

光学学报

多体制兼容相干探测卫星激光通信技术

任伟杰^{1,2**}, 孙建锋^{3*}, 周煜³, 卢智勇¹, 从海胜^{1,2}, 姜玉鑫^{1,2}, 李超洋¹, 张龙坤¹, 许玲玲^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800

摘要 卫星相干激光通信系统中,信号调制格式以相移键控(PSK)为主,未兼容开关键控(OOK)的相干接收。针对卫星相干光通信接收机不兼容多种调制格式的问题,实验搭建了兼容 OOK 以及二进制相移键控(BPSK)的相干通信接收装置。在 1 Gbit/s 的通信速率下,当调制格式为 OOK 且信号光功率为 -54.6 dBm 时,误码率(BER)为 10^{-3} ,接收灵敏度距离散粒噪声极限 3.3 dB;当调制格式为 BPSK 且信号光功率为 -57.95 dBm 时,BER 为 10^{-3} ,接收灵敏度距离散粒噪声极限 4.2 dB。该多体制兼容相干接收机的结构与当前大多数相干接收机的硬件通用,且具有较高的接收灵敏度,证明了卫星相干激光通信多体制兼容技术的可行性,具有重要意义。

关键词 光通信; 多体制兼容; 内差检测; 开关键控; 相移键控

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221606

1 引言

自由空间激光通信因具有大带宽、无许可证频谱、高通信速率、可快速部署以及低功耗等优点^[1]受到了广泛关注。欧洲航天局(ESA)于 1990 年展开星间卫星链路实验(SILEX)的部署^[2],并在 2002 年建立了同步轨道卫星(ARTEMIS)与低轨卫星(SPOT-4)之间的双向通信激光链路,通信格式为开关键控(OOK)^[3]。2008 年,德国 Terra 合成孔径雷达 X 波段(SAR-X)卫星和美国近场红外实验(NFIRE)卫星建立了通信速率为 5.6 Gbit/s 的相干激光通信链路,调制格式为二进制相移键控(BPSK)^[4]。2011 年,日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)开展了基于光学锁相环的零差 BPSK 解调工作,通信速率为 2.5 Gbit/s^[5]。2014 年,美国麻省理工学院(MIT)和美国宇航局进行了月球激光通信(LLCD)实验,其调制方式为脉冲位置调制(PPM)^[6]。2015 年,JAXA 公布了下一代日本数据中继系统(JDRS),其中光通信格式采用归零差分相移键控(DPSK)和通信速率为 50 Mbit/s 的 OOK^[7]。2016 年,中国科学院上海光学精密机械研究所进行了中国第一次星地相干高速激光通信实验,该实验的调制格式为 DPSK^[8]。2017 年,哈尔滨工业大学的激光通信终端随“实践十三”同步轨道卫星升空,通信调制格式仍为 OOK。卫星激光通信系统中 OOK 与 BPSK 体制已经得到大量应用,而在光纤系统中,2006 年 Becker

等^[9]在不使用前置放大器的情况下进行 10 Gbit/s 的 OOK 外差通信实验,获得了一 31 dBm 的灵敏度,证明了 OOK 相干接收的可行性。2010 年,刘亮等^[10]在光纤系统中完成了 DPSK 和 OOK 信号的混合传输实验。目前,国内外典型高轨卫星激光通信链路的体制主要包括 OOK 调制与 BPSK 调制等^[11]。王宝鹏等^[12]对大气激光通信强度调制技术的差错性能进行分析,给出了不同强度调制格式的最佳判决阈值及其在不同信道中的误时隙率模型。可见,OOK 与 BPSK 调制未来会长期存在。基于此,本文介绍一种多体制兼容相干探测卫星激光通信技术,并搭建兼容 OOK 与 BPSK 的相干接收装置。先通过互相关法确定所用平衡探测器的最佳本振光功率^[13],再调节本振光的频率,使得本振光与信号光的频差远远小于通信信号的噪声带宽,即接收机工作在内差状态。在进行多体制兼容相干探测时,若信号光为 OOK 调制信号,则利用载波包络进行检测,这种检测方法被称为异步解调;若信号光为 BPSK 调制信号,则利用载波的频率和相位进行检测,这种检测方法被称为同步解调。通过算法完成数据解调后,将解调数据与实际码字进行对比,以计算误码率。实验结果表明,当 OOK 与 BPSK 调制格式的通信速率均为 1 Gbit/s 且误码率为 10^{-3} 时,OOK 调制格式的接收灵敏度距离散粒噪声极限仅 3.3 dB,BPSK 调制格式的接收灵敏度距离散粒噪声极限仅 4.2 dB,完成了多体制、高灵敏度的相干解调。

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-09-19; 录用日期: 2022-09-27; 网络首发日期: 2022-10-13

通信作者: *sunjianfengs@163.com; **wjren@siom.ac.cn

2 多体制兼容相干探测基本原理

图 1 为卫星激光通信多体制兼容相干探测装置的结构图

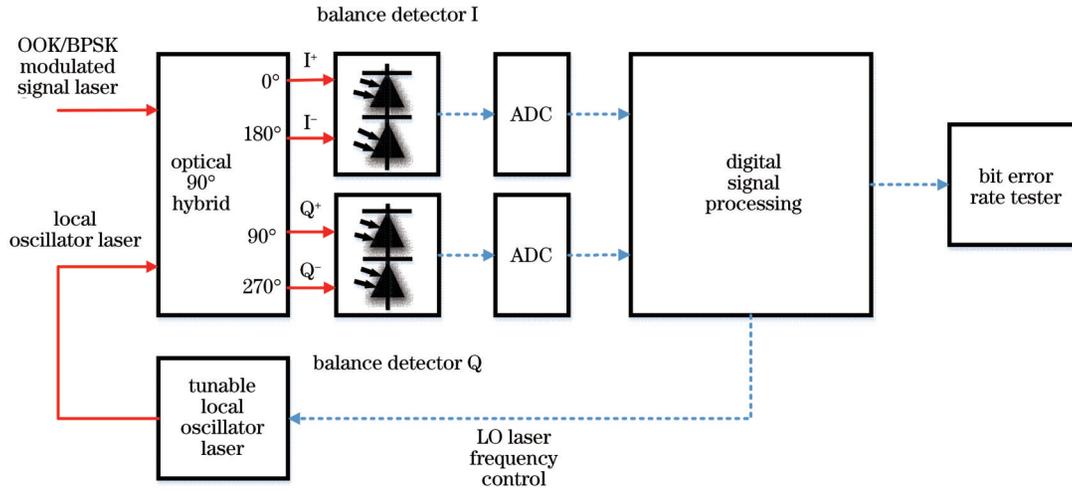


图 1 卫星激光通信多体制兼容相干探测装置的结构图

Fig. 1 Structure diagram of multi-system compatible coherent detection device for satellite laser communications

OOK/BPSK 调制的空间信号光耦合进光纤后,再进入 2×4 90° 的桥接器信号光输入端,可调谐本振激光器输出光进入桥接器的本振光输入端,桥接器输出 4 束混频光,其中同相(I)支路与正交(Q)支路的两束光分别进入两个平衡探测器,两个平衡探测器输出的模拟电信号由两个数模转换器(ADC)同步进行采

样。多体制兼容的原因在于通信体制不同时,数字信号处理(DSP)手段不同,OOK 采取异步接收,而 BPSK 采取同步接收。完成 DSP 后,将解调的 OOK 与 BPSK 基带信号与发射码字进行对比,以计算误码率。

当信号光调制格式为 OOK 时, 0° 、 180° 、 90° 、 270° 混频光产生的电压信号分别为

$$U_0(t) = Rr \left[\frac{1}{2} m^2(t) (1 - k_s) P_s + \frac{1}{2} (1 - k_{LO}) P_{LO} + \sqrt{1 - k_s} \sqrt{1 - k_{LO}} \sqrt{P_{LO} P_s} m(t) \cos(\omega_s t - \omega_{LO} t + \varphi_s(t) - \varphi_{LO}(t)) \right] + n_0(t), \quad (1)$$

$$U_{180}(t) = Rr \left[\frac{1}{2} m^2(t) (1 - k_s) P_s + \frac{1}{2} (1 - k_{LO}) P_{LO} - \sqrt{1 - k_s} \sqrt{1 - k_{LO}} \sqrt{P_{LO} P_s} m(t) \cos(\omega_s t - \omega_{LO} t + \varphi_s(t) - \varphi_{LO}(t)) \right] + n_{180}(t), \quad (2)$$

$$U_{90}(t) = Rr \left[\frac{1}{2} m^2(t) k_s P_s + \frac{1}{2} k_{LO} P_{LO} + \sqrt{k_s} \sqrt{k_{LO}} \sqrt{P_{LO} P_s} m(t) \sin(\omega_s t - \omega_{LO} t + \varphi_s(t) - \varphi_{LO}(t)) \right] + n_{90}(t), \quad (3)$$

$$U_{270}(t) = Rr \left[\frac{1}{2} m^2(t) k_s P_s + \frac{1}{2} k_{LO} P_{LO} - \sqrt{k_s} \sqrt{k_{LO}} \sqrt{P_{LO} P_s} m(t) \sin(\omega_s t - \omega_{LO} t + \varphi_s(t) - \varphi_{LO}(t)) \right] + n_{270}(t), \quad (4)$$

式中: R 为探测器响应度; r 为探测器跨阻; $m(t)$ 为通信信号的调制项,且 $m(t) = 0, 1$; k_s 和 k_{LO} 分别为混频器分信号光比和分本振光比,在本文中 $k_s = k_{LO} = 0.5$; P_s 和 P_{LO} 分别为信号光功率和本振光功率; ω_s 和 ω_{LO} 分别为信号光角频率和本振光角频率; $\varphi_s(t)$ 和 $\varphi_{LO}(t)$ 分别为信号光载波随机相位和本振光载波随机相位; $n_0(t)$ 、 $n_{180}(t)$ 、 $n_{90}(t)$ 、 $n_{270}(t)$ 分别为 4 束

光信号的加性白噪声,以散粒噪声为主,主要原因是通过实验设置较高的本振光功率,使得接收机的主要噪声变为散粒噪声。

将 $k_s = k_{LO} = 0.5$ 代入式(1)~(4),平衡探测器 I 对 0° 电信号和 180° 电信号作差,平衡探测器 Q 对 90° 电信号和 270° 电信号作差,在消除通信平方项以及直流项后,得到的 I、Q 两路电压信号分别为

$$U_{\text{IOOK}}(t) = U_0(t) - U_{180}(t) = Am(t) \cos \Delta\varphi(t) + n_1(t), \quad (5)$$

$$U_{\text{QOOK}}(t) = U_{90}(t) - U_{270}(t) = Am(t) \sin \Delta\varphi(t) + n_Q(t), \quad (6)$$

式中: $A = Rr \sqrt{P_s P_{\text{LO}}}$; $\Delta\varphi(t) = \omega_s - \omega_{\text{LO}}t + \varphi_s(t) - \varphi_{\text{LO}}(t)$; $n_1(t) = n_0(t) - n_{180}(t)$, 为 I 路信号的噪声; $n_Q(t) = n_{90}(t) - n_{270}(t)$, 为 Q 路信号的噪声。

$$U_{\text{ABSOOK}}[k] = [\text{Re}(U_{\text{COMOOK}}[k])]^2 + [\text{Im}(U_{\text{COMOOK}}[k])]^2 = (Am[k])^2 \cos^2(\Delta\varphi[k]) + (Am[k])^2 \sin^2(\Delta\varphi[k]) + 2Am[k] \cos(\Delta\varphi[k])n_1[k] + 2Am[k] \sin(\Delta\varphi[k])n_Q[k] \approx (Am[k])^2 \cos^2(\Delta\varphi[k]) + (Am[k])^2 \sin^2(\Delta\varphi[k]) = (Am[k])^2, \quad (8)$$

式中: $\text{Re}(\cdot)$ 表示取复数信号的实部; $\text{Im}(\cdot)$ 表示取复数信号的虚部。对取模后的信号进行开方即可得到

$$U_{\text{EXTOOK}}[k] = \sqrt{U_{\text{ABSOOK}}[k]} = Am[k]. \quad (9)$$

由于 $m[k] = 0, 1$, 只需要选择合适的阈值(理想情况下为 $A/2$)进行阈值判决即可通过相干接收方式解调 OOK 信号。相干接收 OOK 星座图如图 2(a) 所示, 可以看到, 相干 OOK 解调可以采取对复数求模的方式, 即仅通过载波包络来检测传输数据, 图 2(a) 中的细线表示阈值, 可以直接通过阈值判决进行数据解调, 无需考虑中频信号所携带的频率信息及相位信息, 该种方式属于异步接收, 其对激光器线宽的要求不高^[14], 可作为卫星激光通信中 BPSK 等相移键控通信中载波恢复算法失灵时的备用手段, 可见相干接收机兼容 OOK 的解调具有重要意义。

信号光调制格式为 BPSK 的相干解调与 OOK 相干解调的区别在于 DSP 方法不同。BPSK 通过调制激

对 I、Q 两路信号进行同步采样并作复数化后, 可得到

$$U_{\text{COMOOK}}[k] = U_I[k] + jU_Q[k] = Am[k] \exp(j\Delta\varphi[k]) + n_1[k] + jn_Q[k], \quad (7)$$

式中: k 为采样序号; j 为虚数单位。对采样后的复数化信号取模, 得到

光载波相位携带的通信信息进行数据解调, 因此解调 BPSK 信号需要通过算法进行频偏恢复和相位恢复。目前 BPSK 系统载波相位恢复主要有两种实现方式: 基于复数运算和基于角度运算^[15]。本装置采用基于复数运算的方法恢复载波相位, 以完成对 BPSK 信号的解调。此时, 两个平衡探测器输出的 I、Q 两路电压信号可表示为

$$U_{\text{IBPSK}}(t) = A \cos(\Delta\varphi(t) + \pi m(t)) + n_1(t), \quad (10)$$

$$U_{\text{QBPSK}}(t) = A \sin(\Delta\varphi(t) + \pi m(t)) + n_Q(t). \quad (11)$$

对 BPSK 格式的 I、Q 两路电压信号进行同步采样并作复数化后, 其表达式为

$$U_{\text{COMBPSK}}[k] = A \exp[j(\Delta\varphi[k] + \pi m[k])] + n_1[k] + jn_Q[k]. \quad (12)$$

对于 BPSK 相干信号, 需进行复数平方运算以消除调制项 $m[k]$ 带来的影响。对式(12)进行平方运算后, 可得到

$$U_{\text{SQUBPSK}}[k] = A^2 \exp(j \times 2\Delta\varphi[k]) + 2A \exp(j \times \Delta\varphi[k]) \times n_1[k] + 2A \exp[j \times (\Delta\varphi[k] + \pi/2)] \times n_Q[k]. \quad (13)$$

需要强调的是, 式(10)、式(11)中的 $n_1(t)$ 、 $n_Q(t)$ 与式(5)、式(6)中的 $n_1(t)$ 、 $n_Q(t)$ 均由接收的强本振光所产生的散粒噪声决定, 因此式(12)、式(13)中的 $n_1[k]$ 、 $n_Q[k]$ 与式(7)、式(8)中的 $n_1[k]$ 、 $n_Q[k]$ 也由强本振光产生的散粒噪声决定。

在对 BPSK 的复数信号平方后, 由于 $2m[k] \times \pi = 0, 2\pi$, 通信调制项的影响被消除。此时载波实时相位差的表达式为

$$\theta_{\text{error, BPSK}}[k] = 0.5 \times \text{atan} 2 \left[\frac{\text{Im}(U_{\text{SQUBPSK}}[k])}{\text{Re}(U_{\text{SQUBPSK}}[k])} \right], \quad (14)$$

式中: $\text{atan} 2$ 为四象限反正切函数。复数平方后计算所得的载波相位差变为真实相位差的 2 倍, 因此式(14)前的系数为 0.5, 通过式(14)即可求出信号光为 BPSK 调制时的载波实时相位差, 在得到实时相位差后即可

进行频偏补偿及相位补偿, 以消除 $\Delta\varphi[k]$ 的影响。当 $\Delta\varphi[k] = 0$ 时, I 路电压信号的表达式为

$$U_{\text{IBPSK}}[k] = A \cos[m(k) \times \pi] + n_1[k] = A(-1)^{m[k]} + n_1[k]. \quad (15)$$

由式(15)可知, 设置理想阈值为 0, 即可通过阈值判决解调 BPSK 信号所携带的信息。相干 BPSK 在消除载波相位影响前后的星座图如图 2(b)、(c) 所示。BPSK 调制属于等幅调制, 无法通过提取包络等方法进行解调, 因此需要进行载波恢复, 只有恢复载波后才能进行阈值判决。可见, 该方法要考虑中频信号的频率信息及相位信息, 对激光线宽的要求较高, 属于同步接收。

利用卫星激光通信多体制兼容相干探测装置对 OOK 信号进行相干解调, 属于异步接收。在散粒噪声极限下, 误码率 $R_{\text{BER, COOOK}}$ 与信号光接收功率的关

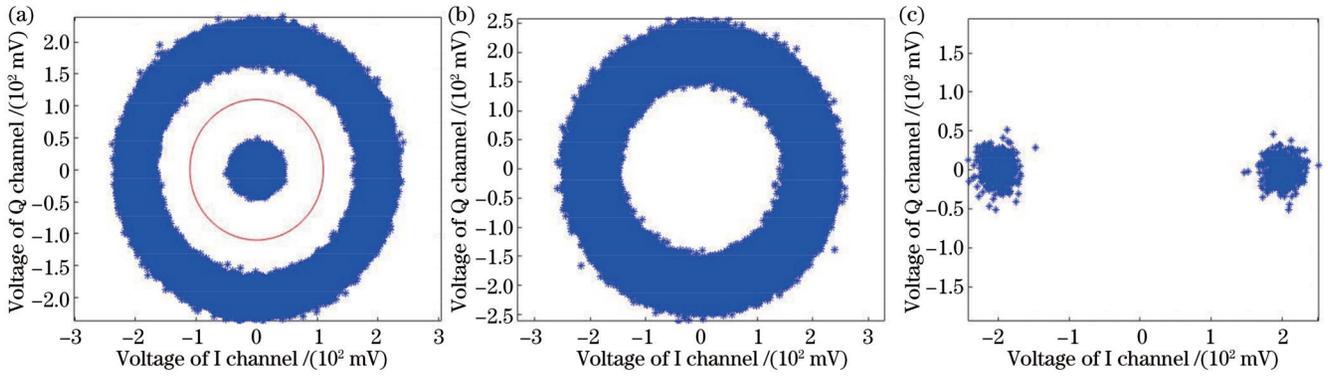


图 2 空间激光通信相干接收 OOK 与 BPSK 星座图。(a) OOK 星座图；(b) 未消除载波相位时的 BPSK 星座图；(c) 消除载波相位后的 BPSK 星座图 (仿真信噪比为 20 dB)

Fig. 2 Constellations of OOK and BPSK for coherent reception of space laser communication. (a) OOK constellation; (b) BPSK constellation without elimination of carrier phase; (c) BPSK constellation after elimination of carrier phase (simulated signal-to-noise ratio is 20 dB)

系^[16]为

$$R_{\text{BER, COOOK}} = 0.5 \times \exp\left(-\frac{\eta P_s}{2h\nu R_b}\right), \quad (16)$$

式中： η 为量子效率，理想状态下该值为 1； $h\nu$ 为光子能量； P_s 为信号光接收功率； R_b 为通信速率。

利用卫星激光通信多体制兼容相干探测装置对 BPSK 信号进行相干解调，属于同步接收。当桥接器的分光比为 0.5 时，在散粒噪声极限下，误码率 $R_{\text{BER, COBPSK}}$ 与信号光接收功率的关系^[17]为

$$R_{\text{BER, COBPSK}} = 0.5 \times \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\eta P_s}{h\nu R_b}}\right), \quad (17)$$

式中： $\text{erfc}(x)$ 为补余误差函数，表示式为

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-t^2) dt. \quad (18)$$

在 1 Gbit/s 通信速率下，当采用卫星激光通信多体制兼容相干接收装置接收通信体制为 OOK 或 BPSK 的信号时，误码率与信号光接收功率的理论曲线如图 3 所示。可以看到，该卫星激光通信多体制兼

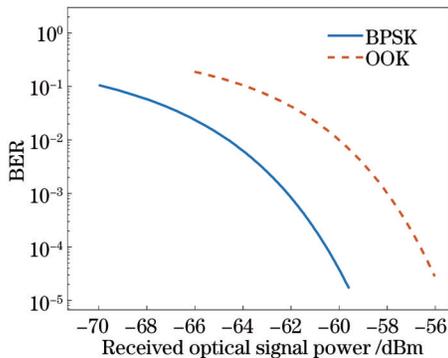


图 3 通信速率为 1 Gbit/s 的 OOK、BPSK 相干接收误码率与接收功率的理论关系

Fig. 3 Theoretical relationship between BER and received power of OOK and BPSK coherent reception with communication rate of 1 Gbit/s

容相干探测装置的实现在于通过不同的 DSP 完成对不同调制格式信号的高灵敏度解调，实现多体制通信的相干接收，从而显著增强空间光通信网络的灵活性和交互性。

3 实验与结果分析

3.1 最佳本振光功率的确定

在进行多体制兼容相干探测卫星激光通信实验前，为获得接近散粒噪声极限的灵敏度，对所使用的平衡探测器本振光功率进行测量，并确定最佳本振光功率。本实验采用文献[13]所述方法，搭建了图 4 所示的实验装置。

$$R_{\text{SNR}} = \frac{N \sum_{i=1}^{N-1} R_{i,i+1}}{(N-1) \sum_{i=1}^N R_{i,i}(0) - N \sum_{i=1}^{N-1} R_{i,i+1}}, \quad (19)$$

式中： $R_{i,i+1}$ 为相邻两组数据的互相关运算最大值； $R_{i,i}(0)$ 为各组数据的自相关运算的零点值； N 为对应本振光功率下所采集外差信号数据的总组数； i 为每组数据的序号。

本次实验所用的两个平衡探测器的型号均为 PDB780CAC (THORLABS 公司)，典型共模抑制比大于 25 dB，可满足实验需求；所使用的 2×4 90° 桥接器为 Kylaia 公司生产的 COH 24，声光移频器的移频频率为 80 MHz。每个平衡探测器有两个光输入口，首先调节信号光衰减器使得进入每个输入口的信号光功率均为 20 nW。关闭信号光，开启本振光，桥接器会将本振光的功率四等分输出；然后，每调节一次本振光功率，记录平衡探测器每个输入口的光功率，所记录的平衡探测器每个输入口的光功率即为本振光功率的四分之一；最后，在所调节的不同的本振光功率下开启信号光，采集多组高速示波器上指定平衡探测器输出的拍频电信号数据。采取式(16)进行不同本振光功率下拍

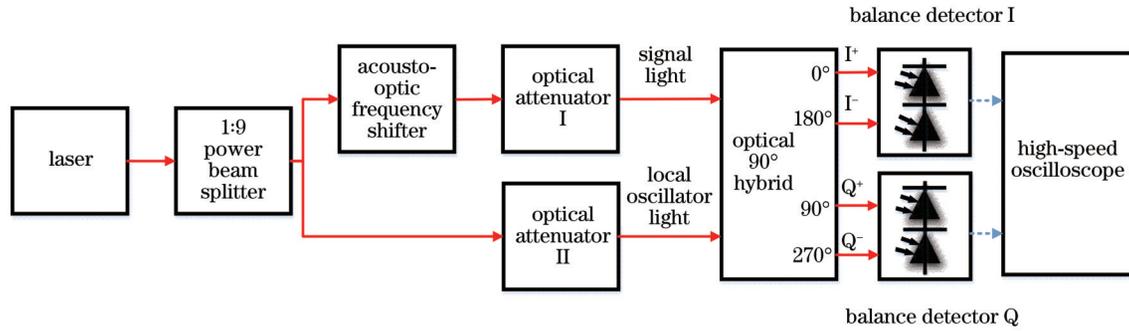


图 4 最佳本振光功率测量实验结构图

Fig. 4 Structure diagram of measurement experiment for optimal power of local oscillator light

频信号信噪比(SNR)的计算,即可得到图 5 所示的拍频信号信噪比与四分之一本振光功率的关系曲线。

从图 5 可以看到,在信号光功率固定的条件下:当本振光功率较小时,信噪比随着本振光功率的增加而增大;当本振光功率增加到一定程度后,信噪比的增加逐渐趋于饱和。为了保证信噪比较高、拍频的电信号幅值较大,且易于判决及采样,综合考虑后选择 3.2 mW 作为四分之一本振光功率,因此,在本卫星激光通信多体制兼容相干接收实验中设置本振光功率为 12.8 mW。

3.2 多体制兼容相干探测实验

本次实验中,所用关键器件对应参数的具体值如表 1 所示。图 1 为卫星激光通信多体制兼容相干探测装置的结构图,在进行实验时,使用一台高速示波器代替图 1 中的数模转换器,并利用离线处理代替 DSP,示波器的型号为 Lab Master MCM-Zi-A (TELEDYNE LECORY 公司)。本次实验中 OOK 与 BPSK 调制的通信速率均为 1 Gbit/s,平衡探测器的最大带宽为 2.5 GHz,两个平衡探测器的输出信号分别进入示波

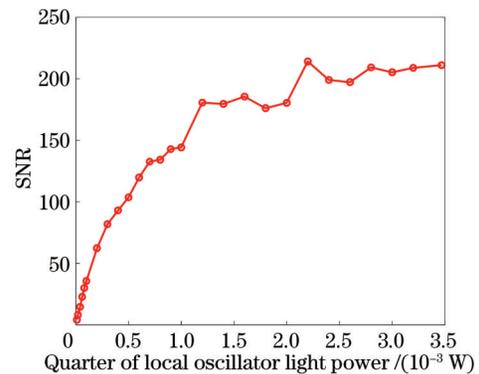


图 5 信噪比与四分之一本振光功率的关系

Fig. 5 Relationship between signal-to-noise ratio and quarter of local oscillator light power

器的通道 1 与通道 2,并将通道 1 与通道 2 的模拟带宽均设置为 1 GHz。为满足奈奎斯特采样定理,设置通道 1 与通道 2 的采样率均为 5 GSa/s。将本振光功率调节为所设计的最佳功率值,不断改变信号光功率,以获得误码率与信号光功率的关系。

表 1 实验器件的关键参数

Table 1 Key parameters of experimental devices

Parameter	Symbol	Specific value
Laser wavelength (signal & local oscillator light)	λ	1555.74 nm
Laser line width (signal & local oscillator light)	$\Delta\nu$	5000 Hz
Communication rate	R_b	1 Gbit/s
Received signal optical power	P_s	-65—-30 dBm
Detector responsivity	R	0.85 A/W
Detector transimpedance	r	5 k Ω
Optical 90° hybrid splitting ratio	k_s & k_{L0}	0.5

在外差或零差光接收机中一般都要使用本振光的自动频率控制电路,以保证本机振荡器的频率相对稳定。而在使用本装置时,首先要控制本振光的频率,使得本振光与信号光的频差远小于通信信号的噪声带宽,以保证接收机处于内差工作状态,原因在于内差检测仅要求光电探测器的带宽与通信信号的噪声带宽具有相当的水平,在内差检测的工作状态下可以降低对

光电探测器带宽的要求,且当探测器的带宽等于通信信号的噪声带宽时,可以获得与零差检测相同的效果。因此需要进行本振光频率的反馈控制,保证本振光与信号光的频差始终处于较小的范围。在本文中所使用的通信调制信号为 0/1 等概率的双极性非归零码,以其功率谱的第一个零点计算时,得到的噪声带宽在数值上等于其通信速率。文献[18]依据激光器频率调节

和控制的原理,采用在信号输出端外接鉴相器、单片机和压电陶瓷驱动放大器的方法,设计了基于反馈判决控制回路的电路,实现了本振光频率对信号光频率的跟踪。在图 1 中,通过 DSP 获得实时频差后,采用改变种子激光温度的方式控制可调谐本振激光器输出激光的频率,激光频率随温度的增加而减小。在实际进行卫星激光通信多体制兼容相干接收实验时,采用快速傅里叶变换(FFT)方法计算实时频差。当信号光调制格式为 OOK 时,对式(7)所得数据进行 FFT,求得频谱峰值处的频率,从而得到实时频差;当信号光调制格式为 BPSK 时,对式(13)所得数据进行 FFT,求得频谱峰值处的频率后再将其除以 2,得到实时频差。

在本实验中,使用示波器对相应信号进行 FFT 可获得实时频差,以此为依据调节本振光频率。所用本

振光激光器具有温度精调功能,最小可以改变几兆赫兹,本振光频率的温漂随时间的变化非常缓慢,因此容易将频差控制在 ± 10 MHz 以内。在对温度与频率的关系进行测量拟合时,发现温度每增加 1°C ,激光频率减小 1.816 GHz,而温度的最小改变量为 0.001°C 。通过调节本振光频率,待实验装置运行进入内差状态后,即可开始数据解调。

当信号光调制格式为 OOK,且通信速率为 1 Gbit/s 时,利用通道 1 与通道 2 同步采集 I、Q 两路模拟信号,对两路实信号作平方运算,将平方后的结果相加再开方,即可得到基带信号。该方法的原理与复数取模再阈值判决的原理一致,是复数取模的具体实现形式。图 6 和图 7 所示为高速示波器采集的 I、Q 两路相干 OOK 的拍频信号以及通过算法恢复的基带信号,误码率优于 10^{-9} 。

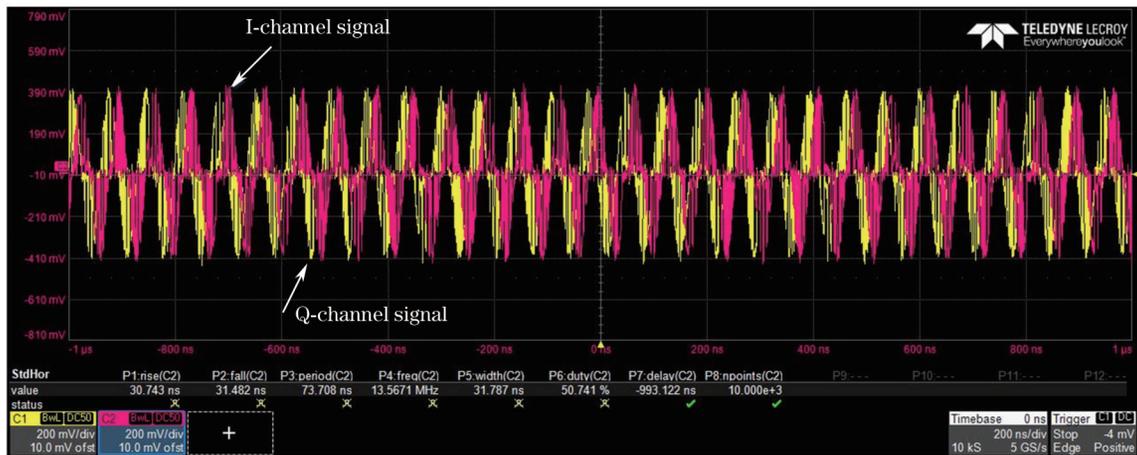


图 6 相干 OOK 的 I、Q 信号

Fig. 6 I and Q signals of coherent OOK

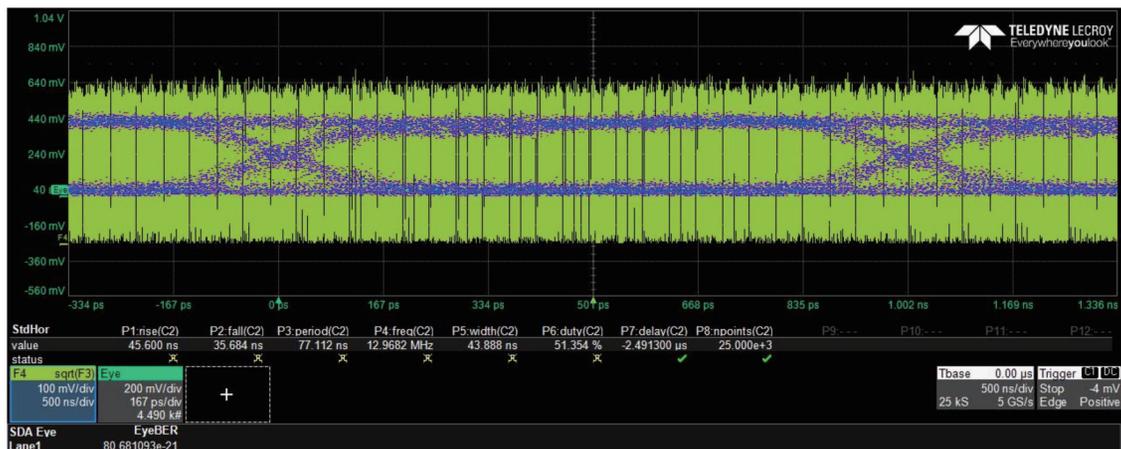


图 7 利用所提算法恢复的相干 OOK 基带信号及其眼图

Fig. 7 Coherent OOK baseband signal recovered by proposed algorithm and its eye diagram

当信号光功率接近本装置的接收灵敏度时,采用离线处理的方式,以 5 GSa/s 的采样率对 1 Gbit/s 的通信数据进行采集,离线处理的流程如图 8 所示。先对信号进行截止频率为 1 GHz 的低通滤波,以消除带外

噪声。为了避免阈值判决时上升沿或者下降沿上的采样点影响阈值判决而造成误码,对低通滤波后信号作 10 倍的重采样,此时 50 个采样点表示一个码元。本次实验所采用的调制伪随机码的码长为 127,首先在采

集信号中确定初始位置,即完成位同步;然后取每 50 个点中间的 30 个点作平均后,用平均值表征该码元所代表的电平值。设定阈值并利用阈值判决得到解调的基带数据,与原始码元进行对比,并将与其不同的码元判为错误码元。

当信号光的调制格式为 BPSK,且通信速率为 1 Gbit/s 时,通过控制本振光频率,待接收机运行进入内差状态后,相干 BPSK 的 I、Q 两路信号如图 9 所示(中频频差为 4.9592 MHz)。与 OOK 相干调制不同,BPSK 的相干解调无法直接通过示波器的数值计算进行基带数据恢复,这是因为 OOK 相干解调属于异步接

收,而 BPSK 通过相位传递信息,须采用同步接收。先将携带频差与相位差信息的 I、Q 数据进行离线恢复,采用式(12)~(14)计算每一个采样点的实时相位差,对所求相位差进行解缠绕,得到表征所采数据相位差变化的数组,对该数组作 50 倍平滑滤波,以消除相位阶跃;再以处理后的相位产生一个补偿相位差所用的复数数组,用此复数数组与 I、Q 两路数据生成的复数数组作点乘即可完成载波恢复,而计算得到的新数组实部即为基带数据。因此,该装置通过离线处理手段实现了 BPSK 信号的零差解调。

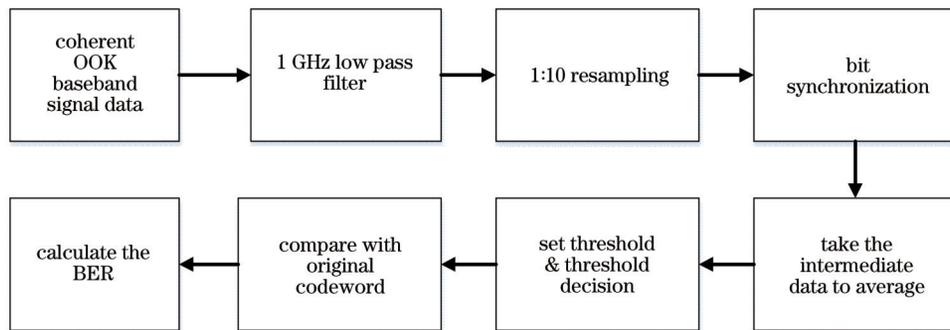


图 8 离线处理流程框图

Fig. 8 Block diagram of offline processing flow

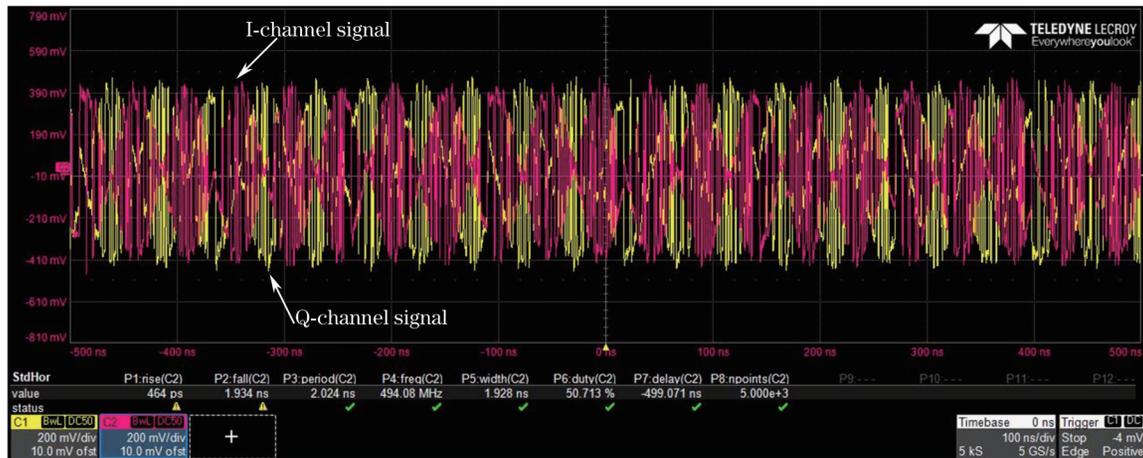


图 9 相干 BPSK 的 I、Q 信号

Fig. 9 I and Q signals of coherent BPSK

解调后的复信号实部与虚部如图 10 所示,其中实部已转为基带信号。在相干 BPSK 信号完成载波恢复后,对实部基带数据的后续处理流程与对相干 OOK 解调后信号的离线处理流程完全一致。

3.3 实际装置通信灵敏度分析

实验中通过不断降低信号光接收功率来获取卫星激光通信多体制兼容相干接收装置的通信灵敏度,分别得到该装置在接收 OOK 与 BPSK 调制格式信号下的误码率与信号光接收功率的实际曲线,如图 11 所示。

当利用多体制兼容相干探测技术对 1 Gbit/s 通信

速率的 OOK 信号光进行相干解调时,在信号光功率为 -54.6 dBm 时取得了 10^{-3} 的误码率,其接收灵敏度距离散粒噪声极限 3.3 dB;当通过利用多体制兼容相干探测技术对 1 Gbit/s 通信速率的 BPSK 信号光进行相干解调时,在信号光功率为 -57.95 dBm 时取得了 10^{-3} 的误码率,距离散粒噪声极限 4.2 dB。误码率选择 10^{-3} 的原因:在编码方式上通过增强型前向纠错技术(FEC)可以将误码率减至 10^{-9} 甚至更低,但所付出的代价不大^[19]。

多体制兼容相干探测技术对于 OOK 信号的接收灵敏度距离散粒噪声极限 3.3 dB,主要原因有:所用

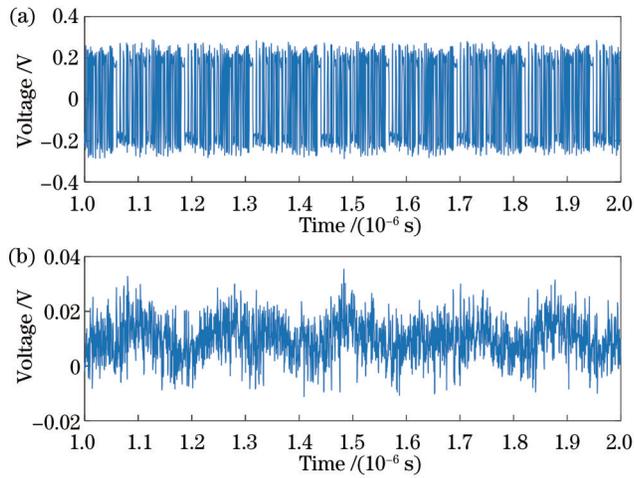


图 10 相干 BPSK 的载波恢复后波形。(a) 信号实部; (b) 信号虚部

Fig. 10 Waveform of coherent BPSK after carrier recovery.

(a) Real part of the signal; (b) imaginary part of the signal

探测器的响应度为 0.85 A/W, 当量子效率为 1 时在 1550 nm 波段有理想响应度 (1.25 A/W), 该响应度会引起 1.67 dB 的损失; 2×4 90° 桥接器的输出端与探测器光纤之间存在一个连接法兰, 这会引起 0.3 dB 的损失; 剩余 1.33 dB 损失的来源可能包括探测器 (探测器窗口存在透过率, 会损失一部分能量)、外差接收机 (接收效率非理想值) 以及 ADC (量化损失) 等。采用多体

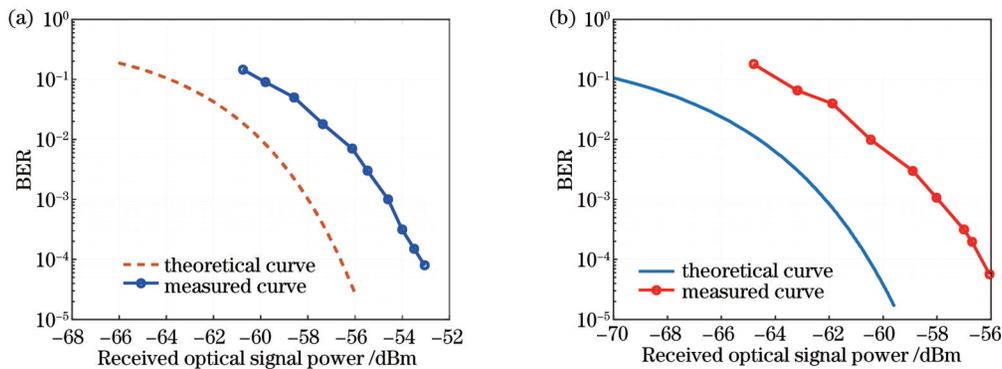


图 11 通信速率为 1 Gbit/s 的 OOK、BPSK 相干接收误码率与接收功率的实测曲线与理论曲线。(a) OOK; (b) BPSK

Fig. 11 Measured and theoretical curves of OOK and BPSK coherent receiving BER and receiving power with communication rate of 1 Gbit/s. (a) OOK; (b) BPSK

参 考 文 献

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [2] Oppenhaus G, Wittig M E. European SILEX project: concept, performance, status, and planning[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1218: 27-37.
- [3] Tolker-Nielsen T, Oppenhaus G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- [4] Fields R, Lunde C, Wong R, et al. NFIRE-to-TerraSAR-X laser communication results: satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7330: 73300Q.
- [5] Ando T, Haraguchi E, Tajima K, et al. Coherent homodyne receiver with a compensator of Doppler shifts for inter orbit optical communication[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7923: 79230J.
- [6] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710S.
- [7] Yamakawa S, Chishiki Y, Sasaki Y, et al. JAXA's optical data relay satellite programme[C]//2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, October 26-28, 2015, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [8] Chen W B, Sun J F, Hou X, et al. 5.12 Gbps optical communication link between LEO satellite and ground station

制兼容相干探测技术对于 BPSK 信号的接收灵敏度距离散粒噪声极限 4.2 dB, 相较于 OOK 信号接收灵敏度与散粒噪声极限的距离多出 0.9 dB, 出现该损失的原因可能是当信号光功率极低时, 信噪比很小, 导致相位差计算不准确, 从而引入锁相误差。

4 结 论

实验搭建了卫星激光通信多体制兼容相干探测装置, 并给出了相应的解调算法与离线处理手段, 完成了兼容 OOK 以及 BPSK 两种调制格式信号光的多体制相干解调。当通信速率为 1 Gbit/s 且误码率为 10^{-3} 时, 多体制兼容相干探测装置对于 OOK 信号的接收灵敏度仅距散粒噪声极限 3.3 dB, 对于 BPSK 信号的接收灵敏度仅距散粒噪声极限 4.2 dB, 实现了高灵敏度、多体制的相干接收。值得一提的是, 相干 OOK 的一个优势在于, 在 PSK 相干通信系统中, 当载波恢复算法或者锁相环由于某些原因无法实现载波同步时, OOK 的相干接收可以作为一个重要的备用手段, 灵敏度损失不大。另外, 多体制兼容并不局限于 OOK 与 BPSK, 对于 QPSK 调制信号, 只需要将消除通信项的平方运算改为四次方运算即可, 载波同步后 I、Q 两路信号均变为基带数据。多体制兼容的相干接收技术可以显著提升未来卫星激光通信网络的灵活性与交互性, 因此具有重要意义。

- [C]/2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, November 14-16, 2017, Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 260-263.
- [9] Becker D, Wree C, Mohr D, et al. Unpre-amplified heterodyne detection of 10 Gb/s NRZ-OOK with high receiver sensitivity [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6353: 63532Z.
- [10] 刘亮, 吴琳, 张帆, 等. 差分相移键控和开关键控信号的混合传输实验[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 676-680.
Liu L, Wu L, Zhang F, et al. Experimental study of the hybrid transmission of 42.8 Gb/s differential phase shift keying and 9.95 Gb/s on-off keying signal[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 676-680.
- [11] 张若凡, 张文睿, 张学娇, 等. 高轨卫星激光中继链路研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500001.
Zhang R F, Zhang W R, Zhang X J, et al. Research status and development trend of high earth orbit satellite laser relay links[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500001.
- [12] 王宝鹏, 余锦, 王云哲, 等. 大气激光通信强度调制技术差错性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230604.
Wang B P, Yu J, Wang Y Z, et al. Error-performance study of intensity modulation technology in atmospheric laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230604.
- [13] 李彬, 雷宏杰, 靳文华, 等. 相干探测系统最佳本振光功率测量方法[J]. 光子学报, 2021, 50(10): 1004005.
Li B, Lei H J, Jin W H, et al. Approach for measuring the optimal local optical power of coherent detection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10): 1004005.
- [14] Fong T K, Sabido D J M, Kalman R F, et al. Linewidth-insensitive coherent AM optical links: design, performance, and potential applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(3): 526-534.
- [15] 徐文婧, 李岩, 刘宇喏, 等. 相干光通信载波相位恢复算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1206002.
Xu W J, Li Y, Liu Y Y, et al. Carrier phase recovery algorithm for coherent optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1206002.
- [16] Okoshi T. Heterodyne and coherent optical fiber communications: recent progress[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(8): 1138-1149.
- [17] Kikuchi K. Fundamentals of coherent optical fiber communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 157-179.
- [18] 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.
Yang S J, Ke X Z. Carrier frequency stability control in coherent optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 040601.
- [19] 吴琳, 刘亮, 张帆, 等. 高速率差分相移键控信号的长距离传输实验[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 54-58.
Wu L, Liu L, Zhang F, et al. Experimental study of high-speed differential phase-shift keying signal long-haul transmission[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 54-58.

Multi-System Compatible Coherent Detection Technology of Satellite Laser Communication

Ren Weijie^{1,2**}, Sun Jianfeng^{3*}, Zhou Yu³, Lu Zhiyong¹, Cong Haisheng^{1,2}, Jiang Yuxin^{1,2},
Li Chaoyang¹, Zhang Longkun¹, Xu Lingling^{1,2}

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Laboratory of Space Laser Engineering, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract

Objective In the satellite coherent laser communication system, the signal modulation format is mainly phase-shift keying (PSK), which is not compatible with the coherent reception of on-off keying (OOK). In view of the problem that the satellite coherent optical communication receiver is incompatible with various modulation formats, a coherent communication receiver compatible with OOK and binary PSK (BPSK) is built experimentally. At the communication rate of 1 Gbit/s, when the modulation format is OOK, and the signal optical power is -54.6 dBm, the bit error rate (BER) is 10^{-3} , and there is a distance of 3.3 dB from the shot noise limit; when the modulation format is BPSK, and the signal optical power is -57.95 dBm, the BER is 10^{-3} , and there is a distance of 4.2 dB from the shot noise limit. The multi-system compatible coherent receiver shares a common structure with many coherent receiver hardware at present and has high receiving sensitivity. It verifies the feasibility of the multi-system compatible technology of satellite coherent laser communication and is of great significance.

Methods As the current mainstream satellite communication modulation formats, BPSK and OOK will exist for a long time. Therefore, this paper experimentally builds a coherent receiver compatible with OOK and BPSK. Firstly, the optimal local optical power of the balanced detector used in this experiment is measured by the experimental setup shown in

Fig. 4. When the optical modulation format of the signal is OOK, the in-phase (I) and quadrature (Q) signals are firstly complexed, then the modulus of the complex signal is calculated, and finally the threshold judgment method is used for verification. When the optical modulation format of the signal is BPSK, the real-time carrier phase difference is calculated by the complex digitization and IQ arctangent method, and the baseband signal can be obtained after the carrier recovery of the BPSK signal. The demodulation of the overall signal relies on offline processing, and Fig. 8 shows the specific flow of offline processing.

Results and Discussions After the experiment in Fig. 4, we finally set 12.8 mW as the optimal optical power of the local oscillator in this experiment. In this paper, when the optical frequency of the local oscillator and the signal is small, the high-speed oscilloscope is used to demodulate the OOK signal. The recovered baseband signal and eye diagram are shown in Fig. 7. When the optical power of the signal close to the shot noise limit is measured, the BER is calculated through offline processing. When the signal optical modulation format is BPSK, the baseband signal will be recovered, and the BER will be calculated after the I and Q signals are directly collected for offline processing. In this experiment, the communication rates of OOK and BPSK are both 1 Gbit/s. With the multi-system compatible coherent detection technology applied, the receiving sensitivity of the OOK signal is 3.3 dB away from the shot noise limit. The main reasons are as follows. The responsivity of the detector used is 0.85 A/W, and the ideal responsivity is 1.25 A/W when the quantum efficiency is 1 in the 1550 nm band, which will cause a loss of 1.67 dB. The output of the optical 90° bridge goes into the detector fiber, and there is a connection flange, which will cause a loss of 0.3 dB. The remaining loss of 1.33 dB may be caused by the following reasons: energy lost due to the transmittance of the detector window, imperfect heterodyne efficiency, and ADC quantization loss. With the help of the multi-system compatible coherent detection technology, the receiving sensitivity of the BPSK signal is 4.2 dB away from the shot noise limit, which is 0.9 dB higher than the distance between the receiving sensitivity of the OOK signal and the shot noise limit. The loss may be caused by an inaccurate phase-locking error from the inaccurate phase difference calculation at a low signal-to-noise ratio due to an extremely low signal optical power.

Conclusions In this paper, a multi-system compatible coherent detection device for satellite laser communication is built experimentally, and the corresponding demodulation algorithm and offline processing method are given. When the communication rate is 1 Gbit/s, and the BER is 10^{-3} , the receiving sensitivity of the multi-system compatible coherent detection device is only 3.3 dB away from the shot noise limit for the OOK signal, and that for the BPSK signal is only 4.2 dB away from the shot noise limit, which realizes high-sensitivity and multi-system coherent reception. It is worth mentioning that an advantage of coherent OOK is that in the PSK coherent communication system, when the carrier recovery algorithm or the phase-locked loop cannot achieve carrier synchronization for some reason, the coherent reception of OOK can be used as an important alternative method, with only a slight loss of sensitivity. In addition, multi-system compatibility is not limited to OOK and BPSK. For quadrature PSK (QPSK) modulated signals, we only need to change the square operation of eliminating the communication term to the fourth power operation. After carrier synchronization, both I and Q signals become baseband data. Multi-system compatible coherent reception can greatly improve the flexibility and interactivity of satellite laser communication networks in the future, so it is of great significance.

Key words optical communications; multi-system compatibility; intradyne detection; on-off keying (OOK); phase-shift keying (PSK)