

引用本文:高晓梅,邢甜,高婉倩,等.无线光相干通信及其实验研究[J].光通信技术,2022,46(4):37-45.

无线光相干通信及其实验研究

高晓梅¹,邢甜²,高婉倩²,董可²,柯熙政^{2*}

(1.西安航空职业技术学院 人工智能学院,西安 710089;2.西安理工大学 自动化与信息工程学院,西安 710048)

摘要:与直接探测相比,相干探测具有响应速度快、检测灵敏度高和滤波性能好等优点,是提高无线光通信系统接收灵敏度的关键技术。总结了国内外在无线光通信系统相干探测领域的研究进展,同时介绍了西安理工大学在相干探测技术方面的研究工作,主要包括与无线光相干通信有关的大气湍流抑制、到达角起伏、振幅起伏、信道噪声、光信号偏振、本振光功率和光源线宽等因素对相干探测系统性能的影响以及副载波调制非光域外差探测系统在理想信道和非理想信道的性能分析。最后,对无线光相干通信系统的发展方向进行了展望。

关键词:无线光通信;相干探测;大气湍流;检测灵敏度;相干增益

中图分类号:TN929.1 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)04-0037-09

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Wireless optical coherent communication and its experimental research

GAO Xiaomei¹, XING Tian², GAO Wanqian², DONG Ke², KE Xizheng^{2*}

(1. School of Artificial Intelligence, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Coherent detection has the advantages of fast response, high detection sensitivity, and good filtering performance, compared with direct detection. It is a key to improve the receiving sensitivity of optical wireless communication system. This paper summarizes the research progress in the field of coherent detection of optical wireless communication system, and introduces the research work of Xi'an University of Technology in the field of coherent detection technology, including the influences on the performance of wireless optical communication due to atmospheric turbulence suppression, angle of arrival fluctuations, amplitude fluctuations, channel noise, optical signal polarization, local oscillator optical power and light source linewidth, and the performance analysis of subcarrier modulated non-optical heterodyne detection system in ideal and non-ideal channels. Finally, the development direction of wireless optical coherent communication technology is prospected.

Key words: wireless optical communication, coherent detection, atmospheric turbulence, detection sensitivity, coherent gain

0 引言

无线光通信是以激光作为信息载体,在大气信道

进行信息传输的通信方式,具有频带宽、通信保密性好、可靠性和有效性高等优点^[1]。无线光相干通信的探测方式包括零差探测与外差探测(当本振光频率与信号光频率相等时,称之为零差探测;当本振光频率与信号光频率不相等时,称之为外差探测)。与强度调制直接探测(IMDD)相比,相干探测具有 20~23 dB 的增益,有效弥补了 IMDD 的不足,近些年成为了众学者的研究焦点^[2]。为了提高通信系统的性能,研究和开发无线光通信系统中的相干探测技术、提高相干接收增益成为无线光通信领域的重要课题之一。本文介绍国内外在无线光相干通信领域的研究进展和西安理工大学在相干探测技术方面的工作。

收稿日期:2022-04-24。

基金项目:西安市科技创新引导项目(NO.201805030YD8CG14(12))资助;陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)资助;陕西省教育厅科研计划项目(NO.18JK0341)资助。

作者简介:高晓梅(1977—),女,硕士,副教授,1999 年获得西安工程大学学士学位,2006 年获得西安理工大学硕士学位。2006—2011 年,曾荣获学院“教学质量优秀奖”7 次;2007 年,曾荣获学院“十佳青年教师”称号。

*通信作者:柯熙政(1962—),男,博士,二级教授,陕西省教学名师,中国电子学会会士,出版专著 10 部,主要研究方向为无线激光通信理论与技术、先进导航理论与技术。



1 国外研究进展

无线光相干通信作为光纤通信的补充或者延拓,突破了传统通信方式的技术瓶颈。虽然光纤通信领域发展成熟,但是为了进一步推动相干通信的实际应用,提高相干探测灵敏度、传输容量,研究人员针对环境因素、偏振技术和其它相干探测方式展开了探索。

早在 20 世纪 70 年代,FINK D^[9]给出了相干接收机信噪比的一般方程,并指出相干探测是在光谱范围内获得量子探测极限的有效方法。

1975 年,COHEN S C^[10]分析了波前失配角和光场分布对外差探测的影响,发现信号光振幅均匀分布的外差探测系统比艾里斑分布信号光的外差探测系统更容易产生严重的波前失配,提出了相干接收机信噪比的一般方程。

1978 年,TAKENAKA T 等人^[9]针对相干探测的外差效率进行了研究,在系统设计中外差效率取值大于 0.8 时,才能保证通信质量不受影响;同时,研究了高斯场光外差检测的信噪比问题。

1984 年,TANAKA K 等人^[9]研究了在本振光功率受限的情况下背景噪声对外差探测系统信噪比的影响,当信号功率与本振光功率的比值、背景噪声功率与本振光功率的比值均取较小值时,系统的信噪比越接近量子噪声极限。

1987 年,TANAKA K 和 OHTA N^[7]分析了信号光为高斯分布的波前倾斜角和光轴偏移量对外差效率的影响,当信号光波前倾斜角小于 10^{-4} ,且光轴偏移量小于入射孔径的五分之一时,外差效率可以达到 60% 以上。

1992 年,IFTEKHARUDDIN K M 等人^[8]分析了外差探测中使用无衍射光束的优点,利用无衍射光束进行外差探测,当贝塞尔光束的入射倾斜角为 1.4° 时,获得最大外差效率约为 50%。

1994 年,KALMAN R F 等人^[9]研究了采用振幅调制、相位调制和频率调制的无线光相干通信链路性能,与直接检测链路相比,无线光相干通信链路可以提供更高的抗干扰能力。

1997 年,CHAMBERS D M^[10]分析了波前像差对相干通信系统外差效率的影响,当波前像差均方根值为 0.1 时,相较于无波前像差理想光束,其外差效率降低了约 31%。同年,DAS K K 等人^[11]针对信号相位和本振相位存在不匹配情况,设计了一种六边形阵列相干探测器,该探测器可以有效提高外差效率和探测信噪比。

2000 年,BELMONTE A 和 RYE B J^[12]采用数值仿真技术,分析了大气湍流对相干外差光功率性能的影响,当传输距离增大时,大气湍流带来的主要影响是光束扩散,从而导致相干接收功率严重下降。

2003 年,BELMONTE A^[13]分析了大气湍流引起的外差探测接收机中信号退化问题,当较短波长激光束在中强湍流条件下传输时,采用较小接收孔径与较大接收孔径在降低相干衍射损耗程度方面基本相同。

2004 年,TAYLOR M G^[14]提出了一种采用数字信号处理技术的相干探测方法,并通过实验首次完成了传输速率为 10 Gb/s 的差分移相键控(DPSK)调制数字相干光探测演示,该方法可实现与零差探测相同的高灵敏度探测。

2006 年,LANGE R 等人^[15]实验完成了 142 km 零差探测的二进制相移键控(BPSK)调制通信链路测试,该零差探测链路不受背景噪声干扰,并且传输速率可达到 5.625 Gb/s。

2006 年,TOYOSHIMA M^[16]研究了存在随机角抖动时聚焦光束与光纤模场大小之间的最佳关系,当归一化随机角抖动与模场半径的比值大于 0.3 时,系统平均误码率显著降低。

2008 年,BELMONTE A 等人^[17]研究了大气湍流引起的光强闪烁和相位畸变对无线光通信链路性能的影响,研究表明高阶相位补偿可以有效提高接收端灵敏度。同年,TSIFTSIS T A^[18]推导了在大气湍流条件下外差探测系统的中断概率和平均误码率解析式。研究结果表明,在实际情况下外差探测系统误码率高于 10^{-9} 。

2009 年,SANDALIDIS H G 等人^[19]推导了大气湍流条件下的误码率表达式,并进一步研究了不同湍流强度下采用差分移相键控的无线光相干通信系统误码性能,通过数值仿真证明了随着湍流强度的增大系统误码率逐渐增加。

2010 年,DJERROUD K 等人^[20]演示了 5 km 大气湍流无线光相干通信链路实验,发现通信链路的相位噪声主要由大气湍流和机械抖动导致。同年,SALEM M 等人^[21]推导了利用部分相干高斯-谢尔模型光束进行混频后外差效率的解析表达式,并讨论了波前失配角和探测器半径对其外差效率的影响,发现部分相干光束比相干光束受波前失配角的影响更小。

2011 年,FICE M J 等人^[22]对采用光锁相的同步零差相干接收机进行了详细分析,并且完成了实验评估。评估结果表明本振光锁相的同步零差相干接收机可以有效完成相干光探测的载波恢复。

2012年,BAYAKI E等人^[23]建立了相干和差分空时编码的无线光通信系统模型,并将其与IMDD的无线光通信系统模型进行比较,发现基于相干和差分空时编码的无线光通信系统会获得更大的性能增益。

2016年,KIKUCHI K^[24]研究了数字信号处理技术在相干接收机中的应用,并对其相干探测的量子噪声特性进行了分析,发现相干探测和数字信号处理的结合为相干接收机载波恢复提供有效的补偿。

2022年,KAKARLA R等人^[25]研究了使用多进制脉冲位置调制(M-PPM)的接收机灵敏度,设计采用相敏光放大接收机的通信链路,发现在高信噪比时与64-PPM结合的正交相移键控(QPSK)具有最佳灵敏度。

上述文献表明:相干探测^[3]对探测方式^[9,14-15,23-25]、激光光源^[4,8,21]、信道等环境因素^[6,12-13,18-20]以及接收端探测器性能^[11,22]的要求都十分严苛。在相干探测中,合适的激光光源是实现探测的关键。其次,为了确保相干探测灵敏度最佳,需要对激光束在接收端进行偏振匹配^[11]和波前匹配^[10,17]。大气湍流引起的实际光束扩展和漂移^[16]也会影响相干探测效率,从而限制无线光相干通信技术的应用。

2 国内研究进展

20世纪80年代开始,随着无线光相干通信领域研究的热潮兴起,国内学者们在相干探测技术方面展开了深入研究。光场分布、大气湍流、偏振控制以及相位匹配对相干探测都具有显著影响,学者们对于该方向也进行了深入的理论研究。国内的长春理工大学、哈尔滨工业大学、电子科技大学、中国电子科技集团公司第三十四研究所、中国航天科技集团公司五院西安分院、武汉大学和西安理工大学等作为无线光通信技术的主要研究机构,在该领域取得了长足进展。

1985年,孙毅义^[26]提出了10.6 μm 激光外差接收方案,并完成了不同湍流强度下外差探测效率检测实验,当接收系统孔径 D 与大气相干长度 r_0 相等时,湍流扰动造成的信号功率起伏最小,外差效率最大。

1988年,钱信中^[27]分析了本振增益、灵敏度与本振功率间的解析关系,并讨论了本振功率的若干限制因素,发现本振功率越大,灵敏度改善越多,信噪比就越接近量子探测极限,相干光外差检测比IMDD方式的接收灵敏度提高10~30 dB。同年,张超英和林宗琦^[28]进行了外差探测实验,首次发现了将光电二极管用于外差接收时最佳本振功率与其所加的偏压大小有关,

即在运行偏压范围内使用较高的偏压可以有效提高本振功率,避免了相干探测效率饱和现象的发生。

1992年,ZHANG X P等人^[29]对基于 M 进制连续相移键控(CPSK)相干接收机采用限幅-鉴频器(L-D)进行了详细分析,当归一化中频信号拍频线宽不小于2%时,最佳调制指数为1。

1996年,闵双全等人^[30]针对相干通信中偏振稳定要求,设计了一种使用4个光纤挤压器组成的偏振控制器,其输出光功率波动范围不超过1%,满足实际通信要求。

1999年,何毅^[31]根据目标的散射回波特性和相位匹配原则设计了相干激光雷达探测系统。该系统在本振光路中增设了可调扩束器后,成功接收到了7.8 km外的目标回波信号。

2003年,王琪等人^[32]建立了高斯与艾里斑分布激光的外差探测系统,并分析了波前失配角对外差效率的影响。仿真结果表明,艾里斑与高斯光束的外差效率最大可达到0.82。同年,肖石林等人^[33]分析了相干探测技术在光纤通信系统中的实际应用,当采用1550 nm的激光束进行传输时,相干探测技术可使接收端灵敏度提高20~23 dB,传输距离达到100 km以上。

2005年,李伟文等人^[34-35]分别设计了基于模拟退火(SA)算法和遗传算法(GA)的偏振控制器,用于稳定控制接收端的偏振态。其中,以SA算法进行反馈控制的偏振控制器,输出光功率波动范围不超过1%;经GA反馈控制后,输出光功率波动小于2%。

2007年,李成等人^[36]研究了到达角起伏对外差探测系统干涉效率影响,并实验检测了系统的干涉效率与信噪比。实验表明在大气湍流影响下,光束到达角起伏明显,信噪比严重下降(信噪比下降20 dB)。同年,徐静等人^[37]研究了大气湍流引起的空间相干性退化问题,并完成了不同湍流强度下外差探测效率与信噪比的检测,发现随着大气湍流强度增大,光斑发生明显漂移并出现了不同程度扩展,外差探测效率和信噪比呈下降趋势。

2008年,张文睿等人^[38]进行了外差探测实验,并对外差探测实验中目标的回波信号进行了测量,当本振光功率保持不变,信号光功率减小到与本振光功率相差6个数量级时,仍可以探测到外差信号。

2010年,么周石等人^[39]研究了动态跟瞄误差对混频效率的影响,并进行了数值仿真分析。仿真分析表明无线光相干通信系统接收端孔径设计必须与对准误差相匹配,链路才会获得最佳误码性能。同年,高龙

高晓梅,邢甜,高婉倩,等;无线光相干通信及其实验研究

等人^[40]推导出了平衡式探测过程的数学模型和信噪比表达式,并对该模型进行了模拟仿真,当接收端光纤分束器的分束比范围在 $[0.293, 0.707]$ 时,采用平衡式探测的信噪比要高于采用普通外差探测的信噪比。

2011年,刘宏展等人^[41]针对相干通信接收系统推导了信号光与本振光不同分布下的外差探测效率解析式。研究表明,采用振幅为均匀分布的两光束完成外差探测的效率约为72%,采用高斯分布与均匀分布的两束光完成外差探测时的效率为82%,证明了振幅为均匀分布的光束代替高斯光束的合理性。同年,肖西等人^[42]设计了一种采用异步解调的外差接收机,并通过实验将其与采用IMDD的系统进行对比,证明了该设计方案的可行性。

2013年,张桐和佟首峰^[43]分析了准直失配对无线光相干通信系统混频效率的影响。研究表明,准直失配可以导致混频效率的严重下降,需尽量减小信号光与本振光之间的失配角。同年,武云云等人^[44]研究了不同大气湍流条件下,波前畸变对零差探测的BPSK调制相干通信链路信噪比的影响。实验结果表明,大气湍流引起的相位畸变破坏了接收端光束的相位匹配,导致混频效率急剧下降,降低了系统信噪比。

2014年,李成强等人^[45]研究了大气湍流条件下光源参数对光束传输偏振特性的影响,当传输距离较短时,光束偏振主要受光源参数的影响;当传输距离较长时,光束偏振受大气湍流影响明显。同年,刘宏阳等人^[46]设计了一种运用光电二极管和跨阻放大器的平衡探测器并对其进行了实验测试。实验结果表明,在相干通信链路中,该平衡探测器使系统信噪比提高了约10 dB。

2015年,李向阳等人^[47]研究了高斯光分布的外差探测效率,并进行了数值仿真,发现探测器表面半径大于本振光束腰半径2倍,且尽量保证本振光与信号光束腰半径相等时,外差探测效率达到最佳。同年,代永红等人^[48]对信道噪声的形成机理进行分析,设计了对大气信道噪声有抑制作用的2.5 Gb/s和5 Gb/s平衡探测探测器,前者相干零差探测灵敏度可达-41.2 dBm,后者灵敏度为-34.3 dBm。

2016年,王盟盟等人^[49]研究了双光学频率梳外差原理测距理论,并数值仿真了频率梳重复频率差与测距性能的变化关系,当采样信号定时抖动时,重复频率差越小,累计噪声越大,测距精度变差。

2017年,常帅等人^[50]分析了采用Costas锁相环的零差相干接收机工作机理,并对其建立了数学模型,当传输速率为5 Gb/s时,接收灵敏度可达-41.4 dBm。

同年,马婷婷等人^[51]研究了相干探测中信号光偏振态与混频效率的关系,并进行了数值仿真,当接收信号光为圆偏振态时,可获得最大混频效率。南航等人^[52]研究了光学元件引起的光斑尺寸偏差与光轴偏移对接收端混频效率的影响。研究发现空间光混频器中光斑尺寸偏差通常小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时,对混频效率的影响较小;而由于空间光混频器中光学元件引起的光轴偏移范围通常大于 $100\text{ }\mu\text{rad}$ 时,对混频效率的影响比光斑尺寸偏差的影响更大。

2018年,雷芳等人^[53]建立了基于相干探测原理的无线光通信系统模型,并且通过数值仿真证明了采用相干探测技术的无线光通信系统接收端灵敏度可达-49 dBm,具有较高的实际应用价值。

2019年,冯力天等人^[54]研究了不同线宽的光源对相干探测性能的影响,并进行了3种线宽的激光光源外场实验,当进行中、远距离探测时,选取几十赫兹线宽光源的探测效果良好。

2021年,孙晶等人^[55]建立了星地激光链路信道随机衰减模型,并分析了该模型的外差探测误码率性能。研究表明,链路天顶角应尽量小于 20° ,可保证链路较好通信。

国内研究进展分别从光场分布^[32,41,47,50]、大气湍流^[26,36-37,44,54-55]、偏振控制^[30,34-35,45]、相位匹配^[31,43]和接收端探测器性能^[27-29,40,42,46,48,51,53]方面对相干探测进行了描述分析。自开展相干探测技术研究以来,相较于直接探测,相干探测的灵敏度和信号传输容量都有了显著提高。

3 无线光相干通信系统实验

无线光相干通信系统在接收端采用相干探测方式获得最佳混频效率和系统信噪比,对提高相干通信系统的探测灵敏度、实现微弱信号检测有很大的帮助。近年来,西安理工大学柯熙政教授课题组已成功研制出空间相干光通信系统终端,完成了传输距离为1.3 km的外差探测系统实验。本文重点介绍副载波调制(SCM)非光域外差探测(NOHD)系统性能以及大气湍流、信道噪声、光信号偏振算法和光源等对相干探测系统性能的影响分析。

3.1 SCM的NOHD系统性能分析

光信号的探测方式分为直接探测、外差光探测、自零差探测和NOHD,对比情况^[56]如表1所示。

直接探测技术原理简单,由光电探测器直接将接收端检测到的光信号转变为电信号,其适用于对设备

表 1 不同探测方式比较

探测方式	外差增益	适用的通信体制	激光器波长调谐性要求	偏振匹配	温控要求	对系统设备的要求
直接探测	无增益	开关键控(OOK)、SCM	不要求	不要求	较宽松	较宽松
外差光探测	通过加入本振光产生增益	调制振幅键控(ASK)、相移键控(PSK)、频移键控(FSK)等	要求有较宽的调谐范围且需要鉴频器	要求严格的偏振匹配	很严苛	很严苛
自零差探测	通过加入前置光纤放大器产生增益	DPSK	不要求	不要求	较宽松	很严苛
NOHD	通过加入本振光产生增益	SCM	不要求	不要求	较宽松	较宽松

要求不高、传输距离较近的通信系统,并且接收灵敏度低^[57]。外差探测技术对光学器件精度要求高,可以满足传输距离较远的通信系统。自零差探测技术在接收灵敏度和传输距离上均具有明显优势,但其要求信号光与本振光严格匹配,适用于对激光线宽有严格限制的通信系统。NOHD 克服了相位匹配问题,弥补了直接探测和外差光探测技术上的缺点,对通信系统的设备要求宽松。针对 SCM 的 NOHD 方式,本文分析其在理想信道和非理想信道情况下对接收端灵敏度的影响。

3.1.1 理想信道下 NOHD

理想信道下,采用 SCM-ASK、SCM-QPSK 和 SCM-16PSK 等调制方式的 NOHD 方法接收时,得到了中频信号功率变化曲线如文献[56]中的图 2-22 所示。这几种调制方式均对发送信号进行了线性放大,有效提高了检测灵敏度。从解调后的信号眼图(仿真图参考文献[56]中图 2-23 所示)可知,采用 SCM-ASK、SCM-QPSK 调制方式时的信号眼图轮廓斜边斜率较大,对定时误差灵敏;采用 SCM-16PSK 调制时,信号眼图轮廓清晰。这表明采用 NOHD 方法适合进行各种 SCM 方式的光信号接收。

3.1.2 非理想信道下 NOHD

非理想信道下,接收机信噪比随相对强度噪声的变化曲线如文献[56]中的图 3-7 所示,当相对强度噪声大于 -160 dB/Hz 时,探测信噪比呈下降趋势,且本振光功率为 10 dBm 的探测信噪比曲线受相对强度噪声影响最为严重;不同相对强度噪声影响下,当本振光功率大于特定值后,受到相对强度噪声的影响,接收

机信噪比呈下降趋势;相对强度噪声越大,接收机信噪比越小。仅考虑接收机热噪声时,随着本振光功率的增大,接收机信噪比急剧增大;当本振光功率大于 25 dBm 时,接收机信噪比趋于平稳。随着信号光功率的增加接收机信噪比呈整体上升趋势,并且随着接收机带宽的增大,信噪比逐渐降低。当采用对数正态分布信道模型时,弱湍流情况下接收光功率为 -30 dBm,接收信噪比为 9 dB,此时误码率为 10^{-5} ,基本能达到无线光通信要求;随着光强起伏方差的增大,系统的平均误码率逐渐增大,并且逐渐趋于平稳。对于 SCM-QPSK/NOHD 方式,在 Gamma-Gamma 信道中随着湍流强度的增大,系统的误码率增大,即由大气信道引入的相位噪声会恶化系统的信噪比。

3.1.3 NOHD 系统实验

文献[58]做了 NOHD 系统实验,发现 NOHD 方式具有接近 20 dB 的外差增益。对比 SCM 正交频分复用信号的 NOHD 接收差频信号与直接检测信号及其功率谱可知,NOHD 差频信号时域波形受噪声影响比较小,NOHD 方式外差增益比直接探测高约 17.2 dB^[56]。

3.2 大气湍流影响下的相干探测系统分析

大气湍流效应对光波的影响(光束漂移、光束闪烁和到达角起伏)可以概括为相位和振幅的扰动,表现为到达角起伏和振幅起伏对相干探测系统的影响,使接收端受湍流扰动的信号光与本振光进行相干的混频效率降低,影响外差探测效率^[59-60]。

3.2.1 到达角起伏对相干探测系统的影响

到达角起伏是造成信号光相干性降低的主要因素。影响到达角起伏的参数有天顶角、湍流强度、大气湍流内外尺度和接收天线孔径半径与本振光束腰半径之比 Ω 。

①随着天顶角的增加,接收端接收的光信号功率逐渐降低;天顶角越大,受湍流影响越大,平均混频效率随传输距离下降越迅速,导致外差探测效率下降越明显^[61]。该研究结果与文献[55]给出的结论相同。其中,文献[55]还对单输入单输出(SISO)系统误码率随天顶角的变化进行了数值仿真,结果表明随着天顶角的增大系统误码率随之增大。

②大气折射率结构常数不同时,湍流强度的变化使到达角起伏引起的平均混频效率下降明显,外差探测效率也随之降低^[61]。

③不同大气湍流强度条件下,随着湍流内尺度的增大,平均混频效率逐渐增大;随着湍流外尺度的增大而逐渐呈下降趋势。这是因为到达角起伏方差与内

高晓梅,邢甜,高婉倩,等;无线光相干通信及其实验研究

尺度成反比例关系,与外尺度成正比例关系所致^[61]。

④在中强湍流条件下,接收孔径的增大导致平均混频效率随传输距离的增大而减小。在弱湍流条件下,不同 Ω 值曲线之间的间隙随着接收孔径的增大而增大。考虑抑制湍流效应和提高相干探测系统外差效率,实现远距离通信时应选择适当小口径的光学接收系统来满足通信系统的性能要求^[61]。

3.2.2 振幅起伏对相干探测系统的影响

振幅起伏对外差探测系统性能有影响,相位和振幅起伏共同存在的情况下对外差探测系统的影响更复杂。文献[62]的仿真结果表明,随着天顶角逐渐增大,外差探测系统的信噪比出现振动起伏的现象,但整体呈减小趋势。这是因为随着天顶角增大,信号光在相对较强湍流区域中的传输距离会增加。无论是振幅起伏,还是振幅和相位共同起伏,信噪比随着波长的增加而增大,对比3种波长(1064 nm、1310 nm、1550 nm)在振幅起伏时的信噪比表现(仿真图如文献[62]中的图3-25所示),外差探测系统应选择1550 nm波长作为通信频带^[62]。

3.2.3 1.3 km 外差探测系统实验

文献[62]建立了1.3 km的外差探测通信链路,系统原理框图如图1所示。发射端采用1550 nm波长光束作为信号光,信源信息通过相位调制器加载到信号光上,并经掺铒光纤放大器(EDFA)馈入发射光学系统发出,在大气信道(长为1.3 km)中传输时受湍流影响,导致接收光斑弥散,系统误码率上升,严重时将使通信链路中断^[63]。因此,在外差探测系统接收端,需要使用自适应光学(AO)技术对信号光波前加以校正^[64]。校正后的信号光与本振光混频,经偏振控制、激光器稳频、相干探测和数字相干解调实现基带信号的实时恢复后,完成1.3 km外差探测系统实验。实验结果表明:当偏振控制系统闭环后,偏振引起的幅值抖动明显下降,接收端信号质量得到了有效提升^[62];不同天气条件下,中频信号的中心频率在82 MHz左右变化,与激光器稳频模块的控制精度吻合^[62];AO系统闭环后,

可以有效提高中频信号质量,表现为校正后的中频信号功率谱的主次谐波更“尖锐”^[65]。

3.3 信道噪声影响下的相干探测系统分析

无线光相干通信在长距离通信中一般会受到背景光噪声、暗电流噪声和电子热噪声的影响^[66],从而影响接收端相干探测效率。相干探测系统信噪比和接收光功率关系曲线如文献[67]中的图5-1所示,相干探测比理想情况下的直接探测信噪比高4.1 dB,比热噪声和散粒噪声作用下直接探测信噪比高约23 dB。不同本振激光器和相对强度噪声(RIN)的星座图如文献[67]中的图5-8与图5-9所示,随着RIN增大时,接收信噪比减小,误码率增大,相干探测效率受到严重影响,在相同RIN影响下,随着本振光功率的增大,相干探测效率也呈下降趋势。当仅存在电子热噪声影响时,在信噪比逐渐降低的过程中,星座图弥散程度增大。

3.4 光信号偏振算法对相干探测系统影响分析

光信号的偏振算法直接影响偏振控制的响应时间,本文介绍SA算法、粒子群(PSO)算法和单粒子优化(SPO)算法的特点,并对这3种算法进行比较。

3.4.1 算法特点

不同信号光偏振态变化速率 V_{Pol} 对应的SA算法优化性能如文献[68]中的图3-6所示,随着 V_{Pol} 逐渐减小,收敛后中频信号幅值的波动越小。当 $V_{\text{Pol}}=0$ rad/s时,收敛后中频信号幅值的波动随着迭代次数逐渐增大而趋于平稳,相干探测系统表现出良好的性能。

不同信号光偏振态变化速率 V_{Pol} 对应的PSO算法优化性能如文献[68]中的图3-11所示,随着迭代次数的增加,收敛后中频信号幅值的波动趋于平稳,即使信号光的偏振态波动,PSO算法也有较好的优化性能。

SPO算法是结合SA算法、PSO算法和遗传算法设计的优化算法,面对信号光偏振态的快速变化,SPO算法表现出了较好的控制效果,可以快速稳定中频信号幅值的波动^[69]。

3.4.2 算法性能比较

由于SA算法需要大量的迭代运算才能达到最优,

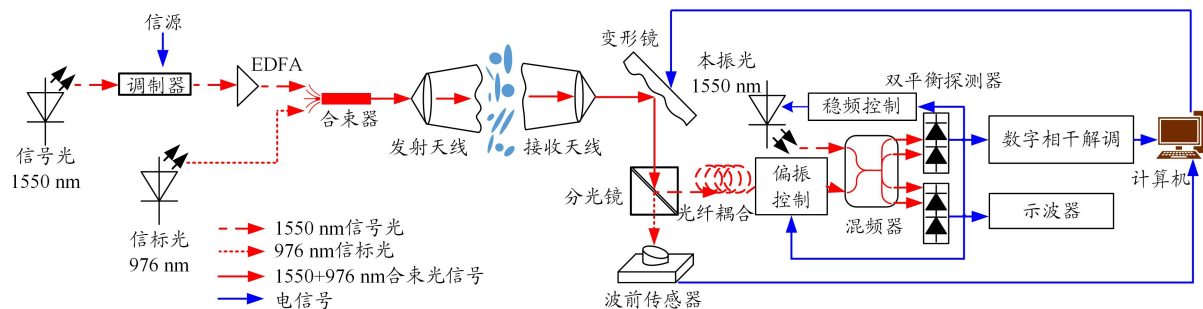


图1 外差探测系统原理框图

PSO 算法第二种复位的存在使其在控制的过程中需要耗费近一倍的时间^[69]。因此,从收敛时间看,SPO 算法的收敛速度远快于 SA 算法和 PSO 算法。从达到最大中频信号幅值所需的时间看,SA 算法需要的收敛时间最多,SPO 算法对比 SA 算法和 PSO 算法在收敛时间上表现出了明显优势^[68]。从参数确定和算法复杂度看,SPO 算法要比 SA 算法和 PSO 算法复杂。

为了进一步验证 SPO 算法的优势,文献[68]完成了相干探测系统中 SPO 算法的实验研究,SPO 算法控制的相干光通信实验链路如图 2 所示。接收天线接收到信号光后将其馈入手动偏振控制器 PLC-M02,模拟信号光的偏振态波动,通过偏振控制器 PCD-M02 将信号光与本振光接入光混频器,传输到平衡探测器后分为 I 路和 Q 路信号输出。其中,PCD-M02 利用 SPO 算法控制信号光偏振态,示波器接 I 路信号观察中频信号输出波形,Q 路信号由检波器 AD8307 进行提取,用于算法的反馈信号。当关闭 PCD-M02 时,中频信号的幅值成余弦变化;当开启 PCD-M02 时,即使用了 SPO 算法,中频信号的幅值基本成稳定状态,表明此时的相干增益达到最佳。

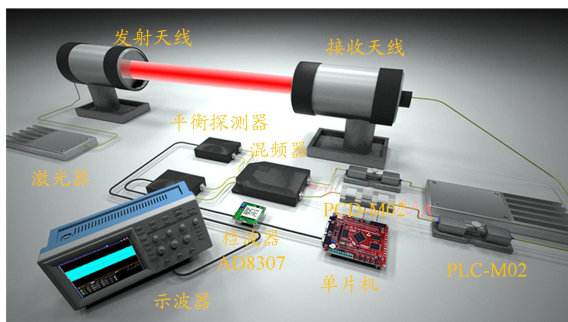


图 2 SPO 算法控制的相干光通信实验链路

3.5 光源对相干探测系统性能影响影响分析

3.5.1 本振光功率的影响

在理想状态下,本振光功率对相干探测系统信噪比的影响关系曲线如图文献[70]中的图 3 所示。随着响应度的增加,相干探测系统信噪比逐渐增大;随着本振光功率的微小变化,相干探测系统信噪比急剧增大到最大值,随后不再受本振光功率的影响而改变。

非线性状态下,当非线性响应度 α 不同时,本振光功率对相干探测系统输出信噪比和外差电流的影响如文献[71]中图 3-3 与图 3-4 所示。随着 α 逐渐增大,量子噪声限呈下降趋势,输出电流逐渐减小,外差探测效率下降;随着本振光功率增大,输出电流逐渐增大。

非线性状态下,当响应度 β 不同时,本振光功率

对相干探测系统输出信噪比和外差电流的影响如文献[71]中图 3-5 与图 3-6 所示。随着响应度 β 的增大,量子噪声限和输出电流逐渐增大,在本振光功率为 1 mW 时,输出电流达到最大。

3.5.2 光源线宽的影响

激光器线宽微小漂移量会导致无线光相干通信链路传输误码率急剧增大,这对相干探测效率影响很大^[74]。光源线宽、大气湍流、传输距离和差频信号带宽等对传输误码率的影响如文献[72]中的图 3-18~图 3-21 所示。当光源线宽、大气湍流强度、传输距离或差频信号带宽增大时,误码率均逐渐增大。仿真结果表明,激光器线宽和湍流强度对无线光相干通信系统中相干探测效率存在不同程度的影响。

3.6 其它实验研究进展

在无线光相干通信领域,为了实现光信号检测,提高相干增益,除了上述文献的研究外,西安理工大学柯熙政教授团队的其他成员还做了如下工作:①孔英秀等人^[73]分析了在大气湍流影响下,不同光场分布对外差效率的影响,证明了 Airy+Gauss 分布的信号光和本振光湍流抑制效果最佳,Airy+平面波分布模型受湍流影响最大,严重时使外差效率下降约 95.13%;②杨尚君等人^[74]设计了一种采用反馈判决控制回路的电路,该电路使载频漂移稳定在 ± 2 MHz 内,有助于接收端解调,可实现本振激光器频率对信号激光器频率的跟踪;③吴佳丽^[75]研制了基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的无波前传感器外差探测通信系统,该系统可以提高无线光相干通信链路单模光纤耦合功率 25 dB 左右;④毛燕子^[76]研究了无线光相干通信系统中光束的传输特性,并分析了接收端光束的偏振特性,为提高接收端增益提供了理论依据;⑤王义^[77]设计了一种基于外差探测的无线光相干通信解调系统,并先后进行了距离为 400 m 和 1.3 km、误码率小于 10^{-6} 的视频传输实验;⑥白佳俊^[78]搭建了无线光相干通信实验平台,并对 QPSK 中频信号进行解调,完成了 OPSK 信号在系统误码率为 10^{-3} 时的调制解调实验。

4 总结与展望

无线光相干通信系统相干探测的发展方向包括以下几个方面:①探索将部分相干光技术引入到无线光相干通信中,抑制大气湍流的影响,改善无线光通信的质量^[79];②研究更快响应速度、更低复杂度的偏振控制算法,提高无线光相干通信中的偏振控制能力^[2];③提高光源稳定性,研制更窄带宽光源,减少光源线宽

高晓梅,邢甜,高婉倩,等;无线光相干通信及其实验研究

漂移量对无线光相干通信系统外差效率影响^[71];④研究新型相干探测技术,如数字相干技术,为提高接收端检测灵敏度提供新途径^[65];⑤研制光学梳技术,通过复用提高相干通信的信道容量,提高相干探测能力^[80]。

5 结束语

本文系统地国内外无线光相干探测领域研究做了总结,同时介绍了西安理工大学相关领域的工作,包括大气湍流和信道噪声影响下的相干探测系统分析、光信号偏振算法和光源对相干探测系统性能的影响和 NOHD 系统性能分析与实验。这些研究不同程度地改善了相干通信系统性能,有效提高了无线光相干通信系统的灵敏度。

参考文献:

- [1] 柯熙政,邓莉君. 无线光通信[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [2] 柯熙政,吴佳丽. 无线光相干通信原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [3] FINK D. Coherent detection signal-to-noise [J]. Applied Optics, 1975, 14(3): 689–690.
- [4] COHEN S C. Heterodyne detection: phase front alignment, beam spot size, and detector uniformity[J]. Applied Optics, 1975, 14(8): 1953–1959.
- [5] TAKENAKA T, TANAKA K, FUKUMITSU O. Signal-to-noise ratio in optical heterodyne detection for Gaussian fields [J]. Applied Optics, 1978, 17(21): 3466–3471.
- [6] TANAKA K, SAGA N. Maximum heterodyne efficiency of optical heterodyne detection in the presence of background radiation [J]. Applied Optics, 1984, 23(21): 3901–3904.
- [7] TANAKA K, OHTA N. Effects of tilt and offset of signal field on heterodyne efficiency[J]. Applied Optics, 1987, 26(4): 627–632.
- [8] IFTEKHARUDDIN K M, KARIM M A. Heterodyne detection by using a diffraction-free beam: tilt and offset effects [J]. Applied Optics, 1992, 31(23): 4853–4856.
- [9] KALMAN R F, FA N J C, KAZOVSKY L G. Dynamic range of coherent analog fiber-optic links [J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(7): 1263–1277.
- [10] CHAMBERS D M. Modeling heterodyne efficiency for coherent laser radar in the presence of aberrations[J]. Optics Express, 1997, 1(3): 60–67.
- [11] DAS K K, IFTEKHARUDDIN K M, KARIM M A. Improved heterodyne mixing efficiency and signal-to-noise ratio with an array of hexagonal detectors[J]. Applied Optics, 1997, 36(27): 7023–7026.
- [12] BELMONTE A, RYE B J. Heterodyne lidar returns in the turbulent atmosphere: performance evaluation of simulated systems [J]. Applied Optics, 2000, 39(15): 2401–2411.
- [13] BELMONTE A. Analyzing the efficiency of a practical heterodyne lidar in the turbulent atmosphere: Telescope parameters[J]. Optics Express, 2003, 11(17): 2041–2046.
- [14] TAYLOR M G. Coherent detection method using DSP for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments [J]. IEEE

photonics technology letters, 2004, 16(2): 674–676.

- [15] LANGE R, SMUTNY B, WANDERNOTH B, et al. 142 km, 5.625 Gbps free space optical link based on homodyne BPSK modulation [C]// SPIE. Proceedings of Conference on Free-Space Laser Communication Technologies XVIII, January 24–25, 2006, Bellingham, USA. Bellingham: SPIE, 2006: 61050A1–61050A9.
- [16] TOYOSHIMA M. Maximum fiber coupling efficiency and optimum beam size in the presence of random angular jitter for free-space laser systems and their applications[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(9): 2246–2250.
- [17] BELMONTE A, KAHN J M. Performance of synchronous optical receivers using atmospheric compensation techniques [J]. Optics Express, 2008, 16(18): 14151–14162.
- [18] TSIFTIS T A. Performance of heterodyne wireless optical communication systems over gamma-gamma atmospheric turbulence channels [J]. Electronics Letters, 2008, 44(5): 373–374.
- [19] SANDALIDIS H G, TSIFTIS T A, KARAGIANNIDIS G K. Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4440–4445.
- [20] DJERROUD K, ACEF O, CLAIRON A, et al. Coherent optical link through the turbulent atmosphere [J]. Optics letters, 2010, 35(9): 1479–1481.
- [21] SALEM M, ROLLAND J P. Heterodyne efficiency of a detection system for partially coherent beams [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(5): 1111–1119.
- [22] FICE M J, CHIUCHIARELLI A, CIARAMELLA E, et al. Homodyne coherent optical receiver using an optical injection phase-lock loop [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(8): 1152–1164.
- [23] BAYAKI E, SCHÖBER R. Performance and design of coherent and differential space-time coded FSO systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(11): 1569–1577.
- [24] KIKUCHI K. Fundamentals of coherent optical fiber communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 157–179.
- [25] KAKARLA R, MAZUR M, SCHRODER J, et al. Power efficient communications employing phase sensitive pre-amplified receiver[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(1): 3–6.
- [26] 孙毅义. 湍流大气中的激光外差探测 [J]. 中国激光, 1985, 13(3): 174–177.
- [27] 钱信中. 相干光通信中本振功率的影响 [J]. 南京邮电学院学报, 1988, 8(1): 129–135.
- [28] 张超英, 林宗琦. 光外差接收系统中的最佳本振功率[J]. 量子电子学报, 1988, 5(4): 368–369.
- [29] ZHANG X, JIANG P. Limiter-discriminator detection of a coherent optical heterodyne M-ary CPFSK receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(8): 1127–1131.
- [30] 闵双全, 黄德修. 无端偏振控制器实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(4): 357–360.
- [31] 何毅. 相干式 CO₂ 激光成像雷达光学系统 [J]. 光学学报, 1999, 19(8): 1079–1083.
- [32] 王琪, 王春晖, 尚铁梁. 高斯本振光和爱里斑信号光相干探测的外

差效率[J]. 中国激光, 2003, 30: 183-186.

[33] 肖石林, 曾庆济. 光相干探测的应用技术研究 [J]. 光相干技术, 2003, 11(9): 28-31.

[34] 李伟文, 章献民, 陈抗生, 等. 模拟退火算法在无端偏振控制器中的应用[J]. 光子学报, 2005, 34(6): 820-824.

[35] 李伟文, 金晓峰, 章献民, 等. 遗传算法在偏振态控制中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(3): 443-447.

[36] 李成, 毛红敏, 甄胜来, 等. 大气湍流对激光外差探测的影响[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(4): 247-250.

[37] 徐静, 毛红敏, 甄胜来, 等. 大气湍流引起激光外差探测空间光相干性退化研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1245-1249.

[38] 张文睿, 曾晓东, 满祥坤. 激光外差实验研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 146-148.

[39] 玄周石, 邓科, 李晓峰. 卫星相干光通信跟瞄误差对链路性能的影响[J]. 光电子·激光, 2010, 21(6): 868-870.

[40] 高龙, 王春晖, 李彦超, 等. 1.55 μm 相干激光测风雷达平衡式探测接收实验[J]. 光子学报, 2010, 39(6): 1064-1069.

[41] 刘宏展, 纪越峰, 许楠, 等. 信号光与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1006001-1006006.

[42] 肖西, 陈名松. 相干光通信外差异步解调接收机的设计[J]. 大众科技, 2011, 140(4): 21-22.

[43] 张桐, 佟首峰. 准直失配对空间相干激光通信混频效率的影响[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(1-2): 13-15.

[44] 武云云, 李新阳, 饶长辉. 大气湍流像差对空间零差二进制相移键控相干光通信误码性能的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0606002-1-0606002-7.

[45] 李成强, 王挺峰, 张合勇, 等. 光源参数及大气湍流对电磁光束传输偏振特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(10): 104201-1-104201-8.

[46] 刘宏阳, 张燕革, 艾勇, 等. 用于相干光通信的平衡探测器的设计与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 23-29.

[47] 李向阳, 马宗峰, 石德乐. 高斯光束场分布对相干探测混频效率的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 539-543.

[48] 代永红, 刘彦飞, 周浩天, 等. 空间相干光通信中平衡探测器灵敏度测试实验[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3110-3116.

[49] 王盟盟, 董瑞芳, 项晓, 等. 基于外差检测原理的绝对测距性能理论研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1861-1868.

[50] 常帅, 佟首峰, 姜会林, 等. 星间高速相干激光通信系统中的光学锁相环技术[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206004-1-0206004-9.

[51] 马婷婷, 佟首峰, 南航, 等. 信号光偏振特性对空间相干探测混频效率的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020604-1-020604-7.

[52] 南航, 张鹏, 佟首峰, 等. 光斑尺寸偏差和光轴偏转对空间光混频器混频效率的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0422001-1-0422001-8.

[53] 雷芳, 王练. 基于光相干探测原理的光通信系统[J]. 激光杂志, 2018, 39(9): 138-142.

[54] 冯力天, 赵培娥, 史晓丁, 等. 光源线宽对相干激光测风雷达探测性能的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0406005-1-0406005-6.

[55] 孙晶, 黄普明, 玄周石. 大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0301003-1-0301003-6.

[56] 陈锦妮. 副载波调制非光域外差检测无线光通信关键技术及其实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.

[57] 柯熙政, 梁静远, 许东升, 等. 无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展[J]. 光电工程, 2022, 49(3): 3-21.

[58] 柯熙政, 陈锦妮. 1km 大气激光通信系统非光域外差检测的实验研究[J]. 应用科学学报, 2014, 32(4): 379-384.

[59] 柯熙政, 吴佳丽, 杨尚君. 面向无线光通信中的大气湍流研究进展与展望[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 323-339.

[60] 谭振坤, 柯熙政. 相干探测系统中的混频效率[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100605-1-100605-9.

[61] KE X Z, TAN Z K. Effect of angle-of-arrival fluctuation on heterodyne detection in slant atmospheric turbulence [J]. Applied Optics, 2018, 57(5): 1083-1090.

[62] 谭振坤. 无线光通信中外差探测性能影响因素及实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

[63] 柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 无线光 MIMO 技术及空时编码研究进展[J]. 湖南科技学院学报, 2021, 42(5): 25-32.

[64] 柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 西安理工大学无线光通信系统自适应光学技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(8): 30-52.

[65] 柯熙政, 吴鹏飞. 自适应光学理论及其在无线光通信中应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.

[66] 柯熙政, 秦欢欢, 杨尚君, 等. 车联网可见光通信系统夜间背景光噪声模型[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 986-990.

[67] 陈牧. 无线光相干通信信道噪声及其对相干检测性能影响研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

[68] 马兵斌. 相干光通信中偏振控制实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

[69] 马兵斌, 柯熙政, 张颖. 相干光通信系统中光束的偏振控制及控制算法研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0106002-1-0106002-8.

[70] 孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 空间相干光通信中本振光功率对信噪比的影响[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0222002-1-0222002-6.

[71] 孔英秀. LC-SLM 的空间相干光通信波前校正技术[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

[72] 孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 激光器线宽对空间相干光通信链路传输误码率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040603-1-040603-6.

[73] 孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 大气湍流对空间相干光通信的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080601-1-080601-7.

[74] 杨尚君, 柯熙政. 相干光通信中载波频率稳定控制[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040601-1-040601-7.

[75] 吴佳丽. 无波前探测的相干光通信系统实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

[76] 毛燕子. 相干光通信中的模式退变及偏振特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

[77] 王义. 相干光通信系统中 DPSK 解调技术的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

[78] 白佳俊. 相干光通信系统中 QPSK 调制解调研究与实现 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

[79] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信中的部分相干光传输理论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

[80] 孔萌, 陆彦婷, 林栋, 等. 参考光学频率梳的数字激光稳频技术[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1614001-1-1614001-6.