

# 基于光场强度涨落关联的外辐射源测距技术研究

李江源<sup>1,2,3</sup>, 于溢琛<sup>1,2,3</sup>

- 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088;
- 孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室, 安徽合肥 230088;
- 雷达探测感知全国重点实验室, 安徽合肥 230088)

**摘要:** 外辐射源探测具有隐蔽性、低能耗、低成本、抗打击等优势,在微波频段技术相对成熟。光频段的外辐射源探测受制于自由空间传输引起的光场退相干,难以从直达的非合作信号和回波信号中提取确定的相位关系。本文提出了以热光场存在的强度涨落关联建立直达波和回波间相关性的方法,不依赖于电磁波的相位信息;在该相关性的基础上首次分析了以太阳光、黑体辐射等为外辐射源进行目标测距的原理及方法;最后在实验室条件下基于黑体辐射外源成功实现目标测距,并指出未来进一步提升测距距离亟待解决的技术难题。基于光场强度涨落关联的外辐射源测距技术是值得大力发展的低成本、高效探测技术。未来突破相关技术瓶颈有望建立以太阳光或目标热辐射作外源的测距系统,在车载无源雷达测距、热像仪直接测距、深空目标测距等领域具备极大的应用前景。

**关键词:** 热光场; 强度涨落关联; 光学外辐射源雷达; 无源测距

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

文章编号: 1672-2337(2025)01-0075-07

**引用格式:** 李江源, 于溢琛. 基于光场强度涨落关联的外辐射源测距技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2025, 23(1):75-81.

LI Jiangyuan, YU Yichen. Research of Passive Ranging by External Source Based on the Intensity Fluctuation Correlation of Light Field[J]. Radar Science and Technology, 2025, 23(1):75-81.

## Research of Passive Ranging by External Source Based on the Intensity Fluctuation Correlation of Light Field

LI Jiangyuan<sup>1,2,3</sup>, YU Yichen<sup>1,2,3</sup>

- The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;
- Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Hefei 230088, China;
- National Key Laboratory of Radar Detection and Sensing, Hefei 230088, China)

**Abstract:** External radiation source detection has the advantages of concealment, low power consumption, low cost, anti-attack and so on. Passive LIDAR is limited by the de-coherence caused by free space transmission, and it is difficult to extract the definite phase correlation from direct non-cooperative signal and echo signal. A method of establishing the correlation between direct wave and echo based on the intensity fluctuation correlation of thermal light is presented in this paper, which does not depend on the phase information of electromagnetic wave. On the basis of such correlation, the principle and feasibility of target ranging by external radiation sources such as sunlight and blackbody radiation are analyzed for the first time. Finally, the target ranging based on blackbody radiation as external source is achieved under laboratory conditions, and the technical problems to be solved in the future are pointed out. Passive ranging by external radiation source based on the intensity fluctuation correlation of light field is a low-cost and efficient detection technology, which is worth developing vigorously. In the future, it is expected to break through the relevant technical bottlenecks to establish the sunlight or thermal radiation as the external ranging system, which has great application prospects in the field of vehicle passive radar, thermal imager direct ranging, deep space target ranging and other fields.

**Key words:** thermal light; intensity fluctuation correlation; passive LIDAR; passive ranging

收稿日期: 2025-01-07; 修回日期: 2025-02-01

基金项目: 西安电子科技大学杭州研究院院士开放基金(No.XH-KY-202306-0290); 安徽省重点研究与开发计划(No.2022b13020003)

## 0 引言

随着电子信息技术的飞速发展和设备的投入使用,空间电磁辐射能量急剧增长,雷达可用频谱资源日益紧张。雷达作为发现预警及引导拦截的“眼睛”,已然成为现代信息化战争的首要攻击目标之一,战场环境下由于其高强度辐射导致生存能力堪忧。外辐射源雷达以民用射频信号作为雷达照射源对目标进行探测和定位,具备隐蔽性、低能耗、低成本、反隐身等优势<sup>[1]</sup>。考虑到太阳具有巨大的能量和极宽的频谱辐射特征,可作为雷达的零成本、抗打击外辐射源。在微波频段已有文章开展以太阳为天基发射站引导地面无源定位技术的相关研究<sup>[2]</sup>。光学频段的目标测距主要依赖于合作的激光发射源。光频段外辐射源的利用常采用太阳光或目标红外辐射等,多用于发现目标,难以获得高精度测距能力。

本文针对光学外辐射源雷达中的测距工作体制和原理进行分析;接着详细论述热光场的强度涨落关联和测量方法;之后设计光学外辐射源测距系统并开展实验演示;最后根据实验数据分析该方案的可行性以及当前技术瓶颈,为建立健全光学外辐射源雷达测距领域奠定基础。

## 1 工作原理

### 1.1 工作体制

外辐射源雷达通常利用调频广播、电视信号等共用频谱信号,在分置的接收端利用参考信道和回波信道之间的相关性获取目标的信息<sup>[3]</sup>。类比传统外辐射源雷达的工作原理,以太阳作为取之不尽用之不竭的辐射源,利用热光场存在的强度涨落关联特性,在接收端对参考信道和回波信道进行强度涨落关联能够获取来自同一时刻的太阳辐射信号的关联峰,进而确定待测目标距离。

事实上,太阳作为典型的真热光源,地表任一点光场可看作由各个基元辐射体自发辐射产生的光扰动在该点的贡献叠加而成,其中各个基元辐射体自发辐射产生的振幅和相位关系随机变化,因此太阳辐射具备时变性、随机性和相位模糊性<sup>[4]</sup>。强度涨落关联不同于传统意义上的相位关

联,而是对来自太阳光振幅或强度变化序列的一种时域相关性<sup>[5-6]</sup>。相比于脉冲雷达存在的信号周期性或伪随机性,导致系统存在难以避免的距离模糊和速度模糊,太阳光源的真随机辐射特征能够使强度变化序列的相关性巧妙避免了上述模糊的出现。因此基于真随机信号强度涨落关联的相关性在目标发现、测距精度、测速精度及抗干扰等方面具备无可比拟的优势。

### 1.2 测距原理

光学外辐射源测距的基本原理与传统外辐射源雷达类似,利用直达光信号与目标反射光信号的相关函数峰值来测量由目标引入的光延时,由光延时、接收反射光信号的方向角,通过三角关系获得目标精确位置信息。具体流程如图1所示。

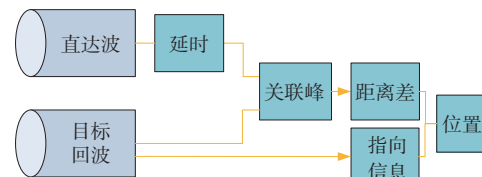


图1 光学外辐射源测距工作流程

在工作过程中,直达接收通道始终对准外辐射源,回波通道接收方向在小范围空域内进行高精度指向扫描。两个接收通道的光信息由单光子探测器转化成电信号,紧接着时幅转换仪把两个电信号到达的时间差值转换成幅值大小不等的电压值;多通道分析仪把不同电压幅值的数目记录在相应的不同道址上,进而得出两个光子的关联峰情况,具体装置图如图2(a)所示。测量结果中黑线为直达波的自关联峰<sup>[7]</sup>,红线为直达波与回波的关联峰,根据关联峰线型得到回波光相对于直达波光子的延时 $\Delta\tau$ ,如图2(b)所示。

考虑光学外辐射源、待测目标和接收系统的三角关系模型,如图3所示。

目标到接收系统的距离可以通过直达波和目标回波之间的延时差 $\Delta\tau = (R_l + R_r - L_l)/c$ 得到。即

$$R_r = \frac{1}{2} \frac{(L_l + c\Delta\tau)^2 - L_l^2}{(L_l + c\Delta\tau) - L_l \cos \phi_r} \quad (1)$$

式中: $L_l$ 表示外辐射源到接收点的直线距离,可以由观测时间计算得到; $c$ 为光速; $\phi_r$ 表示出现关联

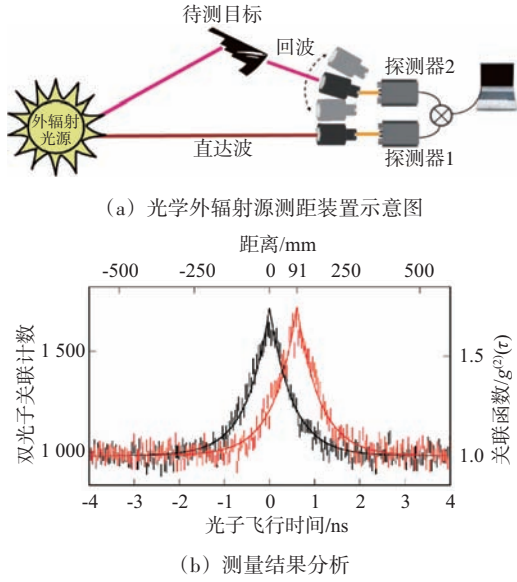


图2 光学外辐射源测距装置示意图及测量结果分析

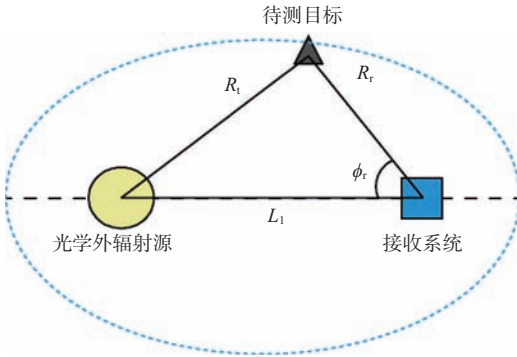


图3 外辐射源、目标与地面接收站组成的三角关系

峰值时的回波通道望远镜与直达通道望远镜之间的夹角; $R_r$ 表示待测目标到接收点的直线距离; $\Delta\tau$ 表示直达波与目标回波之间的关联峰延时。

综上,利用光学外辐射源进行目标测距在原理上可转化为对直达波与目标回波之间的关联峰的延时测量。

### 1.3 强度涨落关联原理

考虑到光学外辐射源发射的光场在自由空间传播过程中不可避免地受到大气湍流等影响,相位信息无法精确控制和保持。因此,为了获取直达波与目标回波之间的延时,需要建立二者光场间的相干性。此处讨论的外辐射源的相干性是指光场强度涨落之间的相关,即同源热光场其振幅随时间变换的序列在一定时间窗口内存在的相关特征<sup>[8]</sup>。

光场的相干性按照相干阶数可以分为一阶相干、二阶相干和高阶相干<sup>[9]</sup>。一阶相干是光场相位间的关联,是相干累积得益的基础。测量方式为待测的两束光在某点处相遇、发生叠加的同时,使用一个探测器对一个空间上固定的点进行数次具有不同时间延迟的测量,描述不同时刻同一信号相位的同向叠加,如图4(a)所示。一阶自相关函数 $G^{(1)}(r_1, r_1)$ 表示探测器 $P_1$ 探测到的 $r_1$ 处的光场强度, $G^{(1)}(r_2, r_2)$ 表示探测器 $P_2$ 探测到的 $r_2$ 处的光场强度。 $G^{(1)}(r_1, r_2)$ 表示在 $r_1$ 和 $r_2$ 处的场关联强度,称为一阶关联函数,其经典表示为<sup>[10]</sup>

$$G^{(1)}(\vec{r}_1, t_1; \vec{r}_2, t_2) = \langle E^*(\vec{r}_1, t_1) E(\vec{r}_2, t_2) \rangle \quad (2)$$

式中, $E(\vec{r}, t)$ 表示光场在 $t$ 时刻 $r$ 位置处的复振幅。

$$E(\vec{r}, t) = E_0 \exp \left[ i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \varphi_0) \right]$$

归一化后得光场一阶相干函数:

$$g^{(1)}(\vec{r}_1, t_1; \vec{r}_2, t_2) = \frac{\langle E^*(\vec{r}_1, t_1) E(\vec{r}_2, t_2) \rangle}{\sqrt{\langle |E(\vec{r}_1, t_1)|^2 \rangle} \sqrt{\langle |E(\vec{r}_2, t_2)|^2 \rangle}} \quad (3)$$

二阶相干则是强度涨落间的关联,因而对于光强的测量可以同时发生在两个不同的时空点上,由两个相互独立的光探测器直接进行测量,描述不同时空下强度涨落关联,用相干函数描述其关联的程度,如图4(b)所示。本文讨论的强度涨落关联中的相干性,本质上是二阶相干性。用 $G^{(2)}(r_1, r_2)$ 表示光场的二阶关联函数,其经典表示为

$$G^{(2)}(\vec{r}_1, t_1; \vec{r}_2, t_2) = \langle E^*(\vec{r}_1, t_1) E^*(\vec{r}_2, t_2) E(\vec{r}_2, t_2) E(\vec{r}_1, t_1) \rangle \quad (4)$$

用光场强度涨落来描述二阶关联可以得到

$$\begin{aligned} G^{(2)}(\vec{r}_1, t_1; \vec{r}_2, t_2) &= \left( \langle I_1(\vec{r}_1, t_1) + \Delta I_1(\vec{r}_1, t_1) \rangle \right) \cdot \\ &\quad \left( \langle I_2(\vec{r}_2, t_2) + \Delta I_2(\vec{r}_2, t_2) \rangle \right) = \\ &\quad \langle I_1(\vec{r}_1, t_1) I_2(\vec{r}_2, t_2) \rangle + \\ &\quad \Delta I_1(\vec{r}_1, t_1) \Delta I_2(\vec{r}_2, t_2) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $I$ 表示不同时间、空间的光场强度, $\Delta I$ 表示光场强度的涨落变化,前者为背景项,后者为强度涨落的关联项。归一化处理,得到时空关联的二阶相干函数为式(6),可以看出该形式表示的是光场间强度涨落之间的相关性,通常以该相干函数值的大小来描述涨落关联的程度,如图4所示。

$$g^{(2)}(\vec{r}_1, t_1; \vec{r}_2, t_2) = \frac{\langle E^*(\vec{r}_1, t_1) E^*(\vec{r}_2, t_2) E(\vec{r}_2, t_2) E(\vec{r}_1, t_1) \rangle}{\langle |E(\vec{r}_1, t_1)|^2 \rangle \langle |E(\vec{r}_2, t_2)|^2 \rangle} = 1 + \frac{\langle \Delta I_1(\vec{r}_1, t_1) \Delta I_2(\vec{r}_2, t_2) \rangle}{\langle I_1(\vec{r}_1, t_1) I_2(\vec{r}_2, t_2) \rangle} = 1 + \frac{|G^{(1)}(x_1, x_2)|^2}{\langle G^{(1)}(x_1, x_1) \rangle \langle G^{(1)}(x_2, x_2) \rangle} \quad (6)$$

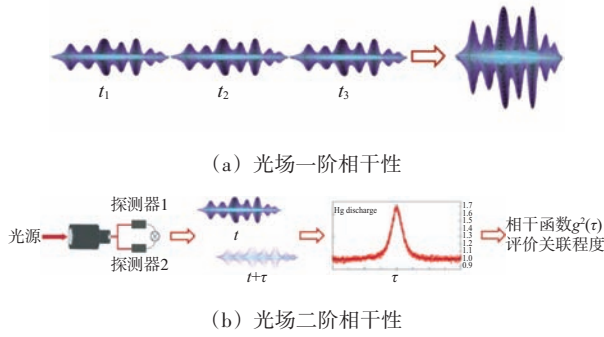


图4 光场相干性的本质

因此,强度涨落关联不需要信号保持特定的相位关系,不对某路信号做表征,而是记录两路信号强度涨落分布随时变化特征,根据两路相关性的大小来对齐两路信号,即获得两路信号的相对时延。因此,越是强度涨落剧烈的随机变化光场,越是能够获得更好的相关性。自然界中的太阳光、室内常用的白炽灯以及卤钨灯等都属于真热光源,存在剧烈的涨落特征,二阶相干函数满足

$$1 < g^{(2)}(\tau = 0) \leq 2 \quad (7)$$

#### 1.4 强度涨落关联测量方法

1956年,汉勃雷-布朗(Hanbury Brown)和特威斯(Twiss)改进了迈克尔逊恒星干涉仪,首次采用了强度关联测量方案得出了天狼星的角直径。反射镜 $S_1$ 和 $S_2$ 将收集到的星体光强信号反射至光电探测器 $P_1$ 和 $P_2$ ,并被探测器线性转换成电信号,低通滤波 $B_1$ 、 $B_2$ 过滤了相位信息,最后将两个输出信号进行关联计算,如图5所示。上述过程中丢失了两个信号间的相对相位,它们之间的关联属于强度涨落关联,因此这种装置又被称为强度干涉仪,基于该装置类似原理和架构的实验均称为HBT实验。HBT测量方法的优点是仅测量两条路径强度变化的一致性而不受单路径相位的影响,

因而不受大气扰动的影响,相比于其他方法灵敏度更高。

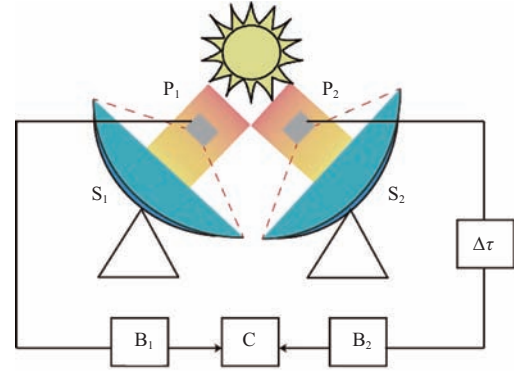


图5 HBT实验装置用于测恒星角直径的简化图

对HBT实验过程进行分析,恒星作为完全非相干热光源,用 $D$ 表示直径, $x_{s_1}$ 和 $x_{s_2}$ 表示光源上两个位置, $I_s$ 表示光强分布,光场表示为<sup>[11]</sup>

$$\langle E^*(x_{s_1}, t_1) E(x_{s_2}, t_2) \rangle = I_s \delta(x_{s_1} - x_{s_2}) \text{rect}\left(\frac{x_{s_1}}{D}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{x_{s_2}}{D}\right) \delta(t_1 - t_2) \quad (8)$$

设恒星到地球上两个望远镜距离为 $z_1$ 、 $z_2$ ,探测过程保持两个望远镜与恒星距离相等,即 $z_1 = z_2 = z$ 。于是探测器接收端处的一阶关联函数表示为

$$G^{(1)}(x_i, x_j) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \langle E^*(x_s) E(x_s) \rangle h_i^*(x_i, x_s) h_j(x_j, x_s) dx_s \quad (9)$$

其中,

$$h_i(x_i, x_s) = \left(-\frac{i}{\lambda z_i}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda z_i} (x_i - x_s)^2\right] \quad (10)$$

表示从光源 $x_s$ 位置到 $x_i$ 接收位置的传递函数,其中积分范围从 $-D/2$ 到 $+D/2$ 。于是

$$G^{(1)}(x_1, x_1) = G^{(1)}(x_2, x_2) = \frac{I_s D}{\lambda z} \quad (11)$$

$$G^{(1)}(x_1, x_2) = \frac{I_s D}{\lambda z} \text{sinc}\left[\left(\frac{\pi D(x_1 - x_2)}{\lambda z}\right)\right]$$

代入上节中公式(6)可得

$$G^{(2)}(x_1, x_2) = \langle G^{(1)}(x_1, x_1) \rangle \langle G^{(1)}(x_2, x_2) \rangle + |G^{(1)}(x_1, x_2)|^2 = \left(\frac{I_s D}{\lambda z}\right)^2 \left[1 + \text{sinc}^2\left[\left(\frac{\pi D(x_1 - x_2)}{\lambda z}\right)\right]\right] \quad (12)$$

该探测系统归一化后的二阶相干函数为<sup>[12]</sup>

$$g^{(2)}(x_1; x_2) = 1 + \text{sinc}^2(M\tau_c) \quad (13)$$

其中: $M = c\pi D/\lambda z$ , $c$ 为光速, $D$ 为辐射源有效直径, $z$ 为到地球的距离, $\lambda$ 为待测波长,因此 $M$ 为由探测

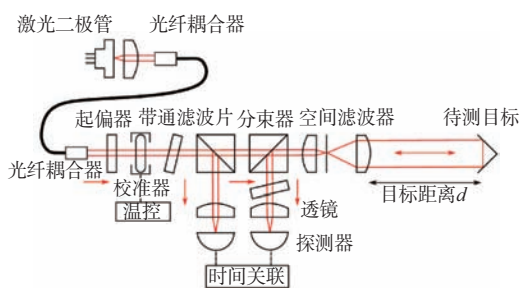
系统决定的参数; $\tau_c = (x_2 - x_1)/c$ 为系统相干时间。上述计算过程中考虑的是 $t_1=t_2$ 即两个探测路径同时探测的过程。若在关联过程中存在路径差,即两个探测器接收到信号存在延时 $\Delta\tau = (z_2 - z_1)/c$ ,二阶相干函数线型不会发生变化,仅在横轴出现时延 $\Delta\tau$ 。

综上所述,利用光学外辐射源开展目标测距的工作原理是:目标距离信息由三角关系转化为对直达波和目标回波的延时 $\Delta\tau$ 测量; $\Delta\tau$ 的测量由光场的强度涨落关联测得,由二阶相干函数线型在时域分布得到。

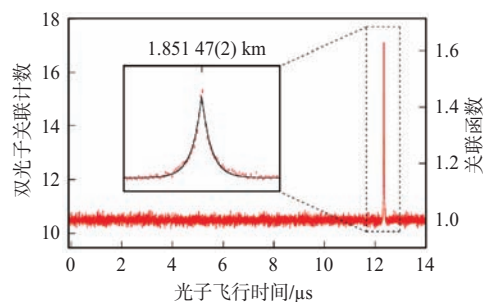
## 2 光学外辐射源测距实验

### 2.1 方案设计

国际上,利用热光场强度涨落关联进行目标测距领域的研究较少,主要是由于当前探测器的时间抖动导致其可分辨时间受限。探测器记录的是光强在特定空间范围、时间长度内的积分结果,可分辨时间在 $10^{-9}$  s量级,而真热光场相干时间极短在 $10^{-14}$  s量级<sup>[13]</sup>。当探测器可分辨时间大于光场相干时间,只能记录多个相干时间内的平均值,因此涨落效应被平均,测得的涨落程度变小甚至无涨落<sup>[14-15]</sup>。为此,吴令安研究组利用了具有高时间分辨能力的探测系统和带宽小于0.01 nm超窄带滤波系统,压窄频率以获取更长的相干时间,达到探测器可以测量的水平,成功测得太阳光的强度涨落关联<sup>[16]</sup>。最近,Tan研究组通过低于泵浦阈值的激光二极管产生较强的自发辐射热光场,并对自发辐射光源分束,一路作为直达信号,另一路经目标反射后与直达信号进行相关,装置示意图如图6(a)所示。基于这种热光场的强度涨落关联装置成功测得最远约1.85 km处目标的距离<sup>[7]</sup>,如图6(b)所示。



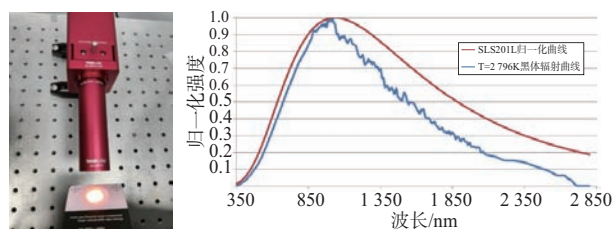
(a) Tan研究组的实验装置



(b) 实验结果

图6 Tan研究组的实验装置和实验结果

为了验证太阳光源、目标黑体辐射等更常见的热光场能够用来对目标进行测距。本实验方案中选取卤钨灯(Thorlab SLS201L/M)作为外辐射源,该光源在360~2 600 nm范围内提供恒定强度约10 mW的黑体辐射,辐射温度约为2 796 K,如图7所示。由于 $\tau_c = \lambda^2/c\Delta\lambda$ 滤波器越窄对应测得的相干时间越长,选取可调谐光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)滤波器,其波长覆盖800~1 620 nm,带宽可达5 pm以内。另外由于FBG滤波器通常存在带外透过的情况,对于宽谱光源存在大量带外光子会作为噪声被探测接收,因此该FBG滤波器需搭配空间光干涉滤波片级联使用,选取带通滤波片中心波长1 550 nm,带宽4 nm。针对滤波后的有效光信号,选用铟镓单光子探测器对黑体辐射光源中1 550 nm波长的光子进行计数接收,该探测器淬灭电路为自制电路,时间抖动在450 ps左右。关联处理模块的符合板卡选用MultiHarp150,时间抖动在10 ps左右,探测器的输出结果分别接入MultiHarp150的通道1和通道2。



(a) 试验用卤钨灯

(b) 卤钨灯谱密度曲线

图7 试验用卤钨灯以及强度分布与波长关系

### 2.2 结果分析

在实验室环境下通过空间分束器将黑体辐射光源分成反射路和透射路,反射路经滤波后直接

被单光子探测器 1 探测接收作为外辐射源的直达波;透射路经由目标反射后,反射光子再经过该分束器,被单光子探测器 2 探测接收,如图 8 所示。两个单光子探测器前的 FBG 滤波器通过温控保持其中心波长高度重合。单光子探测器 1 和 2 的探测效率分别为 10% 和 12%,暗计数分别为 3 200 和 3 500。两个单光子探测器将光子信号转换为电信号,进行强度涨落关联。考虑到光路结构的对称性,由于待测目标使得回路产生了相对于直达路的一定延时,因此可以通过两路相关处理的结果获取该延时,进而推算待测目标距离信息。

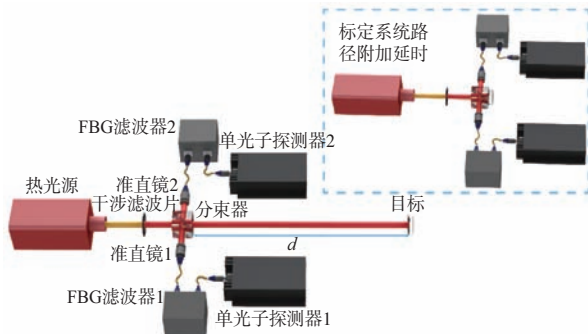


图 8 黑体辐射光源涨落关联测距装置示意图

首先按照图 8 蓝框中的方案,标定系统透射路径与反射路径的系统光程差,先将待测目标紧贴空间分束器的透射面,即  $d=0$ 。分别对两束光进行光子级探测与光电转换,利用时间相关单光子计数器进行信号采集,最后由数据处理终端负责信号的强度涨落关联处理,得到关联峰值位置记为  $\tau_1$ ,结果如图 9 所示。红线和黑线分别用高斯函数拟合了 FBG 滤波器单独作用以及 FBG 滤波和干涉滤波片组合滤波的关联峰测量结果。从图 9 可以

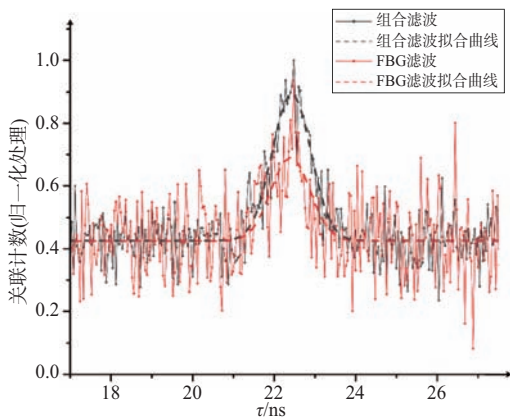


图 9 不同滤波条件下的热光源强度涨落关联峰

看出,由于 FBG 滤波器泄漏的带外噪声导致关联峰可见度大幅降低,后续实验结果均采用组合滤波的方式。

接着将目标距离  $d$  拉开一定位置,重复单光子探测接收和强度涨落关联过程,结果如图 10 所示。红线代表系统路径延时的标定结果,放置目标  $d=0$  时,测得的系统探测路径 1 和 2 的相对延时。黑色曲线代表由于目标反射距离  $d$  引入的延时  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = 2d/c$ ,  $c$  为光速,探测结果的累积时间为 1 200 s。在  $d=0$  时,由系统路径引入的延时(即红线峰值横坐标)  $\tau_1 = 18.80 \pm 0.01$  ns;目标拉远约  $d=0.55$  m 后,由于目标反射引入的延时(即黑线峰值横坐标)  $\tau_2 = 22.48 \pm 0.01$  ns。目标距离  $d = \Delta\tau \cdot c / 2 = 0.551 \pm 0.018$  m。

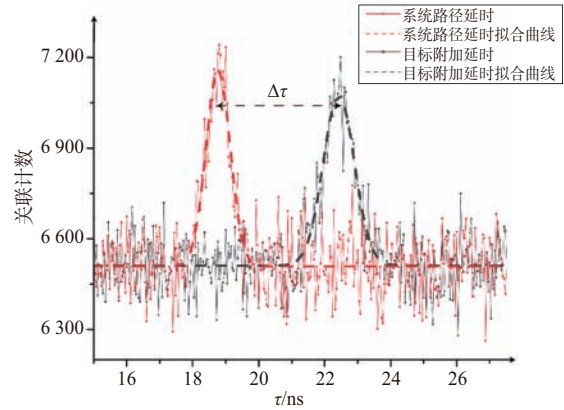


图 10 热光源强度涨落关联峰延时实验结果

本实验成功演示了基于光学外辐射源强度涨落关联的目标测距可行性。本方案与 Tan 研究组的实验方案相比<sup>[7]</sup>,均采用外辐射源与目标和接收站与目标夹角为  $0^\circ$  的特殊三角关系场景进行原理验证,该场景下目标反射率高,能够大幅降低累积探测时间。不同之处在于本方案采用与太阳辐射更为接近的卤钨灯作为外辐射源,该光源为真热光源,强度涨落具备真随机特征,本文从重点聚焦分析以太阳光等真随机源作为外辐射源用于目标测距的可行性和技术瓶颈,而 Tan 研究组采用亮度更高的未达泵浦阈值的激光二极管(Laser Diode),实现更远的测距距离。本方案与 Lee 研究组方案<sup>[8]</sup>相比, Lee 采用的是激光搭配旋转毛玻璃片产生的赝热光源(不满足交叉谱纯条件)<sup>[11]</sup>,仅能模拟真热光源(满足交叉谱纯条件)的部分性质。

在技术瓶颈方面,为了解决现有对真热光探

测器时间分辨能力不足的问题,本实验方案通过超窄带滤波压窄接收线宽从而提升热光源的探测相干时间,达到能够被探测器有效响应的水平。然而在超窄线宽下剩余的热光场的能量极其微弱,经过目标反射后的回波光光子更是微乎其微,需要数分钟的累积以获得足够的探测信噪比<sup>[17]</sup>。另一方面,该方案测距精度由系统时间精度决定,包括外辐射源相干时间 $\sigma_r$ 、探测器计时精度 $\sigma_{tdc}$ 、探测系统时间同步精度 $\sigma_{sync}$ 等。因此,系统测距精度约为 $\sigma_r = c \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_{tdc}^2 + \sigma_{sync}^2} / 2$ ,即 100 ps 系统时间精度将带来 1.5 cm 测距误差。

综上,未来突破飞秒级时间分辨的单光子探测技术,有望摆脱极窄带滤波带来的能量损失,直接对真热光源的涨落进行精确测量,能够大幅压缩累计时间,提高输出帧频,推远探测距离。未来突破系统时间计时精度和同步精度,能够进一步提升系统测距精度,为无源光学系统补充高精度测距手段。

### 3 结束语

本文类比传统外辐射源雷达的工作体制,提出了基于热光场强度涨落关联的外辐射源测距技术。针对容易获取的廉价光源太阳光,首次分析了以此为外源进行目标测距的基本原理和测量方法,并以黑体辐射源模拟太阳光开展演示实验,成功实现了对目标的高精度测距。未来突破高灵敏、飞秒时间分辨能力的探测器有望直接以太阳光或目标热辐射作为外源进行外场目标测距,充分发挥无源系统低功耗、低成本、高隐蔽的探测优势。因此基于光学外辐射源强度涨落关联的测距技术是工程化难度与应用前景并存,值得大力发展的一项高效探测新技术。

#### 参考文献:

- [1] 李万春,田正武,唐迺,等.无参考通道的外辐射源雷达参数估计[J].系统工程与电子技术,2016,38(11):2530-2536.
- [2] 胡晋东.基于太阳辐射源的“夸父”战场定位雷达技术[J].电讯技术,2011,51(5):6-10.

- [3] 朱士强.基于外辐射源的雷达目标探测技术研究[D].成都:电子科技大学,2018.
- [4] 徐鹏.基于太阳噪声的雷达天线测量方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [5] TAN P K, YEO G H, POH H S, et al. Measuring Temporal Photon Bunching in Blackbody Radiation [J]. *Astrophysical Journal Letters*, 2014(1):2782-2798.
- [6] ZHANG Da, ZHAI Yanhua, WU Ligan, et al. Correlated Two-Photon Imaging with True Thermal Light [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18):2354-2356.
- [7] TAN P K, YEO X J, LEOW A Z W, et al. Practical Range Sensing with Thermal Light [J]. *Physical Review Applied*. 2023; 20(1):014060.
- [8] LEE C H, KIM Y, IM D G, et al. Coherent Two-Photon LIDAR with Incoherent Light [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(22):223602.
- [9] 孙雁.基于热光高阶强度关联的亚瑞利分辨率成像[D].沈阳:辽宁大学,2017.
- [10] 周成.基于非相干光关联成像方案研究[D].长春:长春理工大学,2017.
- [11] 杨柳.一种提高热光源高阶关联成像质量的改进算法[D].长春:辽宁大学,2015.
- [12] 袁志丹,李道远,赵达宇,等.热光关联成像系统相干时间[J].实验技术与管理,2021,38(2):78-81.
- [13] 罗春伶.改善鬼成像质量的理论与实验研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [14] 谈志杰,尹少齐,喻虹,等.基于空间调制的星体观测张角强度关联干涉测量[J].光学学报,2022,42(7):179-185.
- [15] 李园.基于单光子探测的光场统计性质的研究[D].太原:山西大学,2009.
- [16] LIU Xuefeng, CHEN Xihao, YAO Xuri, et al. Lensless Ghost Imaging with Sunlight [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8):2314-2317.
- [17] 韦震,陆荣华,喻虹,等.基于符合计数的极弱光强度关联干涉测量研究[J].光学学报,2020,40(1):211-218.

#### 作者简介:

李江源 男,博士,高级工程师,主要研究方向为新体制雷达技术。

于溢琛 男,博士,工程师,主要研究方向为新体制雷达技术。