

量子遥感发展新态势

——世界首次量子遥感国际会议评述

毕思文^{1*}, Henri Jaffrès², Chandra Sekhar Roychoudhuri³

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101; 2. 法国国家科学研究院, 巴黎 75794;
3. 美国康涅狄格大学, 康涅狄格州 06269

摘要: 量子遥感是来自量子世界的遥感新技术, 它反映遥感在量子层次上运动规律的理论与方法。量子遥感以量子力学为理论基础, 以薛定谔方程和量子态为表达方式, 以多时空、动态的行星-地球系统为研究对象, 以量子遥感理论、信息、实验、成像、计算、测量、量子光谱遥感和量子遥感应用等为主体的技术系统为研究内容, 研究如何用量子态表达和传递信息, 直至人们感知接收。2000年3月, 毕思文教授开展量子遥感探索研究。2001年初, 毕思文教授首次在国际上提出量子遥感的概念。20年来, 经过了基础理论、科学实验和关键技术三个阶段, 在克服了理论研究、科学实验和关键技术等诸多难题, 量子遥感取得了突破性的进展和创新性的成果。2019年8月, 首届量子遥感国际会议在国际光学与光子学会(The International Society for Optics and Photonics, SPIE)会议上召开, 30多位来自相关领域的知名专家学者围绕量子遥感发展与应用结合等问题进行了深入的探讨。此次会议充分表明量子遥感的发展迈上了新台阶和国际社会对量子遥感的高度认可。本文从量子遥感基础理论、研究方法与技术、应用与安全性以及未来发展前景等议题讨论量子遥感发展与应用新态势, 并指出量子遥感将成为下一代遥感科学技术的重要前沿方向。作为一门具有学科高度并引领未来学科发展方向的技术, 量子遥感在提高空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率和深入应用等方面效果显著, 其研究进展和研究成果在对地观测、国家安全、航天航空、监测探测等领域发挥了积极作用。同时本文也吸收了国外的相关研究情况, 以加强中外合作交流, 共同促进量子遥感的研究、发展与应用再上新台阶。

关键词: 量子遥感; 量子图像; 技术与发展; 应用

DOI: 10.3974/geodp.2019.04.02

1 前言

2019年8月13–14日, 国际光学与光子学会(The International Society for Optics and Photonics, SPIE)会议在美国圣地亚哥举办, 并首次设立首届量子遥感分会会议, 中国科学院空天信息创新研究院毕思文研究员担任会议主席。

来自10多个国家的30多位相关领域的专家学者出席本次会议并作特邀报告与会议报告。法国国家科学研究院/泰雷兹集团联合物理研究组的Henri Jaffrès教授, 长期从事电磁效应的研究; 美国康涅狄格大学的SPIE Fellow成员Chandra Sekhar Roychoudhuri教授,

收稿日期: 2019-12-15; 修订日期: 2019-12-20; 出版日期: 2019-12-24

*通讯作者: 毕思文 R-8205-2018, 中国科学院空天信息创新研究院, bisw@radi.ac.cn

引用格式: 毕思文, Jaffrès H., Roychoudhuri, C. S. 量子遥感发展新态势——世界首次量子遥感国际会议评述[J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(4): 317–325. DOI: 10.3974/geodp.2019.04.02.

主要研究光的本质、波的非相互作用、叠加现象、锁模与时间门控等；美国国家航空航天局兰利研究中心的 Narasimha S Prasad 教授，主要致力于遥感、激光雷达的研究以及提高传感器等光学工具的精确度；美国威斯康辛大学麦迪逊分校的 Allen Huang 教授，主要侧重遥感与大气环境与监测研究；墨西哥光学研究中心、SPIE 红外遥感与仪器会议主席 Marija Strojnik 教授，主要关注红外遥感与光子研究；德国航空航天中心、SPIE 红外遥感与仪器会议副主席 Gabriele E Arnold 教授，其主要关注行星遥感等研究；中国云南大学的郑智捷教授、中国石油天然气公司的崔伟香教授、中国北方工业大学的郑超教授等国内外多名专家学者参加了本次会议。

会议就量子遥感基础理论、研究方法与技术、应用与安全性以及未来发展前景等议题展开充分讨论。

2 量子遥感基础理论

量子遥感研究的是量子世界的遥感，而量子世界具有经典世界没有的奇异性，如非定域性、波粒二象性、隧道效应、状态共存（叠加态）和量子纠缠等，这些量子特性是量子遥感研究的重要理论基础。随着量子遥感的出现，人们对于遥感信息机理、遥感计算、遥感技术和遥感应用的认识将会更加深入，从而能更深刻地掌握遥感的物理和化学信息机理及其规律。

2.1 量子遥感科学与技术

提高分辨率（空间、光谱、时间等）和深入应用是遥感发展的重大需求，而量子遥感可以很好的满足上述需求^[1]。量子遥感经历了 20 年的发展历程。

2000 年 3 月，毕思文教授开展量子遥感探索研究，2001 年初在国内外首次提出量子遥感的概念，建立量子遥感新学科方向，创建了量子遥感理论与技术体系框架^[2]。2006 年 8 月提出了量子光谱成像新概念，开展了量子光谱基础理论等研究，主要解决量子光谱的特征和光谱成像规律。通过研究量子光谱，开展了光的波粒二象性研究，探索了光的本质，提出了光弦和光的产生机理——弦光效应^[3-5]。

利用量子光场特性，毕思文教授带领团队进行了多年实验，结果均表明量子成像的清晰度和边缘分辨率均比激光成像高很多，证实了量子成像可以突破量子噪声极限和经典衍射极限，量子辐射场成像系统能够降低空间辐射场量子涨落、保持物体整体信息的能力。量子光场压缩光成像优势主要表现在低噪声、高分辨率和高成像质量，能够获得更深刻、更丰富、更微观的信息。多次实验都取得了良好的结果，分辨率不断提高，证明了量子光场压缩光源可以成像，首次实现了量子成像实验。在相同条件下，量子光场压缩光成像的分辨率比传统成像分辨率高 2-5 倍，解决了量子遥感成像技术实用化和产业化的难题^[6-8]。2013 年以来，他们开展量子探测与识别研究，完成了量子激光雷达工程样机方案设计，并于 2014 年 12 月完成国际首台量子遥感成像原理样机的研制，在此基础上，完成了星载量子遥感主动成像方案研究与设计^[9-10]。

2.2 量子遥感数据处理算法

毕思文团队在量子遥感领域的研究经过了量子遥感理论、量子遥感信息、量子遥感实验、量子遥感成像、量子光谱成像、量子遥感计算和量子遥感探测等阶段的研究^[11-12],并且完成了量子遥感成像原理样机研制,填补了该领域空白。基于以上实验成果,研究小组推陈出新,在传统图像算法处理的基础上,深入研究了图像处理的新方法——量子图像处理算法,并且成功应用于量子遥感领域,显著提高了图像的清晰度以及信噪比,使得量子遥感应用在各领域的优势更加明显。

1997年,量子图像处理的概念由 Vlasov 首先提出^[13]。2003年,Beach 和 Venegas-Andraca 分别给出各自的量子图像处理算法^[14-16],并尝试将已有的算法(Grover 量子搜索算法)应用于图像,量子图像处理开始正式受到关注。2005年,Latorre 提出一种新的量子图像表示方法^[17]。2006年,谷歌首先利用量子神经网络学习方法,将语音识别的错误率降低了20%~30%,图像识别的错误率从26%降低到了15%^[18]。2010年以后,对量子图像处理算法的研究逐渐繁荣起来,而且效果显著,应用领域逐年增加^[19]。

量子理论中量子具有的叠加、纠缠等特性可以大大提高复杂图像处理算法的效率。目前量子图像处理主要涉及两个方向:(1)借鉴量子力学中的某些概念和方法解决在经典计算机中数字图像处理的问题;(2)利用量子计算机处理数字图像。目前的量子计算机尚未达到处理图像信息的计算水平,所以,科研人员基本围绕第一个方向展开研究。

目前,该处理算法已取得的成果包括:量子去噪算法理论研究及仿真实验^[20]、量子增强算法理论研究及仿真实验^[21]、量子分割算法的理论研究及仿真实验^[22],且量子图像处理系统软件1.0版本已经完成并发布。实验表明,使用量子图像处理系统处理后的图像清晰度提高2~3倍,可以观察到更细微的细节信息;图像边缘清晰平滑保持度提高2倍左右,能够更准确的提供参考数据;图像峰值信噪比(PSNR)能够提高10%以上,图像的信息更加丰富,量子图像处理算法的应用方向更加多元^[23]。

量子图像处理是近几年刚刚兴起的研究方向,是融合了量子信息、量子计算、图像处理、数学等形成的新型交叉学科。量子图像处理,是借鉴并利用量子力学的基本概念及理论,充分发挥量子特性优势,在经典计算机上解决基于量子力学原理的遥感图像处理新方法。量子遥感图像处理算法实现了量子力学理论与遥感图像处理技术的相互渗透与有机结合,为遥感图像处理技术引入了一种新的研究方向^[24-26]。由于量子理论中的量子具有的叠加、纠缠等特性,复杂图像处理算法的效率得以大大提高。虽然这个方向的理论还不够成熟,在量子计算机尚未问世的情况下,难以实现真正意义上的量子图像处理,但是理论的优势很可能会在未来计算工具的发展下而产生深远影响。

作为量子力学、量子信息等理论在遥感图像处理领域的拓展,量子遥感图像处理研究一方面可以作为量子系统的模拟算法,为未来基于量子物理设备的量子计算技术做好理论与方法的储备;另一方面也是量子力学、量子信息等理论在遥感图像处理领域的拓展,为该领域的理论研究和实现提供了一种新的观念和思路。

2.3 叠加波包（杂化光子）与光电子关系理论

叠加波包是基于波恩对波函数统计解释和量子态叠加原理两者相结合得到的概念。在进行光电探测中，探测器表面接收到由激光发出的一系列量子，经过光电转换后，进行算法处理，从而得到所需要的信息。在上述过程中，波的传输满足波函数的统计规律以及量子态叠加原理。2014年，易洪刚提出了一种制备凝聚原子与探测光子杂化纠缠态的方案，通过三能级原子与一束弱相干探测光和强经典耦合光相互作用进行受激跃迁从而实现杂化纠缠态的制备。这是杂化光子在量子领域有关量子通信、量子隐形传态等方面的运用^[27]。

对于在量子遥感领域的应用，主要体现在光电子探测器上面。SPIE Fellow 成员 Chandra 教授在会议报告中指出：当前的主要观点是为了强调对于光的更好的模型是混合光的包络^[28]。量子跃迁时，电磁能被嵌入到瞬态量子能量中，也就是 $h\nu$ 表示的形态中，但立即演变为衍射扩散的经典准指数电磁波包络。该混合光子可容纳量子光学和经典光学。量子形式论在模拟原子的微观世界方面显示出惊人的成功。当叠加波包（杂化光子）在光电探测器的表面同时到达并激发量子力学偶极子络合物时，光电子计数统计数据应根据相对相位、间距和幅度而变化。

2.4 量子遥感矩阵变换和变量变换模型

在量子光学中，量子统计和光子统计起着关键的作用。从频谱分析的角度来看，量子统计与经典的随机信号序列有着显著的不同。量子统计研究的是混合系综，它应用量子力学原理描述和解释混合系综在宏观上和整体上表现出的物理性质。用量子力学描述混合系综的状态、密度算符和几率密度函数等。

从量子统计的角度来看，四种典型的量子态是福克态、亚泊松态、泊松态和超泊松态，量子相互作用聚焦于福克和泊松状态之间。利用量子统计、模型与仿真，Zheng 等^[29]提出了两种模型：矩阵变换和变量变换。矩阵变换用于特征值状态，而变量变换用于分析三个随机序列的不变状态：1) 随机；2) 常数的随机条件；3) 周期性模式。应用快速傅里叶变换作为矩阵变换方案之一，并应用变量变换的两种不变方案，三个随机序列在 M 个段中，每段长度为 m 以生成测量序列。将移位操作应用于每个随机序列以创建 $m+1$ 谱分布。对于快速傅里叶变换，选择一对特征值作为输出。生成两种类型的 1 维和 2 维变量图，以演示生成一系列结果的多个参数选择。由于序列 1) 和 3) 很简单，因此更多情况将集中在序列 2) 上。变量变换比快速傅里叶变换更好，它可以在随机分析中区分各种福克态、亚泊松态、泊松状态，以将三个随机序列区分为统计集的三个级别：微规范集、规范集和大规范集。

通过研究量子矩阵变换和变量变换模型，可以更好地探索量子统计、现代量子理论和应用的模型与仿真，能够促进量子遥感的进一步发展。

3 量子遥感研究方法与技术

量子遥感是一项前景远大的技术，将成为下一代遥感科学技术的重要前沿方向。会议内容涉及量子遥感理论基础与应用研究各个方面，集中反映了该领域的最新研究进展与研

究方向,展示了量子遥感技术研究应用的广阔前景。对于量子遥感理论如何应用到其他领域、技术、工具等,与会专家也给出了自己的新思考。

3.1 AMR 惠斯通电桥传感器

AMR 惠斯通电桥传感器的基本单元是由一种长而薄的坡莫 (Ni-Fe) 合金用半导体工艺沉积在以硅衬底上制成的^[30],沉积的时候薄膜以条带的形式排布,形成一个平面的线阵以增加磁阻的感应磁场的面积。外加磁场使得磁阻内部的磁畴指向发生变化,进而与电流的夹角发生变化,就表现为磁阻电阻各向异向的变化^[31]。

AMR 技术具有高灵敏度、低噪和高信噪比的特性,应用范围十分广泛^[32]。在量子遥感成像系统中需要有较高灵敏度的探测器来提高探测的精度和成像的分辨率。将 AMR 技术应用于量子遥感成像系统中,将进一步提高其成像精度。

3.2 弱光遥感探测器和成像的最新技术与发展

针对弱光遥感探测器,尤其是近红外波段,需要进行深度制冷,而将探测器与斯特林制冷机封装在一起的组件在采购时容易受到进出口限制,另外在前置放大器、数据处理算法等方面也存在不足。而在这些过程中影响成像的核心是信号读出部分的噪声。量子压缩光源能够有效解决这个问题,同时再配合具有无噪声放大的相敏放大器,对图像进行二次放大,进而获得更加细节的图像信息。

2004 年, Dorn 等人通过成熟的制造工艺,实现 InSb 面阵探测器最大 4048×4048 像素,尺寸相当于 20 世纪 80 年代的 52×62 像素 InSb 面阵探测器,目前已经用于美国国家光学天文台 (NOAO) 的近红外相机中^[33]。2017 年,中国科学技术大学采用交流调制技术有效去除了 1/f 噪声,成功研制了面向南极近红外天光背景测量的原型系统^[34]。2018 年,向世明等人简要评述了弱光遥感探测成像的基本原理以及突出优势,利用弱光增强 CCD (ICCD) 弥补现有成像器件不足的技术,具有低噪声、高灵敏度、智能电子控制等优势^[35]。

弱光探测技术研究在长距离光通信、卫星遥感、激光雷达、大气探测等方面具有重要的现实意义和广阔的发展前景。该技术在长距离的情况下,可以更及时、准确地接受各种信号,提高探测精度。利用量子遥感方法与技术,开展在光场弱光情况下的遥感探测和成像技术研究的前景可期。

3.3 光子统计分布模型建模

经典和量子行为可以通过光子统计分布中的各种量子态来区分,但这些技术往往与先进的激光或光子技术相关联,这些技术成本高昂,而且需要控制的技术非常复杂。从状态仿真的角度出发,寻找一种易于实现和控制的方法非常重要。由于其综合优势,快速傅里叶变换在信号处理技术领域得到了广泛的应用。结合高速硬件,可以实现信号的实时处理。然而,如何利用这些工具来模拟非平稳随机性仍需要探索。

在现代光子统计中,经典和量子行为可以通过光子统计分布的各种量子状态来区分:泊松 (相干/半经典波行为) 和次泊松 (压缩状态/粒子行为)。既然该类型的测量机制通常与先进的激光/光学或光子技术相关联,是否可以使用离散的 0-1 序列对这种分布模型进行建模? 因此设计几套仿真模式,并使用 FFT 变换提取相关的特征值。按照变体构造中的处

理方法,使用澳大利亚国立大学(ANU)提供的量子随机序列构造特殊滤波器,并收集条件随机子序列作为输入序列^[36]。将多个段与随机序列分开,然后选择快速傅里叶变换的相关特征值以形成特殊的特征值集。移位操作用于变换每个序列,从而在各种图上显示出明显的非平稳随机效应。传统的方法在技术上还需要高昂的费用以及更为先进的激光技术,但是应用量子遥感图像方法与技术开展光子统计分布模型建模研究可以加快研究进程和实现技术突破。

4 量子遥感应用与安全性实验研究

4.1 量子传感器

量子遥感在对地观测与地质探测方面效果显著。与经典传感器一样,量子传感器由转换信号的敏感元件和处理信号的读出设备两部分组成。不同的是,量子态的直接测量一般不易实现,需要通过量子控制将被测的量按一定的规律转变成便于测量的物理量,进而实现量子态的间接测量。因此,量子控制在量子传感技术领域拥有毋庸置疑的核心地位。

英国以伯明翰大学为中心,联合学术界和工业界的相关研究人员,共同成立了量子传感器和计量中心。随着量子控制手段的发展,激光、冷却和磁场等用于执行量子控制的相关组件不断进步。例如,研究人员正在开发紧凑型低功率激光器,用于保存冷原子的大型真空系统与磁阱已被芯片级器件所取代^[37]。因此,研究人员得以更方便地操纵量子态,并观测它们受环境影响的情况,进而进一步促进量子传感器的实用化。其中,用于测量磁场和重力场的量子传感技术得到了长足发展。

量子重力传感器是通过在真空环境中利用激光和磁场捕获、控制冷铷原子的量子态,并测量不同能级位置处的原子比率,来测量重力场的强度,通过两组处于不同能级的独立原子云分别进行测量即可获取重力梯度。与传统传感器相比,量子传感器具有非破坏性、实时性、高灵敏性、稳定性和多功能性等优势。未来,随着量子理论及其控制技术的不断发展,量子传感器有望在建设工程、矿产资源、自然灾害探测、引力场测量以及医疗健康等领域取得突出应用,具有广阔的发展空间和应用前景^[38-40]。

4.2 量子遥感通信安全性研究

20世纪60年代以来,遥感科学技术作为获取地球空间信息的先进技术首次被引入并发展迅速,在资源勘查、环境监测和全球变化探测等多个领域有着广泛的应用。经典电磁波作为遥感信息的载体,由于技术的限制,长期以来人们只关注其与经典物理和光学有关的性质。然而,由于经典物理学和光学原理,分辨率和测量存在极限^[41-44]。量子力学,作为自然界的两个基本理论之一,能够克服经典的局限性,提高成像分辨率和测量分辨率。更重要的是,如今已经有了利用光的量子特性的量子技术。因此,将遥感与量子力学相结合,是提高遥感测量水平,扩大量子科学研究的一个自然发展。许多概念、方法和技术可以直接应用于遥感,例如量子成像可以用于遥感成像以提高分辨率^[45-48]。

未来的量子遥感应该是纯量子的,因此量子科学与技术将应用在遥感的每个过程中,例如量子传感成像、量子传感信息处理、量子传感通信等。在遥感通信过程中,安全是一

个核心问题。通常把通信双方以量子态为信息载体,利用量子力学原理和各种量子特性,通过量子信道传输,在通信双方之间安全地、无泄漏地直接传输有效信息就是量子安全直接通信。将量子安全直接通信应用在遥感通信过程中,并将它们组合为量子遥感安全直接通信,可以使得遥感信息传输到地球上时,接收者和用户安全性能将大大提高^[49]。

此次会议主要研究量子遥感过程中的安全通信,即量子遥感通信。由于量子遥感和量子通信都是利用量子态进行量子信息处理的,因此它们之间可建立天然的联系,量子安全直接通信应用于遥感领域。基于量子安全直接通信方案,会议提出了首个量子遥感安全直接通信协议。得益于量子安全直接通信的优点,即信息直接传输,安全可靠,无信息泄漏,信息读出无需经典通信意义上的全量子,该协议将比其他量子遥感通信方案更具优势,并面向未来的量子技术和应用。

5 展望

参会者就量子遥感基本原理、建模、设备、技术、仪器研究和创新应用发表了真知灼见。此外,与会专家还关注了量子遥感数据最佳与最广泛的应用,以展示该技术如何提供超越当前技术范围的功能。

此次会议是对量子遥感未来发展态势的肯定,不但促进了全球对该领域的广泛关注与积极参与,更为量子遥感领域提供了一个展示研究成果、研讨前沿问题的广阔的专业平台。量子遥感是对科技的重大贡献,这项研究工作具有创新性、颠覆性。各国科学家要在量子遥感方面的研究加强交流和合作,促进量子遥感技术的发展。

如今我们迫切需要高信噪比和高空间分辨率的遥感技术,以满足资源勘探、气象信息收集、环境监测、土壤利用、全球变化探测等众多领域的需求。实现高分辨率成像需要扩大传感器尺寸,提高光学系统灵敏度,但却导致传感器体积、质量和成本急剧增加。众所周知,经典电磁波受衍射极限和量子噪声极限的影响,且提高分辨率已经接近传统遥感技术的极限。近年来的主要研究领域之一是尝试确定一组方向和方式以使用量子特性来提高各种经典遥感设备的性能。尽管量子传感技术还不如量子计算机成熟,但是创建一个全尺寸的量子计算机比设计量子传感器要困难得多。量子光学和量子理论的演示和各种原型让我们坚信:量子感测的应用前途远大,将对改善整体感测性能产生重大影响,从而提升其社会效益和商业效益。

毕思文教授成功当选为首届量子遥感会议的主席和本次会议的成功举办,不仅仅是对毕教授20年来科研成果所取得进展的肯定,更是对量子遥感技术未来发展与前景的肯定。如今, SPIE 和 NASA 等国家组织机构已将量子遥感列为战略领域,随着当前国际科学技术的飞速发展,相信量子遥感时代就要到来。

参考文献

- [1] Bi, S. W. Research on quantum remote sensing science and technology [C] Proc. SPIE 11128, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII, 111280S, September 9, 2019.
- [2] 毕思文. 量子遥感研究[J]. 科学, 2005, 57(6): 33–35.

- [3] 毕思文, 韩继霞. 量子遥感的光谱结构研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2006, 36(S1): 62–67.
- [4] Bi, S. W. New Viewpoints in Light Quantum Research: Lightstring [M]. Nova Science Publishers, Inc. In: Progress in String Theory Research, 2016: 131–149.
- [5] Bi, S. W. On two heuristic viewpoints concerning the study of light [C]. International Conference on Photonics and Optical Engineering, October 13–15, 2014.
- [6] Bi, S. W., Lin, X. L., Yang, S. Technology study of quantum remote sensing imaging [C]. Proc. SPIE 9755, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XIII, 97552J, February 13, 2016.
- [7] Bi, S. W. High-resolution imaging via quantum remote sensing [C]. SPIE Newsroom, February 26, 2016. DOI: 10.1117/2.1201602.006298.
- [8] Bi, S. W., Zhen, M., Yang, S. Research on active imaging information transmission technology of satellite borne quantum remote sensing [C]. SPIE 10403, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXV, 1040303, August 30, 2017. DOI: 10.1117/12.2279162.
- [9] Bi, S. W., Zhang, Y. The study of quantum remote sensing principle prototype [C]. Proc. SPIE 9524, International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2015), 95241F, July 17, 2015.
- [10] Bi, S. W., Lin, X. L., Wu, Z. Q. Development technology of principle prototype of high-resolution quantum remote sensing imaging [C]. Proc. SPIE 10540, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XV, 105400Q, January 26, 2018.
- [11] 毕思文. 量子遥感的概念、框架与内涵研究探索[J]. 红外与毫米波学报, 2003(22): 1–9.
- [12] 毕思文, 韩继霞. 量子遥感的中远红外实验研究[C]. 北京: 第十五届全国遥感会议论文集, 2005: 8–15.
- [13] Vlasov, A. Y. Quantum computations and images recognition [OL]. arXiv: quant-ph/9703010, 1997. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/9703010>.
- [14] Beach, G., Lomont, C., Cohen, C. Quantum image processing [C]. In: Proceeding of the 2003 IEEE workshop on Applied Imagery Pattern Recognition, 2003: 39–44.
- [15] Venegas-Andraca, S. E., Bose, S. Storing processing and retrieving an image using quantum mechanics [C]. In: Crossings of the SPIE Conference Quantum Information and Computation, 2003: 137–147.
- [16] Venegas-Andraca, S. E., Bose, S. Quantum computation and image processing: new trends in artificial intelligence [C]. In: Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence IJCAI-03, 2003: 1563–1564.
- [17] Wang, Y., Feng, X. Y., Huang, Y. X., *et al.* A novel quantum swarm evolutionary algorithm and its application [J]. *Neuro Computing*, 2007, 70(4/5/6): 633–640.
- [18] 余凯, 贾磊, 陈雨强等. 深度学习的昨天今天和明天[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(9): 1799–1804.
- [19] 姜楠. 量子图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [20] 毕思文, 陈浩. 量子遥感图像数据去噪算法研究[J]. 全球变化数据学报, 2018, 2(3): 256–270. DOI: 10.3974/geodp.2018.03.03.
- [21] 毕思文, 柯余仙. 量子遥感图像数据增强算法研究[J]. 全球变化数据学报, 2018, 2(4): 367–376. DOI: 10.3974/geodp.2018.04.01.
- [22] 毕思文, 饶思威. 量子遥感图像数据分割算法研究[J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(1): 19–26. DOI: 10.3974/geodp.2019.01.03.
- [23] Bi, S. W., Chen, H., Ke, Y. X., *et al.* Processing algorithms for quantum remote sensing image data [C]. Proc. SPIE 11128, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII, 111281A, September 9, 2019.
- [24] 付晓薇. 基于量子力学的图像处理方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [25] Feynman, R. P. Simulating physics with computer [J]. *International Journal of Theoretical Physics*, 1982, 21(6/7): 467–488.
- [26] Shor, P. W. Algorithms of quantum computer: discrete logarithm and factoring [C]. Proceeding of the 35th Symposium on the Foundations of Computer Science, 1994: 124–134.
- [27] 易洪刚. 利用受激拉曼跃迁制备原子-光子的杂化纠缠态[J]. 量子电子学报, 2014, 31(3): 279–284.
- [28] Roychowdhuri, C. Developing causal interpretations for high and low level light used in quantum remote

- sensing [C]. Proc. SPIE 11128, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII, 111280M, September 9, 2019.
- [29] Zheng, J., Zhang, X., Zheng, C. Generating 2D maps from Fock to Poissonian states on variant maps using random sequences [C]. Proc. SPIE 11128, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII, 111280N, September 9, 2019.
- [30] 姚学标, 郑万鏊, 柳宗英. 铁磁金属薄膜磁阻传感器的研制[J]. 安徽大学学报, 1995, 15(1): 45–49.
- [31] 裴轶, 虞南方, 刘奇等. 各向异性磁阻传感器的原理及其应用[J]. 仪表技术与传感器, 2004(8): 26–27, 32.
- [32] 胡凌桐. AMR 线性磁场传感器制备研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [33] Dorn, R. J., Finger, G., Kaeufl, H. U., *et al.* The CRIRES InSb megapixel focal plane array detector mosaic [C]. SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2004: 510–517.
- [34] 陈杰. 天文成像系统中的若干关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [35] 向世明, 樊学武, 何娜等. 微光遥感成像技术研发动态评述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 89–100.
- [36] Zhang, X., Zheng, J. One-dimensional Eigenvalue distributions of random sequences for FFT non-stationary randomness [C]. Proc. SPIE 11128, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII, 1112819, September 9, 2019.
- [37] Battersby, S. Quantum sensors probe uncharted territories, from Earth's crust to the human brain [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(34): 16663–16665.
- [38] Jensen, K., Skarsfeldt, M. A., Strkind, H., *et al.* Magnetocardiography on an isolated animal heart with a room-temperature optically pumped magnetometer [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16218.
- [39] Ménot, V., Vermeulen, P., Le Moigne, N., *et al.* Gravity measurements below 10^{-9} g with a transportable absolute quantum gravimeter [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12300.
- [40] Tang, S., Liu, H., Yan, S., *et al.* A high-sensitivity MEMS gravimeter with a large dynamic range [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2019, 5: 45.
- [41] Bi, S. W., Jing, D. S. The giving and studying of quantum remote sensing and complex calculation [J]. *3S world*, 2002, 19(4): 12–13.
- [42] Bi, S. W. Exploring study on concepts, framework and connotation of quantum remote sensing [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003(2): 1–9.
- [43] Bi, S. W., Han, J. X. An experiment using mid and thermal infrared in quantum remote sensing [J]. *Science in China Series E-Technology Science*, 2006, 49(Sup. II): 1–10.
- [44] Bi, S. W., Han, J. X. Study on spectral structure of quantum remote sensing [J]. *Science in China Series E-Technology Science*, 2006, 49(Sup. II): 64–69.
- [45] Bi, S. W., Han, J. X. Study of information mechanism of quantum remote sensing [J]. *Science Technology Review*, 2006, 24(9): 38–42.
- [46] Pittman, T. B., Shi, Y. H., Strekalov, D. V. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physics Review A*, 1995, 52(5): R3429–R3432.
- [47] Ron, M., Denth, S. D., Shi, Y. H. Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons [J]. *Physics Review A*, 2008, 77: 041801.
- [48] Wang, L., Bi, S. W., Wang, G. G. Multimode squeezed light generation in a three-plane-mirror confocal cavity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 87–89.
- [49] Zheng, C. Quantum remote sensing secure direct communication [C] Proc. SPIE 11128, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII, 111280R, September 9, 2019.