

时域鬼成像及其应用

孙宝清*, 王玉鹏

山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237

摘要 鬼成像是一种具有双臂结构的新型成像技术,一路利用无空间分辨能力的探测器接收与物体相互作用的光束,另一路用于记录原始光场的空间分布。鬼成像通过多次测量对二者进行关联运算,即可重构出目标物体的空间强度信息,因此受到了研究人员的广泛关注。最近,基于光的时空二元性,鬼成像从空域扩展到时域,时域鬼成像被提出并得以验证。由于使用低速探测器可以探测到高速信号,时域鬼成像逐步发展为一种高速光信号探测方法。此外,许多基于时域鬼成像的信息安全和传输方案也被相继提出。主要介绍时域鬼成像技术的基本原理及应用的发展历程,并着重介绍了其在长距离光纤探测、超快信号探测、信息安全以及提升相机帧率中的应用工作。

关键词 量子光学; 时域鬼成像; 光纤探测; 超快信号探测; 信息安全; 相机帧率

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1212001

1 引言

鬼成像(Ghost Imaging, GI),又被称为关联成像,是一种非直接探测的二维成像手段。它通过同一光源两条光路的关联测量来对物体的二维图像进行重构。其中一路被称作探测光路,在这一光路中入射光与目标物体相互作用,其透射光或反射光被一个没有空间分辨能力的单像素探测器(SPD,又称桶探测器)接收,记录下总光强值;另一路被称作参考光路,在这一光路中入射光不与物体相互作用,而是直接由面阵探测器记录下具有空间分布的光强值。鬼成像的发展经历了从量子鬼成像到经典鬼成像的过程。1995年,美国马里兰大学的 Pittman 等^[1]首次在实验上实现并报道了鬼成像技术。实验中,通过自发参量下转换产生纠缠光源,对两路探测信号进行符合测量,从而获取物体的空间强度信息。由于实验中使用的光源是具有纠缠特性的光子对,因此人们认为鬼成像本质上是一种量子现象,只有具有量子纠缠特性的光源才能实现鬼成像^[2]。直到2002年,美国罗切斯特大学 Bennik 等^[3]利用经典光源实现了鬼成像,才证明纠缠光源并非是实现鬼成像的必要条件。2004年,科学家利用激光照射旋

转毛玻璃,产生赝热光源,实现了关联成像^[4]。2008年,Shapiro^[5]提出了计算鬼成像的方案,通过使用空间光调制器(SLM)定制赝热光场空间分布,省去了传统关联成像实验中的参考光路,简化了成像系统,从而避免了参考光路引入的噪声影响,提高了信噪比。在此之后,高阶关联成像^[6]、差分鬼成像^[7]、差分计算鬼成像^[8]、归一化鬼成像^[9]等方法被相继提出,丰富改进了计算鬼成像的实验方案,促进了该技术在太赫兹成像^[10-11]、超快成像^[12-14]、三维成像^[15-17]、光学安全^[18-21]等领域的实际应用。

时空二元性技术作为一种将空间光信号变换方法类比到时域的信号处理技术^[22],开启了从空域鬼成像延伸至时域鬼成像的大门。2010年,Shirai 等^[23]从理论上证明了经典非稳态光源时域鬼成像的可行性。2012年,Cho 等^[24]从理论上提出了量子光源时域鬼成像方案。2013年,Chen 等^[25]通过数值仿真模拟,验证了时域鬼成像的可行性。2016年,Ryczkowski 等^[26]首次在实验上实现了时域鬼成像。与空域鬼成像相比,时域鬼成像在实验上利用激光二极管发射的强度随机涨落的光束替代了横向强度随机涨落的光束,超快电光调制器(EOM)对入射光场的时间强度调制替代了空间物体与光场的相

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61675117)

*E-mail: Baoqing.sun@sdu.edu.cn

相互作用。通过多次测量,对参考光路快探测器与信号光路慢探测器之间的强度波形进行关联运算,实现了对信号的高质量重构恢复。之后,Ryczkowski 等^[27]又提出了放大时域鬼成像,突破了参考光路中探测器的速度对重构时域信号的时间分辨率的限制。2017年,差分鬼成像也被应用到时域中,有效提高了重构信号的信噪比^[28]。2020年,傅里叶时域鬼成像方案被提出,并被用于直接获取信号的光谱信息^[29]。由于时域鬼成像方案与光纤网络具有良好的兼容性,许多研究人员致力于其在长距离光纤中的信号探测应用^[30-33]。为了克服超快探测器在波长上的限制,Wu 等^[34]通过使用波长转换技术将探测激光波长转移到超快探测器的光谱区域,实现了对 $2\ \mu\text{m}$ 的时间物体成像。此外,时域鬼成像也在微波波段^[35]甚至声学领域^[36]得到了实现和验证。与空域鬼成像相似,时域鬼成像也需要重复多次测量,这导致其只能对可重复或周期性信号进行探测。为了解决这一问题,2016年,Devaux 等^[37]提出了空间复用的时域计算成像方案,通过使用液晶显示器产生随机二值图案作为调制光场,实现了对非周期信号的实时探测。之后,他们还利用赝热

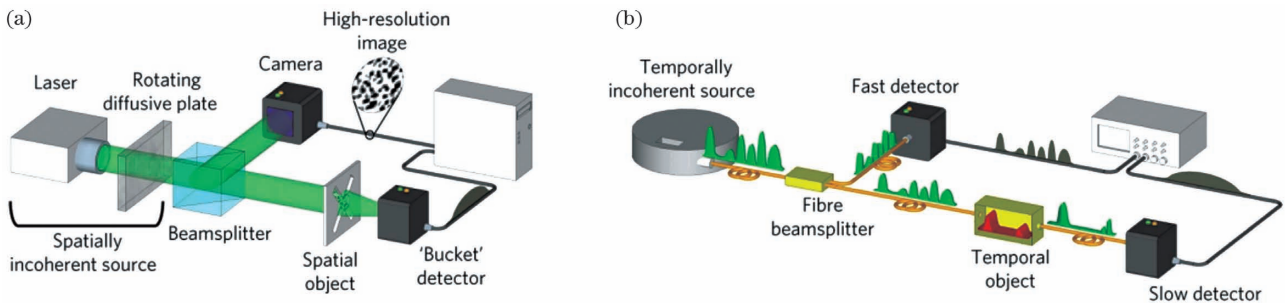


图 1 经典空域鬼成像和时域鬼成像的实验装置比较^[26]。(a)空域实验装置;(b)时域实验装置

Fig. 1 Comparison of classical spatial and temporal GI experimental set-ups^[26]. (a) Spatial set-up; (b) temporal set-up

基于时空二元性,将空域鬼成像类比到时域中所形成的技术,被称作时域鬼成像,其基本原理^[26]如图 1(b)所示。激光二极管发射的强度随机涨落的光束被耦合进光纤中,被光纤分束器分为两路,其中一路的参考光直接由一个快速光电二极管实时记录信号强度波形,另一路则与待测时间信号相互作用,该信号是一个由脉冲模式发生器(PPM)驱动的超快光电调制器(EOM)产生的位序列,作用后的光信号由一个慢速光电二极管进行时间积分,该探测器无法分辨光信号的时序结构,仅能获得一个调制周期内的信号光强总值。该过程即为时域鬼成像的探测过程,可表示为

$$S_i = \int_0^{\tau} I_i(t) dt, \quad (1)$$

光散斑场^[38]和自发参量下转换产生的纠缠双光子^[39]实现了验证。类似地,波分复用^[40]和频分复用^[41]的方案也在时域鬼成像系统中被证明。2018年,国防科技大学的 Xu 等^[42]基于计算鬼成像的思想,将时域鬼成像中的参考光路省去,仅用信号光路的慢探测器即可实现对快速信号的测量。随着研究的不断深入,时域鬼成像在量子器件评估^[43]、空间三维成像^[44]、信息安全和传输^[45-53]等领域也有着潜在的应用前景。本文主要讨论了计算时域鬼成像技术及其在长距离光纤探测、超快信号测量、信息安全等领域的应用。

2 时域鬼成像技术原理

经典空域鬼成像的原理^[26]如图 1(a)所示。激光器发射的光束照射在旋转的毛玻璃上,产生的散斑场经由分束镜分为两束光,一束照射在待测空间物体上,与物体相互作用后被一个 SPD 接收,并记录其总光强,另一束被相机接收后记录其空间光场分布。经过多次重复测量后,就可以得到一系列与照明图案对应的探测光强值,将二者进行关联运算,即可重构获取物体的空间二维分布信息。

式中: $i=1,2,\dots,N$; S_i 为第 i 次测量时慢探测器的积分强度值; τ 为积分时间; $I_i(t)$ 为光源信号与待测信号相互作用后的信号,可表示为

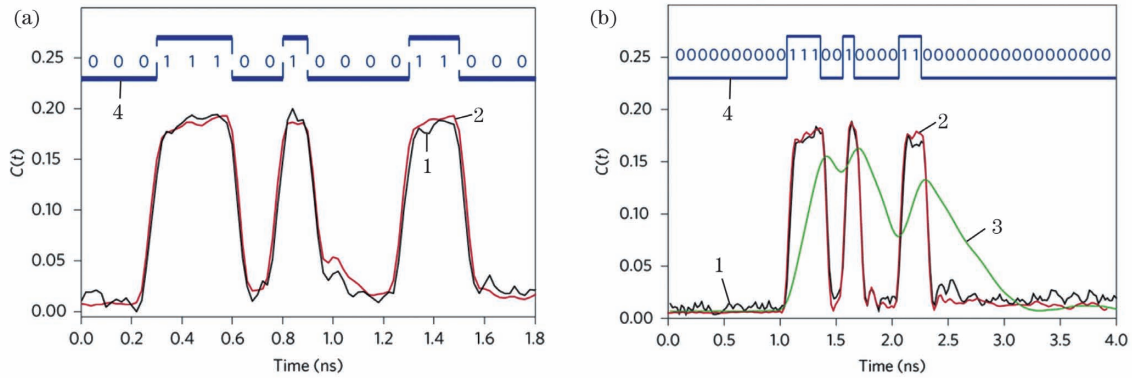
$$I_i(t) = P_i(t) * C(t), \quad (2)$$

其中 $P_i(t)$ 为快速探测器记录的强度随机涨落的光信号波形, $C(t)$ 为待测时间信号,“ $*$ ”表示两序列对应元素相乘。经过 N 次重复测量,可以通过对两路同时测量得到的一系列时间信号作关联运算,恢复出待测的时间信号 $C'(t)$,表达式为

$$C'(t) = \langle (S_i - \langle S_i \rangle) P(t) \rangle, \quad (3)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示取 N 次的平均值,即求期望值操作。

图 2(a)展示经过 80000 次测量后得到的时域鬼成像结果,与使用快速探测器直接探测的波形具



1: temporal ghost image; 2: direct image without the multimode fibre; 3: direct image with the multimode fibre. 4: temporal target signal
 图 2 时域鬼成像的实验结果^[26]。(a)时域鬼成像与使用快探测器直接探测的结果比较;(b)在物体与慢探测器之间引入一段多模光纤后的实验结果比较

Fig. 2 Experimental results temporal ghost imaging^[26]. (a) Comparison of temporal ghost imaging and direct imaging measured with the fast detector; (b) comparison of temporal ghost imaging and direct imaging when a multimode fiber is added between the object and the detector

有较好的一致性。此外,当在探测光路中的物体与探测器之间引入一段长 29 m 的多模光纤时,直接探测的波形产生了严重的失真。然而在引入时域鬼成像技术后,信号失真的影响被消除。更普遍的是,当信号的传输强度在探测时间内不发生变化时,时域信号的波形畸变不影响时域鬼成像技术对目标的重构。借助于任意波形发生器,产生已知的随机信号,对光源进行振幅调制,可省略快探测器一端的参考光路,从而实现计算式时域鬼成像系统。与传统时域鬼成像相比,计算式时域鬼成像系统省略了参考光路,仅使用一个慢速探测器便可实现对快速信号的探测。该方案不仅简化了设备,降低了成本,还避免了参考光路引入的噪声,提升了信号重构质量。此外,还可以通过定制调制时间序列,降低信号重构所需要的采样数量,来满足不同的探测需求。

时域鬼成像中的时间信号重构依赖于参与调制采样的参考信号的时序分布与目标信号之间的关联程度,与目标信号相似程度越高的参考信号,作用后的有效信息就越多,探测器的积分能量就越高。对于使用光源随机涨落或编码的调制方案^[26-27, 33-34, 37-39],不同的调制序列之间必然包含重叠信息,存在一定的冗余性,从而降低了关联运算的效率。因此,为了达到最大的计算效率,最好选择一组正交序列。在数学中,哈达玛(Hadamard)矩阵作为一个仅包含 +1 和 -1 两种元素的方阵满足上述要求,其每一行或每一列都是相互正交的,其性质满足

$$\mathbf{H}^{-1}\mathbf{H} = \mathbf{H}^{-1} = \frac{1}{n}\mathbf{H}^T = \mathbf{I}_n. \quad (4)$$

式中: \mathbf{H} 为哈达玛矩阵; \mathbf{H}^{-1} 和 \mathbf{H}^T 分别为哈达玛矩阵的逆矩阵和转置矩阵; n 为哈达玛矩阵的阶数; \mathbf{I}_n 为 n 阶单位矩阵。哈达玛矩阵的阶数必须是 1、2 或者 4 的正整数倍,一个 2 阶哈达玛矩阵可以表示为 $\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ 。这里只考虑阶数为 2^n 的哈达玛矩阵。高阶哈达玛矩阵可以通过克罗内克积(Kronecker product)运算得到,运算过程可表示为

$$\mathbf{H}_{2^n} = \mathbf{H}_2 \otimes \mathbf{H}_{2^{n-1}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{2^{n-1}} & \mathbf{H}_{2^{n-1}} \\ \mathbf{H}_{2^{n-1}} & -\mathbf{H}_{2^{n-1}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: \otimes 表示克罗内克积。

利用上述哈达玛矩阵作为计算时域鬼成像的调制序列,在数学上,(1)式所示的探测过程可以写为矩阵形式,即

$$[\mathbf{S}_i]_N = [\mathbf{H}_i(t)]_{N \times N} [\mathbf{C}(t)]_N. \quad (6)$$

根据线性代数理论,对待测信号 $C(t)$ 的重构过程可以看作是对(6)式矩阵进行逆运算,即

$$[\mathbf{C}'(t)]_N = [\mathbf{H}_i(t)]_{N \times N}^{-1} [\mathbf{S}_i]_N = \frac{1}{N} [\mathbf{H}_i(t)]_{N \times N}^T [\mathbf{S}_i]_N. \quad (7)$$

利用(4)式所示哈达玛矩阵的正交性,(7)式可以写为

$$\mathbf{C}'(t) = \langle \mathbf{S}_i \mathbf{H}_i(t) \rangle. \quad (8)$$

但是,由于时域信号是非负的,因此可通过差分信号采集法^[8]来实现正交调制,同时实现对光源强度波动噪声和探测器噪声的抑制。差分信号的生成过程可表示为

$$[\mathbf{H}_i(t)]_{N \times N} = [\mathbf{H}_{i_o}(t)]_{N \times N} - [\mathbf{H}_{i_e}(t)]_{N \times N}, \quad (9)$$

其中, $H_{i_o}(t)$ 是将 $H_i(t)$ 中所有的 -1 元素用 0 替换获得, $H_{i_e}(t)$ 是与 $H_{i_o}(t)$ 完全相反的序列。这样, 待测时间信号将由时间序列 $H_{i_o}(t)$ 紧跟着 $H_{i_e}(t)$ 进行调制, 得到对应调制下探测器的积分能量值 S_{i_o} 和 S_{i_e} , 再用 S_{i_o} 和 S_{i_e} 获得差分后的探测值。那么, 待测信号的重构过程最终可以写为

$$C'(t) = \langle (S_{i_o} - S_{i_e})(H_{i_o}(t) - H_{i_e}(t)) \rangle. \quad (10)$$

为了客观评价重构信号的质量, 引入峰值功率信噪比 (P_{SNR}) 来对其进行定量评估, P_{SNR} 定义为

$$P_{SNR} = 10 \lg \left\{ \frac{M}{\sum_t [C'(t) - C(t)]^2} \right\}, \quad (11)$$

式中: M 为信号的像素数; $C'(t)$ 表示重构后的信号; $C(t)$ 表示原始信号。从这个定义来看, 峰值功率信噪比越大, 结果的质量越好, 也就是说结果越接近原始信号。

3 时域鬼成像与光纤探测应用

3.1 长距离光纤探测时域鬼成像

文献[26]中, 研究人员在参考光路和探测光路中均使用了长度为 1 m 的单模光纤, 以保证高速探测器探测到的光强与入射到时域物体上的光强一致。然而, 在光纤传感系统的实际应用中, 时域物体距离探测器通常较远且位置多变, 双臂结构使得系统的灵活性降低且成本增加。理论上, 借助于计算时域鬼成像的思想, 可以通过对光源场的相干测量, 并利用脉冲传播方程计算出入射到物体上的参考光强波动, 从而实现关联测量。但是, 利用皮秒级超快相干检测技术, 实时测量时间随机变化的光源场仍然是一项巨大的挑战。为了克服这一问题, Tang 等[31] 提出了一种只使用强度探测来获取随机光源强度信息的技术, 从而实现了单根光纤上的计算时域鬼成像方案, 其实验原理如图 3 所示。

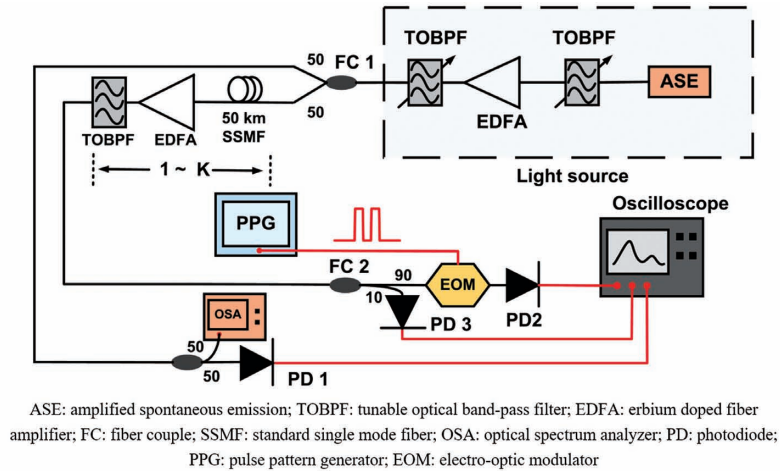


图 3 仅用光强探测计算时域鬼成像实验装置图^[31]

Fig. 3 Schematic diagram of intensity-only detection computational temporal ghost imaging^[31]

实验中, 使用光电探测器 (PD1 和 PD2) 分别测量光源的时域强度和探测光路的总光强, 计算二者之间的互相关系数, 记作光源-探测强度相关系数。理论分析表明, 时域物体与光源-探测强度相关系数之间的传递函数取决于光纤的总色散值和光源的功率密度谱。通过光谱分析仪测量光源光谱, 将其近似看作功率密度谱, 计算出传递函数。利用傅里叶反卷积, 求解得到最终的计算时域鬼成像结果。

图 4 展示了该系统对逻辑状态为“01010”的非归零码脉冲序列的成像结果, 光纤长度被设置为 200 km 。由图可以看出, 光源-探测强度相关结果中的两个脉冲发生了严重的重叠, 无法分辨, 而利用光谱测量得到的传递函数, 在进行傅里叶去卷积之后,

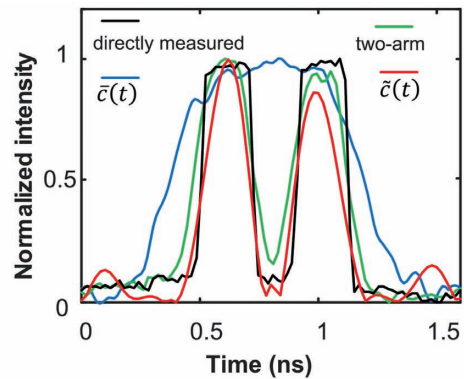


图 4 仅用光强探测计算时域鬼成像实验结果^[31]

Fig. 4 Experimental results of intensity-only detection computational temporal ghost imaging^[31]

得到了与双臂时域鬼成像及直接测量结果相近的高质量波形,两脉冲没有完全重叠。该方案有望促进时域鬼成像在光纤通信或光线传感系统中的实际应用。

3.2 长距离光纤热光时域鬼成像

在文献[30]中,研究人员提出了一种基于硅波导中自发四波混合产生的频率相关光子对的鬼成像方案。通过在鬼成像的两条路径上引入时空色散,

将光子对中的频率相关转化为两个光子到达位置时间的相关。通过这种关联,一维鬼成像可以通过光子对的时间分辨测量来实现。由于时间色散可以通过光纤实现,因此该方案可以在光纤上实现长距离鬼成像传输。在此基础上,通过使用热光源代替量子光源,可以更容易地实现该技术,且提高了系统的抗传输损耗能力,其实验原理如图 5 所示。

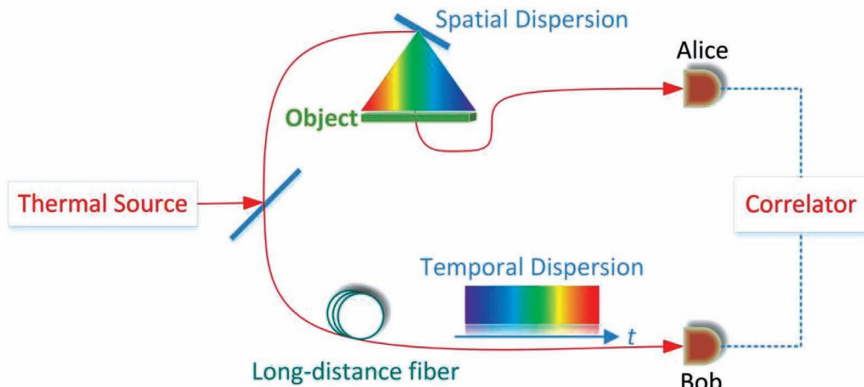


图 5 热光时域鬼成像原理图^[32]

Fig. 5 Schematic diagram of thermal temporal ghost imaging^[32]

实验中将从热源发出的光衰减到单光子级别,然后被分束器分成两条路径。在一条路径(Alice)中,光子通过空间色散器件(如光栅或棱镜),根据频率扩散成一条线,然后照亮物体,透射(或反射)的光子由单光子探测器收集。由于探测器不能区分这些光子的频率或位置,因此这些光子携带的物体透射(或反射)信息不能仅通过这条路径的检测结果来恢复。实际上,由于空间色散效应,物体的空间信息是在热光子的光谱上调制而成的,因此,实验中可使用一个窄带可调滤波器来模拟物体的光谱调制过程。在另一条路径(Bob)中,由于长距离单模光纤的色散作用,光子的传输时间会因频率的不同而有所差异,然后被另一个单光子探测器检测,这些光子不携带物体的信息。最后,物体信息可以通过这两条路径的关联测量进行检索恢复,如图 6 所示。正因为时间色散可以通过长距离的光纤实现,故该方案适用于光纤链路上两个远端之间的成像过程。

4 超快时间信号探测技术及应用

在时域鬼成像中,探测光路中的探测器仅对光的能量进行积分收集,对物体和探测器之间光信号的失真并不敏感,比如色散、非线性或衰减等。尽管这为超快信号探测提供了机会,但是取决于光源的随机波动时间和探测系统的时间分辨率,这限制了

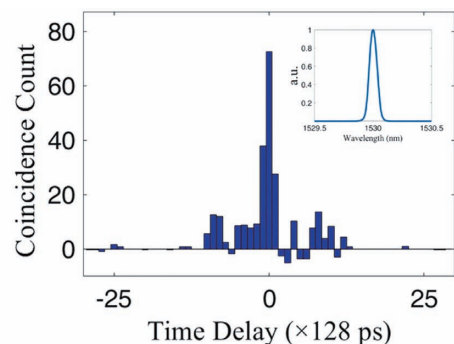


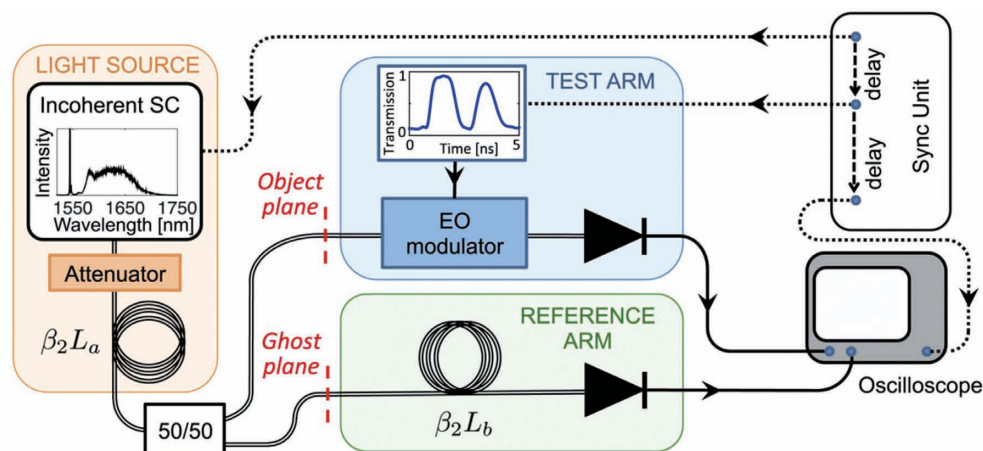
图 6 热光时域鬼成像实验结果(插图窄带可调滤波器的传输谱)^[32]

Fig. 6 Experimental results of thermal temporal ghost imaging(insert: the transmission spectrum of the bandwidth-variable tunable filter)^[32]

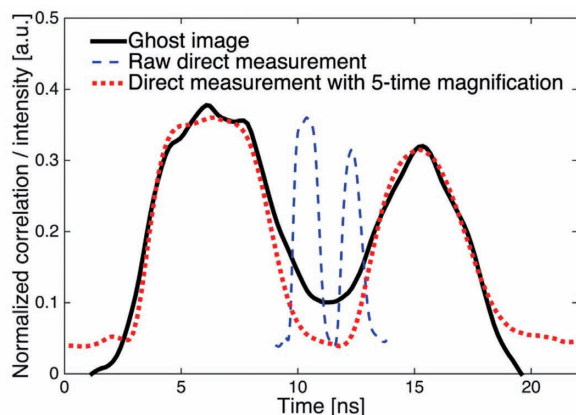
其进一步的应用。为了实现多种场景下的超快信号探测,研究人员进行了大量的研究,并提出了一系列技术方案,包括放大时域鬼成像、波长转换时域鬼成像、计算时域鬼成像等。

4.1 放大时域鬼成像

放大时域鬼成像的装置原理如图 7 所示。实验采用宽频带的时间非相干光源,其发射光的频域光谱信息通过光纤的色散傅里叶变换在时域上展开,即被转化为时域信息。然后,时域脉冲被耦合进探测臂和参考臂。其中,探测臂的光脉冲与由电光调

图 7 放大时域鬼成像实验原理图^[27]Fig. 7 Schematic diagram of magnified time-domain ghost imaging^[27]

制器模拟的时间物体相互作用,最终被一个无法分辨时间物体的低响应探测器接收。参考臂中,通过引入一段额外的长距离色散光纤,将脉冲的时间波动放大 5 倍后,由探测器接收。最终,通过两个探测器接收信号的关联运算,获得了在时间上展宽 5 倍的待测目标物体信息,实验结果如图 8 所示。

图 8 放大时域鬼成像实验结果^[27]Fig. 8 Experimental results of magnified time-domain ghost imaging^[27]

该方法通过使用短时间的脉冲光源,增加了光源的有效波动时间,实现了高倍率的放大成像,从而解决了传统时域鬼成像通常受限于探测系统时间分辨率的问题。

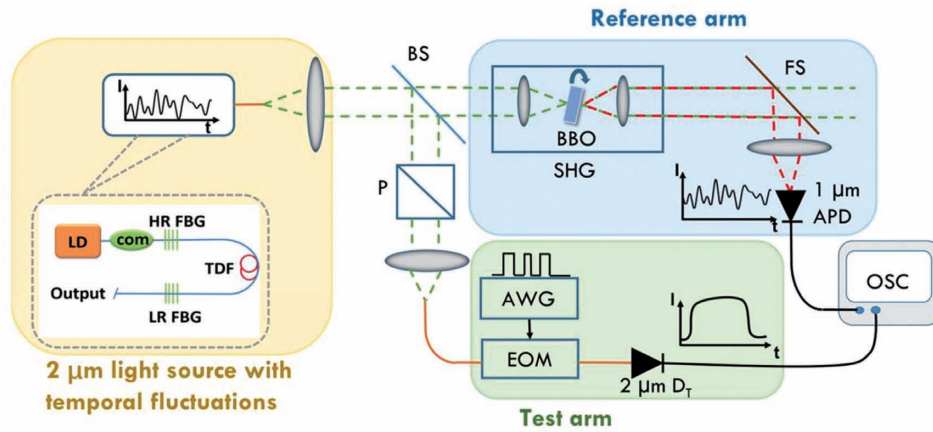
4.2 特殊波段超快时间信号探测

从时域鬼成像的基本原理可以看出,时域信号物体的测量时间分辨率最终是由探测波形波动的特征尺度和测量(或预编程调制)时相应的时间分辨率决定的。为了实现恢复超快时间物体或者调制的高分辨率测量,需要借助于高速探测器,且其波长应与

照明时间物体的光波长保持一致。然而,由于探测器不能在所有波长上使用,这在实验上极大地限制了时域鬼成像的应用范围,尤其是对于红外光谱区域中较长的波长区域。芬兰坦佩雷大学的研究人员借助波长转换的思想,通过将探测光转移到有超快探测器的光谱区域解决了这一问题,并将该技术应用于 $2 \mu\text{m}$ 的时间物体成像,其原理如图 9 所示。

实验使用工作波长为 1970 nm 的定制准连续波包泵浦掺铋光纤激光器作为光源,输出特征时间尺度为 0.13 ns 、强度随机波动的光束。在参考臂中, β -硼酸钡晶体通过 I 型相位匹配产生 $1 \mu\text{m}$ 的倍频激光时间波动,并由带宽为 1 GHz 的快速铟镓砷雪崩光电二极管进行探测。在测试臂中,待测时间信号通过任意波形发生器(AWG)驱动控制 EOM 的开关序列设置,经由 EOM 调制的光被带宽为 20.6 MHz 的慢速积分探测器接收。测试臂中探测器的响应速度太慢,无法解析时间序列的结构。而光源的波动时间尺度比参考臂中快速探测器的响应时间短近一个数量级,因此最终通过关联运算恢复得到的时间信号分辨率则由参考臂中的快速探测器的带宽决定。图 10 展示了对总持续时间为 30 ns 、时间分辨率为 1 ns 的时间序列的测量结果。

该工作的提出,使得实验设计有了更广泛的照明和探测选择,极大地扩展了时域鬼成像的应用范围。除了用于上述基于波长转换的二次谐波产生的方法,该技术也适用于保留光源强度统计的任何非线性频率转换过程。此工作为无法使用快速探测器光谱区域的超快成像打开了大门,例如在泵浦-探测实验中可以用来表征难以获取的波长范围内的材料,如中红外^[54]和太赫兹波段^[55]等。



BS: beam splitter; P: polarizer; BBO: β -barium borate crystal; SHG: second-harmonic generation; FS: filters set; APD: avalanche photodiode; AWG: arbitrary waveform generator; EOM: electro-optic modulator; OSC: oscilloscope; LD: laser diode; com: pump combiner; HR FBG: high-reflective fiber Bragg grating; LR FBG: low-reflective fiber Bragg grating; TDF: thulium-doped fiber

图 9 基于波长转换的时域鬼成像实验装置^[34]

Fig. 9 Experimental setup for temporal ghost imaging with wavelength conversion^[34]

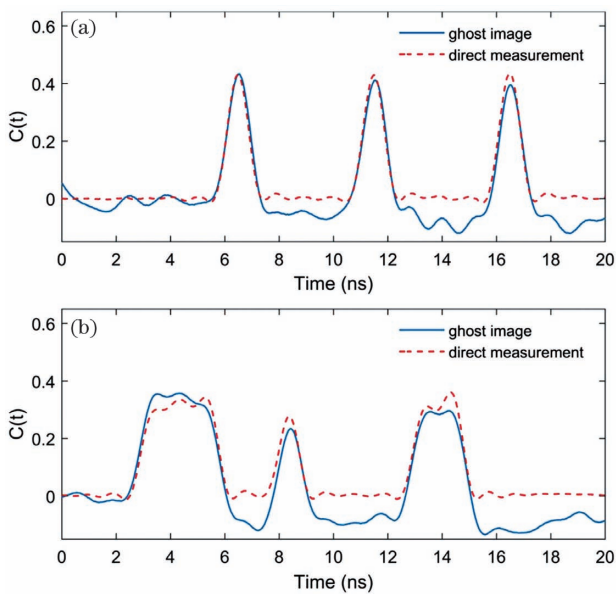


图 10 时间物体的鬼成像实验结果^[34]。(a)(b)不同时间序列的两个例子(实线代表时域鬼成像结果;虚线对应于用 $2 \mu\text{m}$ 快速检测器直接测量的结果)

Fig. 10 Experimental ghost image of temporal objects^[34]. (a) and (b) are two examples of different bit sequences (The solid lines represent the ghost image; the dashed lines correspond to the direct measurement results with the $2 \mu\text{m}$ fast detector)

4.3 基于计算时域鬼成像的超快时间信号探测

根据信息论的原理,为了无失真地实现信号探测,探测器的带宽必须与信号频率相匹配。而对于计算时域鬼成像而言,在探测端并不关注信号的时

间分辨能力,只对调制后的信号光进行积分,而后收集其总能量。因此,探测器并不需要具有与待测时间信号相当的时间分辨能力,也就是说计算时域鬼成像方案可以允许仅使用一个低带宽的慢探测器,来实现对快速时间信号的测量。

图 11 展示了该方案的实验装置。首先激光二极管发射出一个可重复待测的光信号,再经由一个电光调制器对其进行 0、1 随机强度调制,最后被一个光电探测器接收,并由示波器记录下其电压输出值。其中,待测光信号的调制频率为 20 MHz,即时间分辨率为 50 ns;其包含 300 bit 数据,时间总长为 15 μs 。为了便于比较,实验对信号分别进行了直接探测,并利用时域鬼成像算法进行了重构。直接探测时,控制调制器使信号不加调制而直接通过。对于计算时域鬼成像,则将信号每个周期内示波器记录的结果求和,获取总的积分结果进行重构。实验中,探测器的 -3 dB 带宽在 10 MHz 到 1 kHz 内发生变化。

图 12 中的点线表示了对信号直接探测的结果。可以看出,随着探测器带宽的降低,其响应时间逐渐增加,信号的上升沿和下降沿也因此被拉长。当带宽较低时,信号出现了失真甚至串扰现象。在待测的信号中,三个峰的高度原本是相同的,但如图 12(c)~(e)所示,后一个峰都会受到前一个峰的影响,因此三个峰的高度依次增大。同时,由于探测器的频率响应变差,其探测结果的峰值随着带宽的降低而减小,从而导致噪声相对增加,使其看起来更加明显。相比之下,基于计算时域鬼成像的重构结

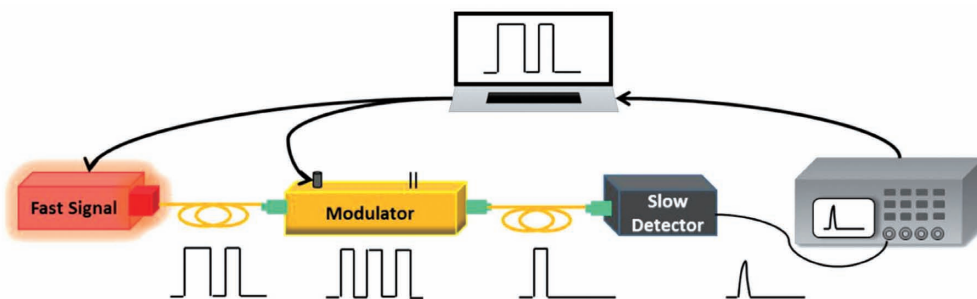


图 11 通过计算时域鬼成像探测时间信号实验装置^[42]

Fig. 11 Experimental setup for detecting a temporal signal via computational temporal ghost imaging^[42]

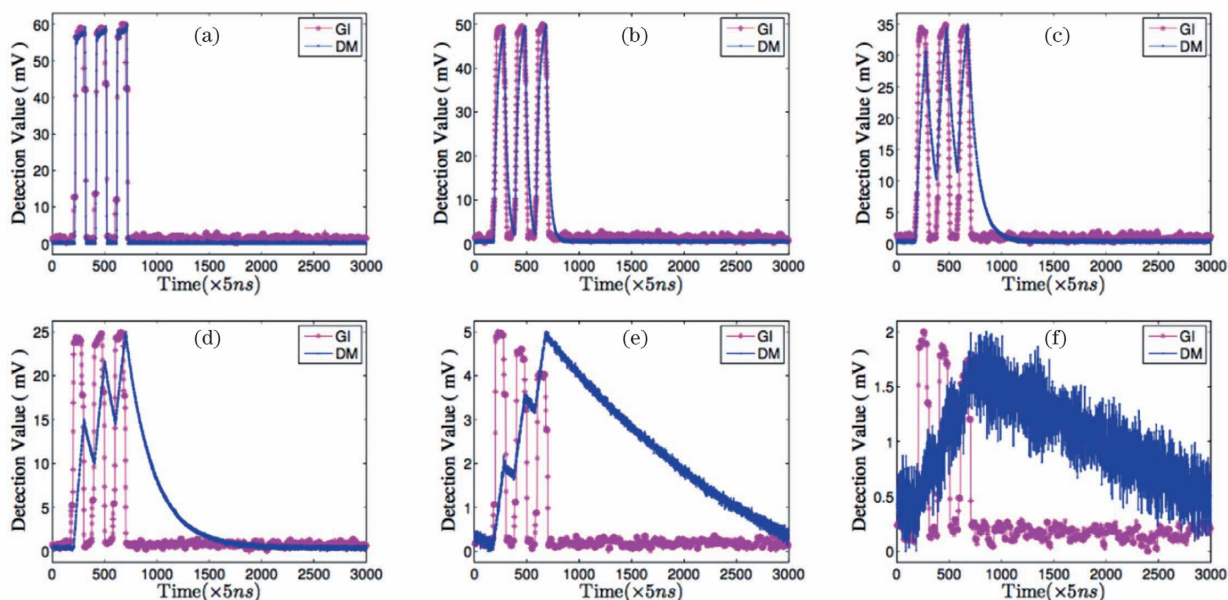


图 12 直接探测和计算时域鬼成像重构结果的比较^[42]。(a)带宽为 10 MHz;(b)带宽为 1 MHz;(c)带宽为 300 kHz;
(d)带宽为 100 kHz;(e)带宽为 10 kHz;(f)带宽为 1 kHz

Fig. 12 Comparison of results of direct detection and computational temporal GI^[42]. (a) Bandwidth is 10 MHz;
(b) bandwidth is 1 MHz; (c) bandwidth is 300 kHz; (d) bandwidth is 100 kHz; (e) bandwidth is 10 kHz;
(f) bandwidth is 1 kHz

果受探测器带宽的影响很小,如图 12 中星号线所示。这是因为实验中最终只需要通过测量获取探测器在一段时间内的整体积分强度,然后通过关联运算即可重构出待测信号。即使由于光电探测器的带宽限制导致直接测量的信号波形产生失真,但是其积分强度值仍然保持相对不变,只是出现了一定程度的衰减,且这种衰减对于关联运算来说是线性的,在计算过程中可以被忽略掉,故不会对重构结果产生贡献。需要注意的是,当探测器的带宽很低时,即使使用时域鬼成像的算法也会降低重构信号的保真度,这是因为不同位信号间的串扰使得探测器积分值中三个信号峰所占的比例不同。将当探测器带宽较低时,信号值在从峰值减小到背景噪声水平的过程中,会出现一段长时间的拖尾。如果信号在采样

结束时没有达到最小值,则会有一部分拖尾被略去,并且信号峰出现得越晚,其被略去的成分就越多。这样,出现时间越晚的信号峰在关联运算中贡献的权重越低,导致计算的相关性下降。因此,随着时间的推移,重构信号峰的高度逐渐降低。在实际探测中,需要尽可能地收集信号包含拖尾全部的能量,以获得更准确的信号重构结果。

4.4 基于计算时域鬼成像的通信安全方案

可见光通信(VLC)作为一种新兴的光学无线通信技术,由于其在 5G 后的下一代通信中具有巨大的应用潜力,吸引了众多研究者的兴趣。随着无线网络流量的快速增长,数据传输的安全性和保密性成为用户关注的主要问题。由于 VLC 的实现方案与现有的通信方法有很大的不同,其加密系统也

有所区别,因此本课题组基于计算时域鬼成像的原理,通过利用超带宽工作下的微型发光二极管 (micro-LED),提出了一种硬件结合算法的双重加密方案,并在 VLC 系统中得到了验证。

图 13 为基于计算时域鬼成像的光通信加解密过程原理图。Alice 作为数据的发射方,要向接收方 Bob 传输一组长度为 127 bit 的伪随机二进制序列,即明文。一般情况下,密钥可以根据不同的情况和需要进行选择。这里,为了减少密钥之间的冗余信息,从哈达玛矩阵的行或列中选取一系列的正交基来提供正交密钥。需要注意的是,若其中某些序列的能量明显高于其他序列,则其很容易被窃听者发现。为了保证能量分布的均匀性和加密的安全性,将从哈达玛矩阵中获取的正交序列与一段相同长度的随机序列进行异或运算操作,从而获得随机化的正交序列密钥。该随机序列可以根据需要自由选择,并由发射方和接收方共享。在加密过程中,将明文 $O(t)$ 与密钥 $K_i(t)$ 在计算机中的对应点相乘,即

$$I_i(t) = K_i(t) * O(t) \tag{12}$$

该过程与(2)式中信号的调制类似。然后,加密后的时间序列 $I_i(t)$ 被加载到任意波形发生器中。

任意波形发生器以 4 GHz 的频率输出加密后的信号,经由一个偏置器与直流电源产生的直流电结合,驱动一个 -3 dB 带宽为 160 MHz 的 micro-LED 工作。micro-LED 发射的光束经过自由信道

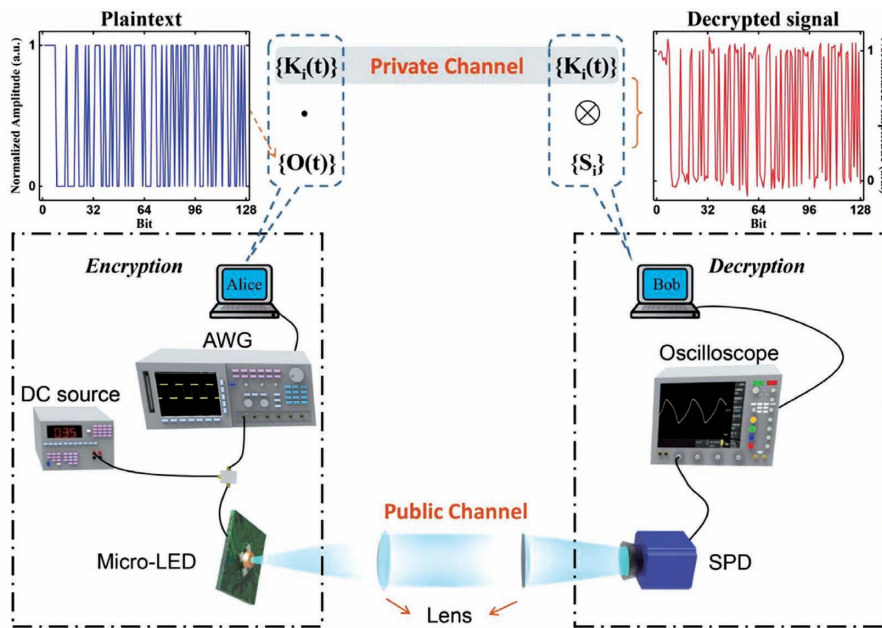
传输后,被接收方的一个 -3 dB 带宽为 100 MHz 的 SPD 接收记录。在解密阶段,SPD 将接收到的光信号转换为电信号,并由示波器采样记录下密文 $I'_i(t)$,其在一个探测器曝光时间周期 τ 内的幅值积分为 S_i ,表达式为

$$S_i = \int_0^\tau I'_i(t) dt, \tag{13}$$

这样,加密后的超带宽信号被求和,并与密钥序列一一对应,而积分值则反映了明文与密钥之间的相关性。最后,类比于(3)式的重构过程,通过关联运算解密出原始信号,表达式为

$$\tilde{O}(t) = \langle (S_i - \langle S \rangle) [K_i(t) - \langle K_i(t) \rangle] \rangle \tag{14}$$

在加密过程中,信号被加载到不同的随机正交基(密钥)上。如果能够完美地加载加密后的信息,则可以通过窃取密钥,直接反解出明文信号。在我们的系统中,虽然探测器接收到的信号由于带宽的限制严重失真,但是潜在的窃听者可以通过高速探测器窃取几乎完美的信号,从而获取数据。因此,需引入非可逆的物理加密机制。一般情况下,micro-LED 的最大有效工作频率只能达到 GHz,且存在一定的误码率^[56]。具体来说,以远远超过其带宽 4 GHz 的频率驱动微 micro-LED,这意味着信号中 160 MHz 的频率分量的功率实际将降低一半,且信号频率越高,功率衰减越严重。这将导致传输过程



AWG: arbitrary waveform generator; DC source: direct current source; SPD: single-pixel detector

图 13 基于计算时域鬼成像的可见光通信加解密过程原理图^[53]

Fig. 13 Schematic diagram of VLC encryption and decryption process based on computational temporal ghost imaging^[53]

中高频成分失真或丢失,从而使原始的数字加密信号完全无法识别。

在数字加密过程中,每个正交密钥都加载了部分信号的有效信息。密文的积分 S_i 实际上反映了明文映射到对应密钥的幅度,即目标信号与正交基的相关性。在关联计算的解密过程中,本课题组只关心探测器的整体强度值。即使接收到的信号发生畸变,积分值也保持相对不变,仅发生衰减,而衰减对二阶相关几乎没有影响。因此,在本课题组的研究方案中,仅采用 -3 dB 带宽为 100 MHz 的慢速探测器来接收数据,减缓了接收高速信号的压力。当 micro-LED 与 SPD 在系统中共同工作时,探测器直接接收到的信号如图 14 虚线所示,其与实线表示的明文有很大区别。而通过关联运算解密出的信号如图 14 中圆点所示,与原始明文相比,其误码率为 0。

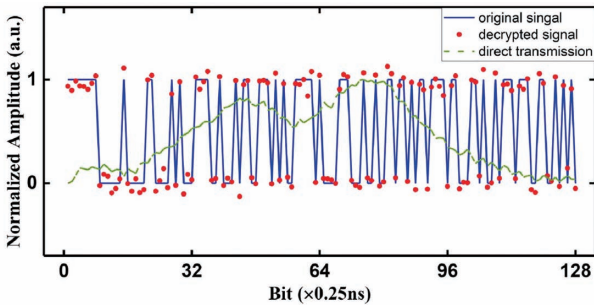


图 14 基于计算时域鬼成像的通信安全方案的实验结果^[53]

Fig. 14 Experimental results of communication security scheme based on computational temporal ghost imaging^[53]

与直接传输探测的 VLC 系统相比,基于 TGI 的通信加密系统需要重复传输 128 次。换句话说,真实的通信速率下降为原有速率的 $1/128$ 。然而,该系统使用了低带宽的发射器及探测器,这意味着 VLC 系统硬件的带宽要求和成本显著降低。这种权衡即使在某些加密通信场景中也是可以接受的。在另一方面,由于数字加密的重复次数与信号的位数相同,故可以通过信号分组来缩短通信时间。此外,使用 LED 阵列代替单一光源,可以简单地通过像素复用^[57]来降低时间成本,这对于现有的技术来说仍然是容易实现的。

5 空间复用时域鬼成像及应用

与空间鬼成像类似,时域鬼成像也需要进行多次重复测量来重构高信噪比的时间信号。那么,这

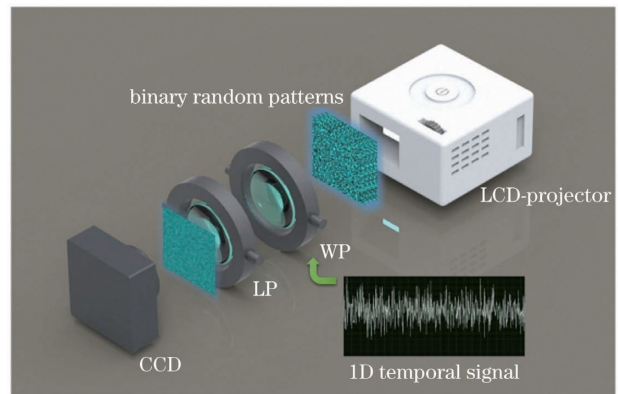
就需要待测的信号可以重复产生,也就是说,时间物体必须是周期信号。这一特点使其不能用于对不可重复或非周期信号的测量,且需要花费更多的时间成本,故在一定程度上限制了时域鬼成像的应用场景。为了解决这一问题,空间复用的计算时域鬼成像方案被提出并通过了实验验证^[37],其实验装置如图 15 所示^[58]。首先,由计算机生成一系列像素数为 $M \times N$ 的随机二值矩阵,然后将其加载到液晶显示投影装置上,并以固定的频率逐一显示。待测时间信号则通过控制一个液晶可变波片,来改变光的偏振态,再通过与其后放置的一个固定的线性偏振片共同作用,来对照明图案的透过率进行调制,实现时间信号的加载。调制后的图案被一个面阵电荷耦合器件相机接收。对整个照明过程进行长曝光采样成像,记录下一幅叠加图 S_{ij} ,表达式为

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^K T(k) X_{k,ij}, \quad (15)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots, K$; $T(k)$ 为加载的时间信号在 k 时刻的值; $X_{k,ij}$ 为第 k 个照明随机图案。最后通过 k 个随机图案与相机采集的积分图案 S_{ij} 之间的关联运算,求解出待测时间信号,即

$$T'(k) = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (S_{ij} - \langle S \rangle) [X_k(i, j) - \langle X_k(i, j) \rangle]}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [X_k(i, j) - \langle X_k(i, j) \rangle]^2}, \quad (16)$$

式中: $T'(k)$ 为所重构的时域信号在 k 时刻的值。



LCD: liquid crystal display; WP: wave plate; LP: linear polarizer; CCD: charge-coupled device

图 15 空间复用计算时域鬼成像实验装置原理图^[58]

Fig. 15 Schematic diagram of spatial multiplexing computational temporal ghost imaging^[58]

5.1 基于空间复用时分域鬼成像的信息安全方案

在空间复用时分域鬼成像中,重构信号的值取决于面阵探测器的积分图案与调制图案的空间分布,且重构过程中不同时刻的信号值与调制图案序列之间存在一一对应关系。如果空间分布或图案序列未知,就不可能正确地重构信号,这一特点使得时分域鬼成像具有较强的安全性,在信息安全领域具有潜在的应用价值。

根据上述空间复用时分域鬼成像的实验原理,提出一种改进的信息安全加密方案。以二维图像为例,该方案加密和解密的原理和流程如图 16 所示。图 16(a)表示了加密过程,待加密的二维图像首先被重新排列为二维数组,该过程可表示为

$$T_i = T_{re} [F_o(m, n)], \quad (17)$$

式中: $m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N; T_i$ 为重排后的一维数组; T_{re} 表示二维到一维的变换操作; $F_o(m, n)$ 表示像素数为 $M \times N$ 的待加密二维图像; 下标 $i = 1, 2, \dots, M \times N$, 表示维度变换后一维数组 T_i 的索引值。为了提升安全性,在变换过程中采用了一些像素置乱技术^[59-61]。事先生成一系列 J 个独立的二维随机矩阵作为密钥,记为 $K_j(p, q)$, 其中: $p = 1, 2, \dots, P; q = 1, 2, \dots, Q; j = 1, 2, \dots, J$, 且 $J \geq M \times N$ 。这里的一维数组 T_i 和密钥 $K_j(p, q)$ 分别对应(15)式中的时间信号 $T(k)$ 和随机二维图案 $X_{k,ij}$ 。然后,将一维数组 T_i 的每个元素与密钥的每个二维图案 $K_j(p, q)$ 相乘,即

$$G_j(p, q) = T_i K_j(p, q). \quad (18)$$

这一过程类似于中(16)式中时间信号对二维随机图案的调制。原则上,为了获得更好的安全性结果,一维数组 T_i 的每个元素都可以与多个二维图案相乘,但是这会增大密钥序列的长度。因此,在该方案中均假设 $J = M \times N$, 且 $i = j$ 。最后,将调制后图案的对应像素相加,得到密文图像,密文图像的表达式为

$$T'_i = \frac{\sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^P [F'(p, q) - F'] [K_i(p, q) - K_i]}{\sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^P [K_i(p, q) - K_i]^2}, \quad (19)$$

$$F'(p, q) = \sum_{j=1}^{M \times N} G_j(p, q). \quad (20)$$

该操作类似于空间复用计算时分域鬼成像中相机长曝光采集的时间积分成像过程。

由于原始图像(明文)在求和过程中已经成为密钥的每个二维图案的加权值,因此可以在不担心信息泄露的情况下进行存储或传输。上述加密过程既可以在计算机上完成,也可以在实际光学系统中实现。假设加密信息的接收端与发送端共享相同的密钥,类比于(16)式的重构过程,可以解密重构生成的一维数组 T'_i , 最后,利用(17)式的逆运算,解密得到原始图像,原始图像可表示为

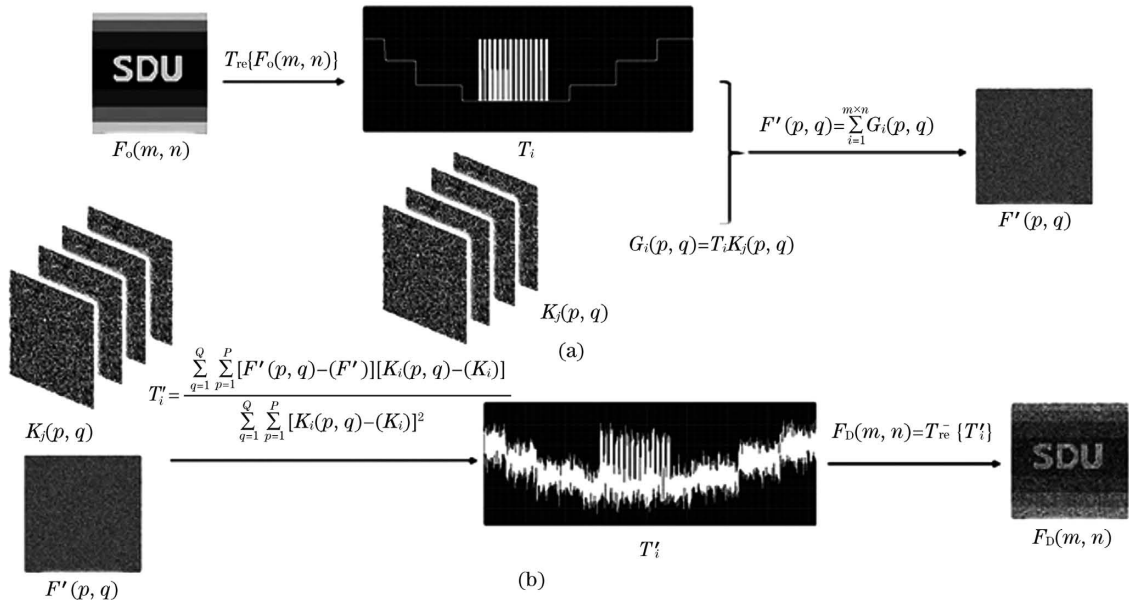


图 16 基于空间复用时分域鬼成像的加密方案框架^[46]。(a)加密过程;(b)解密过程

Fig. 16 Algorithmic framework of the encryption scheme based on spatial multiplexing computational temporal ghost imaging^[46]. (a) Encryption procedure; (b) decryption procedure

$$F_D(m, n) = T_{re}^{-1} \{ T'_i \}, \quad (21)$$

其中, T_{re}^{-1} 表示对应的一维数组到二维图片的重排变换。

在仿真实验中,对如图 17(a)所示的 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的 8 bit 灰度图像进行模拟加密。密钥序列总共包含 4096 张独立的 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 随机二值图片,图 17(b)展示了密钥中的一张图片。图 17(c)表示加密后的密文,也就是面阵探测器积分得到的二维图像。当接收端接收到密文后,可以利用已知的密钥序列,对其进行解密,解密后的图像如图 17(d)所示,其 P_{SNR} 为 27.86 dB。需要注意的是,只有当密钥中的二维图案以及图案的序列完全正确时,才能够解密获得正确的原始图像。

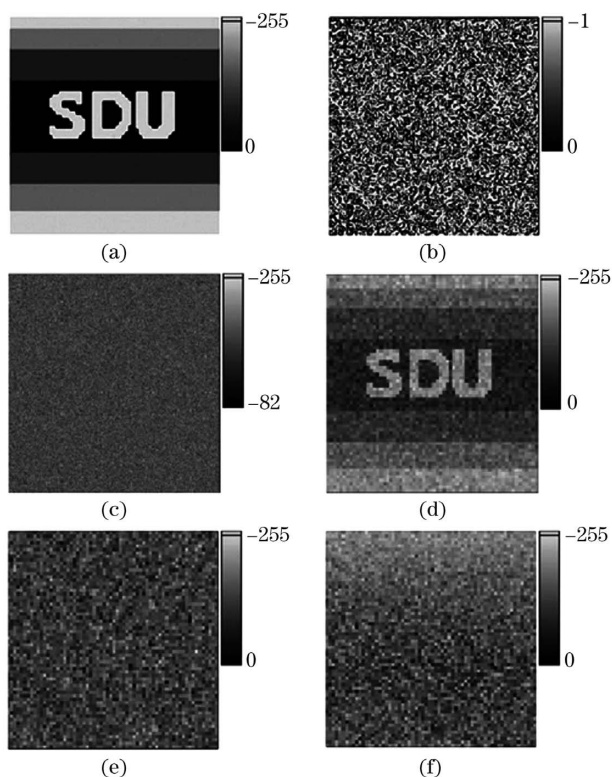


图 17 加密方案实验结果^[46]。(a)待加密的原始图像;(b)密钥序列中的一张二值随机图案;(c)加密后的灰度图像;(d)使用正确密钥的重构图像;(e)使用完全错误的空间分布密钥的解密图像;(f)使用错误密钥序列的解密图像

Fig. 17 Experimental results of the security scheme^[46]. (a) Original image to be encrypted; (b) one binary random pattern of the secret key sequence; (c) image after encrypted; (d) reconstructed image with correct key; (e) decrypted image using the key with completely different spatial distribution; (f) decrypted image using wrong order of the key

图 17(e)显示了使用错误的二维图案密钥得到的解密图像,与正确密钥相比,该图像的空间分布完全是随机置乱的。图 17(f)显示了当密钥图案的顺序随机无序时,获取的解密图像。即使密钥图案是正确的,但是错误的顺序仍旧令接收方无法获得有效的信息。

为了验证该加密方案的鲁棒性,本课题组通过裁剪攻击和噪声攻击来对该系统进行测试。图 18(a)为遮挡 25% 的密文,图 18(b)为对应的解

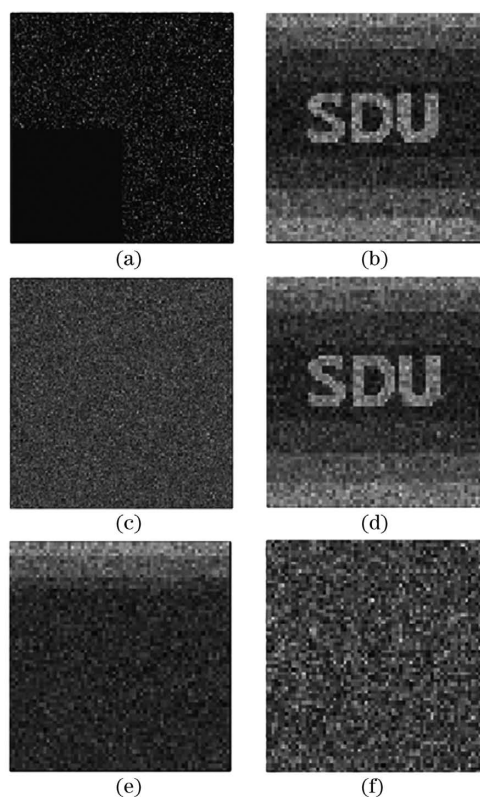


图 18 鲁棒性测试实验结果^[46]。(a)25%裁剪后的加密图像;(b)通过裁剪后的密文进行重构的图像;(c)被零均值加性白高斯噪声污染的加密图像;(d)使用被噪声污染的密文进行重构的图像;(e)使用 20% 正确序列的密钥图案进行解密的图像;(f)引入额外的密文调制后,使用正确的密钥序列但不解调密文时的解密图像

Fig. 18 Experimental results of robustness testing^[46]. (a) Encrypted image with 25% occlusion; (b) reconstructed image by the incomplete ciphertext; (c) ciphertext after adding zero-mean white additive Gaussian noise; (d) reconstructed image by the ciphertext with noise; (e) decrypted image using 20% patterns in proper order; (f) decrypted image using the right secret key but without demodulation of ciphertext when additional modulation on the ciphertext is introduced

密重构图像,其 P_{SNR} 为 22.99 dB。图 18(c) 和图 18(d) 分别为被标准差为 0.1 的零均值加性白高斯噪声污染的加密图像,以及对应的 P_{SNR} 为 22.09 dB 的复原图像。

该方案可以通过在密文上增加额外的加密来提高安全性。如图 18(e) 所示,如果窃听者同时得到密文的一部分(本次仿真中为总像素的前 20%)和密钥序列的对应图案,则可以重构原始图像对应像素的信息。为了避免这个情况发生,本课题选择对密文进行离散余弦变换(DCT)。如果不引入额外的密文解调就不能直接识别解密图像,如图 18(f) 所示。应该注意的是,这只是一个增加安全性的简单示例,可以通过增加更多的加密步骤来进一步提高方案的安全性。

5.2 基于空间复用时域鬼成像的相机帧率提升技术

现代数码相机应用感光元件阵列电荷耦合器件(CCD)和互补金属氧化物半导体 CMOS)可以直接完成对二维图像的采集。为了拍摄图像,设备必须完成信号采集和数据传输两过程,从而定义系统的帧速率。由于检测灵敏度和数据传输速度的限制,普通 CCD 或 CMOS 的帧率一般低于 kHz 水平,远远不足以检测高速场景。

为了进行超快观测,需要提高阵列相机的帧率。除了在相机硬件更新方面取得的成果外,计算方法已经成为突破系统帧率约束的有力途径。Bub 等^[62]采用了一种数字微镜设备(DMD),作为高速快门来解析超过相机时间分辨率的目标图像。

Wilburn 等^[63]和 Agarwal 等^[64]利用一系列高速触发器来精确、有序地控制相机阵列,从而实现了时间上的超分辨率。Pournaghi 等^[65]提出了一种利用多台随机编码曝光的相机获取高帧率视频的方法。Edgar 等^[66]利用单像素探测器搭建了一个实时视频系统,能够在可见光和短波红外波段同时成像。Xu 等^[13]提出了一种基于高速 LED 照明模块的计算鬼成像方案,在 1000 frame/s 帧率下实现了 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 分辨率成像。此外,利用图像稀疏性对欠采样数据进行重构的压缩视频相机模型也被提出^[67-68]。

基于计算时域鬼成像的原理,提出一种新的高速成像方案,它可以用慢速相机捕获高帧的视频^[69]。将相机分划成许多相同大小的区域,每个区域由多个像素组成,分别进行空间复用的时域鬼成像重构,以解析该区域场景的时间细节。通过所有区域的并行运算,最终可以在一次曝光中恢复由相机捕捉到的场景的时间细节,从而以比相机帧率快得多的速度进行视频录制。

图 19 展示了该方案中面阵相机的采集过程,即在一次曝光中对目标场景实现一系列的 K 次空间投影调制,此时动态场景就被高速调制分解为 K 个子帧,相机所记录的是所有这些调制后的子帧的累积。在此过程中,根据场景的分辨率,将 $m \times m$ 个像素的调制图案和面阵相机在空间上都划分为 $n \times n$ 个“超像素”,每个超像素独立进行 $l \times l$ 的像素运算($m = nl$)。也就是说,对于场景中的每个像素,分别在调制平面和记录平面上分配 $l \times l$ 个像素的区域进行时间相关测量。通过对每个像素进行空间复用时域鬼成

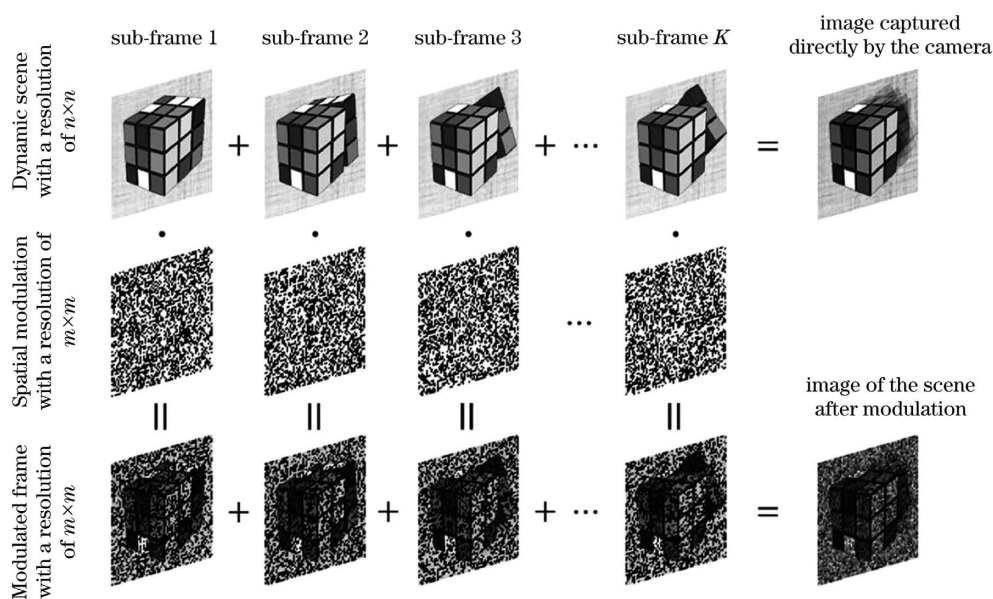


图 19 高速成像方案的相机采集过程^[68]

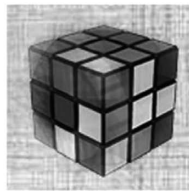
Fig. 19 Camera acquisition process of the high speed imaging scheme^[68]

像的重建,可以在时域内对场景信息进行解析。

在空间复用的过程中,计算鬼成像将时域信息复用到空域上,以空间像素分辨率换取时间分辨率。因此,成像帧率的增加是以空间分辨率降低为代价的,相机只能在其空间分辨率的 $1/l^2$ 的场景上进行空间复用时域鬼成像。一般来说,在场景分辨率和时间分辨率给定的情况下,成像帧率越高,调制像素就越多。

在仿真中,首先选取 64 阶的 Hadamard 矩阵作为调制基,对相机一次曝光过程中的 64 幅图像进行分解。它的每一行(或列)都被重新排列成大小为 8×8 的二维数组作为一个超像素,对场景进行调制。总共使用 128 个超像素的数组来匹配目标的空间分辨率,进行 64 步调制。这样,整个调制基可以用 $128 \times 128 \times 64$ 超像素大小的三维阵列表示。从数学上讲,调制过程是调制基矩阵超像素与动态场景像素之间的对应相乘。所有被调制的帧累加在一起形成一张相机图像,它具有与 DMD 相同的空间分辨率,即 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。将这幅图像和调制基代入空间复用计算鬼成像的重构公式,即可重构出 64 帧的视频。图 20(b)是本课题组采用高

(a)



(b)

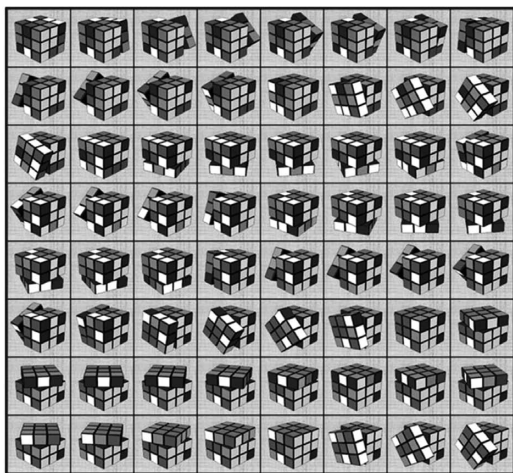


图 20 图像恢复结果^[68]。(a)相机直接拍摄的旋转魔方图像;(b)基于空间复用计算时域鬼成像重构出的 64 帧图像

Fig. 20 Results of image recovery^[68]. (a) Rotating Rubik's Cube taken by the camera directly; (b) reconstruction of 64 frames of images based on spatial multiplexing computational temporal ghost imaging

帧率成像方案重建的所有帧,其时间分辨率是图 20(a)相机直接拍摄图像的 64 倍。

6 结束语

通过对时域鬼成像和空域鬼成像进行类比,介绍了时域鬼成像技术的起源与发展过程,分析介绍了时域鬼成像技术的原理,并介绍了当前时域鬼成像技术的应用发展研究现状。由于基于关联运算的信息重构的特点,时域鬼成像在超快信号探测方面有着特殊的优势。并且时域鬼成像与光纤网络具有良好的兼容性,使其在长距离光纤中的信号探测及信息传输领域具有较大的潜力。同时,其编码重构的特性使其在光通信安全领域中有天然的应用优势。依靠空间复用技术,可以通过单次测量实现对不可重复信号的探测,还可将其应用于信息安全领域,实现计算加密或物理光学系统加密。此外,时域鬼成像的计算方法可以在相机的一次曝光中恢复场景的时间细节,用慢速相机获取到高帧率视频。时域鬼成像研究虽然取得了一些重要进展,但仍然处于初期发展阶段,有许多问题还有待解决。不过,它也展现出很好的研究与应用潜力。相信随着硬件器件的发展以及计算方法的改进,必将会促进时域鬼成像技术在光通信、信息安全与传输、设备性能提升等领域的发展和应用。

参 考 文 献

- [1] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1995, 52 (5): R3429-R3432.
- [2] Abouraddy A F, Saleh B E, Sergienko A V, et al. Role of entanglement in two-photon imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(12): 123602.
- [3] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [4] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and Classical Correlation [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(9): 093602.
- [5] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [6] Li H, Shi J H, Chen Z P, et al. Detailed quality analysis of ideal high-order thermal ghost imaging [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2012, 29(11):

- 2256-2262.
- [7] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [8] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. Differential computational ghost imaging [C]// *Computational Optical Sensing and Imaging 2013*, June 23-27, 2013, Arlington, Virginia, United States. Washington, D.C.: OSA, 2013: CTu1C.4.
- [9] Sun B Q, Welsh S S, Edgar M P, et al. Normalized ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16892-16901.
- [10] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121105.
- [11] Ma Y, Grant J, Saha S, et al. Terahertz single pixel imaging based on a Nipkow disk [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1484-1486.
- [12] Ota S, Horisaki R, Kawamura Y, et al. Ghost cytometry [J]. *Science*, 2018, 360(6394): 1246-1251.
- [13] Xu Z H, Chen W, Penuelas J, et al. 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2427-2434.
- [14] Zhao W G, Chen H, Yuan Y, et al. Ultrahigh-speed color imaging with single-pixel detectors at low light level [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(3): 034049.
- [15] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [16] Zhu Y C, Shi J H, Li H, et al. Three-dimensional ghost imaging based on periodic diffraction correlation imaging [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(7): 071101.
- [17] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26133.
- [18] Clemente P, Durán V, Torres-Company V, et al. Optical encryption based on computational ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2391-2393.
- [19] Tanha M, Kheradmand R, Ahmadi-Kandjani S. Gray-scale and color optical encryption based on computational ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(10): 101108.
- [20] Chen W, Chen X D. Marked ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251109.
- [21] Zafari M, Kheradmand R, Ahmadi-Kandjani S. Optical encryption with selective computational ghost imaging [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(10): 105405.
- [22] Salem R, Foster M A, Gaeta A L. Application of space-time duality to ultrahigh-speed optical signal processing [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(3): 274-317.
- [23] Shirai T, Setälä T, Friberg A T. Temporal ghost imaging with classical non-stationary pulsed light [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(12): 2549-2555.
- [24] Cho K, Noh J. Temporal ghost imaging of a time object, dispersion cancelation, and nonlocal time lens with bi-photon state [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 1275-1282.
- [25] Chen Z P, Li H, Li Y, et al. Temporal ghost imaging with a chaotic laser [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(7): 076103.
- [26] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Ghost imaging in the time domain [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 167-170.
- [27] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Magnified time-domain ghost imaging [J]. *APL Photonics*, 2017, 2(4): 046102.
- [28] O-Oka Y, Fukatsu S. Differential ghost imaging in time domain [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(6): 061106.
- [29] Meng W W, Shi D F, Yuan K E, et al. Fourier-temporal ghost imaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106294.
- [30] Dong S, Zhang W, Huang Y D, et al. Long-distance temporal quantum ghost imaging over optical fibers [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26022.
- [31] Tang J, Tang Y W, He K, et al. Computational temporal ghost imaging using intensity-only detection over a single optical fiber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 1-9.
- [32] Yao X, Zhang W, Li H, et al. Long-distance thermal temporal ghost imaging over optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 759-762.
- [33] Wu H, Han B, Wang Z N, et al. Temporal ghost imaging with random fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9957-9964.
- [34] Wu H, Ryczkowski P, Friberg A T, et al. Temporal ghost imaging using wavelength conversion and two-color detection [J]. *Optica*, 2019, 6(7): 902-906.
- [35] Imani M F, Smith D R. Temporal microwave ghost imaging using a reconfigurable disordered cavity [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(5): 054102.
- [36] Tian Y, Ge H, Zhang X J, et al. Acoustic ghost imaging in the time domain [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(6): 064044.

- [37] Devaux F, Moreau P A, Denis S, et al. Computational temporal ghost imaging [J]. *Optica*, 2016, 3(7): 698-701.
- [38] Devaux F, Huy K P, Denis S, et al. Temporal ghost imaging with pseudo-thermal speckle light [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(2): 024001.
- [39] Denis S, Moreau P A, Devaux F, et al. Temporal ghost imaging with twin photons [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(3): 034002.
- [40] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Single shot time domain ghost imaging using wavelength multiplexing [C]//*Frontiers in Optics 2016*, October 17-21, 2016, Rochester, New York, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: FTh5C.6.
- [41] Tang J, Zou D D, Cheng M F, et al. Single-shot temporal ghost imaging based on orthogonal frequency-division multiplexing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(17): 1555-1558.
- [42] Xu Y K, Sun S H, Liu W T, et al. Detecting fast signals beyond bandwidth of detectors based on computational temporal ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 99-107.
- [43] Wu J, Wang F X, Chen W, et al. Temporal ghost imaging for quantum device evaluation [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2522-2525.
- [44] Bo Z W, Gong W L, Han S S. Focal-plane three-dimensional imaging method based on temporal ghost imaging: a proof of concept simulation [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(3): 417-421.
- [45] Pan Z L, Zhang L H. Optical cryptography-based temporal ghost imaging with chaotic laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(16): 1289-1292.
- [46] Jiang S, Wang Y R, Long T, et al. Information security scheme based on computational temporal ghost imaging [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7676.
- [47] Kang Y, Zhang L H, Zhang D W. Study of an encryption system based on compressive temporal ghost imaging with a chaotic laser [J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 535-540.
- [48] Huang X W, Bai Y F, Fu X Q. Stable and secure image transmission based on temporal ghost imaging [J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(5): 055701.
- [49] Zhang W, Huang Y D. Photonic energy-time entanglement in quantum communications [C]//*2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP)*, December 11-13, 2019, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [50] Kang Y, Zhang L H, Ye H L, et al. One-to-many optical information encryption transmission method based on temporal ghost imaging and code division multiple access [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(12): 1370-1380.
- [51] Sun H J, Ye H L, Zhang L H. Research on the information transmission based on linear block code and temporal ghost imaging algorithm [J]. *Laser Physics*, 2019, 29(11): 115203.
- [52] Ye H L, Zhang L H, Chen J, et al. Information transmission based on a Fourier transform and ascending coding temporal ghost imaging algorithm [J]. *Laser Physics*, 2020, 30(12): 125202.
- [53] Wang Y P, Chen H L, Jiang W J, et al. Optical encryption for visible light communication based on temporal ghost imaging with a micro-LED [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106290.
- [54] Mancinelli M, Trenti A, Piccione S, et al. Mid-infrared coincidence measurements on twin photons at room temperature [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15184.
- [55] Olivieri L, Gongora J S T, Pasquazi A, et al. Time-resolved nonlinear ghost imaging [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3379-3388.
- [56] Liu X Y, Tian P F, Wei Z X, et al. Gbps long-distance real-time visible light communications using a high-bandwidth GaN-based micro-LED [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 1-9.
- [57] Liu X Y, Lin R Z, Chen H L, et al. High-bandwidth InGaN self-powered detector arrays toward MIMO visible light communication based on micro-LED arrays [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(12): 3186-3195.
- [58] Jiang S. Investigation of signal to noise ratio and application in single-pixel computational imaging [D]. Qingdao: Shandong University, 2019: 76.
- [59] Zhao J L, Lu H Q, Song X S, et al. Optical image encryption based on multistage fractional Fourier transforms and pixel scrambling technique [J]. *Optics Communications*, 2005, 249(4/5/6): 493-499.
- [60] Spagnolo G S, Simonetti C, Cozzella L. Content fragile watermarking based on a computer generated hologram coding technique [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(7): 333-342.
- [61] Meng X F, Cai L Z, Yang X L, et al. Information security system by iterative multiple-phase retrieval and pixel random permutation [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(14): 3289-3297.
- [62] Bub G, Tecza M, Helmes M, et al. Temporal pixel multiplexing for simultaneous high-speed, high-resolution imaging [J]. *Nature Methods*, 2010, 7(3): 209-211.

- [63] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. High performance imaging using large camera arrays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 765-776.
- [64] Agrawal A, Gupta M, Veeraraghavan A, et al. Optimal coded sampling for temporal super-resolution [C] // 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 13-18, 2010, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 599-606.
- [65] Pournaghi R, Wu X L. Coded acquisition of high frame rate video [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(12): 5670-5682.
- [66] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10669.
- [67] Reddy D, Veeraraghavan A, Chellappa R. P2C2: programmable pixel compressive camera for high speed imaging [C] // CVPR 2011, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 329-336.
- [68] Koller R, Schmid L, Matsuda N, et al. High spatio-temporal resolution video with compressed sensing [J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15992-16007.
- [69] Jiang W J, Li X Y, Jiang S, et al. Increase the frame rate of a camera via temporal ghost imaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 122: 164-169.

Temporal Ghost Imaging and Its Application

Sun Baoqing^{*}, Wang Yupeng

School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China

Abstract

Significance With the advancement of information technology, humans have entered the mobile Internet age. Moreover, surging communication services have resulted in an exponential growth of the capacity and rate of communication systems, spurring the research and development of an ultrahigh-speed and ultralarge-capacity optical communication system. However, high-speed optical signals are susceptible to channel dispersion and nonlinearity, increasing the bit error rate at the receiver and limiting further improvement of the communication rate. Furthermore, as the signal rate increases, the bandwidth demand for the transmitter and detector in the communication system also increases, increasing the overall system cost. To address these challenges, conventional optical communication transmission and detection methods must be improved further to enhance the efficiency of optical communication.

Ghost imaging is a novel dual-arm imaging technology, which has attracted considerable research attention. A correlation algorithm between two spatially separated light beams can be used to reconstruct the spatial intensity information of the target object. The object is illuminated by one beam called the object beam, and the transmitted or reflected light is collected using a bucket detector with no spatial resolution, yielding the total light intensity value. The other beam called the reference beam does not interact with the target object and is directly received using a detector with spatial distribution. Neither of the detectors can produce an image of the object on their own; however, the object will appear after correlation operation for these two beams. Ghost imaging has aroused great interest of researchers because of its unique nonlocality, which has a significant potential application value in noisy and turbulent scenarios where the application of conventional imaging methods is limited.

Ghost imaging has recently been extended from the spatial domain to the temporal domain by investigating the duality of light propagation in space and time, i. e., the correspondence between the diffraction of a light beam and the dispersive propagation of a short optical pulse. Temporal ghost imaging has been proposed in theory and verified in experiment. To reconstruct a temporal object by correlating operation, different temporal sequences must be illuminated and the cumulative energy of the illuminated light must be collected using a bucket detector. Temporal ghost imaging uses a slow-speed detector to detect high-speed optical signals and is insensitive to the damage between the signal and detection. Therefore, it is a promising method for optical signal detection and recovery.

Progress Since the implementation of temporal ghost imaging in an optical fiber-based system (Fig. 1), related research works on long-distance optical fiber detection, high-speed optical signal detection, information security, and

camera frame rate have been proposed recently. In the practical application of optical fiber sensing systems, the distance of temporal objects to detector is usually far and the position is changeable. The dual-arm structure reduces the flexibility of the system and increases the cost. To overcome these problems, Tang *et al.* proposed a method for obtaining the intensity information of a random light source using intensity-only detection, thus realizing a computational time-domain ghost imaging scheme on a single optical fiber (Fig. 3). By exploiting the long-distance optical fiber to achieve time dispersion, Yao *et al.* proposed the use of a thermal light source to achieve imaging between two remote ends of an optical fiber link (Fig. 5). Although temporal ghost imaging is insensitive to the damage between the object and detector, which provides an opportunity for ultrafast signal detection, its application is limited by the random fluctuation time of the light source and the temporal resolution of the detectors. To realize ultrafast signal detection in various scenarios, researchers have proposed a series of technical solutions. Ryczkowski *et al.* used an extra-long dispersion fiber in the reference beam path to magnify the time fluctuation of the reference signal by five times, resulting in a reconstructed signal with five times pulse width (Fig. 7). A low response speed of the infrared detector limits the measurement of high-speed signals. Wu *et al.* transferred light to the spectral region using an ultrafast detector by employing the wavelength conversion concept, thus achieving temporal ghost imaging at a wavelength of $2\ \mu\text{m}$ (Fig. 9). Using computational temporal ghost imaging, Xu *et al.* could detect fast signals beyond the bandwidth of the detectors by actively modulating the target signal with specific patterns (Fig. 11).

Further, we proposed a dual encryption scheme based on the micro-light-emitting diode (micro-LED) operating ultra bandwidth and a computational temporal ghost imaging algorithm, which was verified in a visible light communication system (Fig. 13). However, repeated measurements reduced the detection efficiency and limited the detection of nonrepeatable or aperiodic signals. To solve these problems, spatial multiplexing technology was introduced, based on which Jiang *et al.* proposed an information security scheme (Fig. 16). Moreover, Jiang *et al.* demonstrated a fast imaging scheme by increasing the camera frame rate via temporal ghost imaging.

Conclusions and Prospect In conclusion, temporal ghost imaging opens novel perspectives for dynamic imaging of ultrafast signals in various scenarios; however, it still needs further research and improvement. The development of hardware devices and improvement of the calculation algorithms will promote the development and application of temporal ghost imaging in optical communication, information security and transmission, equipment performance improvement, and other fields.

Key words quantum optics; temporal ghost imaging; optical fiber detection; ultrafast signal detection; information security; camera frame rate

OCIS codes 110.1758; 110.6915; 060.2605