

# 激光频率波动对内差相干通信载波 恢复性能的影响分析\*

杨成武, 谌 明, 刘向南, 蒋培文  
(北京遥测技术研究所 北京 100094)

**摘要:** 搭建内差相干激光通信系统频率波动模型, 对比分析 BPSK 和 QPSK 两种信号在不同频率波动条件下和 Viterbi-Viterbi 滤波器长度时的载波恢复性能。结果表明, 当系统的工作状态稳定后, 在激光频率波动幅度和波动频率较小时, 两种信号的光信噪比损失平均值均小于 0.5dB; 随着波动幅度和波动频率的逐渐增大, Viterbi-Viterbi 滤波器的长度越大, 光信噪比损失就越严重。当 Viterbi-Viterbi 滤波器长度分别为 7 和 11 时, 两种信号载波恢复性能良好。此时, BPSK 信号由波动幅度引起的光信噪比损失平均值分别为 0.11dB 和 0.16dB, 由波动频率引起的光信噪比损失平均值均为 0.15dB。而 QPSK 信号由波动幅度引起的光信噪比损失平均值分别为 1.7dB 和 2.9dB, 由波动频率引起的光信噪比损失平均值均为 0.8dB。因此, 对于相同的 Viterbi-Viterbi 滤波器长度、波动幅度和波动频率, BPSK 信号的抑制激光频率波动能力优于 QPSK 信号。

**关键词:** 相干激光通信; 激光频率波动; 内差; 载波恢复

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)01-0026-05

## Analysis of influence of laser frequency fluctuations on carrier recovery performance in intradyne coherent laser communication

YANG Chengwu, CHEN Ming, LIU Xiangnan, JIANG Peiwen  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The intradyne coherent laser communication system with laser frequency fluctuations model is built, and the carrier recovery performance of BPSK and QPSK signals with different laser frequency fluctuation and Viterbi-Viterbi filter lengths are compared and analyzed. It shows that when system is stable, the optical signal-to-noise ratio(OSNR) penalty of two signals is less than 0.5dB at the slight fluctuation amplitude and fluctuation frequency. As the fluctuation amplitude and frequency increase gradually, the OSNR penalty is increasing as the Viterbi-Viterbi filter length values increase. When Viterbi-Viterbi filter lengths are 7 and 11, the two kinds of signals show high performance. For BPSK signals, the average of OSNR penalties caused by fluctuation amplitude are 0.11dB and 0.16dB respectively, and the average of OSNR penalties are both 0.15dB caused by fluctuation frequency. At the same time, for QPSK signal, the average of OSNR penalties caused by fluctuation amplitude are 1.7dB and 2.9dB respectively, and the average of OSNR penalties are both 0.8dB caused by fluctuation frequency. Therefore, for the same Viterbi-Viterbi filter length and fluctuation, the ability of BPSK signal to suppress laser frequency fluctuations is better than that of QPSK signal.

**Key words:** Coherent laser communication; Laser frequency fluctuations; Intradyne; Carrier recovery

## 引 言

相干激光通信具有通信速率高、抗背景光干扰能力强、接收灵敏度高等特点, 是构建天基高速信息网络的主要技术途径之一<sup>[1,2]</sup>。近些年来, 空间相干激光通信技术发展迅速, 特别是 2008 年, 德国低轨卫星 TerraSAR-X 和美国低轨卫星 NFIRE 之间成功进行了世界上首次星间相干激光通信试验, 采用 BPSK 调制零差相干探测体制, 通信速率为 5.625Gbit/s, 代表了目前星间激光通信的最高技术水平, 标志着卫

星高速通信时代的到来<sup>[3]</sup>。我国紧追国外技术发展步伐,先后开展了墨子号和实践二十号卫星星地高速相干激光通信在轨试验,通信速率分别达到了 5.12Gbit/s 和 10Gbit/s<sup>[4,5]</sup>。然而,受限于星载平台搭载条件、高速模数转换器(ADC)采样率以及技术实现复杂度和稳定性等综合因素,如何在提升星间相干激光通信速率、获得高接收灵敏度的同时,降低相干激光通信终端的技术复杂度以及满足软硬件资源需求仍是当前星间激光通信工程应用面临的主要问题之一。

目前,常用的空间相干激光通信体制主要有外差探测和零差探测两种方式。其中,外差探测对 ADC 采样率的需求很大,不适用于 10Gbit/s 及以上的高速通信应用场景;零差探测虽然降低了对 ADC 采样率的需求,但是其接收系统复杂,需要采用光学锁相环,对激光器线宽及频率稳定性要求高,技术实现难度大、稳定性差<sup>[6]</sup>。针对上述问题,研究人员开始寻找新的相干激光通信技术途径,并将研究重点逐渐转向内差探测。内差相干激光接收技术的概念最早是由 Frowin Derr<sup>[7]</sup>提出的,近年来引起了研究人员的广泛关注。其中,Semjon Schaefer 等人于 2016 年开展了星间内差相干激光通信的桌面测试验证,对 BPSK、QPSK 和 8PSK 三种调制信号的内差相干接收性能进行了比较分析,指出了内差相干激光通信应用于星间链路的可行性和潜力<sup>[8]</sup>。然而,目前关于激光频率波动对内差相干激光通信载波恢复性能影响的研究较少。针对上述问题,本文开展了激光频率波动对内差相干激光通信载波恢复性能影响分析。

## 1 内差相干激光通信系统模型

以星间内差相干激光通信链路应用为例,其模型如图 1 所示。在发射端,由窄线宽信号激光器产生的激光作为载波,经过电光调制器调制为 BPSK 或 QPSK 等码型信号,调制后的光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大并由发射天线发送至自由空间信道。经过星间链路传输后,接收端由接收天线接收到的光信号经窄带光滤波器滤除部分背景光噪声,随后信号光与本振光在  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  光混频器中进行混频后输出的 4 路光信号经平衡探测后转换为 2 路电信号(同相 I 路和正交 Q 路电信号)。最后由 ADC 对两路电信号进行模数转换并送入 DSP 数据处理单元,在电域完成对激光通信信号的处理。

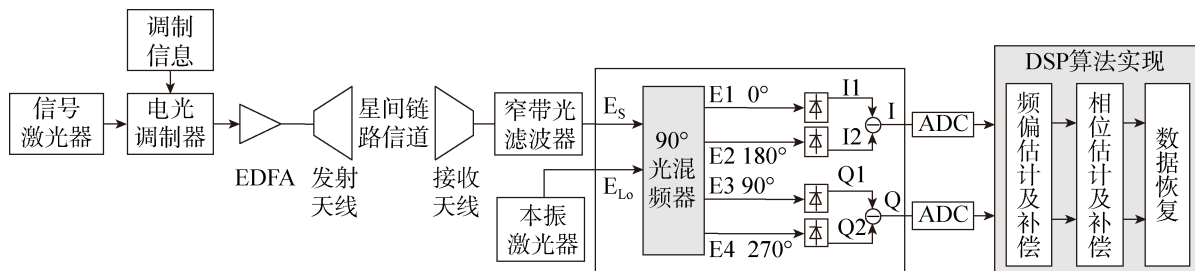


图 1 星间内差相干激光通信链路模型

Fig. 1 Inter-satellite intradyne coherent laser communication model

在上述过程中,入射至相干激光接收机的信号光  $E_s$  与本振激光器产生的本振信号  $E_{Lo}$  进行  $4 \times 90^\circ$  光混频后得到 4 路光输出信号  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  和  $E_4$ , 然后进入平衡探测器,获得的 I 路电流信号  $I(t)$  和 Q 路电流信号  $Q(t)$  分别为

$$I(t) = 2R\sqrt{P_s P_{Lo}} \cos\{\theta_s(t) + 2\pi f_o t + \Delta\Omega + \theta_n(t)\} \quad (1)$$

$$Q(t) = 2R\sqrt{P_s P_{Lo}} \sin\{\theta_s(t) + 2\pi f_o t + \Delta\Omega + \theta_n(t)\} \quad (2)$$

式中,  $R$  为响应度,  $P_s$ 、 $P_{Lo}$  分别为信号光功率和本振光功率。 $\theta_s(t)$  为调制信号的相位信息,对于 QPSK 信号,  $\theta_s(t) \in \{\pm\pi/4, \pm3\pi/4\}$ ; 对于 BPSK 信号,  $\theta_s(t) \in \{0, \pi\}$ 。 $f_o$  是信号光与本振光的差拍频率,在内差相干激光通信系统中,  $f_o$  小于信号带宽  $B$ 。 $\Delta\Omega$  为等效相位变化量。 $\theta_n(t)$  是由本振激光器产生的相位噪声,通常用 Winner 过程来描述,可以表示为

$$\theta_n(t) = \sum_{i=-\infty}^t N_i \quad (3)$$

式中,  $N_i$  代表均值为 0、方差为  $2\pi\Delta\nu T_s$  的高斯变量,  $\Delta\nu$  是本地激光器线宽,  $T_s$  为码元周期。I 路和 Q 路电流经 ADC 采样后, 到达解调端的第  $k$  个采样信号  $y(k)$  如下:

$$y(k) = A \exp(j\theta(k)) + n(k) \quad (4)$$

式中,  $n(k)$  为高斯白噪声,  $A$  和  $\theta(k)$  分别表示为

$$A = 2R\sqrt{P_s P_{Lo}} \quad (5)$$

$$\theta(k) = \theta_s(k) + 2\pi f_0 k T_s + \Delta\Omega(k) + \theta_n(k) \quad (6)$$

在信号解调过程中, 采用基于 FFT 的符号频谱估计方法<sup>[9]</sup>计算信号频偏并进行补偿进而得到信号  $Y(k)$ , 随后采用 Viterbi-Viterbi 前馈相位补偿算法对信号相位进行补偿, M-PSK 信号的噪声相位估计主要方法如下<sup>[10]</sup>:

$$\hat{\theta}_k = \frac{1}{M} \text{unwrap} \left\{ \arg \left( \sum_{i=k-L}^{k+L} Y(k)^M \right) \right\} \quad (7)$$

## 2 激光频率波动模型

在接收端, 本振激光器的等效相位变化量主要是由激光载波的频率波动所引起的。因此, 可将由激光频率波动引起的激光相位变化  $\Delta\Omega(t)$  可以等效为具有正弦变化特性的频率调制过程, 具体表示如下<sup>[10]</sup>:

$$\Delta\Omega(t) = \frac{A_v}{f_v} \sin(2\pi f_v t) \quad (8)$$

式中,  $A_v$  是激光频率波动幅度,  $f_v$  是激光频率波动频率。相关文献表明, 当激光器工作在静态条件下, 其激光频偏表现为具有约 40MHz 波动幅度和约 1kHz 波动频率的正弦频率调制<sup>[11]</sup>。

## 3 仿真分析

基于上文所给出的内差相干激光通信系统模型以及激光频率波动模型, 利用 MATLAB/Simulink 搭建了相应的仿真模型进行分析, 仿真过程中的主要参数设置如表 1 所示。

根据上述仿真模型, 首先在 Viterbi-Viterbi 滤波器长度  $N$  为 21、光信噪比 OSNR 为 12dB、波动幅度  $A_v$  为 100MHz、波动频率  $f_v$  为 35kHz 时, 分别计算了当工作时间  $t$  为 8 $\mu$ s、10 $\mu$ s、12 $\mu$ s 和 14 $\mu$ s 时 QPSK 信号的解调星座图, 如图 2 所示。可以看出, 随着工作时间的增加, 星座图愈发弥散, 即系统误码率增大。因此, 在激光频率波动的干扰下, 需要对 QPSK 相干激光通信系统的性能损失进行量化分析并做出相应的补偿。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter		
参数名	参数符号	参数值
激光波长	$\lambda$	1550nm
激光器线宽	$\Delta\nu$	250kHz
差拍频率	$f_0$	1GHz
码元速率	$R_s$	20GBaud/s

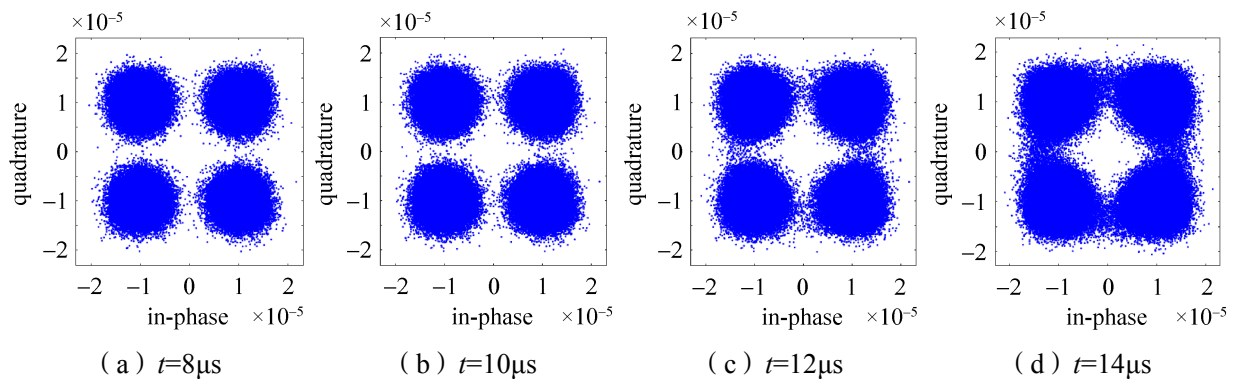


图 2 解调 QPSK 信号随时间变化的星座图

Fig. 2 Constellation of demodulated QPSK signal over time

在误码率为  $10^{-4}$  的条件下，仿真了 BPSK 和 QPSK 两种信号在波动幅度  $A_v$  为 100MHz、波动频率  $f_v$  为 35kHz 时，当选取不同 Viterbi-Viterbi 滤波器长度  $N$  时，OSNR 损失值随时间的变化情况，如图 3 所示。

由图 3 可以看出，在上述选定的参数条件下，当仿真进行到  $16\mu s$  时 OSNR 损失值几乎不发生变化。此时，工作系统进入稳定状态。对于 QPSK 信号，Viterbi-Viterbi 滤波器长度  $N$  越长，OSNR 损失就越大。在  $N=21$  时，OSNR 损失高达 11.6dB。对于 BPSK 信号，当 Viterbi-Viterbi 滤波器长度  $N$  分别取值为 7、11、17 和 21 时，在  $0\sim 20\mu s$  仿真时间内的 OSNR 损失值较小，其平均损失约为 0.06dB。因此，Viterbi-Viterbi 滤波器长度对 BPSK 调制的 OSNR 损失影响微弱。

图 4 给出了在工作系统状态达到稳定后，固定波动频率  $f_v$  为 35kHz 的情况下，选取不同的 Viterbi-Viterbi 滤波器长度  $N$  时，OSNR 损失随波动幅度  $A_v$  的变化曲线。

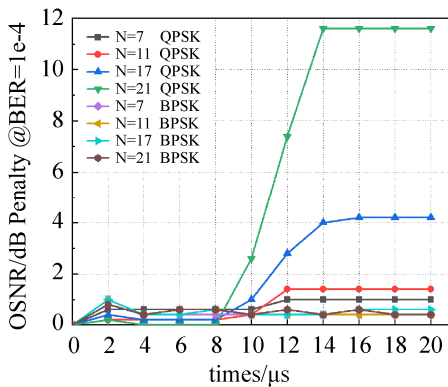


图 3 光信噪比损失随时间变化的曲线  
 $A_v=100\text{MHz}, f_v=35\text{kHz}$

Fig. 3 Time-varying curve of OSNR penalty when  $A_v=100\text{MHz}, f_v=35\text{kHz}$

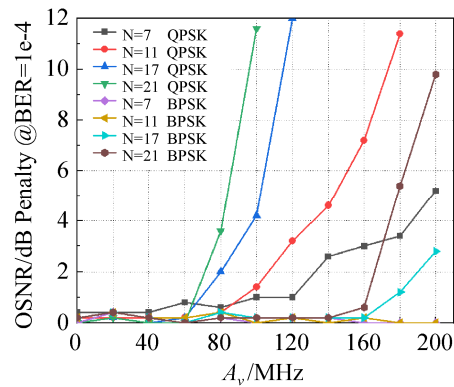


图 4 光信噪比损失随波动幅度  $A_v$  的变化曲线  
 $f_v=35\text{kHz}$

Fig. 4 OSNR penalties curve with fluctuation amplitude  $A_v$  when  $f_v=35\text{kHz}$

由图 4 可知，对于 QPSK 信号，在波动幅度  $A_v$  较小时， $N$  值越大，OSNR 损失越小；随着波动幅度  $A_v$  的逐渐增大，当  $N$  值越大，OSNR 损失越严重。对于 BPSK 信号，在波动幅度  $A_v$  小于 160MHz 时， $N$  值的变化对 OSNR 损失影响不大，但在波动幅度  $A_v$  高于 160MHz 时，其曲线变化规律与 QPSK 信号相似。此时， $N$  值越大，OSNR 损失越严重。然而，对于相同的  $N$  值和波动幅度  $A_v$ ，BPSK 信号表现出来的性能优于 QPSK 信号。从图 4 还可以看出，BPSK 信号在  $N$  为 7 和 11 时，其随波动幅度的 OSNR 损失平均值分别为 0.11dB 和 0.16dB，方差分别为 0.19dB 和 0.23dB，具有较好的抑制波动幅度能力。

图 5 给出了在工作系统状态达到稳定后，固定 QPSK 信号波动幅度  $A_v$  为 100MHz 时和 BPSK 信号波动幅度  $A_v$  取 200MHz 时，选取不同的 Viterbi-Viterbi 滤波器长度  $N$  时，OSNR 损失随波动频率  $f_v$  的变化曲线。

从图 5 可知，对两种信号而言，当波动频率  $f_v$  小于 15kHz 时，OSNR 几乎没有损失；随着波动频率  $f_v$  的逐渐增大， $N$  值越大，OSNR 损失越严重。同时，当波动频率  $f_v$  达到 35kHz 后，OSNR 损失维持相对稳定的状态。此外，对于 QPSK 信号，当  $N$  取 7 和 11 时，OSNR 损失较小，其平均值分别为 0.8dB 和 0.78dB；此时，BPSK 信号的 OSNR 损失几乎不受波动频率  $f_v$  的影响，其 OSNR 损失平均值仅为 0.15dB，方差为

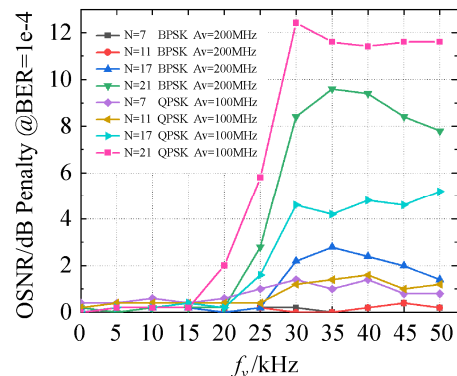


图 5 光信噪比损失随波动频率  $f_v$  的变化曲线  
Fig. 5 OSNR penalties curve with fluctuation frequency

0.017dB, 具有良好的抑制波动频率能力。

#### 4 结束语

激光频率波动是影响内差相干通信系统稳定性的因素之一。本文构建了 MATLAB/Simulink 内差相干激光通信系统模型, 仿真分析了激光频率波动对 BPSK 和 QPSK 两种信号解调性能的影响。分析表明 Viterbi-Viterbi 滤波器长度的选取会影响以上两种信号的解调性能, 表现为当波动幅度和波动频率较大时, Viterbi-Viterbi 滤波器长度越长, 引起的光信噪比损失越严重。因此, Viterbi-Viterbi 滤波器长度的选取需要进行优化分析。在同等波动条件下, BPSK 内差相干激光通信系统的光信噪比损失远小于 QPSK 内差相干激光通信系统。同时, BPSK 信号在 Viterbi-Viterbi 滤波器长度取值较小时几乎无光信噪比损失。因此, BPSK 内差相干激光通信系统具有良好的抑制频率波动能力。

#### 参考文献

- [1] 刘向南, 赵卓, 李晓亮, 等. 星间链路技术研究现状及关键技术分析[J]. 遥测遥控, 2019, 40(4): 1-9.  
LIU Xiangnan, ZHAO Zhuo, LI Xiaoliang, et al. Research status and key technologies analysis of inter-satellite link[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(4): 1-9.
- [2] 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.
- [3] RENNY F, CARL L, ROBERT W, et al. NFIRE-to-TerraSAR-X laser communication results: satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance[J]. Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 2009, 7330, 73300Q.
- [4] 中科院上海光机所. 上海光机所空间高速相干激光通信载荷搭载量子科学卫星(墨子号)发射升空[EB/OL]. (2016-08-16) [2020-06-29]. [http://www.siom.cas.cn/xwzx/ttxw/201608/t2016\\_0816\\_4650946.html](http://www.siom.cas.cn/xwzx/ttxw/201608/t2016_0816_4650946.html).
- [5] 本刊编辑部. “实践”二十号卫星: 跨代之作 引领未来[J]. 中国航天, 2020(1): 20-24.
- [6] SCHAEFER S, GREGORY M, ROSENKRANZ W. Coherent receiver design based on digital signal processing in optical high-speed intersatellite links with M-phase-shift keying[J]. Optical Engineering, 2016, 55(11): 111614.
- [7] DERR F. Coherent optical QPSK intradyne system: Concept and digital receiver realization[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(9): 1920-1926.
- [8] SCHAEFER S, GREGORY M, ROSENKRANZ W. Investigation of coherent receiver designs in high-speed optical inter-satellite links using digital signal processing[C]. Proceedings of SPIE, International Conference on Space Optics, 2016.
- [9] SELMI M, JAOUÉN Y, CIBLAT P. Accurate digital frequency offset estimator for coherent PolMux QAM transmission systems[C]. Optic Communication, 2009.
- [10] PABLO G, GRACIELA C B, CARMEN E, et al. A new parallel carrier recovery architecture for intradyne coherent optical receivers in the presence of laser frequency fluctuations[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, 2011.
- [11] KUSCHNEROV M, PIYAWANNO K, ALFIAD S M, et al. Impact of mechanical vibrations on laser stability and carrier phase estimation in coherent receivers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(15): 1114-1116.

#### [作者简介]

杨成武 1994 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为空间激光通信高速信号处理技术。

湛明 1977 年生, 研究员, 主要研究方向为测控通信技术。

刘向南 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空间激光通信总体技术。

蒋培文 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高速信号解调技术。