

功分热态微波信号的导航测距测角方案及性能分析

朱浩男¹, 吴德伟¹✉, 苗强¹, 李响¹, 夏兆益²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 济南市儿童医院, 济南, 250021)

摘要 根据光学中应用热光场的二阶关联特性, 得到与纠缠光场相类似的关联成像、时钟同步和关联测距等方法, 将其延伸至微波频段, 利用热态微波信号进行二阶关联导航测距测角。热态微波信号用于二阶关联测距测角的过程为, 首先用功分器对制备的热态微波信号分成相同功率的两路, 并将功分后的2路热态微波信号通过两个天线发射, 然后在接收端对2路信号进行实时功率测量, 对测得的功率波形进行相关运算, 通过对关联峰值的提取, 计算出2路信号传播的距离差, 进而应用干涉式测角原理推导出目标方位角信息。通过实验和仿真方法对热态微波信号的导航测距和测角方案进行了分析验证, 利用热态微波场的真随机特性, 能够解决以往无线电导航定位中由于信号周期性引起的整周模糊问题, 并且拥有更好的抗噪性能、抗多径能力, 使定位精度得到提高。

关键词 关联测距; 热态微波信号; 量子二阶关联; 导航测角

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.008

中图分类号 TN961 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0046-06

Navigation Ranging and Angle Measurement Scheme by the Power Divided Thermal Microwave Signals and Performance Analysis

ZHU Haonan¹, WU Dewei¹✉, MIAO Qiang¹, LI Xiang¹, XIA Zhaoyi²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Jinan Children's Hospital, Jinan 250021, China)

Abstract: According to the second-order coherence of thermal light applied in optics, such as associated imaging, clock synchronization, and correlated ranging, etc. under condition of extending the knowledge mentioned above into the microwave frequency band, thermal microwave signal can be utilized for carrying out the second-order coherence navigation ranging and angle measurement. The process of the thermal microwave signals based ranging and angle measurement by using second-order coherence reads as follows. First of all, a power splitter is utilized for splitting the prepared thermal microwave signal into two equal power paths, and two thermal microwave signals are transmitted through two antennas. At the receiving end, the real-time power of two signals is measured by signal receiver, then the correlation operations on the measured power waveforms are made. Through the extraction of correlation peaks, the distance differ-

收稿日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(61573372; 61603413)

作者简介: 朱浩男(1994—), 男, 陕西渭南人, 硕士生, 主要从事量子纠缠微波导航理论与技术研究。E-mail: zhuhaonank@163.com

通信作者: 吴德伟(1963—), 男, 吉林省吉林市人, 教授, 博士生导师, 主要从航空无线电导航及量子导航理论与技术研究。

E-mail: wudewei74609@126.com

引用格式: 朱浩男, 吴德伟, 苗强, 等. 功分热态微波信号的导航测距测角方案及性能分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 46-51. ZHU Haonan, WU Dewei, MIAO Qiang, et al. Navigation Ranging and Angle Measurement Scheme by the Power Divided Thermal Microwave Signals and Performance Analysis[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 46-51.

ence between the two channels of signal propagation is calculated, then the target azimuth information is derived from the principle of interferometric angle measurement. The result shows that due to the truly random nature of the thermal microwave signals, the problem of integer ambiguity caused by periodicity of signals in traditional radio navigation positioning is solved. And the anti-noise performance, and the anti-multipath capability are better, and the positioning accuracy is improved.

Key words: correlated ranging; thermal state microwave signal; quantum second-order coherence; navigation angle measurement

近年来,人们对量子关联光学的理论和试验进行了大量的研究,研究表明热态光场具有和双光子纠缠态相类似的二阶关联特性^[1-5],利用热光场同样可以实现类似纠缠光场的鬼成像、鬼干涉、亚波长干涉等试验。正是由于热光场具有和纠缠双光子对类似的二阶关联特性,已经引起了大量研究人员的注意并取得一定的成果,目前已经能够观测到了热光场类似于纠缠光的鬼成像、鬼干涉和亚波长干涉等现象。2004年,意大利的 Lugiato 小组^[6-7]和美国 Boyd 小组^[8]通过理论推导和实验验证,证明经典的非相干光作为光源可以用来进行关联成像,随后有多篇文章报道了用赝热光源来实现鬼成像和鬼干涉的实验;接着经典热光的亚波长干涉也在实验中得到验证^[9-12];上海交通大学的曾贵华教授研究小组对热光场二阶关联时钟同步^[13]和关联测距^[14]进行了研究。上述研究成果表明热光场和纠缠光场在二阶关联检测中具有很大的相似性;同样可以推断热态微波信号和路径纠缠微波信号也具有很强的相似的特性,因此不仅可以直接应用热态微波场二阶关联进行导航测距测角,而且能够用来模拟路径纠缠微波信号的二阶关联测距测角性能,作为路径纠缠微波信号^[15-19]导航提供支撑,为将来应用纠缠微波进行导航打下基础。

应用微波频段的多模热态电磁场进行关联测距差,相比于已有的相位式测距差、脉冲式测距差和伪码测距差等方法具有以下优势:①热态微波信号是真随机信号,没有周期,因此在测距中没有测量盲区,并且不存在一般信号或伪码信号由于信号周期性引起的整周模糊问题,适合于任意距离测距应用;②由于宽带的热态微波信号具有良好的自相关特性,通过关联检测可以获得一定的扩频增益,因此拥有较强抗噪声及其他信号干扰的能力,甚至与所在工作频段相重合的其他信号的干扰。因此对热态微波信号的导航应用进行研究具有重要的意义。

1 功分热态微波信号分析

首先对热态电磁场进行回顾。在电磁场的量子

理论中,热态属于统计的混合态,处于混合态的热态电磁场密度算符为:

$$\rho = \sum_i P_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i| \quad (1)$$

式中: $|\psi_i\rangle$ 为归一化的电磁场量子态的态矢; P_i 为处于对应态 $|\psi_i\rangle$ 的概率。

单模热场可由一处于热平衡状态的单模腔体产生,根据热力学统计可知,热场能量服从指数分布,因此单模热态的密度矩阵可以表示为:

$$\rho_T = [1 - \exp(-\frac{\hbar\omega}{KT})] \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-\frac{n\hbar\omega}{KT}) |n\rangle\langle n| = [1 - \exp(-\frac{\hbar\omega}{KT})] \exp(-\frac{\hbar\omega}{KT} a^+ a) \quad (2)$$

式中: \hbar 为约化普朗克常量; K 为玻尔兹曼常量; T 为开氏温度; ω 为光子频率; n 为光子数; a^+ 、 a 分别为 a 模光子的产生和湮灭算符。

由此可以计算得到单模热态的平均光子数 \bar{n} 为:

$$\bar{n} = \langle \hat{n} \rangle = [\exp(\frac{\hbar\omega}{KT}) - 1]^{-1} \quad (3)$$

式中: \hat{n} 为光子数算符。

从而单模热态的密度矩阵可用平均光子数 j 简化为:

$$\rho_T = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\bar{n}^n}{(1 + \bar{n}^{n+1})} |n\rangle\langle n| \quad (4)$$

接着通过准概率分布函数 $P(\alpha)$ 分析热态信号的统计特性, $P(\alpha)$ 表达式为:

$$P(\alpha) = \frac{e^{-|\alpha|^2}}{\pi^2} \int d^2 u \langle -u | \rho | u \rangle e^{|\alpha|^2} e^{a u^* - a^* u} \quad (5)$$

式中: $|u\rangle$ 为相干态。

通过计算得到热态的准概率分布函数为:

$$P(\alpha) = \frac{1}{\pi n} e^{-|\alpha|^2/\bar{n}} \quad (6)$$

可以看出,单模热态是服从高斯分布的相干叠加态。

如图1所示,热态微波信号 a 经微波功分器得到 b, c 2路信号输出,微波功分器对微波信号的作用,与光学中分束器对光场的作用是相同的,可以构建出相同的分束模型。为了保证功分器在量子力学模型中保持输入输出微波光子产生算符和湮灭算符

的对易关系,在功分器中需要引入1路“隐藏”的热态信号输入 v ,如图1所示,这4路信号的输入输出关系为:

$$\begin{cases} b=(a+v)/\sqrt{2} \\ c=(a-v)/\sqrt{2} \end{cases} \quad (7)$$

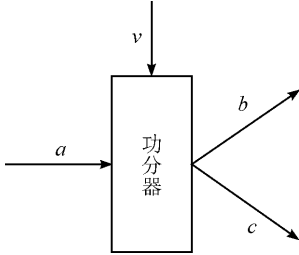


图1 热态微波信号进行功分示意图

然后对 b 、 c 2路微波信号进行短时间内的平均功率测量,等同于对其进行微波光子数的测量,此时得到2路微波信号平均功率为:

$$\begin{cases} \bar{P}_b = b^+ b = (a^+ a + a^+ v + v^+ a + v^+ v)/2 \\ \bar{P}_c = c^+ c = (a^+ a - a^+ v - v^+ a + v^+ v)/2 \end{cases} \quad (8)$$

对输入的微波信号场算符和热态场算符进行线性化:

$$\begin{cases} a = \alpha + \delta a \\ v = \beta + \delta v \end{cases} \quad (9)$$

式中: α 、 β 表示直流成分; δa 、 δv 表示交流成分。

对2路信号的平均功率做差得到:

$$\bar{P}_b - \bar{P}_c = 2\alpha\beta + \beta\delta X_a + \alpha\delta X_v \quad (10)$$

2路信号平均功率之差等于输入微波场算符 a 的直流分量 α 与“隐藏”热态场算符 v 的直流分量 β 乘积的2倍、 α 倍热态场正交振幅分量 X_v 、 β 倍输入微波信号量子起伏正交振幅分量 X_a 3项之和。当 a 中的光平均子数 $n(n = \alpha^* \alpha)$ 较小时,功分后的微波场 b 、 c 的平均功率之差受到输入信号量子噪声和“隐藏”热噪声的影响较大;随着平均光子数 n 的不断增大,信号量子噪声和“隐藏”热噪声的影响逐渐的降低。

2 功分热态微波信号二阶关联测角方案

2.1 热场的二阶关联函数

下面对热态场的量子二阶关联函数^[20-23]进行分析,场的二阶关联函数表示为:

$$G^{(2)}((r_1, t_1), (r_2, t_2)) =$$

$$\text{tr}\{\rho \hat{E}^-(r_1, t_1) \hat{E}^-(r_2, t_2) \hat{E}^+(r_2, t_2) \hat{E}^+(r_1, t_1)\} \quad (11)$$

式中: r_i, t_i 分别表示时间和空间点; \hat{E}^- 、 \hat{E}^+ 分别表示电磁场量子化的负频和正频部分。

由此可以得到二阶相干函数为:

$$g^{(2)}((r_1, t_1), (r_2, t_2)) = \frac{\text{tr}\{\rho \hat{E}^-(r_1, t_1) \hat{E}^-(r_2, t_2) \hat{E}^+(r_2, t_2) \hat{E}^+(r_1, t_1)\}}{\text{tr}\{\rho \hat{E}^-(r_1, t_1) \hat{E}^+(r_1, t_1)\} \text{tr}\{\rho \hat{E}^-(r_2, t_2) \hat{E}^+(r_2, t_2)\}} \quad (12)$$

最终推导得到单模热态电磁场的二阶相干函数为:

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\text{tr}[\rho (\hat{a}^+)^2 \hat{a}^2]}{[\text{tr}(\rho \hat{a}^+ \hat{a})]^2} = 2 \quad (13)$$

对于单模情况 $g^{(2)}(\tau) = \gamma^{(2)}(0)$,与延时时间 τ 无关。然而现实中理想的单模电磁场是不存在的,都是具有一定频谱展宽的多模量子化电磁场,这样电磁场的频谱可以用关于频率 ω 的函数 $F(\omega)$ 来表示。可以得到一阶相干函数 $g^{(1)}(\tau)$ 与频谱函数 $F(\omega)$ 的关系表示为:

$$g^{(1)}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (14)$$

对于多模热场,其各模之间是相互独立的,它的二阶相干函数和一阶相干函数有如下关系:

$$g^{(2)}(\tau) = 1 + |g^{(1)}(\tau)|^2 \quad (15)$$

2.2 热态微波信号测距差方案

通过上述对热态电磁场的二阶关联特性的分析,当时域信号完全对准时能够得到最大的相关值,当相关计算的延迟时间大于信号相干时间时,关联性消失。因此可以用功分器将制备的热态微波信号等分成2路,并在接收端分别对其进行接收,对2路信号做二阶关联计算以得到相关峰最大值出现时的时间,从而推导出信号的波程差,实现对信号传播距离差的测定。

热态微波信号实现二阶关联的具体过程如下:首先是制备热态微波信号,主要通过微波频段的噪声发生器来进行制备,同时对具有限定带宽 B 的热态微波信号,它的二阶相干函数的相干峰时间宽度 Δt 与带宽 B 的关系为 $\Delta t = 1/B$ 。

接着将制备的热态微波信号送入微波3 dB功分器,例如:威尔金森功分器等。将随机的热态微波信号分成2路,经传输线将2路信号分别送入2个接收端,2条传输线之间的长度差就是2路信号传播的距离差,假设2条传输线的长度分别为 L_1 、 L_2 ;最后在2个接收端对同时开始对信号的实时功率进行测量。

假设产生的较大功率微波热态信号为 $\hat{E}(t)$,通过功分器后将信号通过2条传输线到达2个接收端 B 和 C ,其接收到的信号分别为 $\hat{E}_a(t)$ 、 $\hat{E}_b(t)$,且:

$$\begin{cases} \hat{E}_a(t) = \hat{E}(t - L_1/c)/\sqrt{2} \\ \hat{E}_b(t) = \hat{E}(t - L_2/c)/\sqrt{2} \end{cases} \quad (16)$$

接着对2路信号进行二阶关联计算,得到二阶关联函数:

$$G^{(2)}(t_1, t_2) = \langle \hat{E}_a(t_1) \hat{E}_b(t_2) \hat{E}_b^+(t_2) \hat{E}_a^+(t_1) \rangle = \langle \hat{E}_a(t_1) \hat{E}_a^+(t_1) \rangle \langle \hat{E}_b(t_2) \hat{E}_b^+(t_2) \rangle + |\langle \hat{E}_a(t_1) \hat{E}_b^+(t_2) \rangle|^2 \quad (17)$$

通过式(16)~(17)得出 $G^{(2)}(t_1, t_2)$ 峰值位置为:

$$t_1 - t_2 = (L_2 - L_1) / c \quad (18)$$

由此,就可以得到 2 路信号波达时间差 $\tau = t_1 - t_2$, 从而计算得到 2 路信号传播的距离差 $L_2 - L_1 = c\tau$. 测距方案实现如图 2 所示。

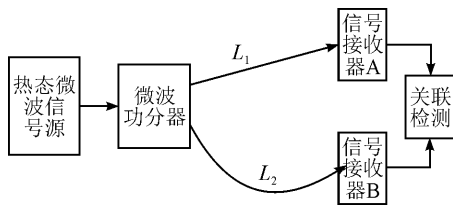


图2 热态微波信号测距差原理框图

下面以带宽 $B=20$ MHz 的热态微波信号为例进行实验验证,其理论计算的相关峰时间宽度为 $\Delta t = 50 \times 10^{-9}$ s。所制备的热态微波信号用功分器分成功率相等的 2 路,2 路信号采样波形如图 3 所示。

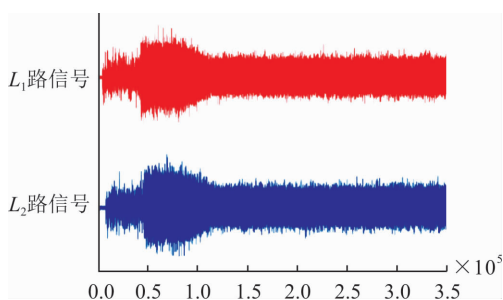


图3 功分2路信号波形图

计算得到的二阶相关函数曲线如图 4 所示,从图中可以看出信号的相关峰宽度大约为 48×10^{-9} s, 与理论推导相一致,可见关联检测精度可以根据信号的带宽增大而提高。

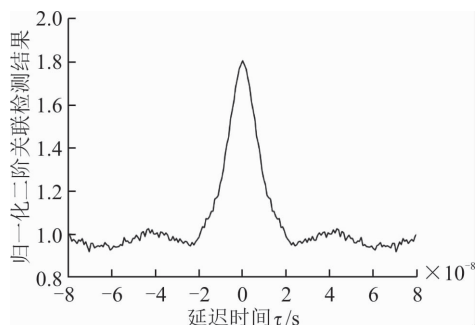


图4 功分2路信号二阶相关曲线

进一步通过码环路,对相关峰进行捕获,可以得到波达时间差 $\tau = t_1 - t_2$, 波达时间差的测量误差理论上可以达到相关峰宽度的 1%。

2.3 功分热态微波信号干涉式测角方案

通过上述的理论推导和实验验证,证明利用热

态微波信号的二阶关联特性,测距精度和信号的带宽有关,信号带宽越大测量精度就越高,这为其进一步应用在近程导航测角中提供了基础。下面对热态微波信号用于干涉式测角的具体过程进行分析。

如图 5 所示,在发射端将制备好的热态微波信号通过 3 dB 微波功分器分成 2 路;接着将 2 路信号分别送入间隔距离为 d 的 2 个全向极化正交的发射天线向自由空间发射,2 个极化正交天线作用是对 2 路信号在自由空间中进行隔离。

在接收端,目标 C 也通过同样的 2 个正交极化接收天线分别接收 2 路信号 $\hat{E}_a(t)$ 、 $\hat{E}_b(t)$,对得到的 2 路信号进行二阶关联计算,通过检测关联相关峰的位置得到 2 路信号的波达时间差 Δt ,进而计算出波程差 d_{ab} ;地面天线 A、B 位置和间隔 d 距离已知,并且由于 2 个天线的间隔远小于天线到目标的距离,两天线的信号可以近似为平行传播的,这样就可以推导出目标方位 θ 为:

$$\theta = \arcsin(d_{ab} / d) \quad (27)$$

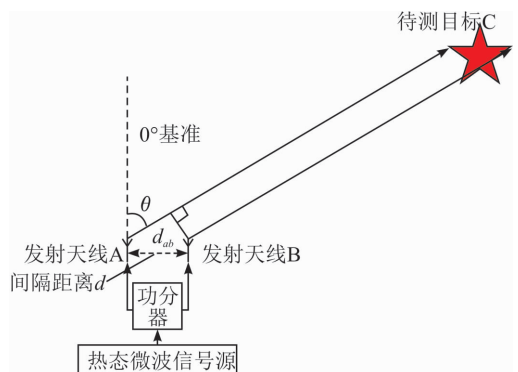


图5 热态微波信号干涉式测角原理图

3 导航测角精度分析和仿真实验

精度是导航系统首先要考虑的性能之一。测量精度是由测量延迟时间误差决定的。传统微波着陆系统^[24]测角精度如图 6 所示,分析中微波信号采用 5 GHz 的正弦波,天线波束宽度为 1° ,扫描速率为 $20\,000^\circ/\text{s}$,往返扫描角度范围为 120° 。微波测角脉冲宽度可用公式 $\Delta t = \theta_0 / v$ 计算, θ_0 为波束宽度。根据已知参数,可计算出传统微波信号测角理论误差为 0.5° 。

而对功分热态微波信号进行互相关检测,从随机信号理论中可以知道,相关峰宽度与信号的带宽有关。假如产生了 $B=500$ MHz 的信号,相关峰宽度:

$$T = \frac{1}{B} = 2 \mu\text{s} \quad (19)$$

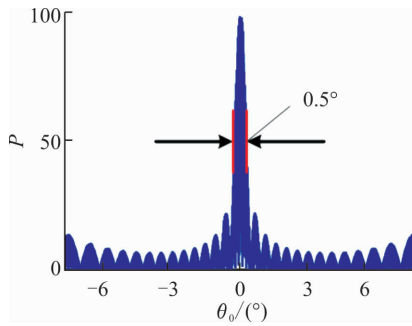


图6 传统微波信号的波束宽度

信号粗捕获采用相关计算采用FFT相关算法,对测角精度的影响主要取决于采样率的大小,此过程中相关峰延迟时间的解算会产生最大为 $\frac{1}{2}$ 采样间隔的误差,即 $\delta\tau_{\max} = \frac{1}{2}f_s$ 。

下面是路径纠缠微波导航测角方案粗捕获阶段的仿真分析,仿真场景设置如下:天线A和B之间的间隔 $D = 6\text{ m}$;热态微波信号的带宽 $B = 500\text{ MHz}$;采样率 $f_s = 1.25\text{ Gs/s}$;飞机距离跑道中心线的终点距离 $L = 3\ 000\text{ m}$;对飞机所处方位角在 $\pm 40^\circ$ 范围内的误差进行仿真,仿真结果见图7、图8。

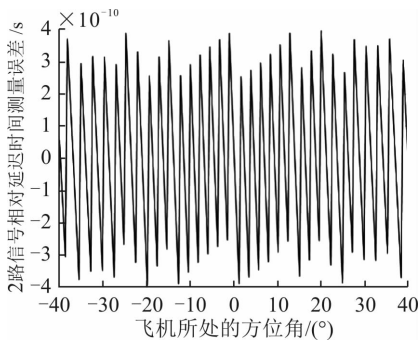


图7 2路信号相对延迟时间测量误差

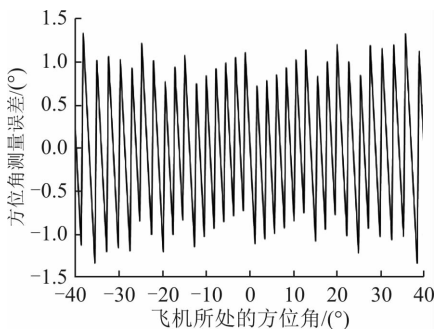


图8 方位角测量误差

通过仿真可以看出,粗捕获过程中延迟时间测量误差最大为 $0.4\ \mu\text{s}$,相应的方位角测量最大误差为 1.35° ,与理论分析基本一致。

通过进一步的码环路对相关峰进行精捕获,此

时测量误差主要取决于相关峰的宽度,理论上能够分辨出相关峰宽度的1%,则时间测量误差 ΔT 为 $0.02\ \mu\text{s}$ 。在这种情况下,将纠缠微波信号应用于问答式导航测距,理论精度能够达到 0.6 cm 。将纠缠微波信号应用于基线干涉式测角,假如两天线之间的间隔为 6 m ,理论测角精度可达到 0.06° 。

同时由于角度计算误差转换关系为:

$$\delta\theta = \arcsin(\delta d/D) \quad (20)$$

可以发现两发射天线放置的间距对测量精度也有一定的影响,间隔距离 D 越大测角精度越高,然而过大的间距会使2路信号平行到达运行体这一近似假设失效,因此天线间距选取也对测角精度有着一定的影响。

4 结语

本文根据光学中应用热光场的二阶关联特性进行关联成像、时钟同步和关联测距等方法,将其在微波领域进行拓展,提出利用热态微波信号进行二阶关联导航测距差和测角的方案。文中对所提方案进行了详细的分析论证,通过实验验证了功分热态微波信号用于测距差的能力,并对测角方案精度进行理论分析和仿真验证。通过将功分热态信号应用到导航测距测角中,能够解决以往无线电导航定位中由于信号周期性引起的整周模糊问题,并且拥有更好的抗噪性能、抗多径能力和导航精度,提高了导航的性能。

参考文献(References):

- [1] CAO D Z, XIONG J, WANG K G. Geometrical Optics in Correlated Imaging System [J]. Physical Review Letters, 2004, 93: 093602.
- [2] VALENCIA A, SCARCELLI G, D'ANGELO M, et al. Two-Photon Imaging with Thermal Light [J]. Physical Review Letters, 2004, 94(6): 063601.
- [3] FERRI F, MAGATTI D, GATTI A, et al. High-Resolution Ghost Imaging and Ghost Diffraction Experiments with Thermal Light [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(18): 183602.
- [4] BASANO L, OTTONELLO P. Experiment in Lensless Ghost Imaging with Thermal Light [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(9): 061106.
- [5] GATTI A, BACHE M, MAGATTI D, et al. Coherent Imaging with Pseudo-Thermal Light [J]. Journal of Modern Optics, 2006, 53(5-6): 739-760.
- [6] 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.
- [7] GATTI A, BRAMBILLA E, BACHE M, et al. Correlated Imaging, Quantum and Classical [J]. Physical Review A, 2003, 70(1): 235-238.
- [8] BENNINK R S, BENTLEY S J, BOYD R W, et al. Quantum and Classical Coincidence Imaging [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(3): 033601.
- [9] NAGASAKO E M, BENTLEY S J, BOYD R W, et al. Nonclassical Two-Photon Interferometry and Lithography with High-Gain Parametric Amplifiers [J]. Physical Review A, 2001, 64: 043802.
- [10] WANG K, CAO D Z, Subwavelength Coincidence Interference with Classical Thermal Light [J]. Physical Review A, 2004, 70(4): 041801.
- [11] XIONG J, CAO D Z, HUANG F, Experimental Observation of Classical Subwavelength Interference with a Pseudothermal Light Source [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(17): 173601.
- [12] ZHAI Y H, CHEN X H, ZHANG D, et al. Two-Photon Interference with True Thermal Light [J]. Physical Review A, 2005, 72: 043805.
- [13] ZHU J, HUANG P, XIAO X, et al. A New Clock Synchronization Scheme Based on the Second-Order Coherence of Thermal Light [J]. Optica Applicata, 2013, 43(2): 373-381.
- [14] ZHU J, CHEN X, HUANG P, et al. Thermal-Light-Based Ranging Using Second-Order Coherence [J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4885-4890.
- [15] ZAGOSKIN A M, IL'ICHEV E, MCCUTCHEON M W, et al. Controlled Generation of Squeezed States of Microwave Radiation in a Super-Conducting Resonant Circuit [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(25): 253602.
- [16] EICHLER C, BOZYIGIT D, LANG C, et al. Observation of Two-Mode Squeezing in the Micro-Wave Frequency Domain [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(11): 113601.
- [17] JOHANSSON J R, JOHANSSON G, WILSON C M, et al. Nonclassical Microwave Radiation from the Dynamical Casimir Effect [J]. Physical Review A, 2013, 87(4): 87-90.
- [18] MENZEL E P K. Propagating Quantum Micro-Waves: Dual-Path State Reconstruction and Path Entanglement [D]. Munich: Technic University of Munich, 2013.
- [19] 吴德伟, 王湘林, 苗强, 等. 空间分离的路径纠缠微波信号制备方案 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(4): 40-45.
- WU D W, WANG X L, MIAO Q, et al. Review of Approaches on Generating Spatially Separated Path Entangled Microwave Signal [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(4): 40-45. (in Chinese)
- [20] 张明智. 量子光学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHANG M Z. Quantum Optics [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [21] GLAUBER R J. The Quantum Theory of Optical Coherence [J]. Physical Review, 1963, 130(6): 2529-2539.
- [22] CAVES C M, Quantum-Mechanical Noise in an Interferometer [J]. Physical Review D Particles & Fields, 1981, 23(8): 1693-1708.
- [23] GLAUBER R J. Photon Correlations [J]. Physical Review Letters, 1962, 10(3): 84-86.
- [24] 吴德伟, 陈树新, 卢虎, 等. 导航原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- WU D W, CHEN S X, LU H, et al. The Principles of Navigation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)