

# 基于光梳的实时高分辨相位测量方法理论分析

葛锦蔓<sup>1,2\*</sup>, 闫明<sup>2,3</sup>, 谭庆贵<sup>1</sup>, 禹旭敏<sup>1</sup>, 朱忠博<sup>1</sup>, 李小军<sup>1</sup>, 曾和平<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中国空间技术研究院西安分院空间微波技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710100;

<sup>2</sup>华东师范大学精密光谱国家重点实验室, 上海 200241;

<sup>3</sup>华东师范大学重庆研究院, 重庆 401147

**摘要** 针对液晶光学相控阵(LCOPA)调制相位分布测量实时可溯源的问题,结合空间啁啾技术与双光梳干涉测量技术,提出一种基于光梳的空间高分辨相位测量方法。针对光栅以及光梳光源的参数对系统空间分辨率以及测量视场的影响进行理论仿真分析。理论仿真结果表明,该方法的测量视场可达 100 mm,空间分辨率优于 2  $\mu\text{m}$ 。实验结果表明,该方法能够在微秒时间尺度内实现 LCOPA 多通道驱动电极调制相位分布的快速测量,因此有望为 LCOPA 器件的研制和性能的评价提供有效途径。

**关键词** 测量; 相位测量; 相位调制; 光学通信; 干涉法

中图分类号 O436; TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1104005

## Theoretical Analysis of Real-Time High-Resolution Phase Measurement Method Based on Optical Combs

Ge Jinman<sup>1,2\*</sup>, Yan Ming<sup>2,3</sup>, Tan Qinggui<sup>1</sup>, Yu Xumin<sup>1</sup>, Zhu Zhongbo<sup>1</sup>,  
Li Xiaojun<sup>1</sup>, Zeng Heping<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, Shaanxi 710100, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

<sup>3</sup>Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401147, China

**Abstract** To enable the real-time traceability of measurements of the modulated phase distribution produced by a liquid crystal optical phased array (LCOPA), a spatial high-resolution phase measurement method based on optical combs, which combines spatial chirp and dual-comb interferometry techniques, is proposed herein. Theoretical simulation analysis is conducted to study the influence of the parameters of the grating and optical comb light source on the system's spatial resolution and measurement field of view. Theoretical simulation results show that the field of view measured using this method can reach more than 100 mm, and the spatial resolution is better than 2  $\mu\text{m}$ . Further, experimental results show that this method can enable the rapid measurement (microsecond timescale) of the modulation phase distribution generated by a multichannel LCOPA driving electrode. Thus, the proposed method is expected to provide an effective way for the development and performance evaluation of LCOPA devices.

**Key words** measurement; phase measurement; phase modulation; optical communication; interferometry

**OCIS codes** 120.5050; 120.5060; 120.3180; 060.4510

## 1 引言

基于液晶电控双折射效应与闪耀光栅原理的液晶光学相控阵(LCOPA)具有较小的体积、质量和功率(SWaP),是重要的液晶光调制器件之一,不仅可

以实现多光束的捷变控制和准确定位,还可以实现多角度的灵活指向,因此在激光雷达<sup>[1]</sup>、自适应光学<sup>[2]</sup>、卫星通信终端的多波束用户接入以及激光通信终端的高精度和高可靠性的跟踪和瞄准系统中<sup>[3-4]</sup>具有重要的应用价值。作为一种实时可编程

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-06-29; 录用日期: 2020-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(11904283)、国家实验室基金(6142411196316, 2020SSFNKLST-13)

\* E-mail: gjm129@163.com

的光束偏转器件<sup>[5-6]</sup>, LCOPA 主要是采用驱动电压低、相位调制深度大的向列液晶材料而制成, 并通过外加驱动电压来控制液晶分子的偏转, 从而改变透射光束的相位延迟<sup>[7]</sup>。在不同周期外加驱动电极单元的作用下, LCOPA 将形成闪耀光栅的结构, 进而实现可操控的光束偏转<sup>[8-11]</sup>。

由于 LCOPA 外加驱动电压会直接影响调制相位的分布, 因此对二者关系进行快速且高精度的标定将直接决定器件对入射光束偏转特性的控制精度。然而, 对于 LCOPA 中微米量级尺寸的诸多驱动电极单元来说, 其对已有波前相位检测方法的测量视场、空间分辨率以及测量时间提出了严峻的挑战。目前, 对于液晶光调制器调制相位分布的测量还没有完善的解决方法, 现有方法难以对大量密集分布的 LCOPA 驱动电极调制相位进行高分辨率的快速测量。例如, 夏克哈特曼法是一种基于微透镜阵列的相位检测方法, 具有相位复原算法简单、结构紧凑以及多次测量下可以拓展测量视场的优点, 但空间分辨率受到微透镜阵列加工工艺的限制(约为几十到几百微米)<sup>[12]</sup>, 无法实现对 LCOPA 单个驱动电极(宽度约为  $4\sim 5\ \mu\text{m}$ )的相位测量; 另一种常用的液晶光调制器相位检测方法是基于偏振和光强特性的波片法, 该方法具有光路结构简单和成本低的优点, 但驱动电压回程区域的相位恢复需依赖于复杂的算法<sup>[13]</sup>, 因此在实时性方面存在缺陷。此外, 郑春艳等<sup>[14]</sup>在 Mach-Zehnder 移相干涉光路中引入了光学  $4F$  系统, 可以实现对液晶光栅相位分布的干涉测量, 空间分辨率为  $20\ \mu\text{m}$ , 约为  $4\sim 5$  个 LCOPA 驱动电极的空间尺度。Wu 等<sup>[15]</sup>利用了正交移相干涉法获得液晶衍射光栅  $\pm 2$  级的调制相位信息, 但此类基于激光干涉原理的相位测量方法实际测得的是远场合成相位分布, 这对相位畸变的实时溯源存在困难, 需要多次测量才能准确确定 LCOPA 驱动电极与相位畸变之间的对应关系<sup>[16]</sup>。

光学频率梳即光梳, 其作为一种新型的宽带相干光源, 在时间域上表现为超短脉冲序列, 在频率域上则表现为等间距散分布的频率齿。由于同时兼具高时间分辨与高频谱分辨的独特性质, 光梳在频率测量、时频传递、精密光谱和精密测距等领域<sup>[17-21]</sup>得到了广泛的应用, 并催生出一系列基于光梳的高精度测量技术。双光梳拍频技术采用两台重复频率

略有不同的光梳, 通过在一个高速光电探测器上采用光外差探测的方式, 并在无需扫描干涉臂与色散光谱仪的简单构架下, 可以实现快速和高精度的宽带光场强度与相位谱的测量, 以及实时和高分辨率的空间形貌成像<sup>[22-24]</sup>。然而, 尽管双光梳拍频探测技术具有测量时间短、光谱覆盖范围广和谱分辨率高等诸多优势, 但在 LCOPA 波前相位检测方面鲜有应用。

本文针对现有 LCOPA 波前相位检测技术中的缺陷, 结合空间啁啾技术提出一种基于光梳的相位测量方法, 该方法具有快速和高空间分辨率的优点。通过物理建模对该方法在波前相位检测中的测量视场、空间分辨率以及数据更新率(或单次测量时间)进行研究。

## 2 测量方案与基本原理

基于光梳的空间高分辨率相位测量方案如图 1 所示, 其中 PD 为光电探测器,  $f_1, f_2, \dots, f_N$  为光梳的梳齿频率,  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$  为光梳光源中不同梳齿频谱的相位延迟,  $N$  为光梳梳齿的个数。使用两个重复频率略有微小差异的两台光梳激光器 comb 1 和 comb 2, 并将其输出的光分别作为本振光和探测光, 测试光经过两个互相平行且参数相同的透射光栅后发生空间色散, 从而形成空间啁啾光阵列, 该阵列中不同频率的光信号的空间间隔相等, 且与光梳梳齿一一对应。空间啁啾光阵列垂直经过待测件 LCOPA 后, 将携带该器件不同驱动电极单元的相位调制信息; 经过与透射光栅共轭的空间啁啾单元后, 空间啁啾光阵列被耦合进单模光纤中。收集的探测光与本振光使用光纤耦合器进行合束, 并在高速光电探测器上进行光外差拍频。拍频信号由一台高速示波器来采集, 并采用快速傅里叶变换(FFT)算法来实现数据分析。

假设探测光梳的重复频率为  $f_r$ , 本振光梳的重复频率为  $f_r + \Delta f_r$ , 并且这两个光梳的梳齿个数分别为  $p$  和  $q$ , 其中  $\Delta f_r$  为参考信号和探测信号之间的重复频率差。双光梳拍频的过程中, 将产生  $p \times q$  个拍频信号, 其在时域上是混叠的。本振光梳 comb 1 和探测光梳 comb 2 的电场分别用  $E_{\text{ref}}$  和  $E_{\text{mea}}$  来表示。光电探测器响应的是光强信号, 当本振光中第  $p$  个频率的光与探测光中第  $q$  个频率的光发生干涉时, 形成的拍频信号可表示为

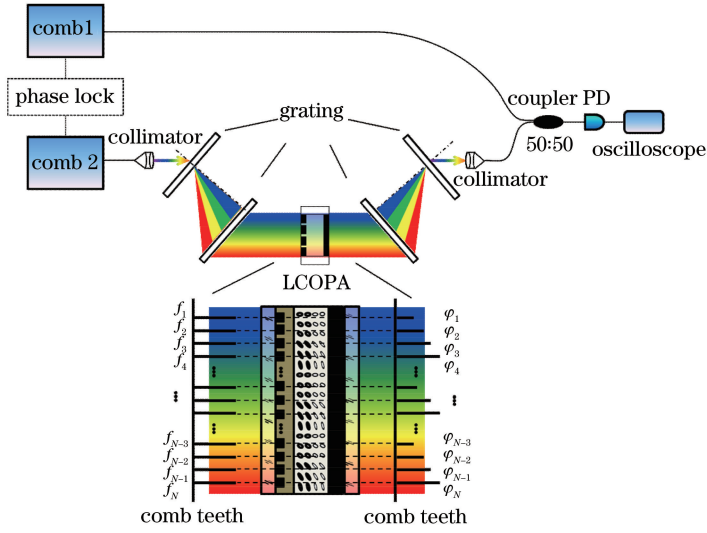


图 1 基于光梳的空间高分辨相位测量方案

Fig. 1 Spatial high-resolution phase measurement scheme based on optical comb

$$\begin{aligned}
 I_{pq}(\omega_{\text{ref}}, \omega_{\text{mea}}, \varphi_q) &= |E_{\text{beat}}(t, \varphi_q)|^2 = [E_{\text{mea}}(t, \varphi_q) + E_{\text{ref}}(t)][E_{\text{mea}}^*(t, \varphi_q) + E_{\text{ref}}^*(t)] = \\
 &= \sum_p \sum_q \frac{A_p^2 + B_q^2}{2} + \sum_p \frac{A_p^2}{2} \cos[4\pi(f_r + \Delta f_r)t + 2\varphi_q] + \sum_q \frac{B_q^2}{2} \cos(4\pi q f_r t) + \\
 &\quad \sum_p \sum_q (A_p \cdot B_q) \cos\{2\pi[p(f_r + \Delta f_r) + q f_r]t + \varphi_q\} + \\
 &\quad \sum_p \sum_q (A_p \cdot B_q) \cos\{2\pi[(p - q)f_r + p \Delta f_r]t + \varphi_q\}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中:  $\omega_{\text{ref}}$  和  $\omega_{\text{mea}}$  分别为本振光梳和探测光梳的角频率,  $\omega_{\text{ref}} = 2\pi(f_r + \Delta f_r)$ ,  $\omega_{\text{mea}} = 2\pi f_r$ ;  $A$  和  $B$  分别为本振光梳和探测光梳的幅度;  $\varphi$  为 LCOPA 不同驱动单元的调制相位延时;  $E_{\text{beat}}$  为拍频信号的电场;  $t$  为时间;  $E_{\text{mea}}^*$  和  $E_{\text{ref}}^*$  分别为本振光梳和探测光梳的共轭电场。

由于光电探测器相当于一个低通滤波器, 因此其只能探测到(1)式中的第 5 项差频项, 即  $\sum_p \sum_q (A_p \cdot B_q) \cos\{2\pi[(p - q)f_r + p \Delta f_r]t + \varphi_q\}$ 。在混叠的差频信号中, 当  $p \neq q$  时, 该拍频信号仍无法被探测到, 只有当  $p = q$  时, 拍频信号才可以被探测到。因此, 采集到的拍频信号可表示为

$$\mathbf{I}_{qq} = \begin{bmatrix} I_{11}(\omega_{\text{mea}_1}, \omega_{\text{ref}_1}, \varphi_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I_{22}(\omega_{\text{mea}_2}, \omega_{\text{ref}_2}, \varphi_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I_{qq}(\omega_{\text{mea}_q}, \omega_{\text{ref}_q}, \varphi_q) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$I_{qq}(\omega_{\text{mea}_q}, \omega_{\text{ref}_q}, \varphi_q) = \sum_q A_q B_q \cos(2\pi q \Delta f_r t + \varphi_q). \quad (3)$$

由(2)式和(3)式不难看到, 拍频信号中, LCOPA 不同驱动电极的调制相位与  $q$  倍的重复频率差(即拍频信号频谱)一一对应。因此, 使用示波器来采集拍频信号并对其进行 FFT 分析, 便可获得空间啁啾光阵列中不同频率的光信号引入的不同相位延迟  $\varphi_q$ , 表达式为

$$\varphi_q = \arctan[\text{Im}(I_{qq})/\text{Re}(I_{qq})], \quad (4)$$

式中:  $\text{Im}(\cdot)$  为取虚部;  $\text{Re}(\cdot)$  为取实部。

### 3 理论模型与分析讨论

基于光梳的空间高分辨相位测量方法的测量视场主要由空间啁啾光阵列的宽度决定, 空间分辨率由空间啁啾光阵列中梳齿频率的空间间隔决定。若建立待测相位与 LCOPA 驱动电极间准确的对应关系, 不仅要求空间啁啾光阵列的宽度大于待测件 LCOPA, 还要求空间啁啾光阵列中相邻两个频率的

光信号的空间几何间距必须小于 LCOPA 驱动电极宽度的 1/2,即几个微米量级,以此满足奈奎斯特采样定理的要求。对空间啁啾光阵列的特性参数进行数学建模,几何光路如图 2 所示,其中  $f_0$  表示光梳的中心频率, $\alpha$  表示光梳光源入射到光栅表面的入射角, $\theta_n$  和  $\theta_1$  分别表示光梳光源入射到第一个光栅出射的最大和最小衍射角, $n$  为第  $n$  个出射的光梳光源。假设入射光束  $S$  是光梳的出射光,经过两个平行放置且间距为  $D$  的光栅  $G_1$  和  $G_2$  后发生空间色散,最终形成空间啁啾光阵列  $S'$ 。根据光梳的

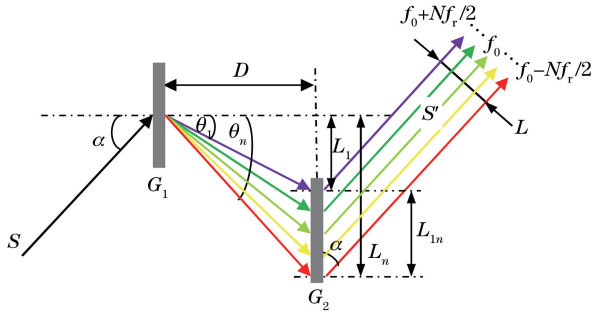


图 2 空间啁啾光阵列形成的几何光路  
Fig. 2 Geometric light path formed by spatial chirped light array

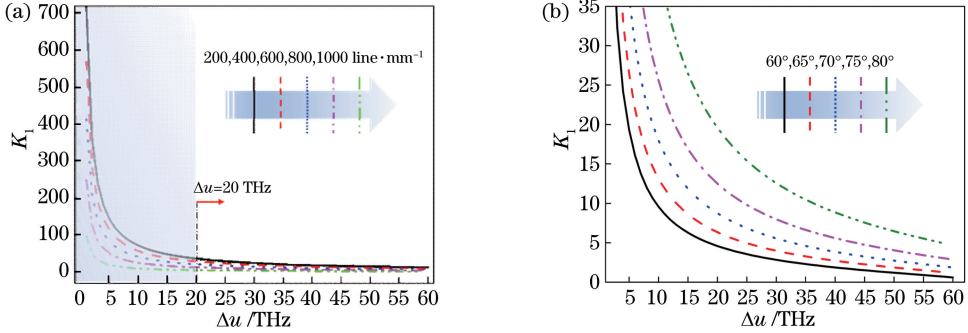


图 3 光梳频谱宽度与  $K_1$  在不同情况下的关系曲线。(a)光栅刻线数;(b)入射角  
Fig. 3 Relationship between comb spectrum width and  $K_1$  under different conditions.

(a) Grooves of grating; (b) incident angle

从图 3 可以看到,  $K_1$  随着  $\Delta u$  值的增大呈指数衰减;在固定  $\alpha$  的情况下,当  $\Delta u < 20$  THz 时,光栅刻线数越大,  $K_1$  值越低;当  $\Delta u > 20$  THz 时,  $K_1$  值趋于平缓。实验结果说明,当  $\Delta u < 20$  THz 时,应尽量选择光栅刻线数较大的光栅。从图 3(b) 可以看到,在相同  $\Delta u$  值的情况下,入射角越小,  $K_1$  值越小,此时更便于实际操作与系统集成。该测试系统所占的空间尺寸主要受限于光栅对的间距,如图 1 所示。实验过程中,若考虑到光学平台尺寸的限制,则测试系统中光栅对的间距在 500 mm 以内为宜。此外,若要满足常用 LCOPA 单次全场测试的需求,

特征原理可知,  $S'$  中有  $N$  个频率,即最大频率为  $f_0 + Nf_r/2$ ,最小频率为  $f_0 - Nf_r/2$ 。

### 3.1 系统测量视场的影响因素分析及讨论

根据光的衍射原理对空间啁啾光阵列的宽度(即该方法的测量视场)进行数学建模,相关公式可表示为

$$(\tan \theta_n - \tan \theta_1) \cos \alpha = L/D, \quad (5)$$

$$\sin \theta_n - \sin \alpha = c/f_n d, \quad (6)$$

$$\sin \theta_1 - \sin \alpha = c/f_1 d, \quad (7)$$

$$f_n = f_0 - \Delta u/2, \quad (8)$$

$$f_1 = f_0 + \Delta u/2, \quad (9)$$

式中:  $c$  为真空中的光速;  $d$  为光栅常数;  $L$  为测试系统中空间啁啾光阵列的宽度;  $f_1$  和  $f_n$  分别为光梳的最小和最大频率;  $\Delta u$  为光梳光源的频谱宽度。由(4)式不难看出,该测试系统的测量视场由被测件的几何尺寸所决定,且  $L$  与  $D$  成正比,比例系数  $K_1 = D/L$ ,该系数是关于  $\Delta u$  的函数,即  $K_1(\Delta u)$ 。在实际的光路搭建中,考虑到空间尺寸与光功率的限制,  $K_1$  值应尽可能的小。在  $\alpha = 60^\circ$  和  $d = 1000$  line/mm 的情况下,不同光栅常数与入射角度对  $K_1(\Delta u)$  的影响,如图 3 所示。

即测量视场要求达到 100 mm,则  $K_1$  值需小于 5。由模拟仿真可得,当入射角为  $60^\circ$  时,  $\Delta u \geq 20$  THz,测试视场即可大于等于 100 mm。由于目前 LCOPA 的驱动电极单元的宽度一般为  $4 \sim 5 \mu\text{m}$ ,因此提出的测量方法可以同时测量约  $2 \times 10^4$  个驱动电极单元的调制相位,说明该方法在 LCOPA 多通道相位同时测量方面具有优势。

### 3.2 系统空间分辨率的影响因素分析及讨论

在未达到光学衍射极限的情况下,测量系统的空间分辨率由空间啁啾光阵列中光梳齿的空间间隔所决定,彼此关系满足

$$(\tan \theta_n - \tan \theta_{n-1}) \cos \alpha = R/D, \quad (10)$$

$$\sin \theta_{n-1} - \sin \alpha = c/f_{n-1}d, \quad (11)$$

$$f_{n-1} = f_n + f_r, \quad (12)$$

式中: $R$ 为空间啁啾光阵列中频率梳齿的空间间隔; $f_{n-1}$ 为与 $f_n$ 相邻的光频率; $\theta_{n-1}$ 为空间啁啾光阵列中与最大频率的光信号相邻的光束衍射角。将(5)~(12)式联立,可以得到

$$\frac{R}{L} = \frac{\tan \theta_n - \tan \theta_{n-1}}{\tan \theta_n - \tan \theta_1}. \quad (13)$$

由(13)式可知, $R$ 与 $L$ 成正比,即空间啁啾光阵列的宽度越小(测试系统的测量视场越小),则空间啁啾光阵列中频率梳齿的间隔越小(空间分辨率越高)。由(5)~(12)式可知,当光栅参数选定且空间位置固定时, $R$ 与 $L$ 的比值 $K_2 = R/L$ ,其仅与 $\Delta u$ 和 $f_r$ 有关。在 $\varphi = 60^\circ$ 且光栅刻线数为1000 line/mm的情况下, $K_2$ 与 $\Delta u$ 和 $f_r$ 的数值仿真结果如图4所示。

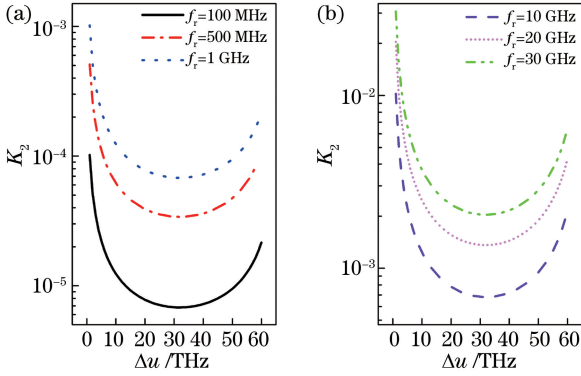


图4 光梳频谱宽度与 $K_2$ 在不同 $f_r$ 值的关系曲线。(a)  $<1$  GHz; (b)  $>10$  GHz

Fig. 4 Relationship between width of optical comb spectrum and  $K_2$  at different  $f_r$  values.

(a)  $<1$  GHz; (b)  $>10$  GHz

从图4可以看到, $K_2$ 值在 $\Delta u = 30$  THz附近出现最小值,并且当 $\Delta u$ 值相同时, $f_r$ 值越小,则 $K_2$ 值越小,即该测量方法的空间分辨率越高。若 $\Delta u$ 值确定,则当 $f_r$ 值越小时,该测量方法的空间分辨率越高。

经过光栅对的空间啁啾阵列中,相邻频率光的空间间距相等,因此该系统的 $R$ 值还可以用 $L/N$ 来表示,可以得到

$$R = \frac{L}{N} = \frac{(\tan \theta_n - \tan \theta_1) \cos \alpha}{\Delta u} D f_r. \quad (14)$$

由(14)式可知, $R$ 与 $D$ 和 $f_r$ 成正比,即减小光栅的间距或光梳的重复频率,即可提升系统的空间分辨率。在 $\Delta u = 30$  THz和 $D = 200$  mm的情况

下, $R$ 与 $f_r$ 之间的关系如图5所示。

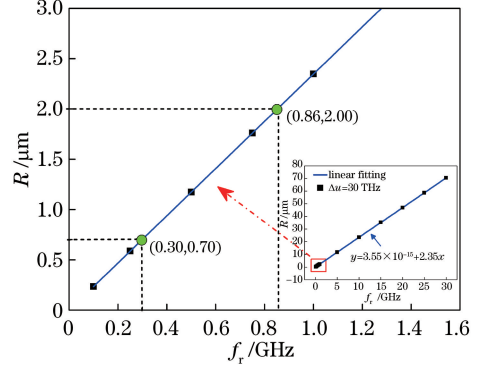


图5 重复频率与空间间隔之间的关系 (插图为局部区域放大图)

Fig. 5 Relationship between repetition frequency and spatial interval (inset is enlarged view of local area)

从图5可以看到, $f_r$ 与 $R$ 呈近似线性的关系,当光梳的重复频率越低时,则空间啁啾光阵列中频率梳齿的间隔越小,即系统的分辨率越高。当 $f_r < 1$  GHz时,系统的空间分辨率可以达到几微米,并随着重复频率的降低,系统的空间分辨率可以达到亚微米量级。目前,LCOPA的单个驱动电极单元的宽度通常为 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ ,根据奈奎斯特定理可知,测量系统的空间分辨率需要达到 $2 \mu\text{m}$ 。从仿真结果来看,选择 $\Delta u = 30$  THz和 $f_r < 860$  MHz的光梳光源,便可以使系统的空间分辨率小于 $2 \mu\text{m}$ 。

此外,需要考虑光束的衍射极限问题。以常用的近红外光纤光梳为例,其中心波长为 $1550 \text{ nm}$ ,聚焦后的光斑衍射极限约为 $0.7 \mu\text{m}$ <sup>[25]</sup>。在图5的条件下,当 $f_r < 300$  MHz时,系统的空间分辨率即可达到衍射极限。

### 3.3 系统采样时间的分析及讨论

在梳齿可分辨的情况下,双光梳拍频探测最小数据的采样时间为 $1/\Delta f_r$ ,即干涉条纹的重复周期。为了避免信号失真,拍频信号需要满足奈奎斯特的条件。对于双光梳系统而言,该条件可以表述为<sup>[17]</sup>

$$\Delta u \cdot \frac{\Delta f_r}{f_r} \leq \frac{f_r}{2}. \quad (15)$$

由(15)式可知,当 $\Delta u = 30$  THz、 $f_r = 860$  MHz且空间分辨率为 $2 \mu\text{m}$ 时,两台光梳的最大重复频率差,即数据更新率约为 $12 \text{ kHz}$ ,单次数据的采样时间约为 $80 \mu\text{s}$ ,因此该方法的系统采样时间在理论上明显优于传统波前分析仪的干涉图采样更新时间(毫秒量级)。实际情况下,数据更新时间需要综合考虑数据存储、处理以及显示等过程的耗时。

## 4 验证实验

实验采用两台型号均为 WTEC-01-25 的电光调制光梳源,并使用该光梳源对静态 LCOPA 相位分布进行验证。两台光梳输出的光谱相似,均是以 192.92 THz 为中心并呈对称分布,光谱全宽约为 3.3 THz,如图 6(a)所示。两台光梳的重复频率分别为  $f_r=25$  GHz 和  $f_r+\Delta f_r$  ( $\Delta f_r=0.5$  MHz)。探测光梳经过型号为 GR13-0616 的光栅对系统后,垂直经过待测 LCOPA 表面。透射光被再次耦合进光纤中,并经过 50/50 光纤耦合器后与本振光梳重合,然后在型号为 PDB-465C 的平衡探测器中对光外差拍频进行探测。探测器前装有可调光衰减器,防止探测器饱和,饱和光功率为 0.12 mW。探测信号由型号为 HD06104A 的高速数字示波器(带宽为 1 GHz,采样率为 10 GSa/s)采集后输入计算机中进行数据处理。图 6(b)为时域拍频信号的实验结果。从图 6(b)可以

看到,单个拍频信号的重复周期为  $2 \mu\text{s}$ ,即为  $1/\Delta f_r$ 。对一个完整周期内的拍频信号进行快速傅里叶变换,可以在射频域上得到幅度谱及相应的相位谱,如图 6(c)和图 6(d)所示。通过双光梳的频率转换因子  $f_r/\Delta f_r$ <sup>[17]</sup>,可将幅度与相位谱还原至光频波段。

实验测得经过 LCOPA 的探测光梳频谱宽度为 1.5 THz,相当于 30 MHz 的射频谱宽,得到的梳齿数量为 60 个。因此,该实验装置能够同时对 LCOPA 表面的 60 个点位进行测量,进而获取被测件的相位分布信息。由(2)式可知,理想状态下,静态 LCOPA 的相位分布为线性分布,这与实测结果基本一致,如图 6(d)所示。此外,实验中单次数据的采样时间仅为  $2 \mu\text{s}$ 。由于受到 MATLAB 软件数据处理程序的制约(耗时约为 0.01 s),系统最终的数据更新率为 100 Hz。即便如此,相较于传统方法<sup>[12-16]</sup>,双光梳相位检测方法在多点位并行检测及测量实时性方面占有优势。

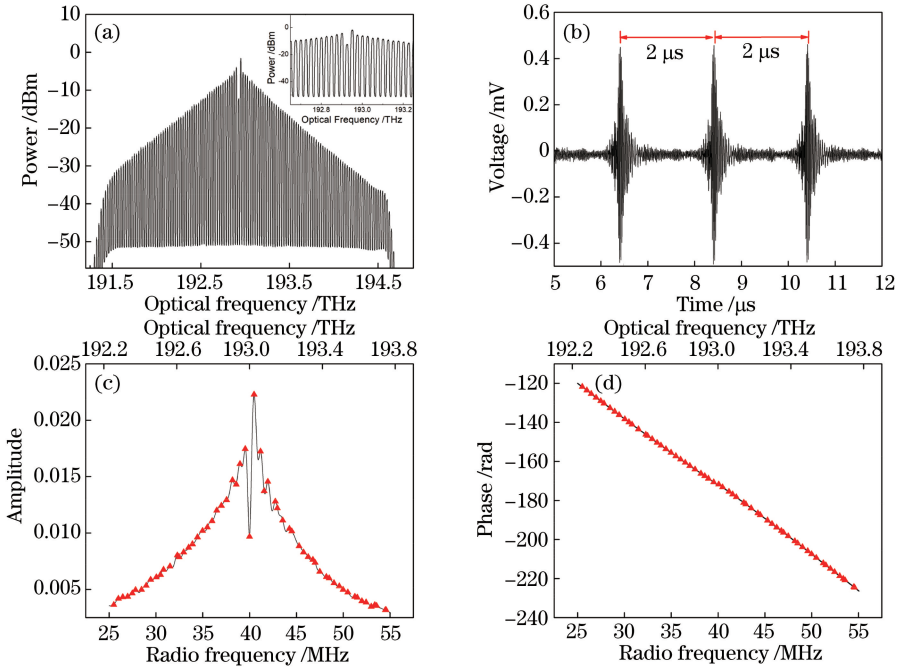


图 6 LCOPA 静态相位分布的测量结果。(a)光梳光谱图;(b)时域拍频信号;(c)幅度谱;(d)相位谱

Fig. 6 Measurement results of LCOPA static phase distribution. (a) Optical comb spectrum; (b) time domain beat signal; (c) amplitude spectrum; (d) phase spectrum

## 5 结 论

为了解决 LCOPA 调制相位分布的实时溯源问题以及有效提升器件的性能,结合空间啁啾技术及双光梳拍频测量技术,提出基于光梳的相位测量方法,该方法可用于 LCOPA 单个驱动电极调制相位分布的空间高分辨快速测量。理论仿真结果表明,

该方法的测量范围可达 100 mm,空间分辨率达到  $2 \mu\text{m}$ ,单次测量即可获取 LCOPA 中上万个驱动电极单元的调制相位分布信息。此外,通过实验验证该方法在更新速率(单次测量时间仅为  $2 \mu\text{s}$ ,最终数据更新率为 100 Hz)等方面占有优势。因此,实验与仿真结果表明该方法有望为高性能 LCOPA 的研制和性能评价提供实时的高分辨相位检测手段。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Z C, You Z, Chu D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e213.
- [2] Pan G Z, Xu C, Xie Y Y, et al. Ultra-compact electrically controlled beam steering chip based on coherently coupled VCSEL array directly integrated with optical phased array[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13910-13922.
- [3] Jiang H L, Jiang L, Song Y S, et al. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (4): 0405008.  
姜会林, 江伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42 (4): 0405008.
- [4] Anguita J A, Quezada C, Herreros J. Demonstration of multi-user laser communication using orbital-angular-momentum channels [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8517: 851708.
- [5] Arvizu A, Santos J, Domínguez E, et al. ATP subsystem for optical communications on a cubesat [C]//2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), October 26-28, 2015, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE, 2015: 15838610.
- [6] Chen J, Kong L J, Xiao F, et al. Continuously one-dimensional steering of coherently combined beam utilizing phased array of liquid crystal optical phased arrays (PALCOPA)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9344: 934426.
- [7] Wang C, Peng Z, Liu Y, et al. Two-dimensional symmetrical radial sub-aperture coherence and the local precision defect elimination method for high-precision beam steering[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18751-18765.
- [8] Wang C, Peng Z, Liu Y, et al. Radial sub-aperture coherence method used to achieve beam steering with high precision and stability [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6331-6347.
- [9] Niu Q F, Wang C Y. High precision beam steering using a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51 (6): 180.
- [10] Hu J, Du S P, Guo H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56 (11): 110002.
- [11] Xun X D, Cohn R W. Phase calibration of spatially nonuniform spatial light modulators [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(35): 6400-6406.
- [12] Thiebaut C, Perraud L, Delvit J M, et al. Fast gradient-based algorithm on extended landscapes for wave-front reconstruction of Earth observation satellite [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9909: 99096V.
- [13] Chen X, Chen X T, Li J C, et al. A calibration algorithm for the voltage-phase characteristic of a liquid crystal optical phased array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9795: 979503.
- [14] Zheng C Y, Yang R F, Xu L, et al. Wave-front measurement approach of liquid-crystal blazed gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38 (10): 1008004.  
郑春艳, 杨若夫, 徐林, 等. 液晶闪耀光栅波前相位测量方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1008004.
- [15] Wu L, Wang X R, Xiong C D, et al. Polarization-independent two-dimensional beam steering using liquid crystal optical phase arrays[J]. *Chinese Optical Letters*, 2017, 15(10): 101601.
- [16] Zheng D H, Li J P, Chen L, et al. Spatial phase-shifting polarization point-piffraction interferometer for wavefront measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(11): 114203.  
郑东晖, 李金鹏, 陈磊, 等. 空域移相偏振点衍射波前检测技术[J]. *物理学报*, 2016, 65(11): 114203.
- [17] Coddington I, Newbury N, Swann W. Dual-comb spectroscopy[J]. *Optica*, 2016, 3(4): 414-126.
- [18] Wu H Z, Zhao T, Wang Z Y, et al. Long distance measurement up to 1.2 km by electro-optic dual-comb interferometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(25): 251901.
- [19] Nishiyama A, Nakajima Y, Nakagawa K, et al. Precise and highly-sensitive Doppler-free two-photon absorption dual-comb spectroscopy using pulse shaping and coherent averaging for fluorescence signal detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8957-8967.
- [20] Zhao Y H, Qu X H, Zhang F M, et al. Theoretical analysis and application of absolute distance measurements based on electro-optic modulation and optical frequency comb [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1204002.  
赵宇航, 曲兴华, 张福民, 等. 基于电光调制光频梳绝对测距的理论及实验分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1204002.

- [21] Lu Q, Shi L, Mao Q H. Research advances in dual-comb spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0400001.  
路桥, 时雷, 毛庆和. 双光梳光谱技术研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0400001.
- [22] Ren X, Dai H, Li D, et al. Mid-infrared electro-optic dual-comb spectroscopy with feedforward frequency stepping[J]. Optics Letters, 2020, 45(3): 776-779.
- [23] Riehle F, Gill P, Arias F, et al. The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures[J]. Metrologia, 2018, 55(2): 188-200.
- [24] Wang C, Deng Z J, Gu C L, et al. Line-scan spectrum-encoded imaging by dual-comb interferometry[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1606-1609.
- [25] Wang Y X, Guo S, Wang D Y, et al. Breaking through the diffraction limit using far-field optical imaging methods[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(12): 1799-1809, 2.  
王云新, 郭莎, 王大勇, 等. 突破衍射极限的远场光学成像方法[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 1799-1809, 2.