

低信噪比大频偏空间光信号的频率捕获研究

华莹, 李晓亮, 林一, 李英飞
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 卫星相干光通信系统信号解调过程中, 卫星相对运动会导致接收的信号光产生 GHz 量级的多普勒频移, 信号光的远距离传输导致光信噪比极低, 传统方法无法在低信噪比下补偿大范围多普勒频移, 严重影响通信系统的能力。针对上述问题, 本文提出了一种两段式频率捕获算法, 该算法包含自动扫频和锁频控制两个阶段。自动扫频阶段通过本振光自动频率扫描将频差缩小至 100 MHz 量级; 锁频控制阶段通过高精度的本振光频率控制与 FFT 变换, 在低信噪比下继续缩小频差至 MHz 量级。仿真验证结果表明: 该算法可在 2 dB 信噪比下补偿大动态范围的 10 GHz 范围多普勒频差, 满足卫星相干光通信解调需求。

关键词: 卫星相干光通信; 频率捕获; 频偏估计; FFT 变换; 扫频

中图分类号: TN929.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2024)02-0068-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20231219002

引用格式: 华莹, 李晓亮, 林一, 等. 低信噪比大频偏空间光信号的频率捕获研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(2): 68-74.

Research on Frequency Acquisition of Low Signal-to-Noise Ratio and Large Frequency Offset Space Optical Signal

HUA Ying, LI Xiaoliang, LIN Yi, LI Yingfei
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: In the signal demodulation process of the satellite coherent optical communication system, the relative motion of the satellite will cause the received signal light to produce a Doppler frequency shift of GHz magnitude. The long-distance transmission of the signal light leads to an extremely low optical signal-to-noise ratio. The traditional method cannot compensate for the large-scale Doppler frequency shift at a low signal-to-noise ratio, which seriously affects the ability of the communication system. In view of the above problems, this paper proposes a two-stage frequency acquisition algorithm, which includes two stages: automatic frequency sweeping and frequency locking control. In the automatic frequency scanning stage, the frequency difference is reduced to the order of 100 MHz by the local oscillator's automatic frequency scanning. In the frequency locking control stage, the frequency difference is further reduced to the MHz level at a low signal-to-noise ratio through high-precision local oscillator frequency control and FFT transformation. The simulation results show that the algorithm can compensate for the Doppler frequency difference in the 10 GHz range of the large dynamic range under the 2 dB signal-to-noise ratio, and meet the demodulation requirements of the satellite coherent optical communication.

Keywords: Coherent optical communication; Frequency acquisition; Frequency estimation; FFT transformation; Sweep frequency

Citation: HUA Ying, LI Xiaoliang, LIN Yi, et al. Research on Frequency Acquisition of Low Signal-to-Noise Ratio and Large Frequency Offset Space Optical Signal[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(2): 68-74.

0 引言

近年来, 随着各种军用、商用卫星技术的不断发展, 传统的微波射频通信受限于载波频率,

其通信速率已逐渐接近极限, 无法满足通信速率日益增长的需求, 成为组建空间高速信息传输网络的瓶颈。卫星相干激光通信具有传输速率高、探测灵敏度高、保密性好、组网灵活、抗电磁干

扰能力强、功耗小、重量轻等特点,可实现海量数据传输、大规模空间组网,是未来最具潜力的高速通信发展方向之一,能够满足未来我国航天装备体系的发展需要^[1-6]。

由于激光束具有非常高的方向性,卫星相干激光通信系统在进行远距离传输数据时,需要经过捕获、对准、跟踪,使得发射激光束和接收机之间保持对准,确保发射信号可以被有效接收^[6,7]。但在实际应用中,仍存在多普勒效应、环境扰动、光学器件、电学器件工艺限制等因素,导致光信号频率波动大,造成本振光和信号光混频后存在很大频差,严重影响卫星相干光通信系统的解调功能,降低了传输可靠性,甚至造成无法通信^[8-12]。因此,在卫星相干光通信中,频率的稳定捕获技术和大范围频差补偿技术具有重要意义。

目前,对于相干激光通信的频率捕获方法有多种,主要分为数据辅助法^[13]和非数据辅助法^[14]。数据辅助法需要在传递数据信息时额外提供导频信息,其实现精度完全取决于导频长度;而非数据辅助法在传递数据信息时不需要额外提供附加信息,主要分为锁频环和频率估计补偿。数据辅助法的估计范围广,但发送导频信号时消耗部分发送功率,降低了频带利用率,相干光通信中使用较少。锁频环可捕获 $[-4\text{ GHz}, 4\text{ GHz}]$ 的频偏,且实现精度高,但对信噪比要求较高,若信号光和本振光的初始频差较大,捕获时间较长;开环的频率估计和补偿算法对接收信号进行统计分析估计频偏、并补偿频移量,其可估计和补偿的偏移量较小,其最大频偏捕获范围一般约为 $[-1\text{ GHz}, 1\text{ GHz}]$,不适合大范围的频偏捕获。常用的频偏估计算法有最大似然频偏估计、基于FFT(快速傅里叶变换)的频偏估计算法、基于Hoffmann频偏估计算法等^[15-21]。

卫星相干光通信具有通信距离远、动态范围大等特点,导致接收端的本振光和信号光混频后的信号存在极大频差且信号较弱、频偏估计补偿难度增加。传统的频率捕获方法无法同时满足在低信噪比下完成大范围频率捕获,本文在FFT频偏估计算法的基础上,提出一种两段频率捕获算法进行频差补偿。该算法包括自动扫频阶段和锁频控制阶段。自动扫频阶段通过大范围频率扫描将本振光和信号光的频偏缩小到一定范围内,锁频控制阶段将扫描得到的频偏估计值通过调整本

振激光器输出的波长,进而减小本振光和信号光之间的频差,完成精确的频偏补偿。该方法可在低信噪比下对 $[-5\text{ GHz}, 5\text{ GHz}]$ 大动态范围内的频差信号进行精确捕获,解决了低信噪比下卫星相干光通信系统解调困难的问题。通过仿真,分析了影响该实现方法的两个重要因素:带通滤波器和信噪比,同时证明了该算法可在2 dB的低信噪比下正常工作,利于实际工程应用。

1 BPSK相干光通信接收系统

假设星间相干激光通信系统已完成链路建立并实现稳定跟踪。基于BPSK调制的星间外差相干光通信接收系统框图如图1所示。信号光和本振光经过光混频后输出的两路光信号到平衡探测器,转换为一路电信号。

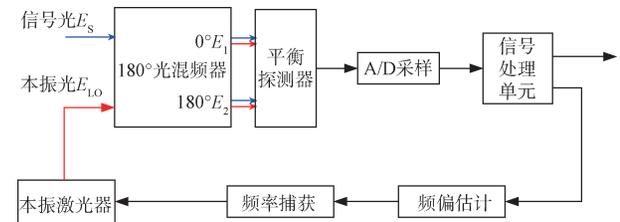


图1 相干光通信接收系统框图

Fig. 1 The block diagram of coherent laser communication receiving system

本振光 E_{LO} 和信号光 E_s 进入 180° 光混频器进行相干混频后得到两路光信号 E_1 、 E_2 ,平衡探测器将光信号转换为电信号,其表达式为:

$$u(t) = \frac{rR}{2} \sqrt{P_s P_{LO}} \left\{ \cos(2\pi f_0 t + 2\pi f_{\text{devi}} t + \phi_n(t)) \cos(d(t_1) \pi) \right\} \quad (1)$$

式中, r 为平衡探测器的前置跨阻抗, R 表示平衡探测器光电二极管响应度, P_{LO} 、 P_s 分别为本振光和信号光的光功率, f_0 为外差接收系统的中心频率, f_{devi} 为本振光和信号光的频差, $\phi_n(t)$ 为激光器的相位噪声, $d(t_1)$ 表示相位调制数据, $d(t_1) = \{0, 1\}$, $t_1 = nT$ 。电信号经过AD采样后可以表示为:

$$S_n = \pm A \cos(2\pi f_0 nT + 2\pi f_{\text{devi}} nT + \phi_n(n)) + n(k) \quad (2)$$

其中, $n(k)$ 为高斯白噪声, $A = \frac{rR}{2} \sqrt{P_s P_{LO}}$ 。

由公式(2)得到,采样后的公式与微波通信系统中的一致,故光电转换后的信号处理与传统微波通信系统相同。此外,基于BPSK的相干光接收

系统的空间应用还具有以下不同特点: 其一, 激光频率稳定性约为 50 kHz@1 s(短稳), 20 MHz@24 h(长稳), 相比微波频率赫兹级稳定性, 光载波信号频率抖动大。其二, 激光载波频率约为 200 THz, 在星间通信领域应用时, 相比微波通信兆赫兹量级多普勒效应, 激光通信载波频移更大, 可达±5 GHz。

因此, 相比微波通信, 卫星相干光系统中频率抖动大, 导致频率估算不准确; 大范围的多普勒频移受硬件带宽抑制, 易造成信号畸变, 数字采样更易出现频率混叠。在信道带宽、AD 采样频率的限制下, 接收系统进行频率捕获时需要考虑频率抖动、多普勒频移带来的信号处理约束问题。

2 频率检测及捕获方法

2.1 两段式频率捕获方法

由于硬件带宽限制, 要满足空间±5 GHz 多普勒的需求, 本文将频率捕获分两步实现, 即两段式频率捕获, 包括自动扫频阶段和锁频控制阶段。自动扫频阶段本振激光器在中心频率的[-5 GHz, 5 GHz]的范围内, 由低到高自动扫频。当频谱幅度大于捕获检测门限时, 混频信号的频差已缩小到百兆赫兹内, 视为捕获成功, 进入锁频控制阶段, 否则继续扫频。

微波通信常用 FFT 频偏估计算法进行频率捕获, 经相干混频补偿存在的频差。微波通信中的频偏较小, 硬件带宽余量能够保证多普勒下的微波信号不受影响, 可以在信号处理时进行数字相干补偿。此方法不适用卫星相干光通信中的大范围频偏, 需通过控制激光器频率的方式, 保证在捕获阶段光电宽带信号可通过通信系统的带通滤波器。

本振激光器频率控制一般有三种方式: 电流控制、机械控制、温度控制。其中温度控制采用二级温控方式, 一级温控保证模块内波长锁定器和功率检测器的恒温; 另一级通过改变激光器谐振腔的温度来改变发射的波长。

在锁频控制阶段, 本振光和信号光的频差较小, 通信信号稳定在系统通带内, FFT 算法可以稳定输出频偏估计值。利用频偏估计值, 控制激光器温控模块, 改变激光器光学谐振腔的温度, 实现精确控制激光器的波长。

两段式频率捕获流程图如图 2 所示。在自动扫

频阶段, 初始化起始频点, 并进行频率分析, 将得到的频谱幅度与捕获检测门限对比, 不满足门限则继续扫频, 直到大于捕获检测门限, 视为捕获到信号; 在锁频控制阶段, 将频偏估计值反馈给本振激光器的控制模块, 调整本振光信号的频率, 由于温度调谐速度较慢、准确性差, 需重复上述操作多次, 直到满足频差小于分辨率。

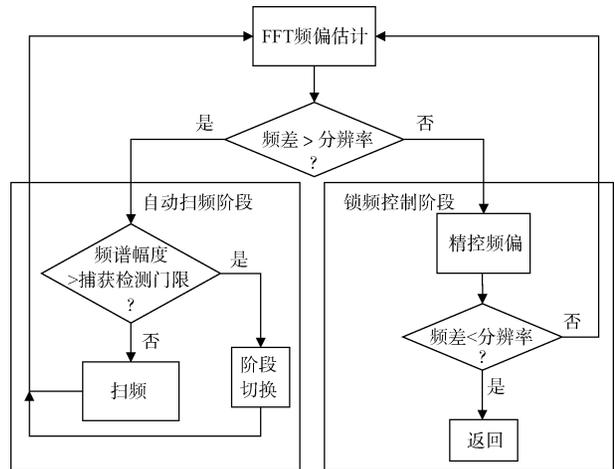


图 2 两段式频率捕获流程图

Fig. 2 The flow chart of two-stage frequency acquisition

2.2 频率检测算法

在两段式频率捕获方法中, FFT 频率检测是核心算法。针对该捕获方法, FFT 分析需要具备宽带信号频率检测功能。基于使用需求提出一种基于幅度判决的 FFT 频偏估计算法, 如图 3 所示。

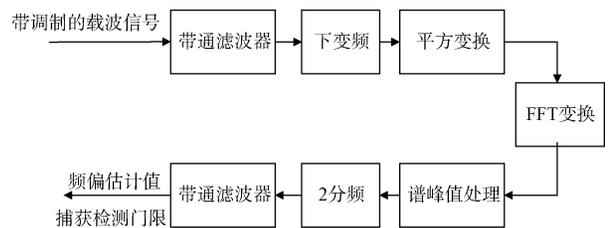


图 3 基于 FFT 的频率检测框图

Fig. 3 The diagram of FFT frequency estimation

经过 AD 采样的载波信号在宽带信号处理时, 按最小通信速率设计数字滤波带宽, 减少进入频率检测模块的噪声, 提高信噪比。BPSK 信号平方导致中频信号趋近奈奎斯特采样频率, 为减少频谱混叠, 进行向下移频处理。平方变化后的数字信号表达式为:

$$S_n^2 = \frac{A^2}{2} \cos(2\pi(2f_0 + 2f_{\text{devi}})nT) \quad (3)$$

为便于分析,表达式忽略了信道噪声、相位噪声和直流分量。其中 f_0 为外差相干探测的中心频率,设归一化频率为 F ,令 $F/N=2(f_0+f_{\text{devi}})T$,并进行离散傅里叶变换,忽略负频域部分有:

$$Y_N = \frac{A^2}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re} \left(\exp(j2\pi \frac{F}{N} n) \right) \exp \left(-\frac{j2\pi kn}{N} \right) = \frac{A^2}{2} \exp \left(\frac{j2\pi(F-k)n}{N} \right) = \frac{A^2}{2} \frac{\sin[\pi(F-k)]}{\sin[\frac{\pi(F-k)}{N}]} \exp \left[\frac{j\pi(F-k)(N-1)}{N} \right] \quad (4)$$

$(k=0, 1, 2, 3, \dots, N-1)$

从中可以看出,当频率分量 k 取值为 F 时, S_n^2 在频域有幅度最大值。因此,通过离散傅里叶变换对频偏进行估计,其频偏估计值表达式为:

$$\Delta \hat{f} = \frac{1}{2} \left(\arg \max \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_n^2 e^{-j2\pi n \Delta f T} \right| \right) \quad (5)$$

此时的频偏估计范围为 $(-1/4T, 1/4T)$ 。通常采用分辨率表示最小频率间隔 $\Delta f=f_s/N$,其中, N 为采样点数, f_s 为采样率。分辨率决定了频率检测方法的精度。

图3中经过2分频的带通滤波器设置在外差中心频率附近,其作用一是滤除直流分量,避免寻找峰值谱幅度时出现误判;其二可以造成离中心频率较远的带外信号频谱幅度明显小于带内的信号频谱幅度。因此,可通过检测频谱是否超过门限,判定信号频率是否在中心频率附近,门限设定为零频差时的频谱幅度的中值。基于频谱幅度的频谱检测方法,可解决大范围的多普勒频差问题,实现简单。

3 仿真结果与分析

为了测试两段式频率捕获方法的性能,在MATLAB中建立基于外差的卫星相干光通信仿真接收模型,主要仿真参数见表1所示,经计算,FFT频偏估计的分辨率为1.95 MHz,在仿真系统中分析带通滤波器带宽和信噪比对该方法的影响。

3.1 带通滤波器性能分析

带通滤波器将理想零频差信号附近的频谱幅度增大,滤波器的带宽决定了锁频控制阶段的作用范围。为分析带通滤波器对方法的影响,在表1条件下进行仿真,分析不同带宽条件下,理想混

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

仿真参数	取值
码率 f_b	1.024 Gbps
采样速率 f_s	4 GHz
信噪比	15 dB
采样点数	1 024
中心频率	1 GHz

频信号附近不同频差时的谱峰值幅度,频差为0时为理想混频信号,仿真结果如图4所示。

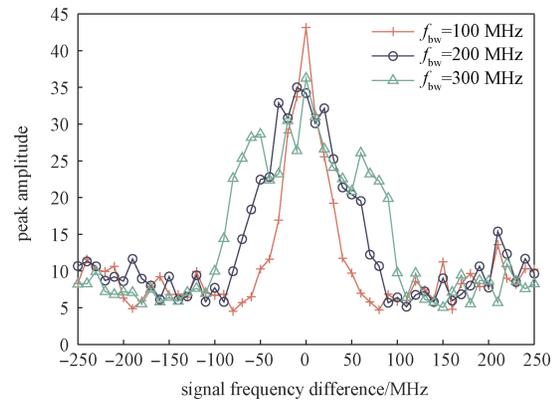


图4 带通滤波器的带宽对频偏估计范围的影响

Fig. 4 The influence of bandwidth of band-pass filter on estimation range of frequency offset

由图4可知,滤波器带内的谱幅度明显高于带外谱幅度,通过捕获检测门限判决,缩小频差至百兆量级。此外,滤波器带宽决定了进入锁频控制阶段的补偿范围,带宽越宽,进入该阶段的范围越大。图4中带宽为300 MHz时,滤波器带内的尖峰最多,造成错误估计概率增加;带宽为100 MHz时只有一个尖峰,错误估计概率较小;而带宽较窄,在自动扫频阶段需将扫频步进量调小,增加了扫频时间。因此,选取滤波器的带宽要适中,较宽的滤波器带宽易出现太多尖峰,造成错估概率增加,较窄的带宽易增加扫频时间。

3.2 信噪比性能分析

为分析信噪比对两段式频率捕获方法的影响,在表1条件下进行仿真,其中,滤波器带宽设置为200 MHz。分析信噪比为1 dB、2 dB、3 dB和5 dB下,不同频差的混频信号的谱峰值幅度,仿真结果如图5所示。

如图5所示,信噪比为1 dB时,带通滤波器作用失效,无法通过设置捕获检测门限判断频差大

小, 两段式频率捕获方法不能正常工作; 信噪比为 2 dB、3 dB 和 5 dB 时, 可以找到捕获检测门限

保证两段式频率捕获方法实现, 因此该方法最低可在 2 dB 下正常工作。

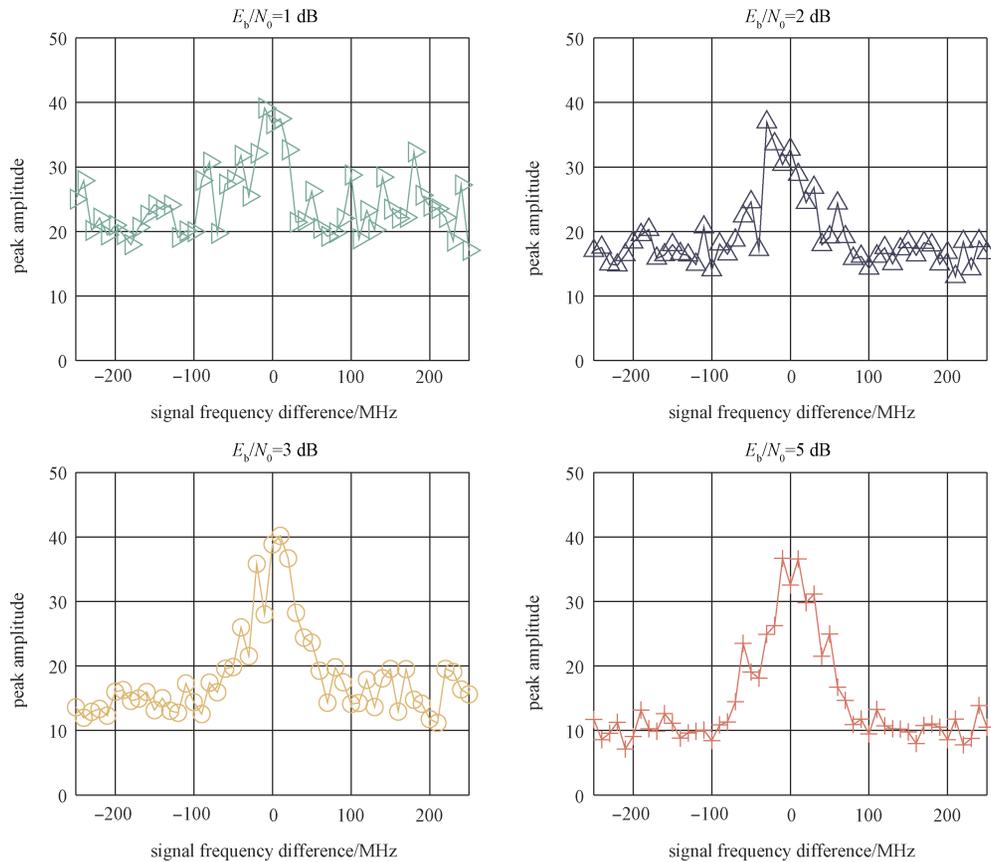


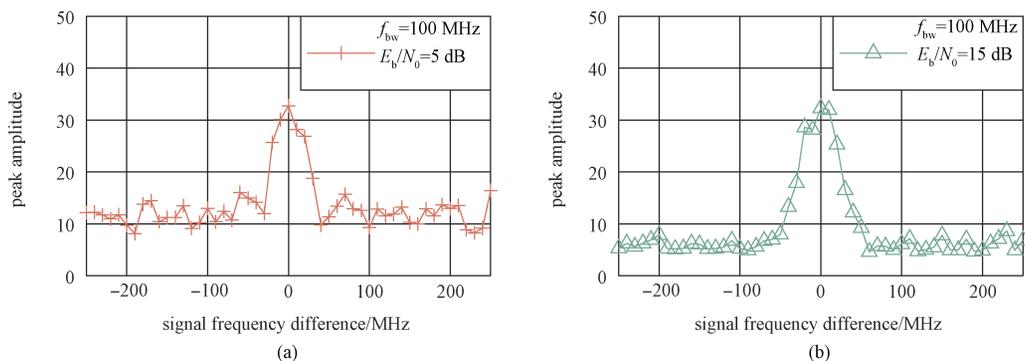
图 5 不同信噪比下相应频差的谱峰值幅度

Fig. 5 Spectral peak amplitude of corresponding frequency difference at different E_b/N_0

为分析信噪比对带通滤波器性能的影响, 在表 1 条件下进行仿真。将带通滤波器的带宽分别设置为 100 MHz、200 MHz 和 300 MHz, 同时分析在信噪比为 5 dB 和 15 dB 时不同频差的混频信号的谱峰值幅度, 如图 6 所示。

图 6(a)、6(c)和 6(e)是信噪比为 5 dB 时, 带宽依次为 100 MHz、200 MHz、300 MHz 的带通滤波器下不同频差的混频信号的谱峰值幅度, 图 6(b)、

6(d)和 6(f)是信噪比为 15 dB 时的情况。对比图 6(a)、6(c)和 6(e)可知, 信噪比一定时, 带宽越宽, 通带内出现的尖峰增多, 且对噪声的滤除能力减弱, 图 6(e)较难找到合适的捕获门限。将信噪比增加到 15 dB 得到图 6(f), 捕获检测门限明显改善。将图 6(a)和图 6(b)、图 6(c)和图 6(d)分别对比, 在带宽较窄时, 信噪比变化对滤波器的性能影响较小, 即窄带滤波器对恶劣信号具有更好的容忍



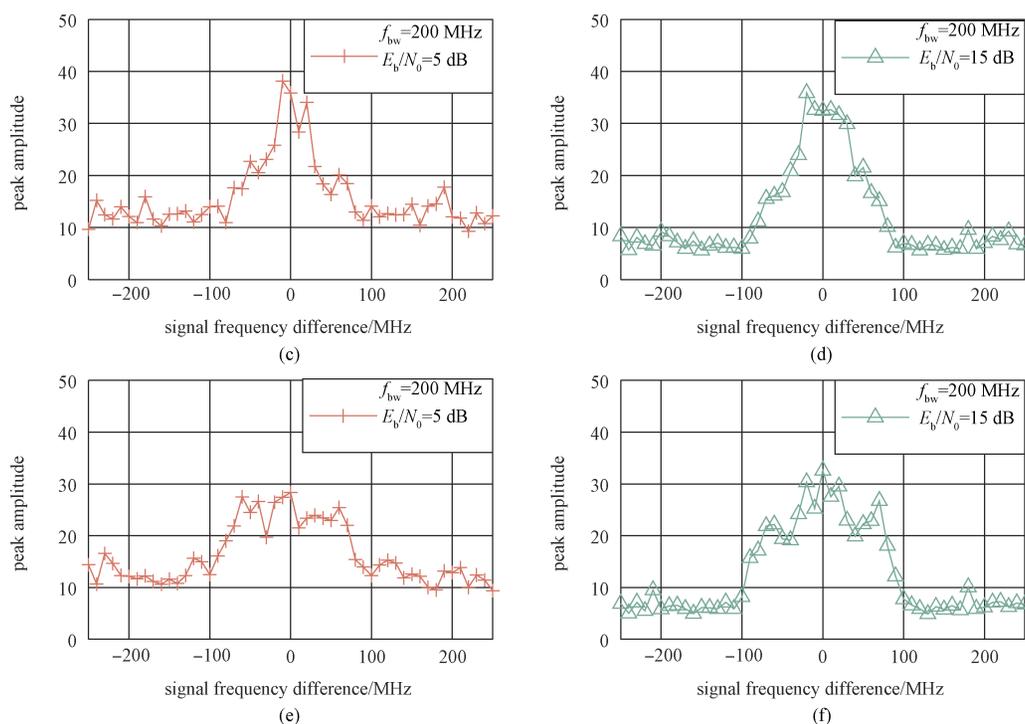


图6 两种因素影响下的谱峰值幅度

Fig. 6 Spectral peak amplitude under the influence of two factors

度。但在工程实践中，滤波器带宽不能无限窄，否则会增加两段式频率捕获方法的扫描时间，增加计算复杂度。

4 结束语

本文基于FFT算法提出一种两段式频率捕获方法，可在低信噪比下大范围缩小频差。两段式频率捕获方法的第一段即自动扫频阶段通过扫频方式补偿[-5 GHz, 5 GHz]大范围的频差，将频差缩小到百兆量级内；第二段即锁频控制阶段通过反馈频偏估计值，控制本振激光器的波长进而控制频偏。通过仿真分析了带通滤波器带宽和信噪比对该方法性能的影响。滤波器带宽要选取适当值，该方法最低可在2 dB下正常工作。该方法在远距离的星间相干激光通信中弱信号的捕获和频偏补偿具有较好的工程应用前景。未来将进行实物验证，分析实物器件对该方法的影响，调整该算法的参数设置，使其更适用远距离相干光通信系统的工程应用。

参考文献

- [1] 姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] 孙建锋, 许倩, 鲁伟, 等. 空间相干激光通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2022.
- [3] 孙建锋. 天地一体化信息网络激光通信系统发展设想[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 18-23.
SUN Jianfeng. Development of laser communication system in space-ground integrated information network[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(12): 18-23.
- [4] 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.
- [5] 姜会林, 付强, 赵义武, 等. 空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1-8.
JIANG Huilin, FU Qiang, ZHAO Yiwu, et al. Development status and trend of space information network and laser communication[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 1-8.
- [6] DAS B, ABDULLAH M F L, CHOWDHRY B S, et al. A novel signal regeneration technique for high speed DPSK communication systems[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(2): 3249-3273.
- [7] 梁静远, 陈瑞东, 姚海峰, 等. 无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展[J]. 光电工程, 2022, 49(8): 210439.

- LIANG Jingyuan, CHEN Ruidong, YAO Haifeng, et al. Research progress of acquisition, pointing and tracking in optical wireless communication system[J]. Opto-Electron Eng, 2022, 49(8): 210439.
- [8] 李一芒, 盛磊, 陈云善. 高速激光光斑检测系统的设计与实现[J]. 激光技术, 2015, 39(4): 533-536.
LI Yimang, SHENG Lei, CHEN Yunshan. Design and implementation of high-speed laser spot detection systems[J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 533-536.
- [9] TANG C, ZHANG L, ZHANG Y, et al. Nonlinear revised error aided feedback equalization in high-speed satellite communication[J]. Telecommunication Systems, 2017, 66(2): 243-251.
- [10] HAO S, ZHANG D, ZHAO Q, et al. Coherent receiving efficiency in satellite-ground coherent laser communication system based on analysis of polarization[J]. Optics Communications, 2017, 393:267-274.
- [11] LI J, ZHANG Z, GAO J, et al. Bandwidth of adaptive optics system in atmospheric coherent laser communication[J]. Optics Communications, 2016, 359: 254-260.
- [12] 任宁. 用于相干激光雷达的回波光锁相技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2022.
- [13] 刘忆. 一种面向深空测距的大多普勒频偏信号捕获算法[J]. 电讯技术, 2021, 61(3): 311-315.
LIU Yi. An acquisition algorithm of signal with large Doppler shift in deep space pseudocode ranging[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(3): 311-315.
- [14] 王也. 空间相干光通信系统中的数字信号处理技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- [15] 郝世聪. 光锁相环的频率捕获与跟踪技术[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [16] LIU Y, ZHAO X, TONG S, et al. Study of multistage composite loop control based on optical phase-locked loop technology[J]. Optics Communications, 2018, 424: 17-25.
- [17] 许云祥, 吴斌, 汪勃, 等. 基于EDFA的卫星相干光通信开环补偿技术研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 337-340.
XU Yuxiang, WU Bin, WANG Bo, et al. Research of open-loop compensation technology in EDFA-based satellite coherent optical communication[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(3): 337-340.
- [18] 张力川. 干扰条件下的卫星通信同步技术研究与应用[D]. 西安: 电子科技大学, 2017.
- [19] 常倩. 数字卫星通信系统中QPSK频偏估计技术的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [20] 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.
- [21] 杨成武, 谌明, 林一, 等. 卫星激光通信FFT改进频偏估计算法研究[C]//第十七届卫星通信学术年会论文集, 2021: 146-151.

[作者简介]

- 华莹 1998年生, 硕士研究生。
李晓亮 1979年生, 硕士, 研究员。
林一 1984年生, 硕士, 高级工程师。
李英飞 1986年生, 硕士, 高级工程师。

(本文编辑: 潘三英)