其中： x_i 和 ω_i 是N阶Hermite多项式的零点和权因子，可查表获得^[50]。

2.5 本章小结

本章分析了作为自由空间光通信的传输信道的近地大气层中大气气溶胶粒子、雨雪雾等粒子对光信号的吸收和散射效应，以及近地大气湍流引起的光强闪烁效应以及不均匀尺度的湍流造成的相位漂移效应，均导致了自由空间光通信系统性能的恶化。2.1 小节介绍了大气的结构与成分，并列举了几种常见天气下的气象视距与衰减系数的关系。2.2 小节分析了大气湍流的产生原理以及大气湍流对光信号的光强闪烁效应与相位漂移效应。2.3 小节介绍了发射端与接收端未瞄准而引起的功率衰减；2.4 小节在 Gamma-Gamma 大气湍流光强闪烁概率密度函数的基础上联合接收端瞄准误差、大气吸收损耗推导出了自由空间光通信近地大气信道的光强衰减联合信道模型，考虑到不均匀尺度的湍流引起的相位漂移，联合相位漂移与光强衰减的概率密度函数推导出了考虑相位漂移的联合信道模型。

第三章 自由空间光通信系统调制技术

我们在第二章介绍了自由空间光通信系统大气信道中对激光信号的主要影响因子：大气粒子以及大气湍流，并对大气湍流中光传播进行了定性分析，推导出了大气信道光强衰减联合概率密度函数以及联合相位漂移与光强衰减的大气信道概率密度函数。我们已知激光信号中可以用来被调制的物理量有很多，如振幅、相位、频率、偏振态等等，本章将对发射端采用的数据调制方式的原理进行理论分析。在本章中主要介绍在通信中几种常见的调制格式，其中较为成熟的调制技术有强度调制和二进制相移键控调制（BPSK 调制），随着通信技术的不断发展，基于相位调制的正交频分子载波调制（OFDM 调制）、偏振态调制（PolSK 调制）等新的调制技术在自由空间光通信领域兴起，较好的抑制了大气湍流的影响，大大提高了自由空间光通信系统的性能。本章分析了以上四种常见调制格式的理想信道条件下的平均误码率等性能，并结合联合大气信道模型讨论了不同调制方式下的自由空间光通信系统的传输性能指标——平均误码率与信噪比的关系。

3.1 幅度调制

在 FSO 通信系统中，强度调制/直接检测(IM/DD)是使用最为普遍且较为成熟的一种调制方式，其中 OOK 调制是最虽然抗恶劣大气环境能力差，不适合长距离传输，但具有系统简单，易实现等优点，在 FSO 中也是最常用的调制技术之一。

3.1.1 基于 OOK 调制的 FSO 系统

OOK 调制其信号源是二进制序列，信号取值为‘1’或‘0’。通过单极性不归零矩形脉冲序列乘以一个余弦函数就产生的电域的信号，经过马赫曾德尔调制器(MZM)调制到光波上形成了光域的信号。

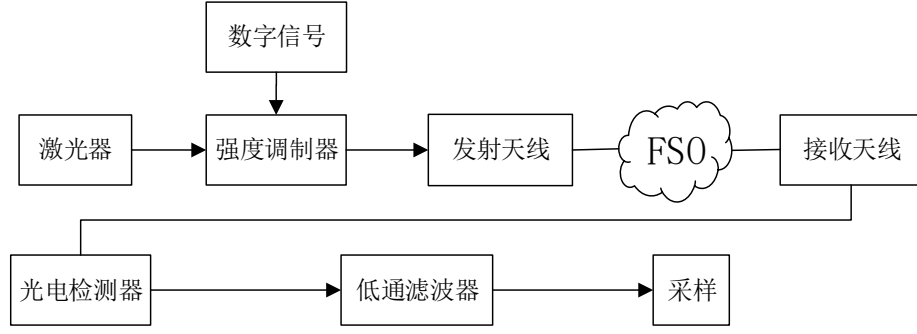


图 3.1 OOK-FSO 系统框图

图 3.1 为 OOK-FSO 的系统框图，选用 1550nm 的激光源，经强度调制器后的激光信号通过发射机以脉冲激光束的方式发射到自然大气信道中进行传输，然后被接收天线接收，经过光电检测器转换成电域的信号，最终经滤波器得到解调出的信息。

3.1.2 OOK 调制性能分析

基于 OOK 调制的系统平均误码率为：

$$P_e = p(0)p(e|0) + p(1)p(e|1) \quad (3.1)$$

理想高斯信道下，采用 OOK 调制的通信系统误码率为：

$$P_{OOK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{R_{SN}}\right) \quad (3.2)$$

其中 R_{SN} 为系统信噪比，噪声总功率与 FSO 系统的接收方式有关。我们在第四章对信噪比进行分析。在第二章中我们讨论了大气信道的数学模型，OOK 调制信号对幅度衰减极为敏感，相位漂移对 OOK 调制的信号影响可忽略不计，在大气湍流衰减与瞄准误差的大气联合信道下，基于 OOK 调制方式的 FSO 系统系统误码率公式为：

$$P_{e-OOK} = \frac{1}{2} \int_0^\infty f_h(h) \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{R_{SN}}\right) dh \quad (3.3)$$

式中 erfc 函数可以表示为 MeijerG 函数：

$$\operatorname{erfc}(\sqrt{x}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[x \middle| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right] \quad (3.4)$$

代入式(2.16)(3.4)，根据 MeijerG 函数的性质(3.3)可以化简为：

$$P_{e-OOK} = \frac{1}{2} \int_0^\infty f_h(h) \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{R_{SN}}\right) dh = \frac{\gamma^2}{2\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{4,3}^{2,3} \left[\frac{R_{SN} A_0 h_l}{8\alpha\beta} \middle| \begin{matrix} 1-\gamma^2, 1-\alpha, 1-\beta, 1 \\ 0, 1/2, -\gamma^2 \end{matrix} \right] \quad (3.5)$$

3.2 相位调制

近年来, 相位调制由于具有较好的信号接收灵敏度和抗干扰能力, 可以有效地抑制大气湍流的影响, 从而被广泛的应用于自由空间光通信领域^[53]。

3.2.1 基于 BPSK 调制的 FSO 系统

二相相移键控(BPSK)也是使用二进制基带信号对正弦载波进行调制, 用相差 ‘0’ 和 ‘ π ’ 表示信号 “0” 和 “1”。设输入的电信号为 $Ae^{j\omega t}$, 经电光调制器相位调制后输出的光信号为:

$$x_1(t) = Ae^{j[\omega_1 t + \pi V(t)/V_\pi]} \quad (3.6)$$

其中 $V(t)$ 为双电平信号, V_π 为半波电压, 使光信号的相位变化为 π , 从而实现了二进制相位调制。

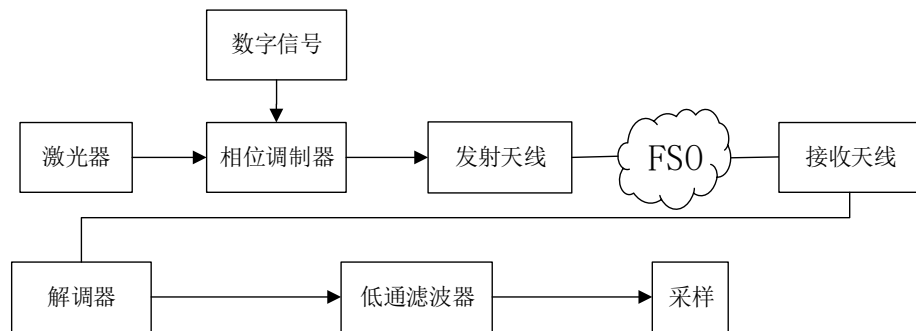


图 3.2 BPSK-FSO 系统框图

相位调制采用相干接收方式, 受相位漂移的影响比较大, 大气湍流引起的相位漂移对 FSO 系统性能的影响不可忽略。

3.2.2 BPSK 调制系统性能分析

理想信道下, 基于 BPSK 调制的系统平均误码率为:

$$P_{BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{R_{SN}}) \quad (3.7)$$

BPSK 调制信号对光功率衰减与相位漂移都比较敏感, 大气湍流引起的相位漂移对 FSO 系统性能的影响很大。

在大气湍流引起的幅度衰减、相位漂移与瞄准误差的大气联合信道数学模型为第二章推导出的式 (2-13)。考虑到相位漂移后的 BPSK-FSO 系统平均误码率表达式可以利用函数化简

为一个闭合的表达式：

$$P_{e-BPSK} = \frac{1}{2} \int_0^\infty f_h(h) \text{erfc}(\sqrt{R_{SN}}) dh = \frac{\gamma^2}{2\sqrt{\pi}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{i=1}^N \omega_i G_{4,3}^{2,3} \left[\frac{R_{SN} A_0 h_i \cos(\sqrt{2}\sigma x_i)}{\alpha\beta} \right]_{0,1/2,-\gamma^2}^{1-\gamma^2,1-\alpha,1-\beta,1} \quad (3.8)$$

相位漂移对相位调制的 FSO 系统性能的影响如图 3.3 所示，

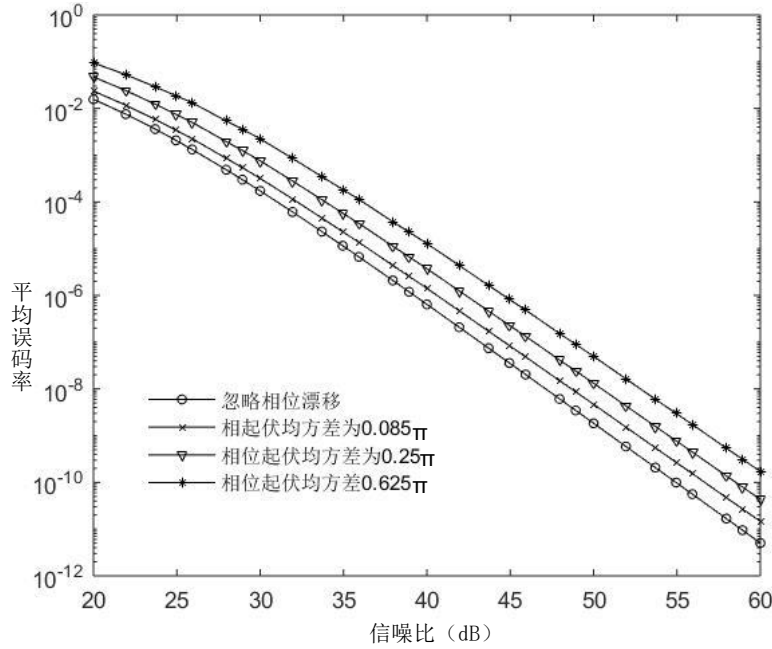


图 3.3 相位漂移对相位调制 FSO 系统误码率性能的影响

图 3.3 描述了在中强湍流下 ($\sigma_0^2=1, \alpha=4.39, \beta=2.56$)，相位漂移量与基于相位调制的 FSO 系统误码率的关系图，相位漂移分别取 0.085π ， 0.25π ， 0.625π 。在相同信噪比下，可以看到随着相位漂移量越大，基于 BPSK 调制的 FSO 系统误码率性能越小，信噪比为 60dB 时，误码率为 5.0×10^{-12} ， 1.31×10^{-11} ， 5.2×10^{-11} ， 3.02×10^{-10} 。仿真结果表明大气湍流引起的相位漂移对基于相位调制的 FSO 系统误码率性能的影响不可忽略。

3.3 正交频分复用调制

随着 FSO 通信的深入研究，对系统的通信容量也有了要求。OFDM 技术是正交频分复用的多载波调制方式的一种，与频分复用方式相比，OFDM 的子载波的频率间隔需满足正交条件，允许子载波的频谱相互重叠，增大了频谱利用率，在接收端只需要一个带通滤波器就能恢复信号。除此之外 OFDM 技术在时变环境下具有抗载波间干扰和符号间干扰的优势，误码率低于单载波调制系统，在自由空间光通信领域具有很好的应用前景。在 OFDM 调制中，子载波有正交幅度调制 (QAM) 和相位调制 (PSK) 两种调制方式，QAM 解调器需要同时正确检测

相位和幅度，而PSK解调只需要检测相位^[54]。本文讨论子载波采用PSK的OFDM调制方式。

3.3.1 基于 PSK-OFDM 调制的 FSO 系统

OFDM调制技术是将多个独立的数据流通过频率不同的多个副载波进行调制，原理为首先把高速的串行数字信号通过串并变换为低速的并行子载波信号，然后通过相位调制把信号加载到子载波的相位上，控制子载波间的间距，使得子载波经逆傅里叶变换(IFFT)后相互正交，再加入循环前缀以减少OFDM信号间码间干扰，变换为串行信号，最后经数模转换和滤波以及上变频处理得到OFDM信号，但由于OFDM信号是双极性信号，通常需要加一个直流偏置以保证信号非负。OFDM相邻子载波信号的频率间隔 Δf 需要与子载波的符号速率 $1/T_s$ 相等的条件，才能保证符号间隔上子载波相互正交：

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp(j2\pi \frac{k}{T_s} t) \exp(j2\pi \frac{j}{T_s} t) dt = \begin{cases} 1, k=j \\ 0, k \neq j \end{cases} \quad (3.9)$$

OFDM信号可表示为：

$$S_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} S_n(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp[i(2\pi f_n + 2\pi f_c)], \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (3.10)$$

其中，N 为子载波个数，S(t)为子载波信号； T_s 为 OFDM 符号周期，也是符号间隔的倒数； f_c 为上变频载波频率。

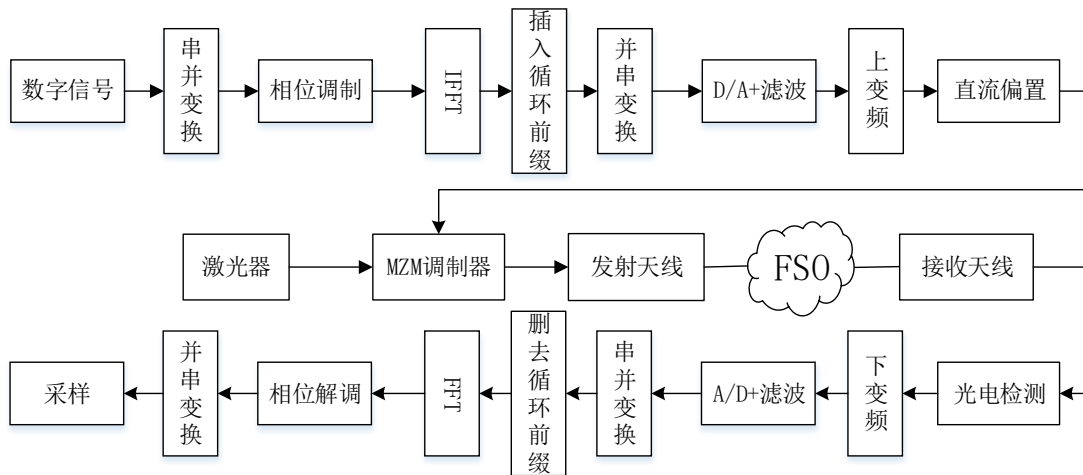


图 3.3 OFDM-FSO 系统框图

基于PSK-OFDM的FSO系统框图如图3.3所示，发送端把OFDM信号经相位调制器调制到激光上，再变换为OFDM信号发射天线发射到大气信道中；接收端经光电检测器把信号从光

域转换到电域,在电域经下变频和滤波处理后转换为并行子载波信号,再经傅里叶变换(FFT)从正交重叠的子载波信号中恢复出子载波传输的信号,最后经并串变换转换为串行原信号。

3.3.2 PSK-OFDM 调制系统性能分析

误码率是通信系统中常用的性能指标。若不考虑大气信道中的损耗,假设子载波个数为 N ,则基于 OFDM 调制的系统总的平均误码率为:

$$P_{PSK-OFDM} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \langle P_{s,n}(X) \rangle \quad (3.11)$$

其中 $P_{s,n}(X)$ 为第 n 个子载波的误码率,基于 PSK-OFDM 的单个子载波误码率为^[55-57]:

$$P_{e,n} = 2Q\left[\sqrt{2 \frac{B}{R_{SC}}} \cdot R_{SN} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\right] = \text{erfc}\left[\sqrt{\frac{B}{R_{SC}}} \cdot R_{SN} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\right] \quad (3.12)$$

其中, $R_{sc} \equiv \frac{N(M-1)}{3T}$ 。B 为用于 RSN 测量的光 ASE 噪声带宽 (~12.5GHz 对应 0.1nm 的带宽), N 为子载波数目 (2^k), M 为 PSK 的映射阶数 (2, 4, 16), T 为 OFDM 符号周期 (子载波信道间隔 15kHz 的倒数, T 取 1/15000s)。

大气联合信道下, PSK-OFDM 平均误码率公式为:

$$P_{e,PSK-OFDM} = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \int_0^{\infty} f_h(h) P_{s,n} dh \quad (3.13)$$

代入式 (2.19), 化为 MeijerG 形式的闭合表达式:

$$P_{e,PSK-OFDM} = \frac{\gamma^2}{\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \sum_{i=1}^N \omega_i G_{4,3}^{2,3} \left[\frac{BA_0 h_i R_{SN} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \cos(\sqrt{2} \sigma x_i)}{R_{SC} \alpha \beta} \middle| \begin{matrix} 1-\gamma^2, 1-\alpha, 1-\beta, 1 \\ 0, 1/2, -\gamma^2 \end{matrix} \right] \quad (3.14)$$

平均容量(遍历容量)也是估计通信链路的重要性能指标,与香农定理在给定时间内传输的信息量定义为平均。若不考虑大气运动的影响,假设信号在理想信道状态下即高斯信道中传输时平均信道容量为^[52]:

$$C_{AWGN} = B \log_2(1 + R_{SN}) \text{ bit} / s \quad (3.15)$$

式中 B 是带宽,对数函数可化简为 MerjerG 函数:

$$\ln(1 + \tau) = G_{2,2}^{1,2}(\tau \mid_{1,0}^{1,1}) \quad (3.16)$$

但在大气信道受到温度和湍流的影响实时的发生变化,使得信道状态无法精确预知。因此可把大气湍流信道看作受大气状态影响不稳定的随机时变系统。在大气信道下系统平均容量为:

$$C = \int_0^{\infty} f(h) C_{AWGN} dh \quad (3.17)$$

由大气吸收损耗、大气湍流与接收端瞄准误差引起的衰减的联合信道下，基于相位调制的单个子载波平均容量的闭合表达式为：

$$C = \frac{B\gamma^2}{\ln 2 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \sum_{i=1}^N \omega_i G_{4,3}^{1,5} \left[\frac{R_{SN} A_0 h_l \cos(\sqrt{2} \sigma x_i)}{\alpha \beta} \right]_{1, -\gamma^2, 0}^{1, 1, 1-\gamma^2, 1-\alpha, 1-\beta} \quad (3.18)$$

对单子载波的平均信道容量进行仿真分析。

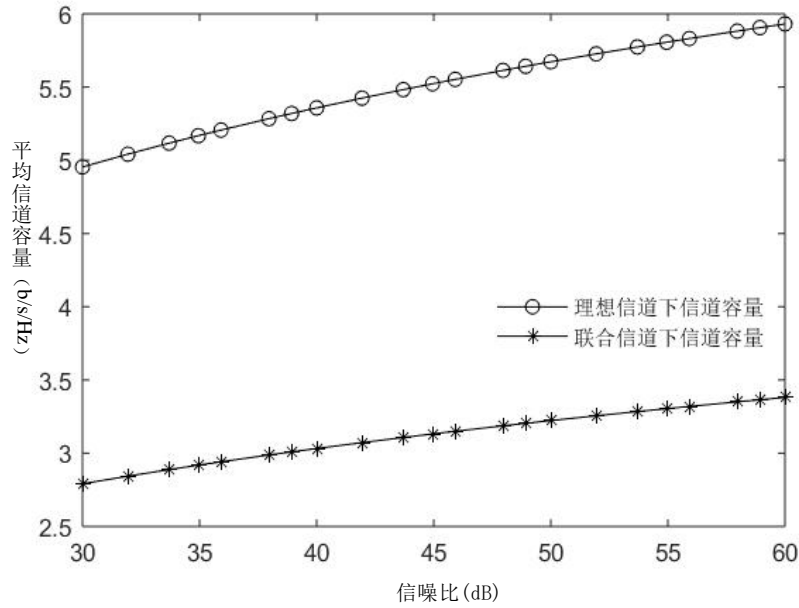


图 3.2 大气信道下基于相位调制单子载波平均信道容量

图 3.2 为中强湍流下 ($\sigma_0^2=1, \alpha=4.39, \beta=2.56$)，传输距离为 1km 时，平均信道容量与信噪比的关系。对比理想信道和联合大气信道下的信道容量，可知大气湍流使 FSO 系统通信容量减小。子载波个数为 N 的 PSK-OFDM 系统平均信道容量为：

$$C = \frac{NB\gamma^2}{\ln 2 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \sum_{i=1}^N \omega_i G_{4,3}^{1,5} \left[\frac{R_{SN} A_0 h_l \cos(\sqrt{2} \sigma x_i)}{\alpha \beta} \right]_{1, -\gamma^2, 0}^{1, 1, 1-\gamma^2, 1-\alpha, 1-\beta} \quad (3.19)$$

3.4 偏振调制

激光的偏振态在大气湍流中传输时偏振度会增加，但经过足够长的距离后，光束的偏振度会趋于源平面上的偏振度初始值。目前近地 FSO 系统的通信距离在几千米，在这一段距离内，激光束的偏振度会有微小的增加，然后趋于不变。长距离传输时大气湍流对光束的偏振

度（DOP）和偏振态（SOP）影响都不大，且理论上正交的偏振态之间串扰的可以忽略^[58-60]。从调制方式的原理上来看，与强度调制和相位调制相比，在长距离传输中偏振调制受大气湍流的影响比较少，使得偏振调制在 FSO 中具有重要研究意义。国内外研究人员陆续展开了对偏振调制技术的研究，对基于偏振调制的直接探测大气通信系统原理和光信号在传输中的偏振变化进行了理论分析。

3.4.1 基于 Polsk 调制的 FSO 系统

偏振调制即通过信号光的偏振态进行调制，偏振调制后进入发射天线的信号光为：

$$x_s(t) = \sqrt{\frac{P_s}{2}} e^{j[\omega_s t + \varphi_s(t)]} \cdot e^{j\Delta\phi/2} \quad (3.20)$$

其中 P_s 为输入光功率， ω_s 为输入光的频率， φ_s 为输入光的相位； $\Delta\phi$ 为经过 PM 调制后的相位变化，信号为“1”时， $\Delta\phi$ 为 π ，信号为“0”时， $\Delta\phi$ 为 0。

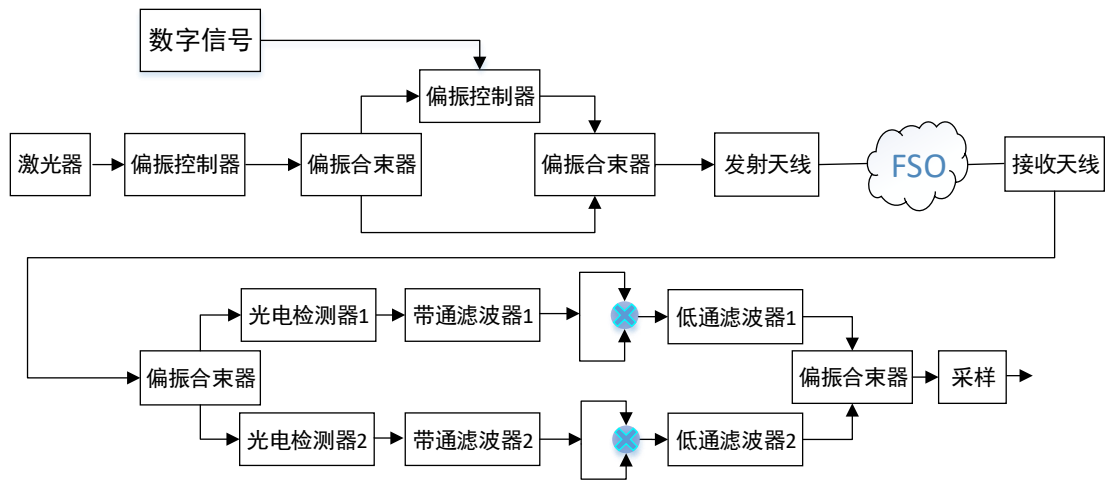


图 3.4 Polsk-FSO 系统框图

基于偏振调制的直接检测 FSO 系统原理图如图 3.4 所示，发射端完成信号在光偏振态上的调制，调制原理为：激光经偏振控制器变成偏振角为 $\pi/4$ 的线偏振光，再由 PBS 分为偏振轴相互正交的两束线偏振光，偏振调制器把数字信号调制到其中一束偏振光上，若信号为“1”，产生 π 相位的相移，经偏振合束器合束为偏振方向为 $-\pi/4$ 的线偏振光；若信号为“0”，则相位不变，合束为偏振方向为 $+\pi/4$ 的线偏振光，经调制后的“0”“1”信号 $x_s(t)$ 是与发射光场偏振分量相关的两个正交信号。接收端负责信号光的接收与解调，通过分析接收信号的偏振

态就可以完成信号的探测与解调。

3.4.2 Polsk 调制系统性能分析

不考虑大气信道中的损耗，在理想信道条下，基于 Polsk 调制的系统平均误码率为：

$$P_{Polsk} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \sqrt{R_{SN}}\right) \quad (3.21)$$

基于 BPSK 调制和 PSK-OFDM 调制 FSO 系统受相位漂移影响，基于 OOK 调制和 Polsk 调制 FSO 系统对大气湍流引起的相位偏移敏感度不高，可忽略不计。在 Gamma-Gamma 湍流衰减与接收端瞄准误差的联合信道下 Polsk 调制方式的 FSO 系统系统误码率公式分别为：

$$P_{Polsk} = \frac{1}{2} \int_0^\infty f_h(h) \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \sqrt{R_{SN}}\right) dh = \frac{\gamma^2}{2\sqrt{\pi}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{4,3}^{2,3}\left[\frac{R_{SN}A_0h_l}{2\alpha\beta} \middle| \begin{matrix} 1-\gamma^2, 1-\alpha, 1-\beta, 1 \\ 0, 1/2, -\gamma^2 \end{matrix} \right] \quad (3.22)$$

3.5 不同调制方式的误码率性能比较

3.5.1 理想信道下误码率性能比较

在 Matlab 仿真软件中，对理想信道条件下的强度、相位、偏振态三种调制方式进行仿真，其中 OFDM 调制的子载波个数为 512，仿真结果表明如图 3.5 所示。

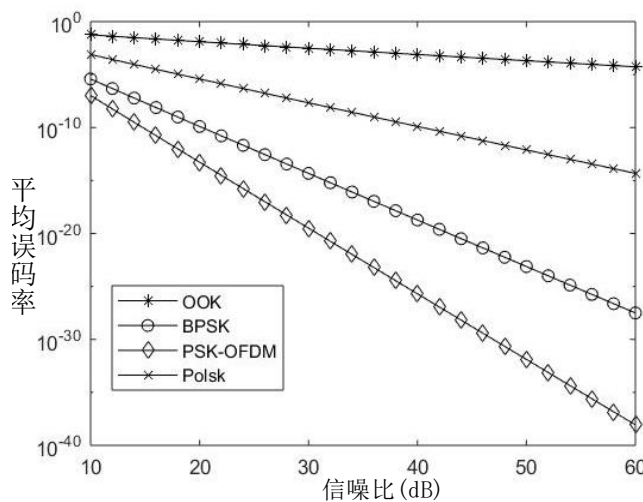


图 3.5 理想信道下不同调制方式的误码率性能比较

由图3.5可以看出，与相位调制和偏振态调制方式相比，OOK调制方式系统误码率性能最弱；与强度调制和偏振态调制方式相比，基于相位调制的通信系统的误码率性能更为优越。由数值仿真可以得到理想信道条件下信噪比为30dB时，OOK调制方式、Polsk调制方式、BPSK

调制方式和PSK-OFDM调制方式的系统误码率分别为 3.1×10^{-3} , 2.16×10^{-8} , 4.74×10^{-15} , 3.21×10^{-20} 。选择合适的调制方式对提高通信系统性能具有重要的意义。

3.5.2 大气联合信道下误码率性能比较

由第二章可知 FSO 系统光信号在自然空间大气信道中受气溶胶粒子以及大气湍流的影响发生不同程度的幅度衰减, 相位信息受不均匀湍流的影响产生随机漂移。光信号幅度的衰减使得光功率发生衰减, 对系统性能具有很大的影响。光信号的相位漂移效应对基于 OOK 调制的 FSO 系统影响可忽略不计, 但基于相位调制方式的 FSO 系统性能有重要的影响。

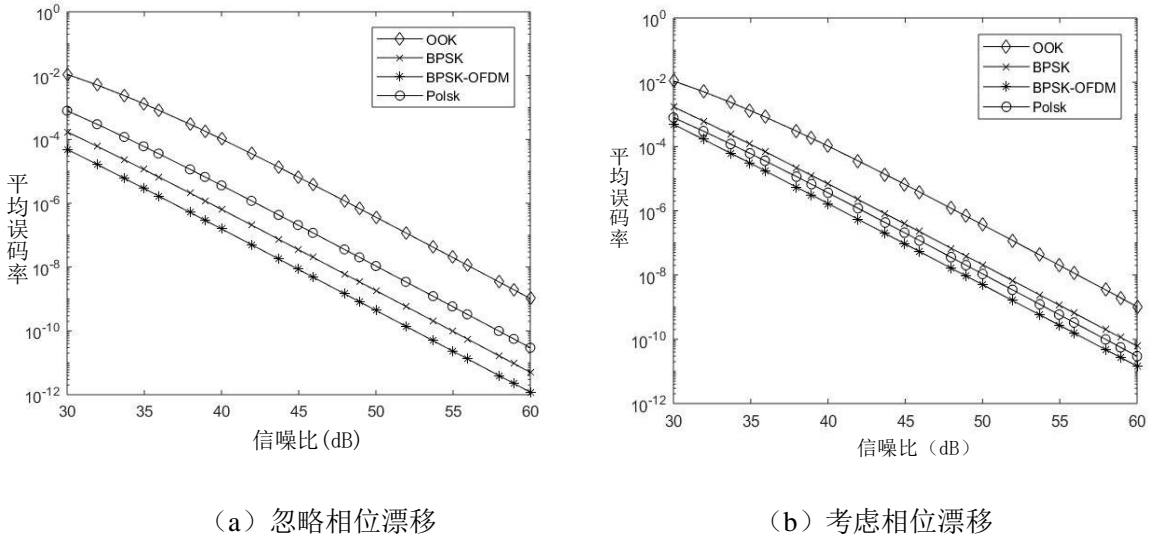


图 3.6 联合信道下误码率性能比较

考虑自然空间大气的影响, 中强湍流下 ($\sigma_0^2=1, \alpha=4.39, \beta=2.56$) 在联合大气信道下基于 OOK、BPSK、PSK-OFDM、Polsk 调制方式的系统性能仿真结果如图 3.6 所示。图 3.6 (a) 为忽略相位漂移, 考虑大气吸收损耗、大气湍流光强闪烁以及发射端与接收端瞄准误差引起的功率衰减联合信道下几种调制方式的信噪比与误码率关系图, 从图 3.6(a) 可以明显可以看出与理想信道条件下相比, 受大气吸收效应、大气湍流引起的衰减效应以及接收端瞄准误差造成的能量衰减使得 FSO 系统误码率性能具有非常大的影响。偏振调制的 FSO 系统误码率远小于 OOK 调制 FSO 系统误码率, 基于 PSK-OFDM 调制的相干 FSO 系统误码率稍高于 BPSK 调制的相干 FSO 系统误码率, 基于 PSK-OFDM 系统的误码率性能最好。但考虑到大气中的不均匀尺度的湍流引起的相位漂移, 不同相位噪声在弱、中、强不同湍流强度对系统性能的影响均不相同, 为进一步凸显这种影响, 中强湍流强度下相位起伏参数取为 0.25π 。衰减与

相位漂移的联合信道下平均误码率仿真图如 3.6 (b) 所示。幅度调制与偏振态调制偏振态信息受相位漂移的影响可忽略不计。通过对比图 3.6(a)和图 3.6(b)可以看出,湍流强度为 $\sigma_0^2=1$,相位起伏参数为 0.25π 时,基于相位调制的 FSO 系统的平均误码率明显增大,BPSK 与 BPSK-OFDM 调制的 FSO 系统误码率为 10^{-8} 时所需信噪比分别增大了 3dB, 2dB。

仿真结果表明大气吸收损耗、大气湍流光强闪烁与接收端和发射端瞄准误差造成的光强衰减,以及大气中不均匀尺度的湍流造成的相位漂移对自由空间光通信系统具有不可忽略的影响,与强度调制、相位调制相比,偏振态调制受大气湍流光强衰减与相位漂移的影响最小。

3.6 本章小结

本章主要对基于OOK、BPSK、PSK-OFDM、Polask调制的FSO系统原理以及平均误码率性能做了详细分析,并结合第二章联合大气信道数学模型,推导出了联合信道下几种调制方式的FSO系统平均误码率闭合公式。并做了以下分析:(1) 仿真分析了大气信道中不均匀尺度的湍流引起的相位漂移对基于相位调制的自由光通信系统的影响,仿真结果表明在相同信噪比下随着相位漂移越大,FSO系统误码率性能越差。(2) 仿真分析了理想信道条件下几种调制方式的平均误码率,仿真结果表明与幅度调制、偏振态调制方式相比,基于相位调制的FSO系统误码率性能最好,基于相位的OFDM调制FSO系统平均误码率性能稍好于基于相位调制的FSO的平均误码率。(3) 仿真分析了相位漂移与振幅衰减的联合信道下几种调制方式的信噪比与平均误码率关系,仿真结果表明大气中不均匀尺度的湍流造成的相位漂移对基于BPSK、PSK-OFDM调制的自由空间光通信系统具有不可忽略的影响;且与强度调制相比,偏振态调制受大气湍流的影响比较小。通过分析,偏振态调制方式受大气信道中影响因子较小,是一种性能优良的调制方式。

第四章 相干 FSO 系统仿真

我们在第三章介绍了发射端几种信号调制的方式，并总结了基于 OOK、BPSK、PSK-OFDM、Polask 几种调制方式的 FSO 系统原理。本章我们将对 FSO 系统的接收方式进行仿真分析：(1) 基于 Optisystem 14.0 软件搭建基于偏振调制的自由空间光通信系统模型，并在模型的基础上分析直接接收、外差相干接收、零差相干接收三种不同接收方式对 Polask-FSO 系统性能的影响；(2) 使用 Matlab 2017b 软件对基于相干接收方式下的偏振 FSO 系统平均误码率和中断概率进行数值仿真，并定量分析大气湍流强度、归一化束宽以及接收端归一化抖动系数对相干 FSO 系统性能的影响。

4.1 FSO 系统的接收方式仿真分析

4.1.1 相干接收方式的原理

自由空间光通信领域中接收技术可分为两类：直接接收技术与相干接收技术，其中相干接收技术因本振源信号与接收光信号的是否同相又可分为零差相干接收技术与外差相干接收技术。目前在自由空间光通信技术中常用的接收技术为直接接收技术，在直接接收方式简单易实现，只需光电探测器直接把激光信号的强度信息解调为电信号直接输出，不用考虑光信号的相位信息，换言之，是只能对光信号的振幅有所相响应，没有利用激光信号的相干特性，把光作为粒子来处理。与直接接收方式不同的是相干探测方式，利用激光信号的相干特性，把激光作为电磁波来处理信号的解调。

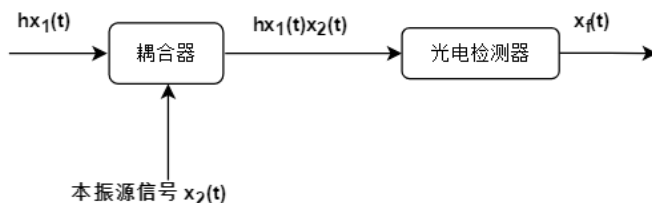


图 4.1 相干接收原理图

相干接收原理图如图 4.1 所示，设接收信号光为 $hx_1 = hA_1 e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)}$ ，本振光为 $x_2(t) = A_1 e^{j(\omega_2 t + \varphi_2)}$ ，

若采用外差检测方式，本振源与接收信号存在一定的频差 $\omega_f = \omega_2 - \omega_1$ ，和一定的相差

$\varphi_f = \varphi_o - \varphi_s$ ，经探测器接收后的光信号与外差本振光为在检测器光敏面上耦合，由于光检测器的平方率特性，混合后的中频信号需经过带宽为 ω_f 的带通滤波器滤波。通过带通滤波器得到中频信号，再经相乘器和低通滤波器进行电域的下变频得到基带信号，最终经采样保持和抽样判决后完成解调。若采用零差检测方式，本振光与信号光的频率和相位信息需保持一致，本振光的相位锁定在信号光相位上，频差和相位差为 0。在检测器光敏面上耦合后的基带信号经低通滤波器滤波，最终完成解调。

从实用性的角度来考虑，零差相干接收系统中需要用到高精度的光锁相环锁定本振光与信号光的频率和相位，而外差探测不要求直接恢复光载频，不需要光锁相环，而且它对光学相位与频率稳定性的要求较零差系统的要低，因此具有结构简单，实用性强的优点。从系统性能的角度来考虑，目前已经有研究表明与直接接收方式相比，自由空间光通信技术中接收端采用相干接收方式系统性能更为优越。本节对基于偏振态调制的自由光通信系统的接收端直接接收、零差相干接收、外差相干接收三种接收方式进行分析。

4.1.2 直接接收与相干接收仿真分析

本节将探讨偏振调制方式的 FSO 系统的三种接收方式下的系统性能，并对基于偏振调制的自由空间光通信系统的通信性能进行模拟仿真。

基于第三章第 4 小节对基于偏振调制技术 FSO 系统的原理的研究，在本节采用光学软件 Optisystem14.0 软件搭建系统模型，对接收端采用直接与相干接收方式时的系统性能等进行仿真研究。数字信号调制速率为 2.5Gbps，选用 NRZ 码；信号激光器波长为 1550nm，频率为 193.414THz，功率为 30dBm，线宽为 10MHz；外差相干本振源激光器的频率为 193.404THz，功率为 32dBm，带通滤波器为 10GHz。零差相干本振源激光器与信号激光器参数一致，功率为 32dBm，与信号光在检测器的光敏面上耦合后经相乘器和低通滤波器得到基带信号。发射端口直径为 5cm，接收端口直径为 25cm。

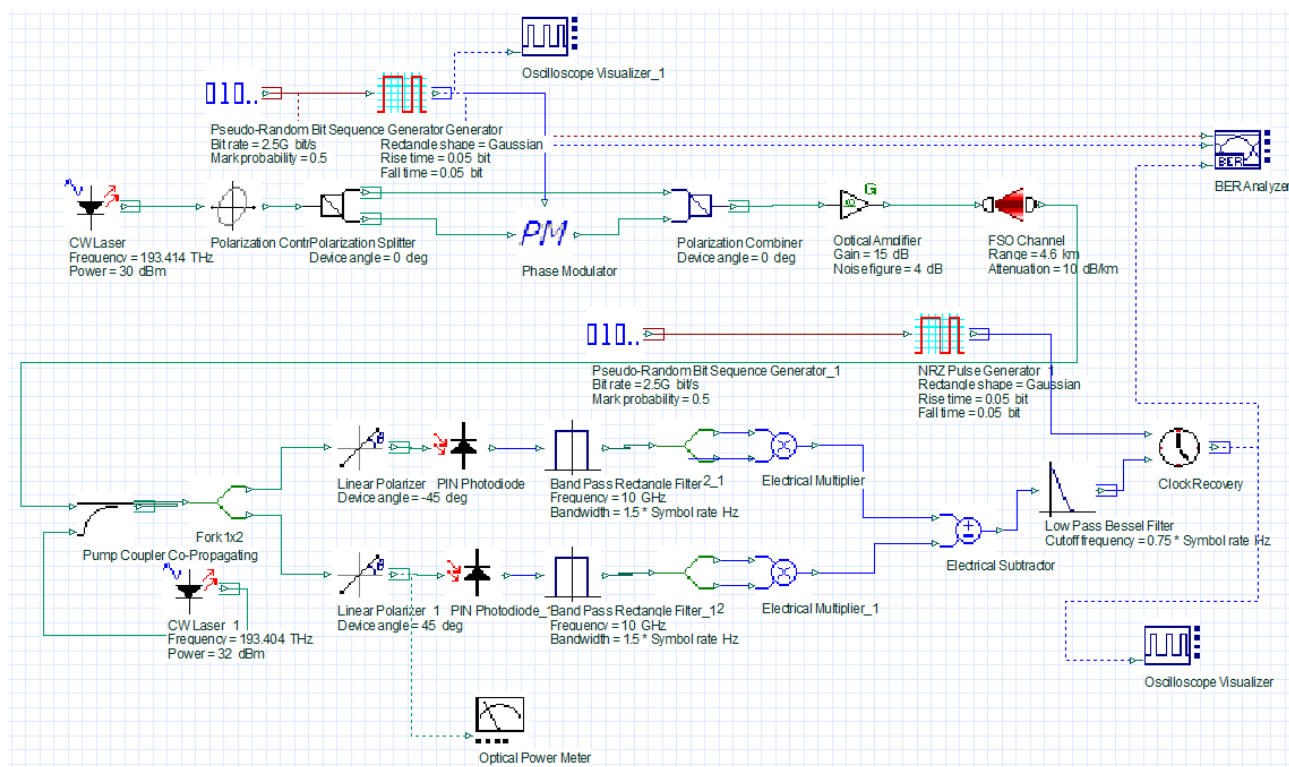
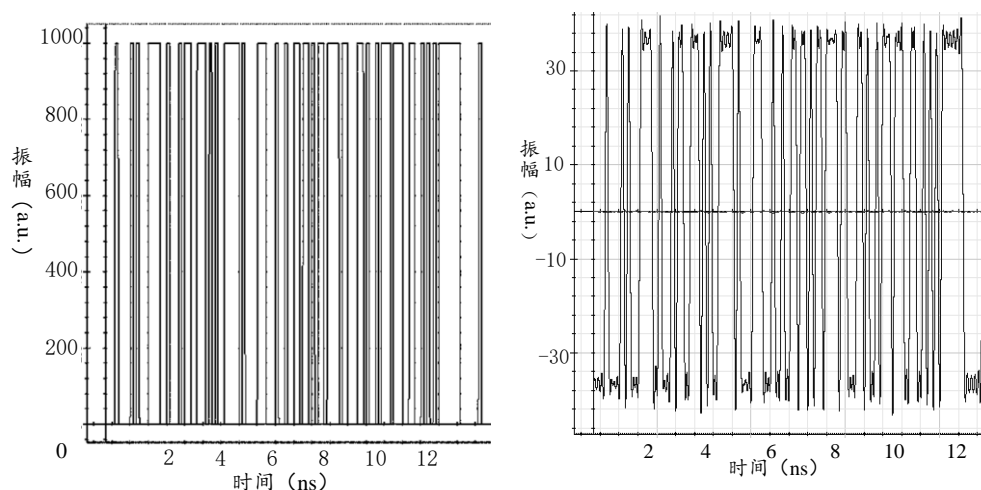


图 4.2 基于 optisystem 软件的偏振调制相干 FSO 系统图

采用光学软件 Optisystem14.0 软件搭建系统在 Optisystem 中搭建的基于偏振调制相干 FSO 系统模型如图 4.2 所示。在第二章第 1 小节中我们对不同天气下的可视距离与激光信号功率衰减系数的关系, 在该仿真系统中我们主要讨论不同功率衰减系数下传输时系统的性能。



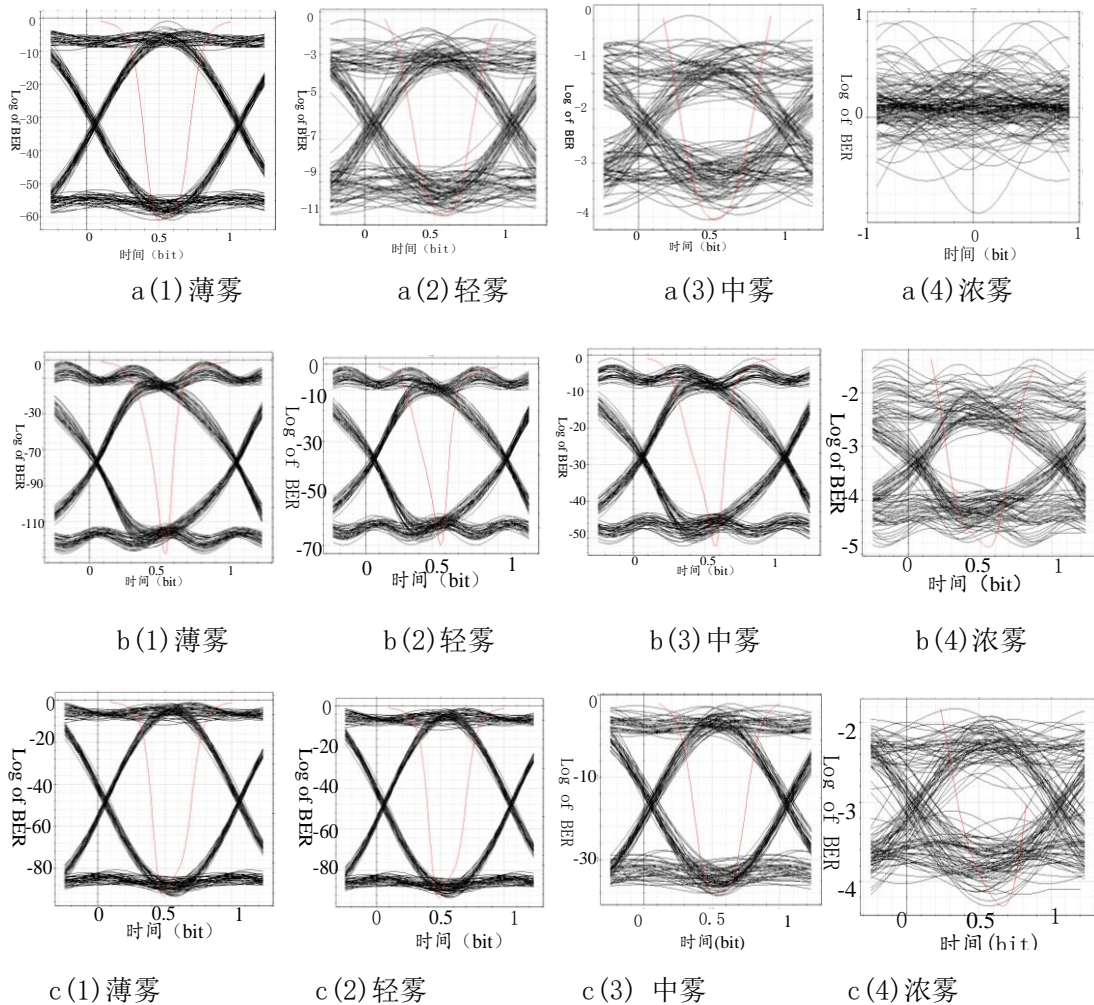
(a) 伪随机发射信号码形

(b) 解调信号码形

图 4.3 发射信号与接收信号的码形图

系统采用偏振外差相干调制方式, 以 2.5Gb/s 的调制速率将 NRZ 码调制到光信号上, 发

射信号码形如图 4.3(a)所示；在信道损耗为 4dB/km、传输距离为 2km 时，经接收端解调和滤波后的信号码形如图 4.3(b)所示。对比调制前与解调后恢复的信号可以看出，解调信号上升沿和下降沿稳定，无频率抖动，系统通信性能较为理想。



(a) 直接探测系统眼图 (b) 外差相干探测系统眼图 (c) 零差相干系统眼图

图 4.4 不同天气条件下直接接收与相干接收的系统眼图分析

图 4.4 是大气传输距离为 2km 时，薄雾、轻雾、中雾和浓雾天气下的系统眼图分析，由此可知，随着天气可视距离的减少系统通信性能逐渐减弱。图 4.4 (a)、图 4.4 (b) 和图 4.4 (c) 分别为不同天气条件下直接检测系统、外差相干检测系统和零差相干检测系统的眼图。对比分析图 4.4 (a)、图 4.4 (b) 和图 4.4 (c)，可以明显看出相同天气条件下，相干偏振检测系统比直接偏振检测系统性能更加突出，如在轻雾、中雾和浓雾天气条件下时，直接探测的误码率分别约为 2.8×10^{-30} 、 5.37×10^{-16} 、1，外差相干检测的误码率约为 5.0×10^{-77} 、 1.28×10^{-49} 、 1.04×10^{-5} ，零差相干误码率约为 5.0×10^{-170} 、 2.9×10^{-92} 、 4.23×10^{-9} ，零差相干检测与外差相干检测的系统误码率远小于直接检测的系统误码率。

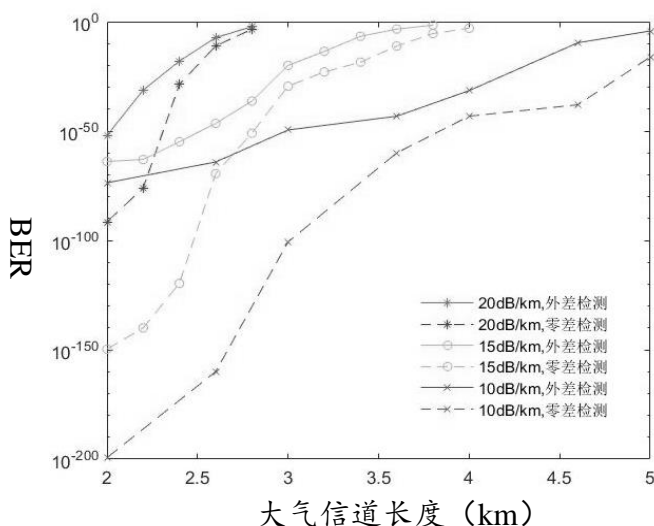


图 4.5 不同天气条件下信道长度与系统误码率的关系

图 4.5 为不同天气条件下，大气信道长度与误码率的关系图，可以看出：随着通信距离增加，误码率增大；随着天气条件变差，系统误码率增大；相同天气条件下，基于偏振调制的零差相干 FSO 系统误码率更小，系统性能更好；传输距离较小时，零差与外差相干探测系统通信性能都良好，远小于通信系统误码率标准；通信距离较大时，相干系统通信质量明显高于直接检测的系统性能，但零差相干系统与外差相干系统的通信性能相差不大，如在轻雾天气下，零差相干系统最大传输距离可传输 5.5km，外差系统最大传输距离为 5km；在中雾天气下，零差相干系统和外差相干检测系统的最大传输距离都不超过 3km；同一天气条件下，通信距离相同时，零差相干与外差相干系统误码率相差不大。

相干接收要求本振源信号与光信号的之间的相位差有一定的要求，零差相干接收方式要求相位一致相位差为 0，外差相干接收方式则允许有定量的相位差。相干接收引入的相位噪声会造信号光与本振光之间产生相位误差，本小节仿真分析了由相干接收引起的相位误差对零差相干与外差相干 FSO 系统的影响。

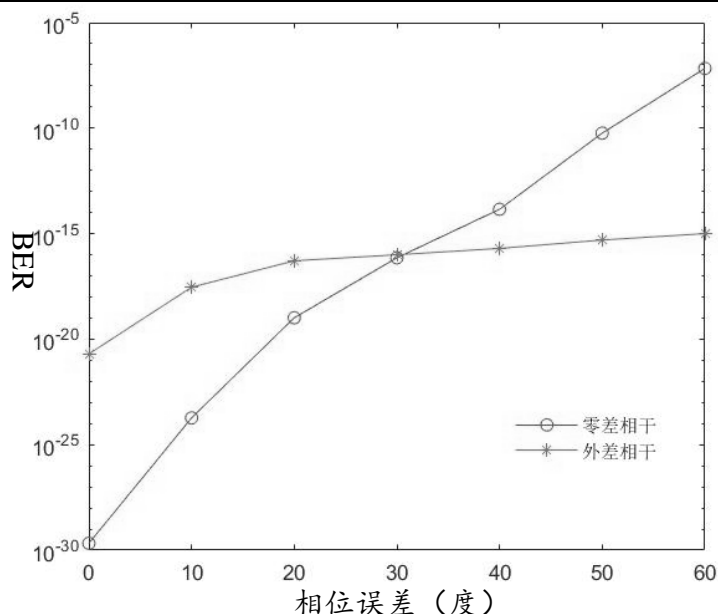


图 4.6 相位误差对相干接收系统误码率的影响

图 4.6 为传输距离为 3km、衰减系数为 15dB/km 时，本振源光信号与激光信号的相位误差与相干接收系统误码率性能的关系图，由图可以看出：在相同强度的光强衰减系数下，随着相位误差的增大，相干接收系统误码率逐渐增大；与外差相干接收系统相比，零差相干接收随相位误差的增加误码率增加更快，受相位误差的影响更大。

本节分析了偏振调制的接收方式，并在偏振调制的基础上分析了三种接收方式，使用 Optisystem 软件设计并实现了直接、零差与外差系统的搭建。由仿真结果可以看出，相同天气条件下，基于偏振调制的相干探测系统比直接探测系统通信效果更好。大气天气条件对通信质量有着严重影响，在中雾天气下，基于偏振调制的相干系统在符合通信标准时的最大传输距离不超过 3km。由于实际系统中实现零差相干的相位一致相当困难，虽然外差相干检测系统的最大传输距离比零差相干检测的最大传输距离更小，但最大传输距离相差不大且外差实际系统更易于实现，综合考虑工程应用中基于偏振调制的相干 FSO 系统宜采用外差相干探测方式。

4.2 相干 FSO 系统仿真分析

4.1 小节对基于偏振调制的自由空间光通信系统的三种接收方式进行了仿真分析，仿真结果表明与直接相干接收、零差相干接收方式比，接收端采用外差相干接收方式更适用于偏振调制 FSO 系统。本节对接收端采用外差相干接收方式时 FSO 系统的平均误码率、中断概率等系统性能进行数值仿真分析。在联合信道下分析大气湍流强度、信噪比、归一化波束宽度、

接收天线与发射天线之间归一化抖动系数、信噪比、平均发射功率等参数对相干 FSO 系统性能的影响，并选取合适的系统参数使得在给定发射功率下通过优化波束宽度使相干 FSO 系统性能达到最优。

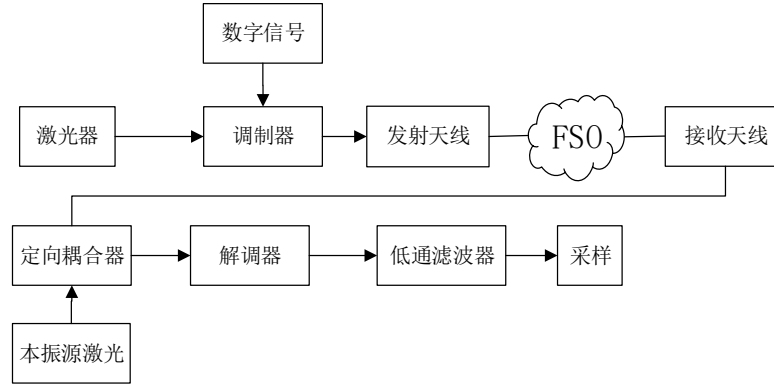


图 4.7 相干 FSO 系统原理图

图 4.7 为相干 FSO 系统原理图，激光波长为 1550nm；光电检测器的响应度 R 为 0.5A/W，接收半径为 10mm，等效带宽 Δf 取 200MHz。

4.2.1 信噪比

FSO 系统的噪声有相干接收光探测器产生的散粒噪声、暗电流噪声、热噪声，以及信道引起的高斯白噪声，则 FSO 系统信噪比为：

$$R_{SN} = \frac{(RPh)^2}{(2qRPh + 2qi_d)\Delta f + 2\sigma_T^2 + \sigma_n^2} \quad (3.5)$$

其中 R 为光电转换器的响应度，定义为平均输出电流与平均输入功率的比值； P 为发送端光信号功率； h 为信道状态； q 为电子电荷电量； Δf 为光电转换器的有效带宽； $\langle i_N \rangle^2 = 2qRPh\Delta f$ 为本振光产生的散粒噪声； $\sigma_{dark}^2 = 2qi_d\Delta f$ 为暗电流噪声； $2\sigma_T^2$ 为热噪声； σ_n^2 为高斯白噪声，约为 $10^{-14}W$ 。忽略暗电流噪声和热噪声、高斯白噪声^[12]，此时系统的信噪比可以化简为：

$$R_{SN} = \frac{hRP}{2q\Delta f} \quad (3.6)$$

4.2.2 平均误码率分析

基于第三章推导出的联合信道下的FSO系统误码率公式，代入相干FSO系统的信噪比，大气吸收损耗系数为0.9；光电检测器的响应度 R 为0.5A/W，半径为10mm，等效带宽 Δf 取200MHz；基于偏振调制的相干FSO系统信噪比与平均误码率的关系如图4.8所示。

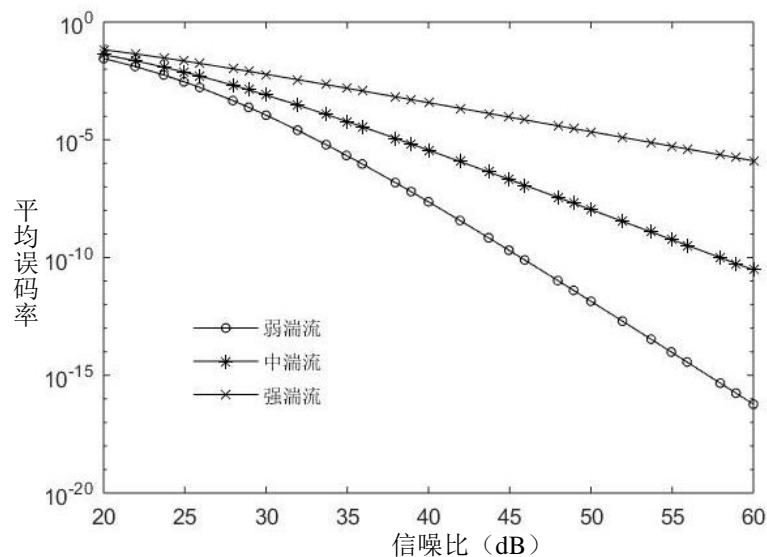


图4.8 平均误码率与信噪比的关系图

图4.8是传输距离为1km时，弱、中、强（折射率常数 C_n^2 分别为 2.51×10^{-13} 、 5.03×10^{-13} 、 2.51×10^{-12} ， σ_0^2 分别为0.5，1，5）三种不同湍流强度下Polask调制平均误码率随信噪比变化的关系图。从图可以看出：同一信噪比时，湍流强度越大，误码率越大，系统性能越低；随着信噪比的增大，系统误码率性能提升。在弱湍流条件下（ σ_0^2 为0.5），信噪比大于44dB时，误码率小于 10^{-9} ，在中等湍流强度条件下（ σ_0^2 为1），信噪比为54dB时误码率才达到 10^{-9} 。由于超过一定功率的激光可能对人眼或皮肤的安全造成一定的影响，对FSO系统的发射功率有着一定的限制以确保符合国际标准。

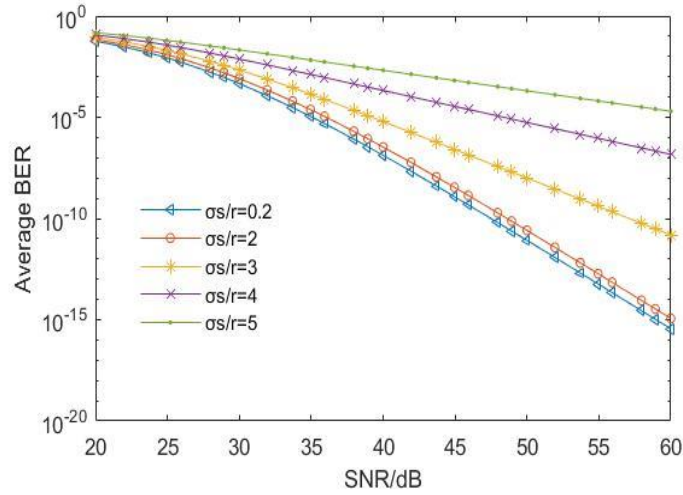


图4.9 平均误码率与抖动系数的关系图

图4.9是弱湍流 ($\sigma_0^2=0.5$) 条件下, 归一化波束宽度为10时, 归一化抖动系数与平均误码率的关系曲线, 从曲线可以看出在相同的信噪比条件下, 归一化抖动系数越小, 通信质量越好。归一化抖动系数为0.2, 2, 3时, 系统的平均误码率在信噪比为46~60dB范围内时满足小于 10^{-9} 的通信条件; 归一化抖动系数大于4时, 系统的误码率在信噪比为60dB时大于 10^{-9} 。因此可通过适当增大接收半径的值, 减小接收天线的归一化抖动系数, 提高通信系统的性能。

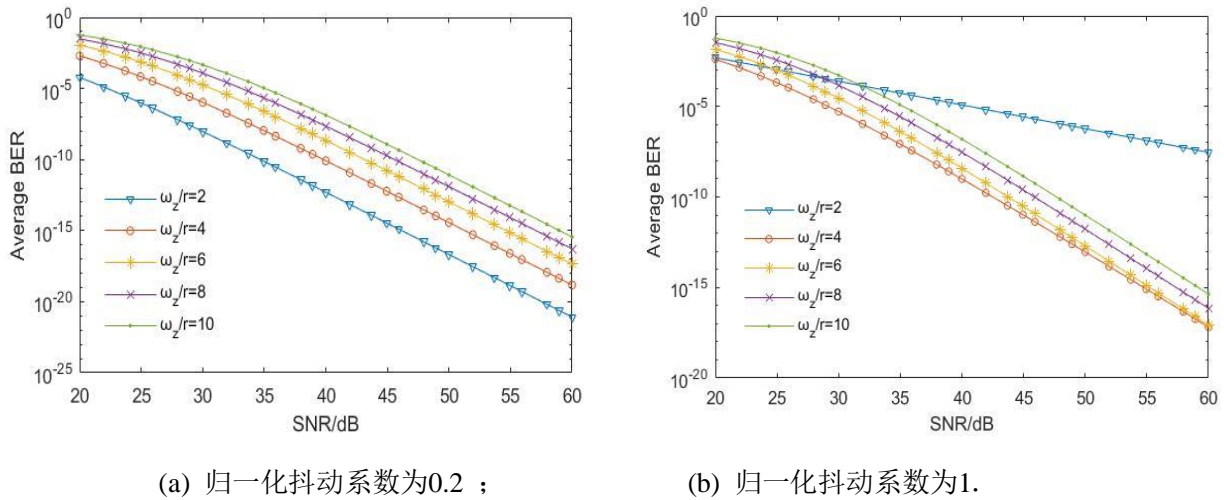


图4.10 平均误码率与归一化束宽的关系图

图4.10为弱湍流 ($\sigma_0^2=0.5$) 条件下, 归一化抖动系数为0.2和1时, 系统平均误码率与归一化束宽的关系图。图(a)是归一化抖动系数为0.2时, 归一化束宽与平均误码率的关系曲线, 由图可以看出随着束宽减小, 误码率降低, 在抖动系数较小时, 可通过减小归一化束宽来实现系统性能的优化。图(b)为归一化抖动系数为1时, 归一化束宽与平均误码率的关系曲线, 由图可以看到归一化束宽较小时与误码率呈现非单调性关系, 在信噪比为20~60dB时, 归一

化束宽最优值的取值范围在2~4之间。因此抖动较大时，需要选择合适的束宽来实现系统性能的最优化。

4.2.3 中断概率分析

随着系统误码率的增大，通信系统的可靠性逐渐降低。当误码率大于某阈值时，即信噪比低于某阈值时，产生通信中断。则系统的通信中断概率可以用下式来表示：

$$P_o(R_0) = \text{Prob}(R_{SN}(h) \leq R_0) = \text{Prob}(h \leq H) = \int_0^H f_h(h) dh$$

设 R_0 为信噪比的阈值，则 $H = \frac{2q\Delta R_0}{PR}$ 为信道归一化阈值，由MeijerG函数性质[15]可得：

$$P_o(H) = \frac{\gamma^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_l} H \middle| \begin{matrix} 1, \gamma^2+1 \\ \gamma^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right]$$

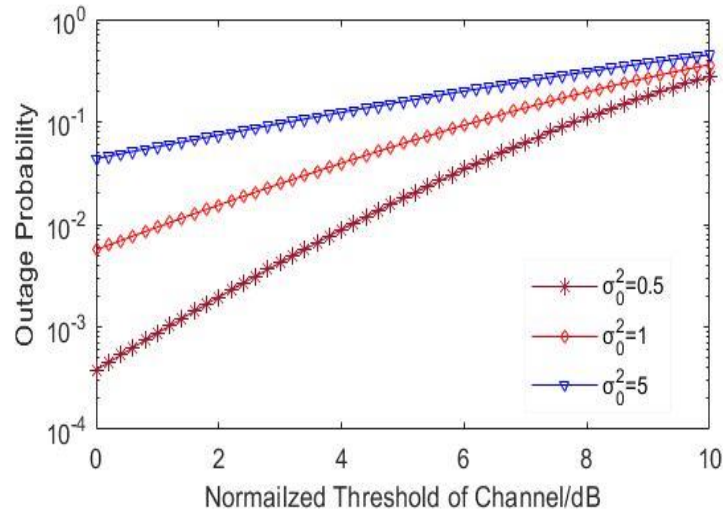


图4.11 中断概率与湍流强度及归一化阈值的关系图

图4.11是当归一化波束宽度 ω_z/r 为10，归一化抖动误差 σ_s/r 为0.2，弱、中、强(σ_0^2 分别为0.5, 1, 5)三种不同湍流强度下，信道归一化阈值与中断概率的关系。由图可知随着信道归一化阈值 H 增加，通信中断概率增大。在归一化阈值为5时，三种不同湍流强度下(σ_0^2 分别为0.5, 1, 5)的通信中断概率分别为0.0174, 0.0604, 0.1564；归一化阈值为10时，三种不同湍流强度下(σ_0^2 分别为0.5, 1, 5)的通信中断概率分别为0.2728, 0.3579, 0.4484。归一化阈值为17时，中断概率接近1。

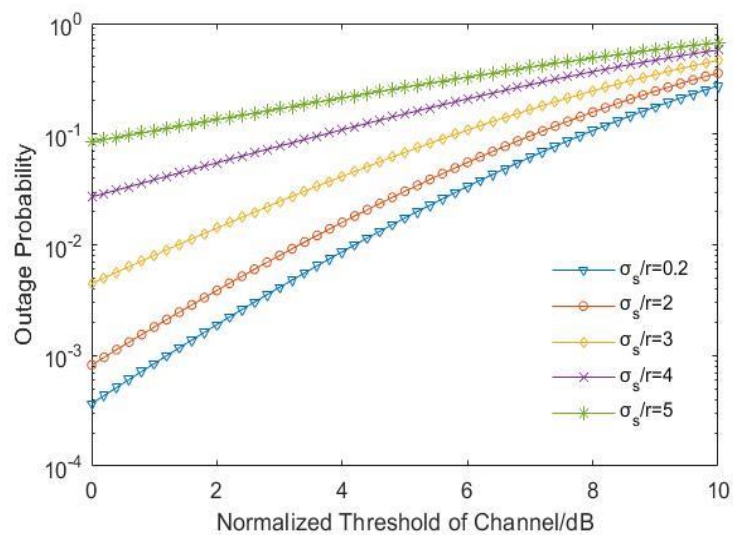


图4.12 中断概率与归一化抖动系数的关系图

表1 中断概率与归一化抖动系数及归一化阈值关系表

| <div><div></div><div>$\frac{\sigma_s}{r}$</div><div>H</div></div> | 0.2 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---------|---------|--------|--------|--------|
| 0 | 0.00037 | 0.00082 | 0.0045 | 0.027 | 0.085 |
| 5 | 0.0174 | 0.0304 | 0.0683 | 0.1522 | 0.2651 |
| 10 | 0.2728 | 0.3564 | 0.4626 | 0.5759 | 0.7308 |

图4.12为 ω_z/r 为10时，归一化抖动系数与中断概率的关系图。由图可以看出随着抖动误差的增加，中断概率也在增加。从图7抽出三组数据，如表1所示，归一化阈值为5时，抖动系数为0.2，2之间中断概率的差值为0.013，抖动系数为2，3时的差值为0.0379，抖动系数为3，4时的差值为0.0839，抖动系数为4，5时的差值为0.1129，差值随着抖动系数的增大而增大，抖动系数越大对系统的影响越大。归一化阈值为10时，抖动系数为0.2，2，3，4，5，相邻抖动系数中断概率的差值分别为0.0836，0.1062，0.1133，0.1549。随着归一化阈值的增大，抖动系数的变化对系统的影响也就越大。

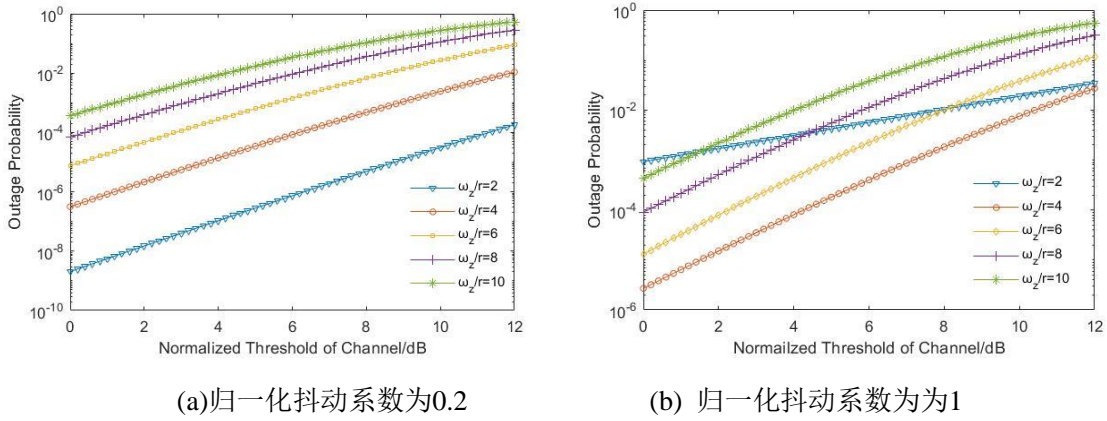


图4.13 中断概率与归一化波束宽度的关系图

图4.13为归一化波束宽度与中断概率的关系图，图4.13(a)是归一化抖动系数为0.2时，波束宽度与中断概率的关系图，从图中可以看出随着波束宽度减小，中断概率降低，系统性能越稳定。图4.13(b)为归一化抖动系数为1时，波束宽度与中断概率的关系图，从图中可以看出，波束宽度与中断概率呈现非线性关系，归一化波束宽度为2的中断概率高于归一化波束宽度为4的中断概率，可通过优化波束宽度的取值来实现系统性能的优化。

4.3 本章小结

4.1小节分析了基于偏振调制的FSO系统接收端直接接收、零差相干接收与外差相干接收三种接收方式，并使用Optisystem软件实现了三种接收方式下基于偏振调制的FSO系统的搭建和仿真。由仿真结果可以看出：相同天气条件下，基于偏振调制的相干接收系统比直接接收系统通信效果更好；与外差相干接收系统相比，零差相干接收系统受相位误差的影响更大。综合考虑，工程应用中基于偏振调制的相干FSO系统宜采用外差相干探测方式。结合第三章联合信道下的FSO系统原理，4.2小节推出了相干FSO系统的信噪比、平均误码率和通信中断概率的表达式，并仿真分析了大气湍流强度、信噪比、归一化抖动系数、归一化束宽对相干FSO系统性能的影响。由图4.8表明在弱湍流和大信噪比条件下，相干FSO系统性能更好；由图4.9和4.12表明抖动越小相干FSO系统性能越好；由图4.10(a)和4.13(a)表明在抖动比较小时，激光束越细误码率和中断概率越小；但由图4.10(b)和4.13(b)可以看出随着抖动的增加，束宽与系统性能呈现非单调性变化，为存在抖动的相干FSO系统选取合适和归一化束宽提供了参考价值。

第五章 总结与展望

5.1 本文的主要工作

本文的研究工作主要围绕自由空间光通信系统中的大气信道、信号调制格式、接收方式展开。大气信道部分主要研究了近地层大气吸收衰减、大气湍流光强闪烁效应以及不均匀尺度的湍流引起的相位漂移效应对地-地自由空间光通信系统的影响。在信号调制格式方面，除了常用的强度调制和相位调制之外，还分析了正交频分复用调制、偏振态调制的FSO系统原理。在接收方式方面，分析了基于偏振调制的FSO系统的直接接收、零差接收与外差接收方式对系统性能的影响，为偏振调制自由空间光通信系统的接收方式提供了理论依据。本文的主要工作有：

(1)介绍了大气信道中大气分子的吸收效应以及大气湍流的光强闪烁效应和相位随机漂移效应，并分析了这些效应对调制信号的影响。不同天气条件对激光光束能量的衰减程度不同，本文在调研了国内外研究后综合分析出了雪雾天气下可视距离与衰减系数的关系；并介绍了常用的三种大气湍流模型，在适用范围广的Gamma-Gamma湍流光强闪烁模型的基础上，联合不均匀湍流引起的相位漂移、接收端与发射端的瞄准误差损耗、以及大气吸收衰减损耗推出了联合信道数学模型。

(2)首先介绍了FSO系统接收端中最常用的信号调制技术—强度调制技术以及相位调制技术，与强度调制方式相比，相同大气信道下相位调制技术大大提高了FSO系统的误码率性能。但仿真分析表明大气中不均匀湍流引起的相位漂移对相位调制信号的影响不可忽略，随着湍流强度的增加相位漂移不可忽略，导致基于相位调制的FSO系统误码率增大。为从调制方式的角度抑制大气的影响以提高FSO系统性能，本文对比分析了PSK-OFDM调制与Polks调制的FSO系统。与OOK调制、BPSK调制对比，仿真结果得出，PSK-OFDM调制方式大大提高了FSO系统的平均通信容量性能，且与单载波相位调制方式相比，抑制了大气湍流的影响，提高了系统的误码率性能。与激光光源的振幅和相位信息相比，激光的偏振态受大气湍流的影响较小。通过对比几种调制方式联合大气信道下考虑与忽略相位漂移时的误码率性能仿真结果图3.6(a)(b)，仿真结果表明：与强度调制方式相比，Polks调制FSO系统平均误码率远小于强度调制的FSO系统误码率；与BPSK调制以及PSK-OFDM调制方式相比，Polks调制信号受相位漂移的影响可忽略不计。相同湍流强度下，同一信噪比时采用Polks调制方式的FSO系统平均误码

率性能提升。

(3)从接收端信号接收方式的角度,分析了接收方式对FSO系统性能的影响。由于相位调制需采用相干接收方式才可对信号进行解调。本文为给基于Polask调制的FSO系统接收方式提供借鉴意义,使用Optisystem软件设计并搭建了直接接收、零差相干接收、外差相干接收的Polask-FSO系统。通过分析仿真的眼图,相同天气条件下,基于偏振调制的相干接收系统比直接接收系统眼图更大更清晰、通信性能更好;通过分析相干接收系统噪声引入的相位误差对相干接收系统的影响,仿真结果表明与外差相干接收系统相比,零差相干接收随相位误差的增加误码率增加更快,受相位误差的影响更大。

(4)对相干FSO系统的信噪比,平均误码率以及中断概率进行了分析。使用Matlab仿真分析了大气湍流强度、信噪比、归一化抖动系数、归一化束宽对相干FSO系统性能的影响,仿真结果表明在弱湍流和大信噪比条件下,系统性能更好。抖动越小系统性能越好,在抖动比较小时,激光束越细误码率和中断概率越小。但随着抖动的增加,束宽与系统性能呈现非单调性变化,为选取合适的归一化束宽提供了参考。

通过仿真结果分析,本文为FSO系统的调制与接收技术的选择提供了参考,对未来 FSO通信系统的建立具有借鉴意义。

5.2 展望

本文在大气吸收损耗、大气湍流光强闪烁效应和相位漂移效应、以及激光信号在发射机和接收机瞄准误差损耗等大气信道特性和信号调制方式以及接收端接收方式对FSO通信系统性能的影响方面做了相应的研究,实现了大气联合信道的系统级仿真,研究了大气联合信道中对光信号相位和强度的作用机理。但由于理论和实验的局限性,许多工作还存在一定的不足,需要在以后的研究中进一步深入探索,其主要内容包括以下几点:

- 1、利用自适应技术对相位起伏进行校正。
- 2、由于大气的复杂性以及实验条件的限制,对大气信道的研究一般为仿真实验。下一步工作可以进行室外大气信道中进行自由光通信系统实验,进一步研究长距离传输中大气因素对FSO系统性能的影响。

参考文献

- [1]潘文,胡渝.美国空间激光通信研究发展概况及现状[J].电子科技大学学报, 1998, 27(5): 541 -545.
- [2]Bingham J A C. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come. IEEE Communications Magazine, 1990, 28(5): 5-14
- [3]丁德强,柯熙政.大气激光通信 PPM 调制解调系统的设计与仿真研究[J].光通信技术,2005(1):50-52.
- [4]王瑞,柯熙政.大气激光通信准直光学系统的设计[J].西安理工大学学报,2004,20(4):408-412.
- [5]KAO K, HOCKHAM G A. Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1996,113(7):1151-1158.
- [6]张旭,薄夫森,刘玉申.自由空间光通信技术及其发展[J].电子技术,2008,9:028.
- [7]邓天平.自由空间光通信系统关键技术研究[D].华中科技大学.2007.
- [8] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, Laser Beam Scintillation With Applications. Bellingham, WA, USA:SPIE Opt. Eng., Press, 2001.
- [9]H. Kaushal, G. Kaddoum. Free Space Optical Communication: Challenges and Mitigation Techniques[J], Mathematics,2015.
- [10]安建梅.大气信道对无线激光通信的影响[D].太原理工大学.2007.
- [11] Mostafa A, Hranilovic S. In-field demonstration of OFDM-Over-FSO[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2012,24(8):709-711.
- [12]安娜,何振泉.自由空间光 MIMO 通信系统的信道容量分析[J].信息通信,2016(9).
- [13]A.A.Farid, Steve Hranilovic. Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors[J]. Light Wave Technology, 2007,25(7):1702-1710.
- [14]韩立强,游雅晖,聂向荣.大气湍流及瞄准误差联合效应下全光中继自由光通信的性能[J].光电子.激光, 2016,27(5):506-512.
- [15]Zedini E,Alouini M S. Multihop relaying over IM/DD FSO systems with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015,33(2):208-216.
- [16]Kamran Kiasaleh. Performance of Coherent DPSK Free-Space Optical Communication Systems in K-Distributed Turbulence[J]. IEEE Transactions On Communications, 2006, 54(4): 604-607.
- [17]H. Samimi, M. Uysal. Performance of coherent differential phase-shift keying free-space optical communication systems in M-distributed turbulence[J].IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw. 2013,5(7):704-710.
- [18]张慧颖. Gamma-Gamma 信道下 OOK 与 DPSK 调制误码率性能分析[J].光通信研究, 2015, 4:61-64.
- [19] R.W.Change. Synthesis of bang-limited orthogonal signal for multichannel data transimission. Bell Sys.Tech.J,1966,11:1775-1796
- [20]Tomoaki Ohtsuki. Multiple-subcarrier Modulation in Optical Wireless Communications. IEEE Communications Magazine,2003,41(3):74-79
- [21]Shieh W,Athaudag C. Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Electron Lett,2006,42:587-589
- [22] Y.Tang,X.Yi,W.Shieh,R.Evans. Optimum Design for Coherent Optical OFDM Transmitter. Optical Society of Amercia, 2006:6-8
- [23]Y.Tang,X.Yi,W.Shieh,R.Evans. Optimum Design for RF-to-optical Up-converter in Coherent Optical OFDM System. IEEE Photon Technol Lett 2007,(19):483-485.
- [24]IvanB.Ojordjevie,Bane.Vasie. Orthogonal Frequency ivision multiplexing for high speed optical transmission[J] Optics Express,2006,41(13):3767-3775

- [25] Neda Cvijet ic, Dayou Qian, Ting Wang. 10Gb/s Free-Space Optical Transmission using OFDM. Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optical Engineers Conference, San Diego, CA, United States, Feb. 2008
- [26] M Selvi, K Murugesan. The performance of orthogonal frequency division multiplexing in the weak turbulence regime of free space optics communication systems[J], IEEE Optics Journal, 2012.
- [27] Nistazakis, N. Stassinakis, G. Sandalidis, S. Tombras, QAM and PSK OFDM RoFSO Over M-Turbulence Induced Fading Channels[J], IEEE Optics Journal, 2015, 7(1).
- [28] Xinhui Zhao, Yong Yao, Yunxu Sun, and Chao Liu. Circle Polarization Shift Keying With Direct Detection for Free-Space Optical Communication[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(4): 307-312.
- [29] 赵新辉. 无线光通信中旋光调制技术及偏振传输理论的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [30] 杨鹏, 艾华. 圆偏振调制激光通信系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0916002-1-0916002-7..
- [31] Z. Ghassemlooy, X. Tang, S. Rajbhandari, Experimental investigation of polarization modulated free space optical communication with direct detection in a turbulence channel, IET Commun. 6 (11) (2012) 1489–1494.
- [32] 林日钊, 傅忠谦, 李永亮, 张虎, 王剑亭. 圆偏振移位键控的星地激光通信误码率研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 188-194.
- [33] 刘丹, 刘智, 方韩韩. 大气激光通信中的偏振调制性能[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26 (03): 307-311.
- [34] 刘丹, 刘艳, 刘智, 王璞瑶, 周昕. 基于圆偏振移位键控的大气激光通信性能分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3111-3115.
- [35] Yuwei Su, Takuro Sato. Analysis of CPol SK-based FSO system working in space-to-ground channel[J]. Optics Communications, 2018, 410: 660–667.
- [36] Yi Wang, Fan Du, Jing Ma, Liying Tan. Employing circle polarization shift keying in free space optical communication with gamma–gamma atmospheric turbulence channel[J]. Optics Communications, 2014, 333.
- [37] 王怡, 李源, 马晶, 谭立英. 自由空间光通信中相干圆偏振调制系统性能研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(08): 80-85.
- [38] M. Al Naboulsi and H. Sizun, Fog attenuation prediction for optical and infrared waves, Optical Engineering, 2004, 23, 319-329.
- [39] F. Nadeem, V. Kvicera, M. S. Awan, Weather effects on hybrid FSO/RF communication link, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27, 1687-1697.
- [40] I. I. Kim and E. Korevaar, Availability of free space optics and hybrid FSO/RF systems, Proceedings of SPIE: Optical Wireless Communications IV, 2001, 4530, 84-95.
- [41] 陈牧, 柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(08): 115-121.
- [42] I. Kim, B. McArthur, E. Korevaar. Comparison of laser beam propagation at 785 and 1550nm in fog and haze for optical wireless communication[C]. SPIE, 2001, 4214: 26-37.
- [43] Andrews LC, Phillips RL. Laser beam propagation through random media[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [44] L. Andrews, R. L. Philips, C. Y. Hopen, Laser Beam Scintillation with Applications. Bellingham, WA: SPIE, 2005.
- [45] 韩立强, 游雅晖, 聂向荣. 大气湍流及瞄准误差联合效应下全光中继自由光通信的性能[J]. 光电子. 激光, 2016, 27(5): 506-512.
- [46] Harilaos G. Sandalidis, Theodoros A. Tsiftsis. Optical Wireless Communications With Heterodyne Detection Over Turbulence Channels With Pointing Errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4440-4445.
- [47] G Xie, F Wang, A Dang, and H Guo. A Novel Polarization-Multiplexing System for Free-Space Optical Links. IEEE Photon. Technol. Lett.. 2011, 23(20): 1484-1486.
- [48] Theodoros A. Tsiftsis, Harilaos G. Sandalidis, George K. Karagiannidis, et al. Optical Wireless Links with

- Spatial Diversity over Strong Atmospheric Turbulence Channels[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2009, 8(2): 951-957.
- [49] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik. Table of Integrals, Series and Products[M]. New York: Academic, 7th ed., 2008.
- [50] Efun. Abcissas and Weights of Gauss-Hermite Integration[OL]. <http://www.efunda.com/home.cfm>
- [51] The Wolfram function site[OL]. <http://functions.wolfram.com/07.34.21.0011.01>, ,
<http://functions.wolfram.com/07.34.21.0084> .
- [52] Antonio G Z, Carmen C V, Beatriz C V. On the capacity of FSO links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels using OOK signaling[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010, 2010.
- [53] 张慧颖. 基于 PSK 调制的相干光通信性能研究[J]. 激光杂志, 2016, 37(10): 111-115.
- [55] Nistazakis H E, Stassinakis A N, Muhammad S S, et al . BER estimation for multi hop RoFSO QAM or PSK OFDM communication systems over Gamma-Gamma or exponentially modeled turbulence channels[J]. Optics & Laser Technology, 2014, (64): 106 -112.
- [56] Abdelmoula Bekkali, Chedlia Ben Naila, Kamugisha Kazaura, et al . Transmission analysis of OFDM-based wireless services over turbulent Radio-on-FSO links modeled by Gamma-Gamma distribution[J]. IEEE photonics journal, 2010, 2(3): 510-520.
- [57] Ninositol M P, Nistazakis H E, Stassinakis A N, et al. Estimation of BER for a PSK OFDM RoFSO link with relays over exponentially modeled turbulence channels with pointing errors[C]. 3rd Pan-Hellenic Conference on Electronics and Telecommunication, 2015.
- [58] Xinhui Zhao, Yong Yao, Yunxu Sun, and Chao Liu. Circle Polarization Shift Keying With Direct Detection for Free-Space Optical Communication[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2009, 1(4) 307-312.
- [59] 赵新辉. 无线光通信中旋光调制技术及偏振传输理论的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [60] Z. Ghassemlooy, X. Tang, S. Rajbhandari, Experimental investigation of polarization modulated free space optical communication with direct detection in a turbulence channel, IET Commun. 6 (11) (2012) 1489–1494.
- [61] 南航, 张鹏, 佟首峰, 陈纯毅. 大气湍流下带有跟踪误差的空间相干通信性能分析[J], 光子学报, 2015, 44(8): 31-35.

附录：攻读硕士学位期间发表的文章

[1]代瑞楠，基于偏振调制的相干FSO系统仿真，2018.07.03.；已发表于光通信技术核心期刊2018年第11期。

致谢

岁月不居，时节如流。我在南京邮电大学已经度过七年的大学生活，在研究生期间，从研一专业知识的培养，到研二研三课题工作的开展与研究，研究生三年时间转瞬飞逝，我也成长了许多，感谢母校和学院对我的培养。在此课题即将完成之际，我还要感谢老师们、师姐师兄们、同学们对我的指导、支持以及鼓励。

本文的研究工作是在徐宁教授的悉心指导下完成的，徐老师不仅在学业工作上不断给我指明方向，从论文的选题、课题工作的学习、大论文的修改、撰写到大论文完成，徐老师指引我度过了一个个的难关。同时在日常交流中，徐老师面对困难的平常心、宽厚待人的胸怀以及对人对事认真负责的人生态度使我受益终身。徐老师在学习生活中对我极大的帮助和关怀，我将永远感恩在心。

同时我要向张莉老师表示衷心的感谢，感谢张莉老师在课题工作中对我进行孜孜不倦的教导，从文献阅读、每一次的文献讨论会到课题工作遇到难关时都予以我最细致最认真的指导。张莉老师对科研严肃认真、执着的钻研精神，对人宽容大度的精神让我受益终生。

还要衷心感谢我的家人和朋友，是他们在背后默默的支持着我，给予我鼓励、安慰和陪伴，我人生经历的每一步成长都离不开他们的牵挂和关爱。你们是我生活中最明亮的阳光，感谢你们对我的支持和无私的付出。

短短三年如白驹过隙，忽然而已。时间文字有限而感激之情无限，再次向所有给予我鼓励和关心的老师和同学表达感谢。同时在此对评阅本论文的各位老师致以诚挚的谢意。