

# 空间激光通信调制技术的研究进展

李金铖<sup>1,2</sup>, 罗 辉<sup>1,2</sup>, 吴晗平<sup>✉1,2</sup>

(1 武汉工程大学光电信息与能源工程学院 武汉 430205

2 武汉工程大学光电子系统技术研究所 武汉 430205)

**摘要:** 空间激光通信系统具有传输速率高、体积小、质量轻、功耗低等特点,适用于卫星高速数据传输。激光通信调制技术作为空间激光通信系统的一项关键技术,是影响系统通信性能的主要因素之一。首先,介绍空间激光通信调制技术的原理及其分类,并对其优缺点做比较分析,再对激光调制的关键技术进行阐述;然后,从发展阶段与应用环境角度对国内外已报道的空间激光通信调制技术研究进展进行总结;最后,对空间激光通信调制技术的发展趋势进行展望。

**关键词:** 空间激光通信系统; 激光调制; 发展趋势

中图分类号: V443+.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)03-0044-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210629001

引用格式: 李金铖, 罗辉, 吴晗平. 空间激光通信调制技术的研究进展[J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 44-53.

## Research progress of modulation technology for space laser communication

LI Jincheng<sup>1,2</sup>, LUO Hui<sup>1,2</sup>, WU Hanping<sup>1,2</sup>

(1. School of Optoelectronic Information and Energy Engineering of WIT, Wuhan 430205, China;

2. Institute of Optoelectronics Technology of WIT, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** Space laser communication system has the characteristics of high transmission rate, small volume, light weight and low power consumption, which is suitable for satellite high-speed data transmission. As key technology of space laser communication system, laser modulation is one of the main factors affecting its communication performance. This article first introduces the principle and classification of various space laser communication modulation techniques, and makes a comparative analysis of their advantages and disadvantages, and then elaborates the key technologies of laser modulation. Finally, from the perspective of development stage and application environment, the research progress of the existing reported space laser communication modulation technology at home and abroad is summarized, and the development trend of space laser communication modulation technology is prospected.

**Key words:** Space laser communication system; Laser modulation; Development trend

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20210629001

**Citation:** LI Jincheng, LUO Hui, WU Hanping. Research progress of modulation technology for space laser communication[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 44-53.

## 引 言

凡“中无所有”之处均可称为空间,即从地面直至遥远的宇宙深处的空域,称之为广义的空间<sup>[1]</sup>。经过多年探索研究,空间激光通信技术在构建空天地一体化信息网络,实现海量对地观测数据的时效传输,突破通信速率瓶颈等方面取得阶段性进展<sup>[2]</sup>。空间激光通信系统具有高速率、轻小型等特点,可作为卫星的有效载荷,其通常搭载在运动平台上,以激光器为光源,并以小束散角发射,实现高速率、远距离信息传输。

✉通信作者: 吴晗平 (wuhanping601@sina.com)

收稿日期: 2021-06-29 收修改稿日期: 2021-11-04

空间激光通信调制技术作为空间激光通信系统的一项关键性技术，可以有效地提高系统的传输速率和系统性能。本文将介绍空间激光通信调制技术的原理，从提升系统调制效率的角度考虑，详细描述各种光调制格式及其原理，并对空间激光通信系统在未来应用中的发展趋势和面临的挑战进行分析<sup>[3]</sup>。

## 1 空间激光通信调制技术原理及分类

### 1.1 空间激光通信调制技术原理

在空间激光通信系统中，激光作为信息的载体，需要将有效信息赋予到激光上。激光携带信息通过不同的传输环境传送到探测器，光接收机进行鉴别并解调携带的信息，从而实现通信。调制过程即信息加载于激光的过程。

激光的瞬时电场可表示为：

$$e_c(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) \tag{1}$$

式(1)中， $A_c$ 为振幅， $\omega_c$ 为角频率， $\varphi_c$ 为相位角。激光调制就是改变光波的某一参量，使其随调制信号的变化而改变，从而“携带”传输特定信息。

### 1.2 空间激光通信调制技术的分类

激光调制有不同的分类方式，按照载波是否连续可以分为连续式调制和脉冲式调制；按照调制信号的形式，可分为模拟信号调制和数字信号调制；按照调制方法，可分为直接调制、腔内调制和腔外调制；按照调制器与激光器的相对关系，可分为内调制和外调制；按照工作机理，可分为直接调制、磁光调制、声光调制和电光调制；按照调制的特征参数，又可分为调幅、调频、调相等。激光调制的分类方式如图 1 所示。本文主要对激光调制的特征参数进行讨论，主要包括强度调制、幅度调制、频率调制、相位调制和偏振调制，如图 2 所示。

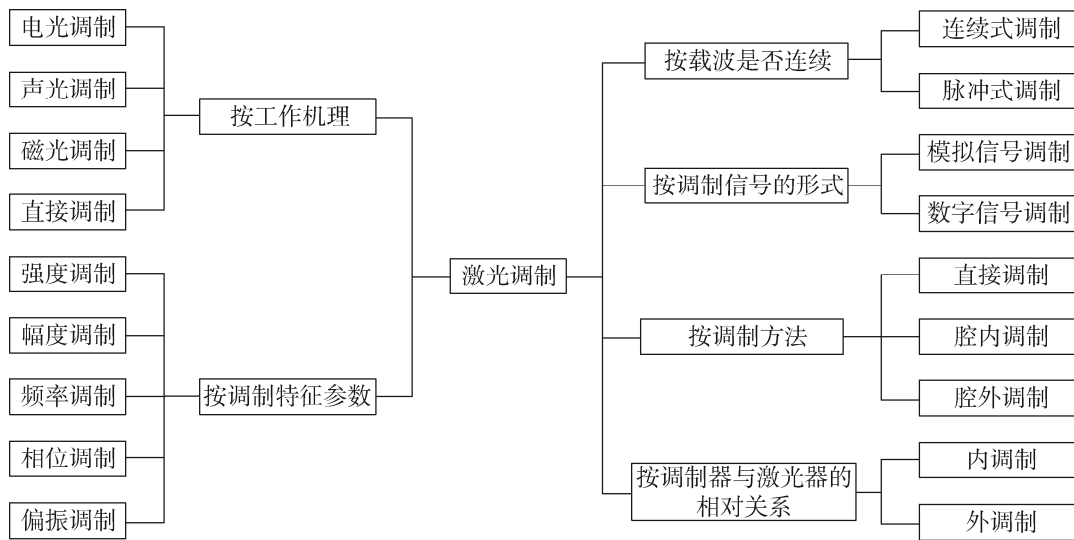


图 1 激光调制的分类方式

Fig. 1 Classification of laser modulation

#### 1.2.1 幅度调制

二进制开关键控调制 OOK (On-Off Keying)，也称为通断键控调制方式，调制原理是根据传输幅度控制传输频率。当发送幅度高时，发送载波频率，否则不传输载波频率。OOK 信号可表示为：

$$S_{OOK}(t) = A \left[ \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g_T(t - nT_b) \right] \cos \omega_c t \tag{2}$$

式 (2) 中,  $A$  为载波的脉冲幅度;  $\omega_c$  为光载波的频率;  $a_n g_T(t - nT_b)$  为开关函数。

现阶段成熟的空间激光通信系统技术体制分为非相干通信体制和相干通信体制两大类<sup>[4,5]</sup>, OOK 调制广泛应用于强度调制/直接探测 IM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection)。其显著特点是低功耗, 能产生相对较高的比特率, 但受到探测灵敏度低等因素的限制, 很难实现远距离或超高速激光通信。

### 1.2.2 时间间隙调制

数字脉冲调制 PPM (Pulse Position Modulation) 使用不间断的周期性光脉冲作为载波, 是基于时间维度的调制格式。通过调制信号来控制载波, 造成脉冲时间位置改变并传输信息。作为空间激光通信非相干通信体制的另一种方式, PPM 相比于 OOK 调制, 其平均功率较低, 具备信道抗干扰能力。适用于传输速率不高、峰值功率较大的通信系统。因此, 在早期的空间激光通信试验中, PPM 调制得到广泛运用。PPM 的类型可细分且各有优缺点。

单脉冲位置调制 LPPM 是将二进制的  $n$  位数据组映射到  $2^n$  个时隙上的某一个时隙处的单个脉冲信号。

L-PPM 的映射编码关系为:

$$\Phi: l = m_1 + 2m_2 + \dots + 2^{n-1}m_n, \quad l \in \{0, 1, \dots, n-1\} \quad (3)$$

式 (3) 中,  $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$  为  $n$  位数据组,  $l$  为时隙位置。

差分脉冲位置调制 DPPM 是在 L-PPM 基础上进行改进, 即将 PPM 信号中的高电平后的“0”时隙去掉; 多脉冲位置调制 MPPM 是将  $n$  位二进制的信息元映射为有  $M$  个时隙段上的多个脉冲; 重叠脉冲位置调制 OPPM 是将脉冲波形占的时隙分为  $w$  个时隙, 符号间隔被平均分为  $n$  个时隙, 每个时隙间隔为  $T_c$ 。几种常见的时间间隙调制方式的比较见表 1。

表 1 几种常见的时间间隙调制方式的比较

Table 1 Comparison of several common time gap modulation methods

| 调制方式  | 优缺点  |
|-------|--|
| LPPM  | 优点: 传输速率较快, 对能量的要求低, 对 LED 尤为适应。<br>缺点: 实现较为复杂。                            |
| DPPM  | 优点: 对同步要求宽松、具有较高功率利用率和频带利用率、信道占用率低。<br>缺点: 实现较为复杂、误码率较高、解调难度大、无法软判决、长连“1”。 |
| DPIM  | 优点: 调制方式易实现、传输容量大、接收端不需符号同步。<br>缺点: 差错性能略低、无法实现软判断。                        |
| MPPM  | 优点: 数据传输速率快, 对带宽的需求稍低, 可排列组合为 PPM 表征各自的传信能力。<br>缺点: 增加系统实现的复杂度。            |
| OPPM  | 优点: 能提高系统传信率。<br>缺点: 需要精确的时间定位。  |
| IDPPM | 优点: 功率利用率和带宽效率做了较好的折中, 可软判决, 易同步。<br>缺点: 收发需要缓存设置。                         |

### 1.2.3 相位调制

相位键控调制 PSK (Phase-Shift Keying) 是通过调制器将传输的信息调制在光信号的相位上, 主要可

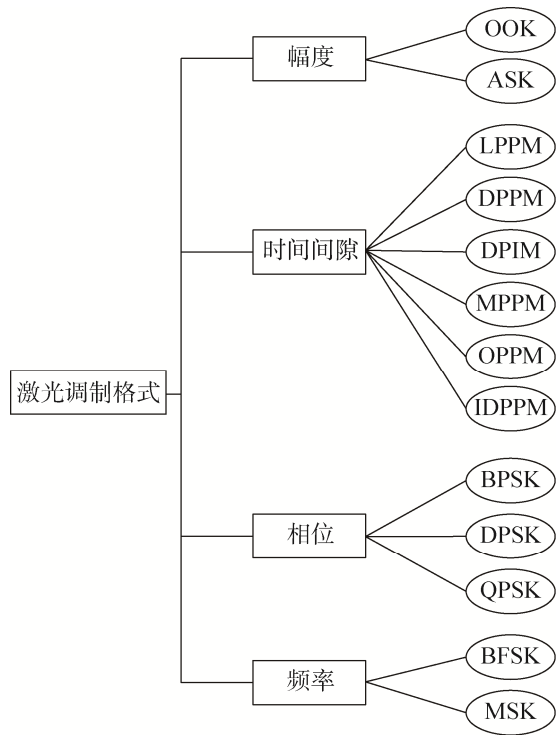


图 2 常见激光调制格式

Fig. 2 Common laser modulation formats

分为两大类：一是以未调制载波的相位为参考，利用载波相位的绝对变化传递信息的绝对相移；二是利用前后相邻码元载波相位的相对变化传递信息的相对相移。相位调制是空间激光通信系统相干通信体制的主要调制方式，主要分为二元相移键控（BPSK）、差分相移键控（DPSK）和四相相移键控（QPSK）等。

调制器输出的 BPSK 信号表示为：

$$S_{\text{BPSK}}(t) = \left[ \sum_n a_n g(t - nT_b) \right] A \cos \omega_0 t = \pm A \cos \omega_0 t \quad (4)$$

其中，码位为“1”时取正，码位为“-1”时取负。

DPSK 是为了克服 PSK 系统相位模糊问题而产生的一种调制手段，根据前后数据的相位差来判断数据信息；QPSK 是一种具有良好的抗噪特性和频带利用率的相位调制。

#### 1.2.4 频率调制

频移键控调制 FSK（Frequency Shift Keying）是利用载波频率传输信息的一种调制信息。它的优点是简单实用、抗衰弱能力较强；缺点是功率利用率差，在相同的信噪比条件下，比 PSK 占用带宽多。频移键控调制在空间激光通信系统中运用得较少，主要分为二元频移键控调制（BFSK）、多进制频移键控和最小频移键控（MSK）等。

BFSK 信号可视为两个振幅键控信号 ASK（Amplitude Shift Keying）之和，通过 ASK 信号的功率谱表达式就可求出 BFSK 信号的功率谱表达式。其功率谱表达式为：

$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \\ A \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) \end{cases} \quad (5)$$

依式（5）可知，BFSK 信号产生方法有两种：一种是用两个频率分别为  $f_1$ 、 $f_2$  的独立振荡器产生，此时载波振荡的相位  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  相互独立的；另一种是用调制信号控制一个振荡器，使其频率随“1”，“0”序列在两个  $f$  值上变化，此时载波振荡的  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  相位连续的。

MSK 是恒定包络连续相位频率调制，其信号的表达式为：

$$S_{\text{MSK}}(t) = \cos \left( \omega_c t + \frac{\pi a_k}{2T_s} t + \phi_k \right) \quad (6)$$

依式（6）可知，MSK 信号的峰值频偏为 1/4 码元速率，其调制指数为（峰值频偏×2）/码元速率。

#### 1.2.5 偏振调制

作为激光在大气信道中最稳定的传输特性，激光的偏振特性是调制技术中的研究热点。偏振调制的原理是改变“携带”信息的光的偏振状态，而进行信息传输的关键环节是激光偏振态的调制解调技术。在近地空间激光通信系统中，为了减少湍流大气中光强闪烁对光通信链路的影响，可通过将线偏振光与起偏器、检偏器结合，控制入射激光功率来实现<sup>[6]</sup>。偏振调制有多种分类，机械调制凭借机械带动偏振片、波片的旋转实现；电光调制凭借材料的电光效应实现；液晶空间光调制是基于液晶的电控双折射特性<sup>[7]</sup>；此外还有光纤调制、光弹调制等<sup>[8]</sup>。

## 2 空间激光通信调制的关键技术

激光是一种光频段的电磁波，其频率远高于一般的电磁波。激光调制能够提高空间激光通信的传输速率，同时随着光学技术的发展，激光调制技术不断取得突破，除了基础的激光调 Q 技术、锁模<sup>[9]</sup>等技术外，很多相关的调制关键技术同样得到发展，主要有：

① 自动偏置控制技术。在空间激光通信系统中，铌酸锂电光调制器得到广泛应用，其特点是低电压、插入损耗较低、传输带宽高且在复杂环境下性能稳定。然而，由于外部电场的漂移、复杂环境中温度的剧烈变化以及输入和发射射频信号的正常波动，铌酸锂电光调制器会引起铌酸锂介质的热积累效应和调制器工作点的漂移，导致发射射频信号失真，严重影响通信质量<sup>[10]</sup>。为了确保无论温度如何变化，调制器始终工作在最佳工作点，需要对铌酸锂电光调制器的偏置电压进行自动控制。其中，偏压控制电路可有效进行自动跟踪和控制直流偏压，并通过监测调制特性曲线及时调整直流偏压值，使调制器始终

在最佳工作点稳定工作, 确保最佳调制性能<sup>[11]</sup>。

② 自动增益控制技术 AGC (Automatic Gain Control)。在空间激光通信调制中, 电光调制器的增益控制是其关键技术。它的存在是为了保证电光调制器的高效运作, 保护输入驱动电信号在通信过程中可调控并不受外界的影响。自动增益控制可以控制电光调制器的驱动电压, 使电光调制器的驱动电压的增益自动地随信号强度而调整, 进而调整驱动器的增益。

③ 调制转移稳频技术。在空间激光通信过程中, 为了稳定通信质量, 避免由于外界环境改变而导致的激光波长偏移现象, 需要使用调制转移稳频技术来抑制激光波长漂移。技术思路是利用在共振频率处原子与激光会发生损耗导致信号误差, 通过激光器对其进行频率锁定<sup>[12]</sup>, 使得激光在空间中有较好的稳定频率, 获得高质量的有效信息。

④ 高阶调制技术。高阶调制可携带多个 bit 信号, 最早应用于地面光纤通信, 目的是在技术成熟稳定的情况下提高通信传输速率。由于处于高空的卫星激光通信系统, 会受到空间辐射、卫星振动等环境因素以及卫星能量、体型等资源因素的影响, 这对高阶调制技术在卫星平台上的发展和应用提出了新的要求, 需要进一步提高光电转换、信号处理等方面的能力<sup>[13]</sup>。

⑤ 非线性补偿技术。在激光调制过程中, 会发生传输信号非线性失真, 需要进行非线性补偿。可行方法包括电路预失真补偿和光线线性化补偿, 电路预失真补偿是利用反正弦函数在外调制器前构建一个反函数传输网络, 相互补偿, 使输出信号与光强之间的关系变得线性<sup>[14]</sup>。光补偿方法只需将多个结构相同的单调制器串联, 保证调制器线性化, 即可消除传输特性的三阶或高阶奇次失真。

### 3 空间激光通信系统调制技术的国内外研究现状

1960 年, 世界上第一台激光器诞生, 利用激光束作为信息载体实现宽带通信成为人们追求的目标。各国积极研究发展激光调制技术并将其应用于空间激光通信。

#### 3.1 国际发展现状

美国、欧洲、日本等国家和地区在空间激光通信调制技术的研究方面处于领先地位, 引领了全球的发展<sup>[15,16]</sup>。经过不断的试验与研究, 调制技术已经充分运用到实际工程之中, 同时也有了新的成果、新的发展<sup>[17]</sup>。国际空间激光通信调制技术的发展主要分两个阶段。

##### 3.1.1 第一阶段: 理论发展及技术创新

美国林肯实验室采用功率为 30 mW 的商用 GaAlAs 半导体激光器, 通过 FSK 调制成功实现终端-终端高码速率卫星通信的演示试验; 日本自 1998 年以来, 投入大量资源研究各种调制解调技术, 包括 ASK、FSK、PSK 等。其中, GEO-GEO 链路的试验显示: 外差 PSK 的探测灵敏度优于 20 光子每比特。

美国加州理工学院 JPL 实验室的相干光通信调制解调技术得到突破后, 重点研究幅移键控 ASK 和 PSK 调制, 以此扩充空间光通信链路的信道容量, 并在 1994 年运用 OOK 调制方式研制成功 OCD 通信端机, 具备结构简单、质量轻、功耗低等特点。

为了实现同步卫星到地面站间的星地激光通信, 德国宇航中心 DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) 和欧空局 ESA (European Space Agency) 进行合作研究。采用零差 BPSK 调制解调技术, 并于 2000 年发表文章称, 成功研制零差 BPSK 接收机, 大大降低了系统复杂性。其试验系统码速率达到 622 Mbit/s, 接收灵敏度可达 18 光子每比特, 接近 13 光子每比特的理论极限<sup>[18]</sup>。

2020 年, 针对激光通信调制存在闪变问题, Sujit Chatterje 利用比常用的 OOK 更有效的 FSK 技术设计实验装置, 得到了比 OOK 低 62% 的无闪变传输, 在 30 cm 和 480 cm 的距离下, 误码率分别比后者降低了 86.8% 和 85.3%。对于 FSK, 在倾角为 3° 时发现 BER 增加了 10%, 而对于 OOK, 仅在倾角为 1° 时就显示出了相同的误差 (100 cm 处测量), 展现了极大的进步<sup>[19]</sup>。

##### 3.1.2 第二阶段: 技术验证及在轨试验

在理论与技术得到发展与创新的基础上, 各国积极将理论落地, 开展技术验证与在轨试验。在实际设计运用中, 根据应用背景不同, 空间激光通信可分为三大类<sup>[20]</sup>: ① 星间激光通信; ② 星地激光通信;

### ③ 地面无线光网（大气激光通信）。

#### ① 星间激光通信系统<sup>[21]</sup>

2001年，世界上首个星间激光通信链路试验——半导体激光星间链路试验 SILEX（Semiconductor Laser Inter satellite Link Experiment）运用直接调制技术成功建立激光链路。数据以 50 Mbit/s 的速率从低地球轨道 LEO(Low Earth Orbit)卫星发射到地球同步轨道 GEO (Geostationary Earth Orbit) 卫星。首次实现了 OOK 调制技术在星间通信中的运用<sup>[22]</sup>。

2005年末，为了验证零差 BPSK 相干通信技术的性能，分析了解星间巨量信息的传输体制及大气信道对相干链路的影响。ARTEMIS 同日本宇航探索局 JAXA（Japan Aerospace Exploration Agency）的光学通信工程试验 OICETS（Optical Inter-orbit Communication Engineering Test Satellite）项目，利用日本 NEC 东芝空间系统公司研制的通信终端“激光利用通信设备”LUCE（Laser Utilizing Communications Equipment），进行了自由空间轨道间的激光通信试验<sup>[23]</sup>。

2002年11月，DLR 资助的项目 LCTSX 启动，将用两个终端 LCTs（Laser Communication Terminal）进行星间通信。2007年4月23日，首个通信终端搭载美国卫星 NFIRE 升空；2007年6月14日，第二个通信终端搭载德国卫星 TerraSAR-X 成功升空会师。2008年2月21日，LCTSX 采用 BPSK 调制技术进行星间通信，是国际上首次星间相干激光通信试验。此后，为了进一步提升空间通信网络的信息传输能力，加强星间激光通信的实用化，ESA 计划将星间激光通信与地面通信形成稳定链路，并制定了欧洲数据中心卫星 EDRS（European Data Relay Satellite）。

2016年1月，EDRS 的首颗卫星进入地球轨道，并以 BPSK 调制技术实现了与 LEO 卫星间的通信交流，意味着欧洲 BPSK 调制技术的成熟<sup>[24]</sup>。

#### ② 星地激光通信系统

为了实现地月之间的高速激光通信，NASA 于 2005 年委托 MIT 林肯实验室进行了月球激光通信演示验证试验 LLCD（Lunar Laser Communications Demonstration）。2013年，LLCD 通信终端成功发射升空，并在上行 20 Mbit/s 的试验中，首次实现了全程无误码传输。

2016年，日本为了在轨验证新型调制/解调方法——DPSK 调制技术，启动先进激光仪器高速通信 HICALI（High speed Communication with Advanced Laser Instrument）项目，有效促进了空间激光通信技术的发展<sup>[25,26]</sup>。

2021年，NASA 在激光通信中继演示试验计划的基础上，开展 GEO-地面站之间的双向激光通信试验，同时验证调制兼容技术，其通信制式兼容 DPSK 和 PPM<sup>[27,28]</sup>。

2023年，NASA 将进行深空探索发射“猎户座”探索飞船，目的是为了实现猎户座与地面站之间的双向通信。为了提高可靠性，信号的调制格式将选用较为成熟的 PPM 调制。其通信距离为 40 万千米，下行速率为 80 Mbit/s ~250 Mbit/s，上行速率为 20 Mbit/s<sup>[29,30]</sup>。

2024年，欧空局计划进行深空到地面的激光通信在轨试验，通信系统为深空光通信系统 DOCS（Deep-space Optical Communication System），试验目标是实现通信距离 1.5 亿千米，其中下行通信速率为 10 Mbit/s，上行为 1 kHz 正弦波，调制技术选用较为稳定高速的 16PPM。

#### ③ 地面无线光网（大气激光通信）

无线光网系统（FSO）基于大气激光传输原理建立，其优点是不受无线电干扰、功耗低和保密性好等，缺点是外界环境与气候对其影响较大<sup>[31]</sup>。为了实现稳定通信需要运用抗干扰、高稳高精度的调制技术，例如美国启用 OCD 激光通信系统，采用 OOK 调制方式，实现了较为稳定的大气激光通信，速率可达 130 Mbit/s。整体来说，地面无线光网所需要的调制技术多选用非相干/直接调制技术，如 PPM、OOK 等。

### 3.2 国内发展现状

我国空间激光通信技术的研究起步较晚，但我国科研人员奋起直追，在理论技术创新与技术试验方面同步推进，完成了多个星地链路的激光通信试验。通过大量研究与试验，实现了空间激光通信系统并

提高了其通信速率、通信距离等性能指标, 取得了良好成果。

### 3.2.1 技术创新与实验

我国各大学与研究机构反复进行多种理论与技术实验, 为实际在轨试验打下了坚实的基础。

2018 年, 长春理工大学和浙江大学合作, 采用 QPSK 技术进行空间光通信试验。在 1 km 的距离上, 其调制单路载波为 40 Gbit/s, 速率达到 120 Gbit/s<sup>[32]</sup>。不久, 在特定条件下实现了单路载波 128 Gbit/s, 速率 384 Gbit/s 的大气传输。

2020 年, 中国科学院西安光学精密机械研究所自主研发 DPSK 卫星激光通信系统, 通过了力学、热学空间环境适应性试验, 在 1 550 nm 波段、口径 100 mm 条件下, 实现了 5 Gbit/s 的通信速率<sup>[33]</sup>。

2020 年, 郑州大学激光与光电信息技术重点实验室完成了基于 FPGA 的 OOK 光通信实验, 收发电路通信距离达到 12 cm, 系统传输速率达到 3.125 Mbit/s<sup>[34]</sup>。

中国台湾国立高雄大学在调制信号安全方面取得一定的成果, 提出并论证了一个 10 Gbit/s 开关键控空间激光通信系统, 并使用偏振复用进行信号安全操作。利用两个偏振方向相互正交的偏振片, 将单个波长分离为两个正交偏振信号, 分别表示为 FSO<sub>p</sub> 和 FSO<sub>s</sub>, 而 FSO<sub>p</sub> 和 FSO<sub>s</sub> 可以作为通信系统连接的数据和干扰通道。当系统注入功率 > -30 dBm 时, 正交偏振信号 FSO<sub>p</sub> 会受到严重干扰, 以达到安全保护的目的。此外, 此系统信号可以通过 25 km 光纤链路, 支持 1 000 m 的自由空间传输长度<sup>[35]</sup>。

中国杭州电子科技大学, 受正交调制的启发提出了一种新的调制格式, 即脉冲位置调制 PPM 上的标记比调制, 利用 PPM 符号和反 PPM 符号之间的标记比差异来传递叠加信号。正交调制将非幅度调制信号叠加在曼彻斯特编码或脉冲位置调制的幅度移位键控 ASK 信号上, 允许在同一波长信道上调制具有不同比特率的两个数据流, 从而提高频谱效率<sup>[36]</sup>。

### 3.2.2 技术验证

海洋二号、墨子号、实践二十号等多颗卫星的成功发射, 对 IM/DD 通信体制、PPM、DPSK/QPSK 相干体制等空间激光通信调制技术进行了验证<sup>[37,38]</sup>。

2011 年, 成功点火升空的“海洋二号”卫星是我国首次星地激光通信试验, 在验证了 IM/DD 通信体制可行性的同时, 填补了我国调制技术及星地激光通信试验的空白<sup>[39]</sup>。

2016 年, 我国进行首次星地高速相干激光通信技术在轨试验, “墨子号”量子卫星采用兼容制式调制技术, 即上行 PPM 调制、下行 DPSK 调制, 实现了卫星与地面的双向通信传输, 其上行速率为 20 Mbit/s, 下行速率为 5.12 Gbit/s, 具备图片与视频的传输能力<sup>[40]</sup>。

2020 年, 国际首个 QPSK 相干体制的星地激光通信链路建立, 由 2019 年发射的“实践二十号”卫星与丽江光学地面站构成, 速率达到 10 Gbit/s, 即验证了 QPSK 调制的性能, 也象征我国空间激光通信技术达到了国际先进水平<sup>[41]</sup>。

空间激光通信调制技术的发展是分阶段、循序渐进的, 先经过理论突破和模拟环境实验, 最后通过实际在轨试验得到验证并走向成熟。在此基础上, 不同应用环境下的激光调制技术也是不同的。如深空远距离激光通信大多使用成熟可靠的 PPM 调制技术; 卫星与卫星之间, 需要高速率通信, 多使用相干调制或高阶调制技术。例如, 零差 BPSK 调制技术特别适用于超长距离星间高速光通信, 可以有效拓宽链路功率预算; 星地激光通信要求实现快速精确的地面站与卫星激光终端间的数据传输(主要包括 GEO、LEO 和空间站与地面站之间), 同时必须考虑大气层对激光传输的影响, 因此多使用兼容式调制技术, 如 PPM 与 DPSK 混合调制; 大气激光通信系统极易受外界环境影响, 如大气对激光的吸收与散射、大气湍流效应等, 因此常用 OOK 调制技术。

## 4 发展趋势

空间激光通信调制技术正朝着高速率、高频带利用率和高稳定性发展。通信系统将从 IM/DD 通信系统向相干光通信系统转变, 光调制器将向着轻小型化、低功耗、高可靠性方向发展。在此基础上, 空间激光通信调制技术还有以下发展趋势:

① 基本调制格式上进行创新。其中, 偏振调制技术是星地激光通信的一个发展方向, 目前在空间激光通信中没有系统地应用。该技术通过调制器对传输的光信号偏振态信息进行调制, 其新型光调制格式包括比特间插偏振调制、双二进制偏振位移键控调制等<sup>[42]</sup>。除此之外, 可以根据激光的传输特性在空间激光通信领域进行深层次开发研究。

② 各领域新兴技术与调制技术相结合。航天科学与工业研究所根据激光束具有良好的方向性和较低的发散度的特点, 将飞秒激光时频传输技术与调制解调技术相结合, 取得了新进展, 极大地提高了接收端的信号质量和时频传输精度<sup>[43]</sup>。同样, 生化环材等各领域技术的不断创新都可进行借鉴引用, 来推动空间激光通信调制技术的发展。

③ 硬件上可进行阵列式排列。为了使空间激光通信系统实现高精度、快速度的通信传输, 可以在硬件方面优化设计。例如, 阵列激光信息传输是通过激光器进行不同频率的调制信号来实现的。可利用硬件电路产生不同频率的多路调制波信号, 驱动多个半导体激光器同时发射激光, 形成集合多路调制光的混合光, 在一定的条件下可实现终端单点对多点的通信传输<sup>[44]</sup>。

④ 激光通信混合式调制。随着通信系统对带宽、功率和误码性能的要求不断提高, 传统上独立地基于幅度、频率、时间、相位和偏振态的各种调制方法有其局限性, 已无法满足通信要求。将多种调制方式相结合, 逐渐成为研究热点<sup>[45]</sup>, 产生的多维混合调制方式可以有效提高空间激光通信系统的性能, 如 PM-QPSK 等混合调制的不断创新。

⑤ 光源空间调制。在空间激光通信过程中, 难免出现大气湍流等湍流效应, 破坏激光载波的信息, 导致通信质量降低。为了提升大气湍流信道中激光通信质量问题, 对光源进行空间调制得到高质量新型光束, 如涡旋光束。通过调制获得具有高信噪比、大接受能量、高螺旋谱模式纯度等传输特性的涡旋光束。

## 5 结束语

空间激光通信系统作为我国空天地一体化信息网络中的重要组成部分, 具有十分广阔的应用前景。其中, 具有高稳定性和抗辐射性、高调制效率和低误差矢量幅度的调制技术是该系统的研究热点之一。在今后的工作中, 调制技术需要进一步研究, 主要包括以下几个方面:

① 一对多、多制式兼容调制。单目标到多目标的多制式兼容通信是极具价值的发展方向, 由于单目标到多目标, 端点式“点-线-面”通信极大地减少了调制通信终端的数量, 提高了通信系统的兼容性和可靠性。多制式兼容调制通过结合多种调制手段, 根据不同通信环境选择调制技术, 有效提高了系统通信速率, 节约了环境成本和资源成本, 有利于实现空间激光通信系统的规模化。

② 进一步发展星上高阶调制技术。空间激光通信对数据传输速率的要求越来越高, 使用更高阶的调制方式是一种有效的方法。但对于高阶的调制技术来说, 为了获得高质量的通信, 对误差向量幅度的要求也更高, 但实际操作中比较难实现。因此须统筹考虑, 在提高激光通信系统性能的同时也得考虑实际制造上的难度。

③ 产品化设计。随着对高速空间三维通信网络进行不断的建设, 很多商用卫星星座和高速卫星数据中继通信系统也得到了发展, 社会对空间激光通信的需求有所提高。面对新的契机, 在对系统进行设计时, 要在保证系统性能优化的前提下, 降低调制系统的成本, 为实现产品化做好准备。

## 参考文献

- [1] 姜会林, 佟首峰, 张立中. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] 谢小平, 高铎瑞, 汪伟, 等. 星载空间激光通信系统设计与实现[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 577-584.  
XIE Xiaoping, GAO Duorui, WANG Wei, et al. Design and realization of satellite-borne space laser communication system[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 577-584.
- [3] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 519-531.  
WU Jing, WU Hanping, HUANG Junbin, et al. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. Chinese Journal of Optics, 2014, 7(4): 519-531.



- [4] ZHANG T, MAO S, FU Q, et al. Networking optical antenna of space laser communication[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017(29): 012013.
- [5] FU Q, LIU X, JIANG H, et al. The network and transmission of based on the principle of laser multipoint communication[C]// *SPIE*, 2014, 9300: 930029.
- [6] 陈曦. 基于液晶的激光偏振参数调制与解调技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [7] 荣健, 胡渝. 空间卫星光通信链路关键技术与方案的研究[J]. *西南交通大学学报*, 2003, 4(2): 220–222.  
RONG Jian, HU Yu. Key technology and schemes of optical communication between GEO and LEO[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003, 4(2): 220–222.
- [8] 曾爱军, 王向朝, 董作人, 等. 光弹调制器在偏振方向调制中的应用[J]. *中国激光*, 2005, 4(8): 1063–1067.  
ZENG Aijun, WANG Xiangzhao, DONG Zuoren, et al. Application of photoelastic modulator in modulation of polarization direction[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 4(8): 1063–1067.
- [9] 毛小洁, 秘国江, 朱相帮, 等. 高峰值功率主动-主动瞬态锁模激光技术研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(7): 728–730.  
MAO Xiaojie, MI Guojiang, ZHU Xiangbang, et al. Research on high peak power active-actvetransient mode-locked pulsed laser[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(7): 728–730.
- [10] 周鹏威, 卢田, 吕晋阳. 导频自适应的电光调制器激光脉冲调制技术[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 35–41.  
ZHOU Pengwei, LU Tian, LÜ Jinyang. Dither-adaptive laser pulse modulation technique for electro-optic modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 35–41.
- [11] 王贝贝. 集成光调制及其片上驱动技术的研究与实现[D]. 桂林: 广西师范大学, 2020.
- [12] 周航. 激光稳频中的电光调制器及其相关效应研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [13] 高铎瑞, 谢壮, 马榕, 等. 卫星激光通信发展现状与趋势分析(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(4): 0406001.  
GAO Duorui, XIE Zhuang, MA Rong, et al. Development current status and trend analysis of satellite laser communication (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0406001.
- [14] 胡彬, 朱少林, 岑少忠, 等. 外调制光发射机非线性补偿技术研究[J]. *光通信技术*, 2014, 38(2): 41–43.  
HU Bin, ZHU Shaolin, CEN Shaozhong, et al. Research on the compensation of non-linear techniques of external modulation optic transmitter[J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 38(2): 41–43.
- [15] GREGORY M, HEINE F, KÄMPFNER H, et al. TESAT laser communication terminal performance results on 5.6 Gbit coherent inter satellite and satellite to ground links[C]// *International Conference on Space Optics—ICSO 2010*, International Society for Optics and Photonics, 2017, 10565: 105651F.
- [16] WILSON K E. An overview of the GOLD experiment between the ETS -VI satellite and the table mountain facility[R]. *The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report*, 1996: 8–19.
- [17] 刘向南, 李春才, 李晓亮, 等. 天地一体化信息网络空间激光通信新技术[J]. *遥测遥控*, 2019, 40(1): 1–7.  
LIU Xiangnan, LI Chuncai, LI Xiaoliang, et al. New technologies of space laser communication for the space-ground integrated information network[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2019, 40(1): 1–7.
- [18] 谭庆贵, 李小军, 胡渝, 等. 卫星相干光通信原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
- [19] CHATTERJEE S, TIRU B. Development of a visible light communication system for reducing flicker in low data rate requirement[J]. *International Journal of Nanoparticles*, 2020, 12(1/2): 59.
- [20] 于思源, 马晶, 谭立英. 自由空间激光通信技术发展趋势分析[J]. *光通信技术*, 2004, 4(12): 47–50.
- [21] 王燕, 陈培永, 宋义伟, 等. 国外空间激光通信技术的发展现状与趋势[J]. *飞控与探测*, 2019, 2(1): 8–16.  
WANG Yan, CHEN Peiyong, SONG Yiwei, et al. Progress on the development and trend of overseas space laser communication technology[J]. *Flight Control & Detection*, 2019, 2(1): 8–16.
- [22] NIELSEN Tolker Toni, OPPENHAEUSER Gotthard. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. *Proc Spie*, 2002, 4635: 1–15.
- [23] JONO T, TAKAYAMA Y, OHINATA K, et al. Demonstrations of ARTEMIS-OICETS inter-satellite laser communications[C] // *24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference*, San Diego, CA, USA, 2006.
- [24] HAUSCHILDT H, GALLOU N L, MEZZASOMA S, et al. Global quasi-real-time-services back to Europe: EDRS Global[C]// *International Conference on Space Optics—ICSO 2018*, 2019.
- [25] AKIOKA M, KUBO-OKA T, SUZUKI K, et al. Development of a breadboard model of space laser communication terminal for optical feder links from Geo[C]// *International Conference on Space Optics*, 2016.
- [26] KUBO-OKA T, KUNIMORI H, SUZUKI K, et al. Development of "HICALI": high speed optical feeder link system between GEO and ground [C]// *International Conference on Space Optics—ICSO 2018*, 2019.

- [27] EDWARDS B. Overview of the laser communications relay demonstration project [M]. Space Ops, 2012.
- [28] KRAINAK M A, LUZHANSKIY E, LI S X, et al. A dual format communication modem development for the Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) program[C]// Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXV, International Society for Optics and Photonics, 2013, 8610: 86100K.
- [29] ROBINSON B S, SHIH T, KHATRI F I, et al. Laser communications for human space exploration in cislunar space: ILLUMA-T and O2O[C]// Free -Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXX , International Society for Optics and Photonics, 2018, 10524: 105240S.
- [30] SEAS A A, ROBINSON B, SHIH T, et al. Optical communication activities through the Laser-Enhanced Mission Communications Navigation and Operational Services (LEMNOS) office[R]. 2018.
- [31] 吴晗平. 光电系统环境与可靠性工程技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.  
WU Hanping. Optoelectronic system environment and reliability engineering technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [32] GAO S M, FENG S L, WU Z H, et al. 120 Gb/s high-speed WDM-QPSK free-space optical transmission through a 1 km atmospheric channel [J]. Electronics Letters, 2018, 54(18): 1082–1084.
- [33] 吴晗平. 光电系统设计: 方法、实用技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [34] 王许浦, 孙晓红, 薛琦. 基于FPGA的OOK可见光通信系统仿真与实现[J]. 现代电子技术, 2020, 43(17): 25–28, 33.  
WANG Xupu, SUN Xiaohong, XUE Qi. Simulation and realization of FPGA-based OOK in visible light communication system[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(17): 25–28, 33.
- [35] YE H C H, CHANG Y J, CHOW C W, et al. Utilizing polarization-multiplexing for free space optical communication transmission with security operation[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 52: 101992.
- [36] LU Y, LI X G, PANG X D, et al. Mark ratio modulation over pulse position modulation[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 57.
- [37] 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207–217.  
JIANG Huilin, AN Yan, ZHANG Yalin, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2015, 34(3): 207–217.
- [38] 邱学雷. 铺就漫漫“天光路”—记我国首次星地激光通信试验[J]. 国防科技工业, 2012(3): 18–19.
- [39] 吴应明, 刘兴, 罗广军, 等. 空间光通信网络技术的研究进展及架构体系[J]. 光通信技术, 2017, 11(12): 46–49.  
WU Yingming, LIU Xing, LUO Guangjun, et al. Research progress and structure system of space optical communication network technology[J]. Optical Communication Technology, 2017, 11(12): 46–49.
- [40] 任建迎, 孙华燕, 张来线, 等. 空间激光通信发展现状及组网新方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 143–150.  
REN Jianying, SUN Huayan, ZHANG Laixian, et al. Development status of space laser communication and new method of networking[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 143–150.
- [41] 崔岳, 唐勇. 实践二十号卫星在轨核心试验全部完成[J]. 国际太空, 2020, (7): 38–41.
- [42] LIU X J, DING M, LI Y, et al. Transverse relaxation determination based on light polarization modulation for spin-exchange relaxation free atomic magnetometer[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(7): 311–316.
- [43] 张来线, 孙华燕, 樊桂花, 等. 猫眼逆向调制自由空间激光通信技术的进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 681–691.  
ZHANG Laixian, SUN Huayan, FAN Guihua, et al. Progress in free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector[J]. Chinese Journal of Optics, 2013, 6(5): 681–691.
- [44] 刘丹, 刘智, 王璞瑶, 等. 一种大气激光通信系统抗干扰调制/解调技术[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 141–147.  
LIU Dan, LIU Zhi, WANG Puyao, et al. Anti-jamming modulation/demodulation technology of atmospheric laser communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7): 141–147.
- [45] 陈仁杰. 无线光通信混合调制解调技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

#### [作者简介]

李金铖 1996年生, 硕士研究生, 主要研究方向为空间激光通信技术。

罗 辉 1993年生, 硕士研究生, 主要研究方向为紫外通信光电信号处理。

吴晗平 1964年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电系统总体技术与设计、红外与紫外技术、自由空间非可见光通信、图像处理与目标识别等。