

量子雷达及其目标探测性能综述*

肖怀铁, 刘康, 范红旗

(国防科技大学 ATR 国家重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要:量子技术与传统技术相结合以提升经典系统性能是近年来电子信息、计算机技术等众多科学领域研究热点。由于隐身和电子对抗技术的进步和日益成熟,雷达作为一类典型的电子信息系统的目标探测受到了越来越多的挑战。从雷达目标探测角度出发,介绍了量子雷达的基本概念与分类、若干实现模型,重点剖析、归纳了量子纠缠等量子效应增强雷达目标探测性能的物理机理与研究现状,指出了量子雷达研究和实现中的关键技术与研究方向。

关键词:量子雷达;雷达目标探测;量子纠缠;量子检测与估计

中图分类号:P412.25, O431.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)06-140-06

Overview of quantum radar and target detection performance

XIAO Huaitie, LIU Kang, FAN Hongqi

(National Key Laboratory of ATR, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Quantum technology have been exploited to increase the performance of classical devices in science and engineering fields, such as electronic information and computer technology. Radar, as a typical electronic information system, suffers more and more challenge in target detection, for the widespread applications of stealth and electronic countermeasure technology. The system models of target detection, and the related research advance of the combination of quantum technology and radar technique were overviewed. The basic concept, classification and typical instances of quantum radar system were introduced. The significant research progress of how quantum phenomena enhance the radar target detection performance was analyzed. Directions of future work including key technologies and main problems in the realization of quantum radar were presented.

Key words: quantum radar; radar target detection; quantum entanglement; quantum detection and estimation

雷达技术历经 70 余年的发展,其理论、体制、实现方法及技术应用等方面都已取得了很大的发展^[1-3]。然而,随着综合电子技术的发展,电子干扰、反辐射导弹、低空/超低空突防和隐身技术等对雷达的生存产生了极大的威胁^[4]。提升雷达系统探测性能,增强雷达对目标的探测、分辨与识别能力,尤其是对隐身目标的探测,已经成为国内外雷达领域科研人员的研究热点。

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,产生了量子保密通信、量子计算和量子成像等理论。其中,量子技术与雷达探测技术的结合迎来了量子雷达技术的诞生,该项技术有望提高雷达系统对目标的探测能力,在未来军事反隐身、空间探索等领域有着极大的应用前景。研究表明,相对于非纠缠的经典电磁波遥感探测系统,采用量子纠缠态电磁波探测目标的量子照射雷达^[5-6]可使雷达接收机处回波信

噪比得到显著改善,从而全面增强雷达对目标的检测性能。同时,干涉量子雷达^[7-10]采用量子计量技术,使用高度纠缠的量子态对目标参数进行测量和估计,可以达到超灵敏度,即突破标准量子极限^[11-12]达到海森堡极限^[10],极大地提高了雷达测距、测角分辨率及成像分辨率。此外,相对于传统雷达,量子雷达具有体积小、功耗低、抗干扰能力强和易于成像等优点。

目前,国内关于量子雷达相关技术的研究尚处于起步阶段,将从以下几个方面来探讨其工作机理和目标探测性能。首先,介绍量子雷达的基本概念、目标探测机理及分类;其次,针对目前提出的两种主要的量子雷达系统实现模型,对量子技术如何改善目标探测性能作重点分析;最后,指出量子雷达实现中的关键技术和亟待研究的主要难题。

* 收稿日期:2014-04-09

作者简介:肖怀铁(1966—),男,湖南浏阳人,教授,博士,博士生导师,E-mail:htxiao@126.com

1 量子雷达基本概念

1.1 量子雷达基本定义与探测机理

当前,量子雷达尚无统一的标准定义,现给出量子雷达的一个广义定义:利用电磁波量子效应对感兴趣目标进行远距离探测的远程传感器系统均可称为量子雷达。相对于传统雷达,量子雷达发射由少量数目光子组成的脉冲信号^[13-14];信号光子与目标相互作用遵循量子电动力学规则^[15-16],并用量子场论的方法来描述其散射过程;在接收机处采用光子探测器进行接收,并采用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^[17-19]。

这里需要说明,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所示为量子雷达系统组成框图,量子雷达技术的核心是对单个光子态进行调制、解调及目标信息获取。广义上来说,我们在讨论量子雷达技术时,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;狭义上来说,如果能够使量子雷达工作于传统雷达频段(3MHz~300GHz),尤其是微波频段,那么量子雷达将具有全天候、全天时的工作能力,其应用范围将更为广阔。

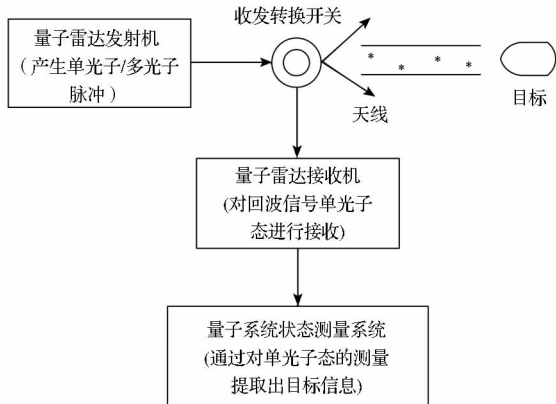


图1 量子雷达系统组成框图

Fig.1 Schematic diagram of the composition of quantum radar

1.2 量子雷达的分类

量子雷达有多种分类方法,依据所利用量子现象和光子发射机制的不同,给出两种主要的分类方法。

首先,根据所利用量子现象的不同,可以将量子雷达分为以下3个类别^[20]。

类型1:量子雷达发射非纠缠的量子态电磁波。发射机发射单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,通过对返回光子状态的测量

可以提取出目标信息。

类型2:量子雷达发射纠缠的量子态电磁波。发射机将纠缠光子对中的信号光子发射出去,“备份”光子保留在接收机中,如果目标将信号光子反射回来,那么通过对信号光子和“备份”光子的纠缠测量可以实现对目标的检测。

类型3:雷达发射经典态的电磁波。在接收机处使用量子增强检测技术以提升雷达系统的性能,目前,该技术在激光雷达技术中有着广泛的应用^[21-23]。

其次,根据光子发射机制,量子雷达系统还可以分为以下2个类别。

类型1:单光子探测,包括发射单个光子和纠缠光子,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。

类型2:相互关联的多光子探测,包括发射相干态电磁波和纠缠态电磁波,虽然会受到一定程度的干扰,但实现起来相对容易,具有更大的现实意义。

2 量子雷达目标探测性能分析

2.1 量子雷达目标探测性能分析理论基础

2.1.1 量子纠缠

量子纠缠概念产生于1935年爱因斯坦等人提出的EPR佯谬^[24],是存在于多子系统内的一种奇妙现象,即对系统中一个子系统的测量结果将决定其他子系统的状态。本质上来说,纠缠态是一种特殊的相干叠加态。

复合系统纯态的Schmidt分解一般可表示为^[25]

$$|\psi\rangle_{AB} = \sum_i \sqrt{p_i} |\psi_i\rangle_A |\psi_i\rangle_B \quad (1)$$

其中 $|\psi_i\rangle_A$ 和 $|\psi_i\rangle_B$ 分别为两个子系统密度算子,属于同一本征值 p_i 的本征矢量,且 $p_i \geq 0$, $\sum_i p_i = 1$ 。那么,当复合系统纯态分解式中非零项数为1时称为可分离态,可分离态是两个子系统的纯态的直积态;当非零 p_i 个数大于或者等于2时,即不能表示为两个子系统的直积态,此复合系统纯态就是纠缠态。

当两个系统处于量子纠缠态时,其最显著的特征是:量子系统之间存在非定域、非经典、超空间的强关联,各子系统的状态都依赖于对方而各自处于一种不确定的状态。对量子子系统测量的关联坍塌是纠缠态存在的重要标志。

2.1.2 自发参量下转换(SPDC)机理

自发参量下转换(Spontaneous Parametric

Down-conversion, SPDC) 光场^[26]固有的量子起源使其在非经典光场研究中具有重要地位和作用, 在目前提出的量子雷达主要实现模型中, 纠缠波束的产生均采用 SPDC 技术, 其产生机理如图 2 所示。

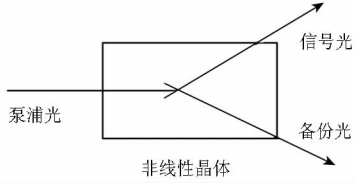


图 2 自发参量下转换产生双光子场示意图

Fig. 2 Diagram of the creation of two-photon field from spontaneous parametric down-conversion

基于非线性光学中的二阶非线性效应, 频率为 ω_p 、波矢量为 k_p 的单色光中每一个光子通过非线性晶体时都会以一定的概率自发地分裂为两个光子(频率和波矢分别为 ω_1, ω_2 和 k_1, k_2), 该过程遵循能量守恒和动量守恒, 即 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_p$, $k_1 + k_2 = k_p$ 。自发参量下转换过程中产生的两个光子在时间、空间、频率、极化、自旋等方面具有极高的相关性, 称为双光子纠缠态。

2.1.3 量子状态检测与估计

量子检测与估计理论^[18-19, 27-28]是量子力学原理和经典统计信号检测理论相融合的产物。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, 密度算符代替传统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: 在众多可能的描述中选择最合适的密度算符表征接收机处量子系统状态。在量子检测与估计理论中, 其核心问题是依据一定的判决准则确定最佳测量算符。当前, 最常用的两种判决准则为: 最佳不模糊准则和最小错误概率准则^[18-19]。

在量子系统二元假设检测中^[27-28], H_0 假设下的系统状态描述为 ρ_0 , H_1 假设下的系统状态为 ρ_1 。

令

$$\Lambda = \eta_1 \rho_1 - \eta_0 \rho_0 = \sum_{k=1}^D \lambda_k |\phi_k\rangle \langle \phi_k| \quad (2)$$

其中, η_1, η_0 分别为 ρ_1 和 ρ_0 的先验概率, $|\phi_k\rangle$ 为算符 Λ 本征值 λ_k 对应的正交本征矢量。

那么, 最小错误概率准则下的最佳测量算符可表示为

$$\Pi = \sum_{\substack{k: \\ \lambda_k \geq 0}} |\phi_k\rangle \langle \phi_k| \quad (3)$$

得到检测概率 Q_1 为

$$Q_1 = \sum_{\substack{k: \\ \lambda_k \geq 0}} \langle \phi_k | \rho_1 | \phi_k \rangle \quad (4)$$

虚警概率 Q_0 为

$$Q_0 = \sum_{\substack{k: \\ \lambda_k \geq 0}} \langle \phi_k | \rho_0 | \phi_k \rangle \quad (5)$$

2.2 量子照射雷达目标探测性能分析

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增强目标识别能力, 量子纠缠在量子雷达技术中的应用使得目标检测可以利用纠缠信息, 有望获得更多、更精确的目标信息, 本小节主要以量子照射雷达为例介绍量子纠缠给雷达探测技术带来的性能优势。

在意大利科学家 Sacchi^[29-31]对量子操作和量子信道识别研究工作的基础上, 美国麻省理工学院的 Lloyd 教授^[5]首次提出了量子远程探测系统模型——量子照射雷达。该系统发射纠缠光子对^[32-33]中的一个光子探测目标, 另一个“备份”光子保留在接收机中, 如果信号光子被目标反射回来, 做纠缠关联测量可以检测出目标信息。相对于经典电磁波, 该技术即使在大噪声和强损耗环境中, 仍然可以显著提高目标检测与成像能力。文献[5]中指出, 对于采用 m 比特纠缠的量子照射可以获得比非纠缠探测情况下高 2^m 倍的信噪比。同时, 即使噪声和损耗使得接收机处纠缠态遭到破坏, 该性能增强特性依然能够保持。

当发射一个光子探测目标时, 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。即使目标存在, 信号光子有很大可能会丢失, 从而只能检测到噪声光子。信号光子一般以较小的概率返回接收机。假设光子探测器可区分的光子模式数为 d , 一次检测事件中最多探测一个光子; 信号光子被目标反射回来的概率为 η ; 噪声中每个模式(频率或极化)平均光子数为 b 。研究表明, 纠缠光子探测系统信噪比较非纠缠探测提升了 d 倍; 低信噪比时, 确定目标存在与否所需的平均实验次数, 纠缠光子探测情况下为非纠缠探测的 $1/d$ ^[34-35]。所以, 纠缠态的使用使得噪声光子被误判为信号光子的概率降低了 d 倍, 即当信号光子与“备份”光子进行纠缠检测时, 噪声就更加难以“伪装”成信号。

文献[5]中性能分析限定单次检测事件中至多只有一个光子到达接收机, 所采用的噪声为微正则模型, 噪声处于光子数服从 Bose-Einstein 分布的高斯态。Tan 等^[6]打破这一局限, 扩展单次

检测事件中的光子数可以为任意数量,分析了全高斯态下量子照射雷达目标检测性能。文献[6]中采用连续波自发参数下采样技术(cw-SPDC)产生纠缠波束,比较了相同发射功率下传统雷达探测与量子照射雷达的探测性能。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。并且,在回波波束与“备份”波束之间纠缠遭受破坏后,性能提升仍然能够得以保持。量子照射雷达与传统雷达目标检测错误概率比较如图3所示^[6]。图中,实线和点线表示量子照射与经典探测情况下错误概率的上边界,虚线表示经典相干态探测时错误概率下边界, M 表示光子模式数, κ 为信道传输系数, N_s, N_B 分别为信号和噪声每个光子模式平均光子数。

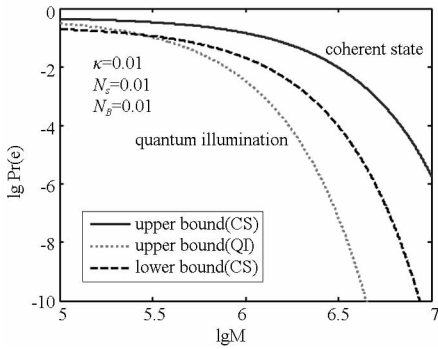


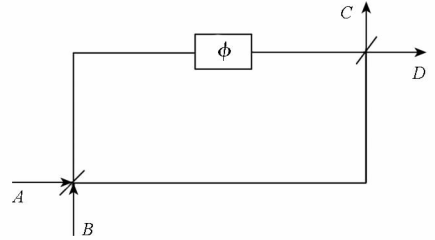
图3 量子照射雷达与传统雷达目标检测性能比较
Fig. 3 Comparison of target-detection performance of coherent-state and quantum-illumination radars

在文献[5-6]工作的基础上,美国麻省理工学院的 Shapiro 等人^[20,36]分析了多光子输入全 Hilbert 空间,允许不同光子数态(Fock 态)之间相干。在单个脉冲平均光子数相同的情况下,比较严格的单光子量子照射雷达探测性能与经典弱相干雷达探测性能,发现单光子量子照射性能等于甚至低于经典相干探测性能。此外, Lloyd 提出的量子照射雷达模型性能将随着背景噪声的增加($\kappa \ll N_B/M \ll MN_B \ll 1$)而下降,但经典相干探测性能却不受其影响。然而,单次最佳测量^[18]光子检测系统在实际实现起来非常复杂,而经典相干探测采用相同量子效率的零差式接收检测实现起来相对容易,所以在特定探测条件下,如果相干态探测能够达到量子照射雷达的性能,则采用前者是实际探测中的较佳选择。

2.3 干涉量子雷达目标探测性能分析

干涉量子雷达是在量子计量技术基础上提出的一种实现模型,借鉴于传统雷达测距原理,我

们可以用量子干涉仪来分析干涉量子雷达目标探测性能^[7-8]。首先介绍一下 Mach-Zehnder 干涉仪工作的基本原理^[37],如图4所示。两个传输路径(AC 和 BD)的相位差 $\Delta\phi$ 信息可以通过测量输出端(C 和 D)的强度(每秒钟光子数量)来提取,由海森堡不确定性原理可以得到相位差估计的统计误差为 $\Delta\phi \geq 1/\sqrt{N}$ (N 为 A 端和 B 端输入的光子数),此称为标准量子极限^[38-40](standard quantum limit)。



A/B 为输入端, C/D 为输出端

图4 Mach-Zehnder 干涉仪

Fig. 4 Mach-Zehnder interferometer

Giovannetti 等^[8-10]研究发现,采用压缩态或纠缠态(如 NOON 态)可以使得相位差估计误差突破标准量子极限而达到海森堡极限(Heisenberg limit),即 $\Delta\phi \geq 1/N$ 。由相位估计与距离估计之间的线性关系,可以得到干涉量子雷达距离估计误差近似为 $\Delta R \approx (\frac{\lambda}{2\pi}) \Delta\phi \geq \lambda/(\pi N)$, λ 为工作信号光子波长。但是,大气衰减会使相干量子雷达性能急剧下降。研究表明^[7],雷达作用距离越远,相位和距离估计误差越大;用于探测的纠缠光子数越多,估计误差越小、性能下降越快。一般大气衰减存在时,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)距离范围只有60km或者更小。美国研究人员 Smith^[7]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1000km以上(大气衰减系数为 $\chi = 0.001\text{dB/km}$)。

3 量子雷达技术研究展望

从多个角度分析了量子技术对雷达目标探测性能的改善情况,指出了量子雷达技术广阔的应用前景。但目前量子雷达技术研究仍处于理论探索阶段,尚无实际可使用的系统,下面将给出量子雷达研究与实现过程中的关键技术与待解决的主要难题。

3.1 纠缠光子态和光子脉冲的制备

目前,量子纠缠理论已经很完善,实验技术可

以制备出可见光附近波段的纠缠光子态^[41-42],如利用宏观晶体的非线性光学效应和半导体纳米结构材料。但是,如何制备出其他波段(如微波段)光子纠缠态、单光子及少量数目的光子脉冲信号等是量子雷达发射机设计中的核心问题。

近年来,来自荷兰莱顿大学的 Emary 等^[43]采用一对量子原子团的带内跃迁技术提出了微波频段极化纠缠光子产生的理论方法。微波光子极化关联通过外部磁场轨道自由度获得,而非依赖于自旋轨道耦合以及对电子相互作用的控制。2012年,东京大学的 Nakamura 和 Yamamoto^[44]采用超导回路,取得了微波频段单光子态和压缩态产生与接收技术的新突破。西班牙研究人员 Peropadre 等^[45]提出了一种基于 QED 电路的微波光子高效检测方法。

在量子雷达技术领域,量子效应将导致传统器件无法有效工作,量子雷达发射机将有着与传统雷达发射机完全不同的工作体制,从而必须研究设计符合量子电动力学规则的量子器件。因此,量子雷达发射机技术中光子脉冲信号产生的理论探索与硬件实现等方面都需要继续开展大量的研究工作。

3.2 纠缠态检测与量子系统状态估计

由量子雷达目标探测性能分析可知,纠缠态关联检测是量子雷达实现高性能探测中的关键技术。同时,纠缠态检测与量子系统状态估计技术也是量子雷达接收机研究中需要解决的主要问题,从事该问题研究的主要有波士顿大学的 Jost^[46]、美国 BBN 技术研究小组^[47-48]等。2013年,意大利研究人员 Lopaeva 等^[49]首次用实验方法实现了量子照射雷达,该实验基于光子数关联,验证了 Lloyd 提出的量子照射雷达模型探测在高噪声及损耗中的性能稳健性。今后,如何对接收机处量子系统进行纠缠测量和状态估计以提取出目标信息在理论算法研究与物理实现上仍然需要进行深入的研究。

3.3 量子雷达目标特性问题

雷达与雷达目标是紧密相关的,雷达目标特性是雷达探测获取目标信息的基础。对于量子雷达技术,不同目标及信道对发射信号光子状态的变化有何“调制”作用、如何从回波光子状态中“解调”出目标信息等目标特性问题是实现目标探测与识别必须要掌握的知识^[50]。

2010年,美国研究人员 Lanzagorta^[13-14]首次提出了量子雷达散射截面(Quantum Radar Cross

Section, QRCS)的概念,通过与传统雷达散射截面类比得出了一些有趣的结论,其工作对衡量量子雷达目标探测能力及量子雷达目标对入射光子散射分布的研究具有很大的参考价值,但更多典型目标的 QRCS 特性以及其他量子雷达目标特性问题有待进一步研究^[51]。

4 结论

量子雷达是一种基于量子物理机理的探测技术,相对于传统雷达,其目标检测性能可以得到显著改善。本文首先给出了量子雷达的概念及基本组成框图,对其目标探测机理做了简要介绍;接着重点分析了当前提出的两种主要的量子雷达实现模型,总结了量子雷达对目标探测性能的改善情况;最后指出了量子雷达技术的研究方向。在今后量子雷达技术的研究探索中,量子雷达的具体工作体制、信号波形设计、衡量目标探测性能的参数指标、工作的最佳频段以及量子雷达目标散射特性等问题都是具有重要研究意义的课题。在不久的将来,量子技术有望给雷达探测技术带来新的,甚至革命性的发展机遇。

参考文献 (References)

- [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: 1-17.
WANG Xiaomo, ZHANG Guangyi. Radar and detection[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 1-17. (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 Jianyu. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 19-27. (in Chinese)
- [4] Lynch D A. Introduction to RF stealth[M]. Herndon: SciTech Publishing, 2004.
- [5] Lloyd S. Enhanced sensitivity of photodetection via quantum illumination[J]. Science, 2008, 321(5895): 1463-1465.
- [6] Tan S H, Erkmen B I, Giovannetti V, et al. Quantum illumination with Gaussian states[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(25): 3601.
- [7] Smith J F. Quantum entangled radar theory and a correction method for the effects of the atmosphere on entanglement[C]// Proceedings of the SPIE Quantum Information and Computation VII conference, 2009: 73420A.
- [8] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum-enhanced measurements: beating the standard quantum limit [J]. Science, 2004, 306(5700): 1330-1336.
- [9] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum metrology[J]. Physical Review Letters, 2006, 96: 010401.
- [10] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Advance in quantum metrology[J]. Nature Photonics, 2011, 5(4): 222-229.
- [11] Braginsky V B, Khalili F Y. Quantum measurement[M].

- New York: Cambridge University Press, 1992.
- [12] Kok P, Lovett B W. Optical quantum information processing[M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [13] Lanzagorta M. Quantum radar[M]. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2011.
- [14] Lanzagorta M. Quantum radar cross section[C]//Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2010: 77270K.
- [15] Greiner W. Quantum electrodynamics[M]. Berlin: Springer Publishers, 2009.
- [16] Berestetskii V B, Lifshitz E M, Pitaevskii L P. Quantum electrodynamics [M]. 2nd ed. Woburn: Butterworth - Heinemann, 1982.
- [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] Helstrom C W. Quantum detection and estimation theory[M]. London: Academic Press, 1976.
- [19] Bergou J, Herzog U, Hillery M. Quantum state estimation[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [20] Harris. Quantum sensors program[R]. New York: Defense Advanced Research Projects Agency, 2009.
- [21] Shapiro J H. Quantum pulse compression laser radar[C]// Proceedings of SPIE, Noise and Fluctuations in Photonics, Quantum Optics, and Communications, 2007: 660306.
- [22] Dutton Z, Shapiro J H, Guha S. Ladar resolution improvement using receivers enhanced with squeezed-vacuum injection and phase-sensitive amplification [J]. Journal of Optical Society of America B, 2010, 27(6): A63 - A72.
- [23] 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.
- [24] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? [J]. Physics Review, 1935, 47(10): 777 - 780.
- [25] Preskill J. Quantum information and quantum computation[D]. California: California Institute of Technology, 1998.
- [26] Burnham D C, Weinberg D L. Observation of simultaneity in parametric production of pairs[J]. Physical Review Letters, 1970, 25(2): 84 - 87.
- [27] Helstrom C W. Detection theory and quantum mechanics[J]. Information and Control, 1967, 10(3): 254 - 291.
- [28] Helstrom C W. Quantum detection and estimation theory[J]. Journal of Statistical Physics, 1969, 1(2): 231 - 251.
- [29] Sacchi M F. Optimal discrimination of quantum operations[J]. Physical Review A: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2005, 71(6): 2340.
- [30] D'Ariano G M, Sacchi M F. Minimax discrimination of two Pauli channels [J]. Physical Review A: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2005, 72(5): 2302.
- [31] Sacchi M F. Entanglement can enhance the distinguishability of entanglement - breaking channels[J]. Physical Review A: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2005, 72(1): 4305.
- [32] 叶明勇, 张永生, 郭光灿. 量子纠缠和量子操作[J]. 中国科学, 2007, 37(6): 716 - 722.
Ye Mingyong, Zhang Yongsheng, Guo Guangcan. Quantum entanglement and quantum operation[J]. Science in China, 2007, 37(6): 716 - 722. (in Chinese)
- [33] Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M, et al. Quantum entanglement [J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(2): 865 - 942.
- [34] Audenaert K M R, Calsamiglia J, Bagan E, et al. Discriminating states: the quantum Chernoff bound [J]. Physical Review Letters, 2007, 98(16): 0501.
- [35] Calsamiglia J, Muñoz - Tapia R, Acín A, et al. Quantum Chernoff bound as a measure of distinguishability between density matrices: application to qubit and Gaussian states[J]. Physical Review A: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2008, 77(3): 2311.
- [36] Shapiro J H, Lloyd S. Quantum illumination versus coherent-state target detection[J]. New Journal of Physics, 2009, 11: 063045.
- [37] Scully M O, Zubairy M S. Quantum optics[M]. New York: Cambridge University Press, 1997.
- [38] Dowling J P. Correlated input - port, matter - wave interferometer: quantum - noise limits to the atom - laser gyroscope[J]. Physical Review A: Atomic, Molecular and Optical Physics, 1998, 57(6): 4736 - 4746.
- [39] Sanders B C, Milburn G J. Optimal quantum measurement for phase estimation [J]. Physical Review Letters, 1995, 75(16): 2944 - 2947.
- [40] Didomenico L D, Lee H, Kok P, et al. Quantum interferometric sensors [C]//Proceedings of SPIE, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices, 2004: 169 - 176.
- [41] Fraine A, Minaeva O, Simon D S, et al. Broadband source of polarization entangled photons[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1910 - 1912.
- [42] 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.
- [43] Emary C, Trauzettel B, Beenakker C W J. Emission of polarization - entangled microwave photons from a pair of quantum dot [J]. Physical Review Letters, 2005, 95: 127401.
- [44] Nakamura Y, Yamamoto T. Breakthroughs in photonics 2012: breakthroughs in microwave quantum photonics in superconducting circuits[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 0701406.
- [45] Peropadre B, Romero G, Johansson G, et al. Approaching perfect microwave photodetection in circuit QED[J]. Physical Review A, 2011, 84(6): 3834.
- [46] Fei H B, Jost B M, Popescu S, et al. Entanglement - induced two - photon transparency [J]. Physical Review Letters, 1997, 78(9): 1679 - 1682.
- [47] Guha S. Receiver design to harness quantum illumination advantage[C]//IEEE International Symposium on Information Theory, 2009: 963 - 967.
- [48] Guha S, Erkmen B I. Gaussian - state quantum - illumination receivers for target detection[J]. Physical Review A: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2009, 80(5): 2310.
- [49] Lopaeva E D, Berchera I R, Degiovanni I P, et al. Experimental realization of quantum illumination[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(15): 3603.
- [50] Lanzagorta M. Amplification of radar and lidar signatures using quantum sensors [C]//Proceedings of SPIE, International Society for Optics and Photonics, 2013: 87340C.
- [51] Liu K, Xiao H T, Fan H Q. Analysis and simulation of quantum radar cross section [J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(3): 4202.