

# 量子雷达及其研究进展

王宏强, 刘 康, 程永强, 秦玉亮, 黎 湘, 蒋彦雯

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 量子雷达是近年来发展起来的一种新体制雷达, 诞生之初便引起了国内外众多学者和研究机构的浓厚兴趣. 本文首先从量子雷达技术特点出发, 精炼了量子雷达的科学内涵, 给出量子雷达基本概念与分类方法, 指出其相对于传统雷达的性能优势; 然后着眼于量子雷达起源、发展和现状, 综述了量子雷达发展历程, 总结归纳其具备突破传统雷达在探测、测量和成像等方面性能极限的应用潜力; 最后, 展望量子雷达的发展前景, 提出了量子雷达走向实际应用的若干开放性问题.

**关键词:** 量子雷达; 量子衍生雷达; 雷达目标探测; 雷达成像; 量子纠缠

**中图分类号:** P412.25, O431.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)02-0492-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.02.031

## The Advances in Quantum Radar

WANG Hong-qiang, LIU Kang, CHENG Yong-qiang, QIN Yu-liang, LI Xiang, JIANG Yan-wen

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Quantum radar as a new radar paradigm has been attracting much attention of researchers and institutions all over the world since proposed. This paper begins defining the scientific content of quantum radar from its technology characteristics; it presents the basic definition and classification of quantum radar and points out the advantages in the target detection performance compared with classical radar systems. Subsequently, viewing from the origin, development and actuality of quantum radar, the paper briefly introduces the history of quantum radar. In particular, the potential applications of quantum radar to radar target detection, measurement and imaging and the corresponding advantages are elaborated. Finally, by viewing the prospects for the development of quantum radar, several open problems in the implementation and application of quantum radar are proposed.

**Key words:** quantum radar; quantum inspired radar; radar target detection; radar imaging; quantum entanglement

## 1 引言

历经 70 余年的发展, 雷达技术在理论、体制、实现方法及技术应用等方面都已取得了很大的进展<sup>[1-3]</sup>. 近年来, 传统雷达探测性能已接近经典物理学极限<sup>[3,4]</sup>, 关键战技指标提升难度较大, 难以满足日益复杂的军事目标信息感知的需求. 如何全面提升雷达系统性能, 增强雷达对目标的探测与识别能力, 特别是对隐身目标的探测<sup>[5]</sup>等是当前国内外雷达领域科技人员的研究热点. 近年来, 量子理论与信息科学相结合迎来了量子信息学的蓬勃发展<sup>[6,7]</sup>, 产生了诸如量子保密通信、量子计算和量子成像等新概念、新理论<sup>[8,9]</sup>. 其中, 量子技

术与雷达探测的结合迎来了量子雷达的诞生, 该项技术有望大幅提高雷达系统对目标的探测能力, 在未来军事反隐身作战、空间探索等领域有着诱人的应用前景.

## 2 量子雷达基本概念

### 2.1 量子雷达的内涵

量子雷达是近年来发展起来的一种新的远程探测传感器技术, 文献[4, 10, 11]等对量子雷达进行了研究并阐述其基本含义, 然而已有定义存在一定的片面性, 未能体现量子雷达的核心概念. 在研究理解的基础上, 我们将量子雷达内涵总结精炼为: 量子雷达是将传统

雷达技术与量子信息技术相结合,利用电磁波的波粒二象性,通过对电磁场的微观量子态和量子态操作和控制实现目标探测、测量和成像的远程传感器系统.其引申内涵还包括,借鉴于量子物理基本原理发展而来的新的雷达探测、测量与成像技术.量子雷达属于学科交叉前沿探索研究,学科基础主要包括量子物理、电子科学与技术、信息与通信工程、光电科学与技术等.其中,量子态测不准关系、量子态相干性以及量子纠缠等量子雷达研究中重要的物理概念<sup>[12-14]</sup>.相对于传统雷达,量子雷达以电磁场微观量子作为信息载体,发射由少量数目光子组成的探测信号<sup>[4,10]</sup>,光子与目标相互作用过程遵循量子电动力学规则,接收端采用光子探测器进行接收,并通过量子系统状态估计与测量技术获取回波信号光子态中的目标信息<sup>[15-17]</sup>.这里需要说明的是,本文中的光子指电磁波的基本能量单元,而非特指光量子.图 1 所示为量子雷达基本组成,其核心是对单个光子态进行调制、解调及目标信息获取.具体来说,量子雷达相对于经典雷达的特点主要表现为:

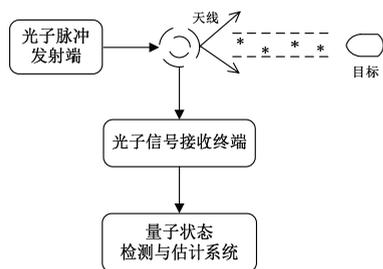


图1 量子雷达基本组成框图

### (1) 信息载体与信号体制不同

经典雷达基于电磁波的波动性,对其在时域、频域、极化域进行调制与解调以获取被探测目标的信息;量子雷达更加注重电磁波的粒子性,尤其是利用了量子纠缠等特殊量子效应,从而有望获取更多的目标信息.

### (2) 信号处理手段与信息获取方式不同

当前,经典雷达的目标检测机理大多是基于信噪比最大准则,利用回波信号宏观的相参特征实现目标参数的估计;量子雷达通常不需要复杂的信号处理过程,而是利用精准的量子测量手段从回波中“测量”出其中携带的目标信息.

### (3) 发射机与接收机结构和器件不同

在量子雷达领域,量子效应将导致传统器件无法有效工作,从而需研究设计符合量子电动力学规则的量子器件.由此,经典雷达系统噪声在量子雷达系统中主要表现为量子噪声,因而量子雷达通常具有极低的噪声基底.

如上所述,量子雷达与经典雷达有诸多不同,但从本质上来说,量子雷达仍属于传统雷达探测与成像的

理论体系范畴,量子雷达是对传统雷达技术的发展和补充,而不是颠覆和取代<sup>[11]</sup>.从广义上来说,我们在讨论量子雷达技术时,并不局限其工作频率,微波/毫米波、红外、太赫兹等波段都可以利用;从狭义上来说,如果能够使量子雷达工作于传统雷达频段,尤其是微波频段,那么量子雷达将具有全天时、全天候的工作能力,其应用范围将更为广阔.

## 2.2 量子雷达的分类

依据所利用量子现象和探测信号形式以及信息获取方式的不同,量子雷达有多种分类方法,首先依据所利用量子现象和信息获取方式的不同,可以将量子雷达分为以下三个类别.

(1) 量子纠缠雷达. 雷达发射纠缠的量子态电磁波<sup>[18]</sup>,发射机将纠缠光子对中的信号光子发射出去探测目标,“备份”光子保留在接收机中.如果目标将信号光子发射回来,那么通过对信号光子和“备份”光子的进行纠缠测量可以实现对目标的检测.

(2) 量子增强雷达. 雷达发射经典态的电磁波,使用光子探测器接收回波信号,利用量子增强检测技术以提升雷达系统的性能,目前该技术在激光雷达中已取得较为广泛的应用<sup>[19-21]</sup>.此外,量子增强雷达还包括基于高精度时频基准传递的量子增强阵列雷达.

(3) 量子衍生雷达. 借鉴于量子物理理论或其数学思想发展而来,可以显著提升传统雷达系统的性能但并不依靠真实量子物理体系来实现,目前在雷达成像领域发展较快.

另外,根据探测信号形式的不同,量子雷达还可以分为以下两个类别.

(1) 单光子探测量子雷达. 发射机发射单光子或纠缠光子脉冲探测目标可能存在的区域,如果目标存在,则信号光子将会以一定的概率返回至接收机处,通过对返回单个光子状态的测量可以提取出目标信息.此为一种理想的探测方案,优点是几乎不受干扰,缺点是实现困难.

(2) 多光子探测量子雷达. 发射机发射相干态电磁波或纠缠态电磁波,利用发射信号中多个光子的关联性进行目标探测,接收机处通过对单个光子状态的测量和辨识完成目标探测.相对于单光子探测量子雷达,它虽然会受到一定程度的干扰,但实现起来相对容易些,具有更大的现实意义<sup>[22]</sup>.

## 2.3 量子雷达性能优势

前面对量子雷达基本概念、工作原理及主要分类方法进行了详细的阐述,下面总结量子雷达技术特点以及其对目标探测性能的改善情况,主要包括以下四个方面内容.

### (1) 系统灵敏度显著提高

在量子雷达系统中,噪声主要为接收系统器件中短电流引起的散粒噪声(Short Noise)以及外部环境带来的热噪声,统称为量子噪声(Quantum Noise).与传统雷达接收机相比,量子雷达接收系统具有极低的噪声基底,而量子雷达信号检测属于微观测量范畴,在量子测量技术中通过使用某些量子操作手段,如相位敏感放大(Phase-sensitive Amplification, PSA)和压缩真空注入(Squeezed-vacuum Injection, SVI)等<sup>[18,23,24]</sup>可以有效降低噪声水平,从而使量子雷达系统灵敏度获得显著提升.在军事斗争领域,通过提升系统灵敏度并结合量子纠缠等典型量子效应,可以显著提高回波信号信噪比,从而能够增强雷达在低信噪比下的目标检测能力,有望实现对隐身目标的探测.

#### (2) 成像分辨率可突破衍射分辨率极限

经典成像技术与量子成像技术本质上来讲都是对电磁场所携带信息的提取,但二者获取目标信息的物理机制不同.经典成像技术建立在电磁场的确定性理论模型(几何光学、波动光学)之上,利用电磁场的一阶关联信息,通过记录辐射场的光强(或相位)分布获取目标的图像信息;而量子成像技术则建立在电磁场的量子统计不确定性理论之上,利用了电磁场的高阶关联信息,通过辐射场分布的强度、相位的空间统计特性获得目标的图像信息.因而量子雷达成像分辨率可超越经典成像系统的衍射极限,有望在战场侦察、精确打击和遥感目标成像等领域得到广泛的应用.

#### (3) 抗干扰能力进一步增强

量子雷达通过对电磁场的微观量子态进行操作以获取目标信息,从信息调制角度来看,微观粒子的状态空间可以构成无穷维的 Hilbert 空间,相比于时域、频域和极化域等传统的信号调制方式,理论上可以在微观量子态上调制更多的信息.一方面,随着信息调制维度的提高,在实际应用中探测信号将更加难以被截获和分析;另一方面,纠缠信号具有的“非定域、超经典”强关联使得探测信号被截获测量时将产生关联“塌缩”,因而量子雷达具有很强的抗干扰和抗侦听能力.

#### (4) 信息获取方式更加精准

一直以来,统计信号估计与检测理论是传统雷达技术中实现目标检测和特征参数估计所采用的主要理论方法,在此基础上发展而来的量子检测和估计理论可以突破经典信号检测和估计方法的性能极限,是量子雷达实现目标探测的重要理论基础.此外,量子计量(Quantum Metrology)等微观测量手段的有效利用也将使得目标信息“测量”更为精准.因此,目标信息获取理论基础的完善以及微观测量手段的使用,将给量子雷达目标探测带来新的性能提升.

### 3 发展历程与研究现状

量子雷达相关技术研究起源于上世纪 60 年代,P. A. Bakut<sup>[25]</sup>探索了在传统雷达系统中使用量子信号的可能性.1967 年,在量子力学、传统检测与估计理论以及经典信息论的基础上,C. W. Helstrom 等人<sup>[26,27]</sup>研究了量子检测与估计理论以突破传统检测与估计方法的性能极限,为量子雷达目标信息获取奠定了重要的理论基础<sup>[11]</sup>.近年来,随着量子信息技术的飞速发展,量子雷达技术迎来了新的研究高潮.瞄准反隐身探测、电子抗干扰等领域的应用潜力,当前量子雷达研究在量子纠缠雷达、量子增强雷达和量子衍生雷达三个子方向进展迅速.

#### 3.1 量子纠缠雷达研究现状

正如相参雷达使得目标检测不仅可以依靠回波幅度信息还可以依据相位信息,量子纠缠在量子雷达技术中的应用使得可以利用纠缠信息进行目标检测,有望获得更多、更精确的目标信息.当前量子纠缠雷达范畴主要包括干涉量子雷达(Interferometric Quantum Radar, IQR)和量子照射雷达(Quantum Illumination Radar, QIR)两个类别.

干涉量子雷达是一种基于量子计量技术(Quantum Metrology)的量子雷达系统实现方案,其通常发射处于纠缠态或压缩态的光子信号,在接收端采用量子相干测量手段来提取目标信息,能够突破标准量子极限(Standard Quantum Limit, SQL)<sup>[28]</sup>而实现超灵敏度.借鉴于雷达测距原理,V. Giovannetti 等人<sup>[29-31]</sup>采用量子干涉分析了干涉量子雷达目标探测性能.研究发现,采用压缩态或纠缠态可以使相位差估计误差突破标准量子极限<sup>[32,33]</sup>而达到海森堡极限(Heisenberg Limit, HL)<sup>[29]</sup>.但是,大气衰减会使干涉量子雷达性能急剧下降.然而,大气衰减存在时,距离估计误差保持超灵敏度(误差介于标准量子极限和海森堡极限之间称为超灵敏度)距离范围只有 60 千米甚至更小.来自美国海军实验室的 J. F. Smith III<sup>[34]</sup>提出了一种类似于自适应光学的校正方法,该校正方法使距离估计性能在电磁特性急剧变化的衰减介质中依然能够保持超灵敏度达 1000 千米以上.在意大利研究人员 M. F. Sacchi<sup>[35,36]</sup>对量子操作和量子信道识别研究工作的基础上,2008 年美国 Seth Lloyd 教授首次提出了具有革命性意义的量子探测系统模型——量子照射雷达,如图 2 所示.该系统发射纠缠光子对中的一个光子探测目标,另一个“备份”光子保留在接收机中.如果目标不存在,那么接收机只能检测到热噪声或者背景噪声光子.由于信号光子一般以较小的概率返回接收机,即使目标存在,信号光子也有很大可能会丢失,从而只能检测到噪声光子.如果信

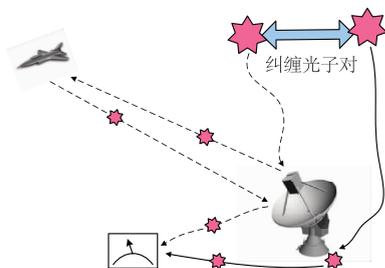


图2 量子照射雷达示意图

号光子被目标反射回来,做纠缠关联测量可以提取出目标信息.对于采用  $m$  比特纠缠的量子照射方式可以获得较非纠缠探测情况下高  $2^m$  倍的信噪比.值得注意的是,即使在大噪声和强损耗环境中,该技术仍然可以显著提高目标检测能力<sup>[37]</sup>.

在 Seth Lloyd 工作的基础上, Si-Hui Tan 等人<sup>[38]</sup>将单次检测事件中的光子数扩展为任意数量,分析了全高斯态下量子照射雷达目标检测性能.图3给出了量子照射雷达与传统雷达目标检测错误概率比较结果.图中,红色曲线表示传统雷达检测错误概率边界,蓝色曲线表示量子照射雷达的错误概率边界.通过对回波信号与“备份”信号进行最佳关联测量,量子照射雷达较传统雷达信噪比显著提升,使得检测错误概率降低了 6dB. 2009 年,美国研究机构 DARPA 在其项目技术报告中首次对量子传感器技术<sup>[18]</sup>进行了系统的介绍,研究成果表明,量子纠缠等效可以用来增强雷达目标探测能力以及三维成像空间分辨率. S. Guha 等人<sup>[23,24]</sup>提出了两类量子照射雷达最佳接收机的实现模型并分析了其目标检测性能. 2013 年,意大利研究人员 E. D. Lopaeva 等人<sup>[39,40]</sup>首次用实验方法实现了量子照射雷达,该实验基于光子数量关联,验证了 Seth Lloyd 提出的量子照射雷达模型在高噪声及大损耗情况下目标探测的性能稳健性. 2015 年,英国 York 大学 S. Pirandola 等人<sup>[41]</sup>研究了微波量子照射雷达技术 (Microwave Quantum Illumination), 如图 4 所示. 该研究团队设计了一个双腔转换器,利用纳米振荡器实现微波探测与光波“备

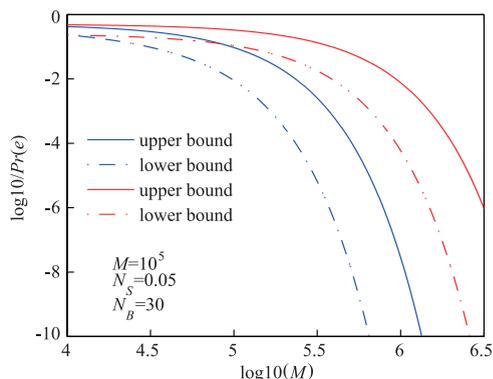
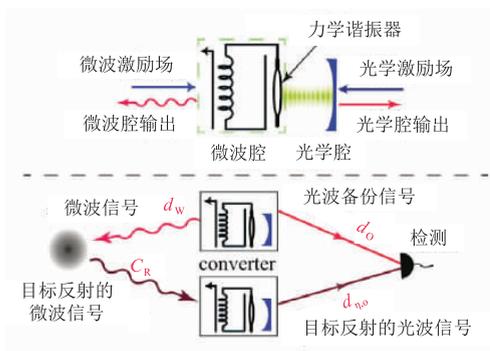


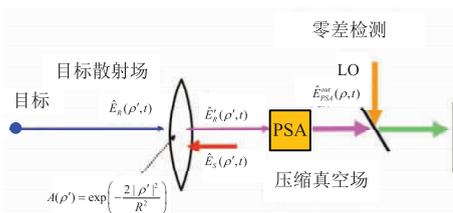
图3 量子照射雷达与传统雷达目标检测性能比较图

份”信号的耦合,探测过程中将微波信号发射出去照射目标可能存在的区域,而光波信号保留在接收机中,雷达接收的目标回波信号将被转换至光学频段后,对转换后的回波信号与保留在接收机中的“备份”信号进行关联处理,可以显著提升雷达对目标的检测能力.

图4 微波量子照射雷达工作原理图<sup>[41]</sup>

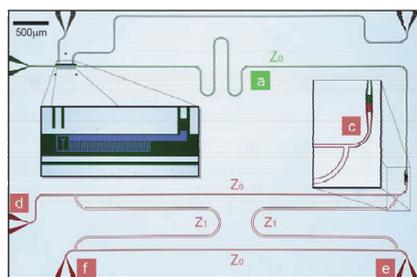
### 3.2 量子增强雷达研究现状

量子纠缠雷达由于利用了量子纠缠信息使得目标探测性能获得了大幅度提升,但是纠缠态制备困难且在大气中易消相干,从而使雷达探测性能急剧下降.与此同时,人们展开了对量子增强雷达的研究,利用微观量子态高维度信息调制特性,实现提高雷达角度分辨和提高系统灵敏度的目标.由 2.2 节中量子雷达分类可知,量子增强雷达的核心是单光子探测器与接收系统的研究设计. 2009 年, Harris 公司、麻省理工学院等<sup>[18,42,43]</sup>提出在接收端采用真空注入 (Squeezed Vacuum Injector, SVI) 和相位敏感放大 (Phase Sensitive Amplifier, PSA) 的零差检测技术以提升雷达探测性能.该量子增强雷达系统结构框图如图 5 所示,目标回波  $\hat{E}_R(\rho', t)$  经软孔径  $A(\rho')$  且与真空场  $\hat{E}_S(\rho', t)$  混合后得到  $\hat{E}_R(\rho', t)$  (即为 PSA 的输入场). 对相位敏感放大后的信号  $\hat{E}_{PSA}^{out}(\rho, t)$  进行平衡零差检测可以得到目标信息.此外,量子增强雷达实现方案还包括:基于零差检测的奇偶探测以及接收端采用具有光子数分辨能力的探测器等<sup>[44]</sup>. 截至目前,量子增强雷达在激光雷达领域已获得较为成熟的应用.

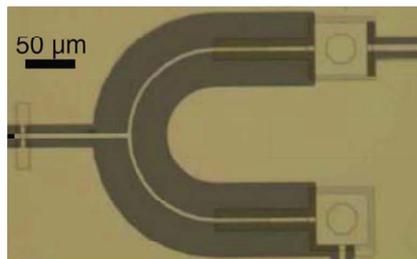
图5 接收端采用SVI和PSA的量子增强雷达系统结构框图<sup>[42]</sup>

在微波光子探测器研究方面,近年来取得了较大进展. 2009 年, G. Romero 等人<sup>[45,46]</sup>基于超材料设计提

出了微波频段单光子计数探测器的实现方案,检测器由微波波导和处于亚稳定状态的量子回路组成,其瞬时状态随着吸收光子状态的不同而变化.基于 QED 回路,西班牙研究人员 B. Peropadre 等人<sup>[47]</sup>提出了一种高效的微波光子检测方法,所设计的检测器具有多种工作模式,可以检测失谐光子且对工艺缺陷具有一定的稳健性.2012 年, Y. Nakamura 和 T. Yamamoto<sup>[48]</sup>利用超导回路实现了微波频段单光子态产生与检测技术的突破,如图 6 所示.



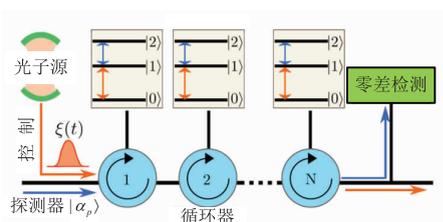
(a) 微波光子产生装置



(b) 微波光子检测装置

图6 微波光子产生与检测装置

2014 年, S. R. Sathyamoorthy 等人<sup>[49]</sup>证明了在波导中微波频段光子与光子之间存在强而有效的相互作用,并通过人工构造三能级原子的方法实现了对微波光子的无破坏性检测,理论分析表明该方法可以获得 90% 的检测效率.图 7 所示为微波光子检测示意图,人工构造三能级原子的三个能级分别用  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$  表示,受控光子场光子能量恰好为  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  之间的能级差,待检测光子能量等于  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  之间能级差.在没有受控光子输入的情况下,人工原子不会与待检测光子发生作用;受控光子存在情况下,待检测光子将与人工原子作用,从而通过零差检测可以获得待检测光子信息.2015 年, K. Koshino 等人<sup>[50]</sup>研究了利用阻抗匹

图7 微波光子无破坏性检测示意图<sup>[49]</sup>

配的  $\Lambda$  系统进行微波单光子检测的方法,研究中分析了  $\Lambda$  系统对单光子脉冲输入响应情况并评估了其检测性能,通过输入微波激励脉冲可以使该系统快速复位,从而实现较短的空载时间和高效的检测效率.

### 3.3 量子衍生雷达研究现状

量子成像又称“鬼成像”,是量子光学的一个重要分支,其利用光场的量子相干性和不确定性,采用二阶(高阶)关联方法是实现对目标的成像,因此也称为关联成像.最早的量子成像是通过纠缠双光子系统实现的,具有非定域特性,并且其分辨率能够突破瑞利衍射.因此,一经提出就受到了人们的广泛关注,并且量子纠缠被认为是鬼成像的必要条件.然而,随着研究的深入,量子成像的实现打破了量子纠缠的限制,能够通过更为普遍的热光源、赝热光源实现,量子衍生雷达也由此发展而来.当前量子衍生雷达研究主要包括:利用光场二阶关联信息的热光/赝热光关联成像雷达<sup>[51,52]</sup>,基于辐射场随机涨落/轨道角动量调制的微波关联成像雷达等<sup>[53,54]</sup>.1988 年,苏联学者 David N. Klyshko<sup>[55,56]</sup>根据自发参量下转换光子对的纠缠行为,首次在理论上提出了利用纠缠光子对实现双光子关联成像的方案.1995 年, T. B. Pittman 和史砚华小组<sup>[57]</sup>首次在实验上实现了双光子纠缠源的关联成像,他们借助于自发参量下转换光子对实现了纠缠态非局域成像.实验装置如图 8 所示,其采用氩离子激光器(波长 351.1nm,激光光斑直径 2mm)作为泵浦光源泵浦 II 型 BBO 晶体,产生纠缠光子对,经 BBO 后被一偏振分束器分开,其中信号光经过透镜照射一透光物体后被探测器桶测量(固定不动,集束透镜收集通过物体各部位的光子的和统一被记录,这种方法称为桶测量);闲置光经过一定距离的自由传播,在探测平面由探测器进行扫描测量.两路探测器的测量结果再进行符合测量即可得到物体的空间分布信息.图 8 中信号源的纠缠光子对,其中一路照亮待探测的透光物体后被不做空间分辨的桶探测器收集,而另一路上则不包含任何物体信息,却用点探测器做空间扫描测量.通过两探测器的双光子符合测量获得了物体清晰的像.

如前文所述,人们最初倾向于认为“鬼成像”是一种量子现象,只有用量子纠缠才能实现“鬼成像”<sup>[58-60]</sup>.然而,关联成像是否真的只是量子纠缠源的特有现象?经典光源是否无论如何也无法实现关联成像?这一问题引起了研究学者们得激烈的讨论.尤其是,在 2001 年 A. F. Abouraddy 等人<sup>[61]</sup>的研究指出纠缠双光子在关联成像中表现出的效应是其他双光子源不能比拟或模拟的,由此认为量子纠缠是“鬼成像”的先决条件.然而, R. S. Bennink 等人<sup>[51]</sup>在 2002 年通过巧妙地实验设计,利用经典热光源同样获得了类似于量子

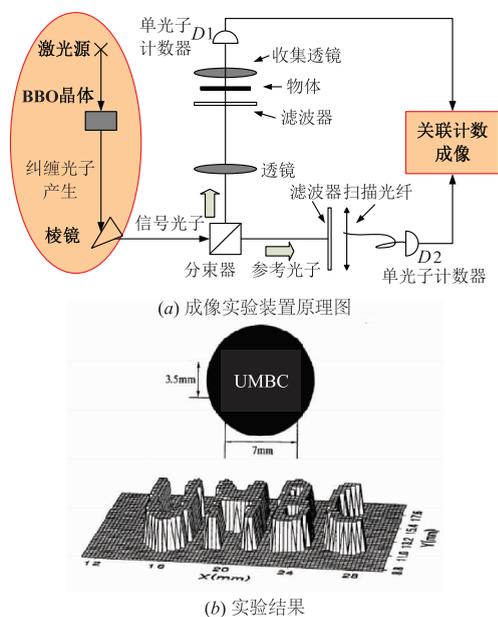


图8 纠缠光子成像雷达

纠缠成像的结果. 试验中,经典光源(He-Ne激光)的光信号经过一个随机旋转的反射镜后,通过光学分束器分为两路:其中一路放置了一个待成像物体,而对另外一路不作任何处理限制.由此产生的两路光场具有显著的相干性.实验的结果是,两路光场的强度关联同样给出了物体图像,从而验证了基于经典光学的“鬼成像”,否认了量子纠缠是“鬼成像”的必要条件.2004年,A. Gatti等人<sup>[62]</sup>经过研究给出了关联成像能够通过真正的非相干光源实现的理论论证.程静与韩申生<sup>[52]</sup>在同年提出了基于X射线衍射的非相干光源“鬼成像”.2005年,F. Ferri等人在实验上用赝热光源完成了关联成像和“鬼干涉”实验.由于光学信号易受环境影响,且相位、幅度难以控制,只能在有限条件下成像.尽管如此,围绕量子还是经典理论是否都可以解释的“鬼”成像仍在继续争论.虽然没有得到一致性的结论<sup>[63]</sup>,但是这一非常具有启发性的工作还是引起了人们更广泛的讨论.

目前,基于经典光源的关联成像雷达已成为理论以及实际应用的研究热点.国内外的学者针对经典热光源量子成像相继进行了理论和实验上的探索,对成像的几何光学理论基础、信号源、可见度以及高阶关联成像<sup>[64-66]</sup>都展开了深入的研究.2013年,美国陆军实验室实现了2.33km距离低亮度、强湍流条件下的高质量量子成像,产生相同质量图像的积累时间从6小时缩短至数秒.同年,上海光机所研制成功激光三维强度量子成像雷达样机并于2014年进行试验,作用距离达10km,成像分辨率比同口径传感器提高2倍.

在微波关联成像雷达方面,2013年美国Duke大学J. Hunt等人提出采用超材料设计制成的孔径实现压缩

微波成像<sup>[67]</sup>.整个系统只需要一个微波探测器,不同频率微波通过超材料阵列可以产生不同辐射模式,在空间形成随机辐射模式,从而实现孔径内的超分辨率成像.2011年以来<sup>[68-70]</sup>,国内中国科学技术大学、国防科技大学、西安电子科技大学等相继开展了微波波段关联成像技术研究,采用阵列发射随机信号在成像平面构造具有空间起伏特性的微波辐射场,通过对目标散射回波与相应辐射场的关联处理获得目标的高分辨率图像.从理论上讲,该技术利用了电磁场的空间相干性,可以获得超越天线孔径限制的空间分辨率,为微波高分辨率成像技术提供了一条崭新的技术途径.目前,从公开报道来看,其他国家还没有涉及该方面的研究.2014年,中国科技大学研制成功微波关联成像雷达样机,进行了百米量级距离的成像试验.2015年,国防科技大学完成了基于DDS的微波关联成像雷达实验平台构建,成功进行了室内与外场试验.

## 4 总结与展望

当前量子雷达工作体制、目标探测与成像等诸多机理性问题尚不明晰,相关理论、技术、系统的研究方兴未艾,理论研究成果到实际系统应用还有很大距离.本文基于对量子雷达发展历程与研究现状的认识,思考总结一些开放性问题及其发展趋势如下.

### 4.1 微观量子态制备与检测

量子雷达发射机和接收系统设计是量子雷达系统设计的核心,其中,微观量子态的制备与检测,特别是纠缠态的制备与检测,是发射与接收系统研究中的主要难题.研究表明,量子纠缠产生与检测理论研究已相当完善,在实验室中可以制备与检测可见光附近频段的纠缠光子态<sup>[71,72]</sup>.然而,对于微波或其他频段的量子态,其产生与探测仍然是一个具有挑战性的问题,可以预见,结合超材料技术有望解决这一重要难题.

### 4.2 量子系统信息获取

由量子雷达基本定义及其工作原理可知,探测信号产生、雷达与目标相互作用、目标回波检测等过程都应当视为对量子系统的操作,因此,量子信息处理原理和方式也将与传统的信号处理手段有着很大的区别.与经典统计信号处理理论相对应,需要研究量子系统状态估计与检测理论,为量子雷达目标信息获取提供重要的理论支撑.与经典物理系统状态测量不同的是,量子系统状态测量受到量子不可克隆原理和海森堡不确定关系的约束,从而不可能对一个物理系统进行多次重复测量以减少测量误差.在量子检测与估计理论中,密度算符(Density Operator)代替经典统计理论中的概率密度函数描述系统可能处于的状态,统计判决问题表现为:在众多可能的状态描述中选择最合适的密

度算符表征接收机所处的量子系统状态. 依据一定的判决准则寻找确定最佳测量算符是量子检测与估计理论中的核心问题.

### 4.3 量子雷达目标特性

雷达目标特性是雷达探测获取目标信息的基础,同时对雷达设计具有很大的现实指导价值. 在量子雷达相关技术中,量子雷达信号与目标相互作用机理,不同目标对信号光子状态的“调制”作用以及传播信道对量子态的改变作用等问题是目标探测与识别的理论基础<sup>[73-75]</sup>. 因此,量子雷达目标散射特性研究是量子雷达相关技术研究探索过程中必不可少的重要内容. 此外,传统雷达目标特性研究方法主要为理论计算或电磁计算以及实验测量,然而由于量子系统可操作性难度较大,目标的量子散射特性实验验证也是一项具有很大挑战的工作.

### 4.4 微观量子操控与宏观应用的“接口”

量子雷达基于对电磁场的量子态操作和控制实现对目标的探测、测量和成像,然而微观量子信息是很难被人们直接“感知”的. 为了实现量子雷达技术的实际应用,需要研究微观量子信息与宏观物理量之间的对应以及如何将宏观问题转化为量子微观问题来解决,即微观量子操控与宏观探测应用的“接口”是量子雷达技术走向实际应用需要解决的一个重要问题. 上述几个方面基本问题,具有重要的学术研究价值,如有突破将对量子雷达发展产生重要的推动作用. 总体来说,量子雷达将给传统雷达技术带来新的、跨越式的发展.

### 参考文献

- [1] Skolnik M L. Radar Handbook [M]. New York: McGraw Hill, 2008.
- [2] 王小谟, 张光义. 雷达与探测: 信息化战争的火眼金睛 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
Wang X M, Zhang G Y. Radar and Detection: The Piercing Eye of the Information War [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [3] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析 [J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19-27.  
Yang J Y. Development laws and macro trends analysis of radar technology [J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 19-27. (in Chinese)
- [4] Lanzagorta M. Quantum Radar [M]. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2011.
- [5] Lynch D. Introduction to RF Stealth [M]. Hern-don: SciTech Publishing, 2004.
- [6] Weedbrook C, et al. Gaussian quantum information [J]. Reviews of Modern Physics, 2012, 84(2): 621-669.
- [7] Kok P, Lovett B W. Optical Quantum Information Processing [M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [8] 李承祖, 等. 量子通信和量子计算 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.  
Li C Z, et al. Quantum Communication and Quantum Computation [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [9] Kolobov M. Quantum Imaging [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [10] Lanzagorta M. Quantum radar cross section [A]. Proceedings of the 4th International Conference on Active and Passive Signatures [C]. Brussels, Belgium: SPIE, 2010. 77270K.
- [11] 江涛, 孙俊. 量子雷达探测目标的基本原理与进展 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(1): 10-16.  
Jiang T, Sun J. The principle and development of quantum radar detection target [J]. Journal of CAEIT, 2014, 9(1): 10-16. (in Chinese)
- [12] 曹昌祺. 辐射场和光场的量子统计理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
Cao C Q. Quantum Statistics Theory of Radiation Field and Optical Field [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [13] 王剑. 量子密码协议理论研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.  
Wang J. Study on the theory of quantum cryptography protocol [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [14] Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M, Horodecki K. Quantum entanglement [J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(2): 865-942.
- [15] Bergou J, Herzog U, Hillery M. Quantum State Estimation [M]. Berlin: Springer, 2004.
- [16] Helstrom C W. Quantum Detection and Estimation Theory [M]. Academic Press, 1976.
- [17] 狄拉克. 量子力学原理 [M]. 陈咸亨, 译. 北京: 科学出版社, 1965.  
Dirac. Principle of Quantum Mechanics [M]. Translated by Chen X H. Beijing: Science Press, 1965. (in Chinese)
- [18] Harris. Quantum sensors program [R]. New York: Defense Advanced Research Projects Agency, 2009.
- [19] Shapiro J H. Quantum pulse compression laser radar [A]. Proceedings of the 4th International Symposium on Fluctuations and Noise [C]. Florence, Italy: SPIE, 2007. 660306.
- [20] Dutton Z, Shapiro J H, Guha S. Ladar resolution improvement using receivers enhanced with squeezed-vacuum injection and phase-sensitive amplification [J]. Optical Society of America B, 2010, 27(10): A63-A72.
- [21] Guerrieri F, Maccone L, Wong F N C, et al. Sub-rayleigh imaging via N-photon detection [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(16): 163602.

- [22] Brandsema M J, et al. Design considerations for quantum radar implementation [A]. Proceedings of the 18th International Conference on Radar Sensor Technology [C]. Baltimore, Maryland, USA; SPIE, 2014. 90770T.
- [23] Guha S, Erkmen B I. Gaussian-state quantum-illumination receivers for target detection [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(5):052310.
- [24] Guha S. Receiver design to harness quantum illumination advantage [A]. Proceedings of the International Conference on Symposium on Information Theory [C]. Seoul: IEEE, 2009. 963 – 967.
- [25] Bakut P A. Potential application of radar in presence of quantum and thermal fluctuations of field [J]. *Radio Engineering and Electronic Physics*, 1967, 12(1):66 – 71.
- [26] Helstrom C W. Detection theory and quantum mechanics [J]. *Information and Control*, 1967, 10(3):254 – 291.
- [27] Helstrom C W. Quantum detection and estimation theory [J]. *Journal of Statistical Physics*, 1969, 1(2):231 – 251.
- [28] Sanders B C, Milburn G J. Optimal quantum measurement for phase estimation [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(16):2944 – 2947.
- [29] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum-enhanced measurements: beating the standard quantum limit [J]. *Science*, 2004, 306(5700):1330 – 1336.
- [30] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum metrology [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(1):010401.
- [31] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Advance in quantum metrology [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4):222 – 229.
- [32] Kok P, et al. *Optical Quantum Information Processing* [M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [33] Braginsky V B, Khalili F YA. *Quantum Measurement* [M]. New York: Cambridge University Press, 1992.
- [34] Smith J F. Quantum entangled radar theory and a correction method for the effects of the atmosphere on entanglement [A]. Proceedings of the 7th International Conference on Quantum Information and Computation [C]. Orlando, Florida, USA; SPIE, 2009. 73420A.
- [35] D' Ariano G M, Sacchi M F. Minimax discrimination of two Pauli channels [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(5):052302.
- [36] Sacchi M F. Entanglement can enhance the distinguishability of entanglement-breaking channels [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(1):014305.
- [37] Lloyd S. Enhanced Sensitivity of Photodetection via Quantum Illumination [J]. *Science*, 2008, 321(5895):1463 – 1465.
- [38] Tan S H, Erkmen B I, Giovannetti V, et al. Quantum illumination with Gaussian states [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(25):253601.
- [39] Lopaeva E D, et al. Experimental realization of quantum illumination [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(15):153603.
- [40] Lopaeva E D, et al. A detailed description of the experimental realization of a quantum illumination protocol [J]. *Royal Swedish Academy of Sciences*, 2014, 2014(T160):014026.
- [41] Barzanjeh S, et al. Microwave quantum illumination [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(8):080503.
- [42] Nair R, Yen B J, Shapiro J H, et al. Quantum-enhanced lidar ranging with squeezed-vacuum injection, phase-sensitive amplification, and slow photodetectors [A]. Proceedings of the 35th International Conference on Quantum Communications and Quantum Imaging [C]. San Diego, California, USA; SPIE, 2011. 816310.
- [43] Santivanez C A, et al. Quantum enhanced LIDAR resolution with multi-spatial-mode phase sensitive amplification [A]. Proceedings of the 35th International Conference on Quantum Communications and Quantum Imaging [C]. San Diego, California, USA; SPIE, 2011. 81630Z.
- [44] Jiang K, et al. Super-resolving quantum radar: Coherent-state sources with homodyne detection suffice to beat the diffraction limit [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(19):193102.
- [45] Romero G, García-Ripoll J J, Solano E. Microwave photon detector in circuit QED [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(17):173602.
- [46] Romero G, García-Ripoll J J, Solano E. Photodetection of propagating quantum microwaves in circuit QED [J]. *Physical Scripta*, 2009, 2009(T137):014004.
- [47] Peropadre B, Romero G, G. Johansson, et al. Approaching perfect microwave photodetection in circuit QED [J]. *Physical Review A*, 2011, 84(6):063834.
- [48] Nakamura Y, Yamamoto T. Breakthroughs in photonics 2012; breakthroughs in microwave quantum photonics in superconducting circuits [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2):0701406.
- [49] Sathyamoorthy S R, Tornberg L, et al. Quantum nondemolition detection of a propagating microwave photon [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(9):093601.
- [50] Koshino K, et al. Theory of microwave single-photon detection using an impedance-matched  $\Lambda$  system [J]. *Physical Review A*, 2015, 91(4):043805.
- [51] Bennink R S, Benley S J, Boyd R W. “Two-photon” coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11):113601.
- [52] Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9):093903.

- [53] 李东泽. 雷达关联成像技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2014.  
Li D Z. Study on the radar coincidence imaging [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [54] Liu K, et al. Orbital-angular-momentum based electromagnetic vortex imaging [J]. IEEE, Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14:711 – 714.
- [55] Klyshko D N. A simple method of preparing pure states of an optical field, of implementing the Einstein-Podolsky-Rose experiment, and of demonstrating the complementarity principle [J]. Sov. Phys. Usp., 1988, 31(1):74.
- [56] Klyshko D N. Combined EPR and two-slit experiments: Interference of advance waves [J]. Phys. Lett. A, 1988, 132(6):299 – 304.
- [57] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, Sergienko A V. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. Physics Review A, 1995, 52(5):R3429.
- [58] Strekalov V D, Sergienko A V, Klyshko D N, Shih Y H. Observation of two-photon “ghost” interference and diffraction [J]. Physics Review Letters, 1995, 74(18):3600.
- [59] Gatti A, et al. Quantum entangled images [J]. Physics Review Letters, 1999, 83(9):1763.
- [60] D’Angelo M, Kim Y H, Kulik S P, Shih Y H. Identifying entanglement using quantum ghost interference and imaging [J]. Physics Review Letters, 2004, 92(23):233601.
- [61] Abouraddy A F, B. Saleh E A, Sergienko A V, Teich M C. Role of entanglement in two-photon imaging [J]. Physics Review Letters, 2001, 87(12):123602.
- [62] Gatti A, Brambilla E, et al. Lugiato. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation [J]. Physics Review Letters, 2004, 93(9):093602.
- [63] Shih Y H. The physics of ghost imaging [J]. Quantum Information Processing, 2012, 11(4):949 – 993.
- [64] Liu J Y, Zhu J B, Lu C, Huang S S. High-quality quantum imaging algorithm and experiment based on compressive sensing [J]. Optics Letters, 2010, 35(8):1206 – 1208.
- [65] 韩申生. 强度关联遥感成像技术 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5):44 – 51.  
Han S S. Intensity correlation based remote sensing imaging technology [J]. Space recovery & Remote Sensing, 2011, 32(5):44 – 51. (in Chinese)
- [66] Ferri F, Magatti D, Gatti A, et al. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light [J]. Physics Review Letters, 2005, 94(18):183602.
- [67] Hunt J, et al. Metamaterial Apertures for Computational Imaging [J]. Science 339, 310, 2013.
- [68] Li D Z, Li X, Cheng Y Q, et al. Radar coincidence imaging in the presence of target-motion-induced error [J]. Journal of Electronic Imaging, 2014, 23(2):023014.
- [69] Zha G F, Wang H Q, Yang Z C, et al. Angular resolution limits for coincidence imaging radar based on correlation theory [A]. Proceedings of the International Conference on Signal Processing, Communications and Computing [C]. Ningbo, China: IEEE, 2015. 1 – 4.
- [70] Zhou X L, Wang H Q, Cheng Y Q, et al. Sparse Auto-calibration for radar coincidence imaging with gain-phase error [J]. Sensors, 2015, 15(11):27611 – 27624.
- [71] Fraire A, Minaeva O, Simon D S, et al. Broad-band source of polarization entangled photons [J]. Optics Letters, 2012, 37(11):1910 – 1912.
- [72] Minozzi M, Bonora S, Sergienko A V, et al. Optimization of two-photon wave function in parametric down conversion by adaptive optics control of the pump radiation [J]. Optics Letters, 2013, 38(4):489 – 491.
- [73] Lanzagorta M. Amplification of radar and lidar signatures using quantum sensors [A]. Proceedings of the 4th International Conference on Active and Passive Signatures [C]. Baltimore, Maryland, USA: SPIE, 2013. 87340C.
- [74] Liu K, Xiao H T, Fan H Q. Analysis and simulation of quantum radar cross section [J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(3):034202.
- [75] Liu K, Xiao H T, Fan H Q. Analysis of quantum radar cross section and its influence on target detection performance [J]. IEEE, Photonics and Technology Letters, 2014, 26(11):1146 – 1149.

#### 作者简介



王宏强 男, 1970 年生于陕西凤翔. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为太赫兹技术、量子雷达、雷达目标特性.



刘康 (通信作者) 男, 1990 年生于江苏泗阳. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生. 主要从事雷达信号处理、量子雷达与雷达目标特性研究.

E-mail: liukang1117@126.com