

微波量子探测技术空间应用研究*

岳鹏毅¹, 赵依拉娜², 郭北斗²

(1. 中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室, 北京 100094; 2. 内蒙古大学物理科学与技术学院, 呼和浩特 010021)

摘要:近年来,利用超导量子回路、原子或类原子体系等平台,已可实现对单个或多个微波量子的制备、操控与探测,为突破经典极弱微波信号探测技术的瓶颈提供了新途径。实现极弱微波信号的探测在无线通信、卫星遥感以及空间安全等方面具有重要的意义。文章从物理原理与工程实用化两个层面,系统分析不同体系在实现微波量子探测过程中所面临的关键技术挑战,展望其未来发展趋势与应用潜力,并探讨若干潜在的空间应用场景。

关键词:微波量子; 超导; 里德堡原子; 量子精密测量; 空间应用

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A

近年来,量子信息技术的发展与应用呈现加速趋势,受到各国普遍关注和重视,我国对于量子信息技术产业发展的重视程度也进一步提高。从技术领域划分,量子信息主要包括量子计算、量子通信和量子测量,其在研究发展水平、技术实用化程度、产品工程化能力和产业化应用前景等方面的发展情况各有差异。从电磁波频段来看,微波和光波是当前信息处理和通信系统中应用最广泛的信号载体,它们在量子信息技术中起着关键作用。当前,光波频段的量子探测技术发展较为迅速且日渐成熟,已经被广泛应用于深空激光通信、空间探测和量子雷达等领域^[1-5]。然而,光波频段容易受到云雾、雾霾、暴雨和大雪等天气条件,以及山脉、树木和建筑物等环境因素的影响,不能全天候使用。未来量子探测技术发展到了微波频段,将对传统通信、遥感和雷达等领域产生颠覆性影响。

在微波频段,微波量子能量较光量子低4~5个数量级,传统非相干探测器(如雪崩二极管、超导纳米线、测辐射热计等)的灵敏度不足以用来探测单微波量子。传统的单微波量子制备和探测手段往往需要极端的实验条件,因此,微波量子探测的发展仍然面临着很大的挑战。近年来,微波量子探测取得了较大的突破^[6-8],有望短期内在低功率通信、微弱信号的接收与识别、基于星载接收平台的海上移动目标和空中目标的探测等场景中得到应用。但是,目前对于不同技术体系的发展趋势及实用化前景仍然不明朗,亟须识别不同体系微波量子探测技术的实用化潜力,系统梳理其在工程应用转化过程中面临的关键技术问题,开展其在解决某些空间应用的迫切需求中的可行性论证。本文围绕微波量子探测技术的空间应用,从技术可行性、工程可实现性及空间适用性3个核心问题展开讨论,为未来空间应用研究提供思路。

* 收稿日期:2025-12-02; 修回日期:2026-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(22463009);北京市自然科学基金项目(4242063);中国航天科技集团钱学森青年创新基金项目

作者简介:岳鹏毅(1989—),男,北京人,工程师,博士。主要从事量子光源制备、量子精密测量和航天器体系仿真等研究。E-mail:pyyue166@163.com

通信作者:郭北斗(1985—),男,北京人,教授,博士。主要从事低维材料与器件、量子精密测量研究。E-mail:beidouguo@imu.edu.cn

1 主要技术体系及发展趋势

微波量子探测的研究工作分为对单微波量子 and 微波场的探测两个方面。前者指的是对单个微波量子或纠缠微波量子对的探测,其中单微波量子探测器是核心部件。后者指的是对微波场的探测。微波量子探测技术主要包括基于约瑟夫森结的超导量子回路、原子作为媒介实现微波场或单微波量子的里德堡原子探测以及上转换实现微波-光波转换 3 种方案。表 1 总结了近年来微波量子探测技术的研究进展情况,可以看出除里德堡原子及磁光耦合体系能在室温下实现对微波量子信号的探测外,其余技术体系均需极端的低温条件下才能实现,实用化面临很大的技术挑战。

表 1 微波量子探测技术研究情况
Table 1 Researches on microwave quantum detection technology

技术体系	技术指标	工作温度	实验波段/GHz	研究单位
超导体系	量子效率 84% ^[9]	50 mK	10. 6	东京大学(2018)、巴黎高等师范学院
里德堡原子	最小可测电场强度 400 pV/cm ^[10]	室温	7	NIST、山西大学(2020)
电光耦合体系	转换效率 2. 05±0. 04% ^[11]	2 K	8	Yale University (2018)、中国科学技术大学
光机械耦合体系	转换效率 47% ^[12]	35 mK	6	University of Colorado、NIST (2018)、中国科学技术大学
原子或类原子体系	转换效率 5% ^[13]	70 μK	84. 18	National University of Singapore (2019)、华南师范大学
磁光耦合体系	转换效率 10 ⁻¹⁰ 、10 ⁻¹² ^[14-15]	室温	10	The University of Tokyo(2016)、中国科学技术大学(2020)

1.1 超导体系

超导体系微波量子探测的核心结构是一种含有一个或多个超导约瑟夫森结的超导电路,如图 1(a)和(b)所示,它包含左右两个超导电极及中间的薄绝缘层,这种电路通常采用铝和铌等超导材料制备而成。如图 1(c)所示,超导约瑟夫森结在超导电路里的作用相当于一个结电感和结电容构成的非线性共振器,其非线性特性源于库珀对的隧穿效应^[16-18]。这种非线性特性使得约瑟夫森结的能级间距不同,如图 1(d)所示,若电磁参量(如偏置电流、外加磁场)选择得当,可使约瑟夫森结简化为一个有效的分立能级系统,且能级间隔处于微波频段(通常 1~10 GHz)。通过精确调控这些参数,可以实现能级间隔与特定微波光子的共振匹配,从而通过共振吸收微波量子实现对微弱信号的探测^[19]。

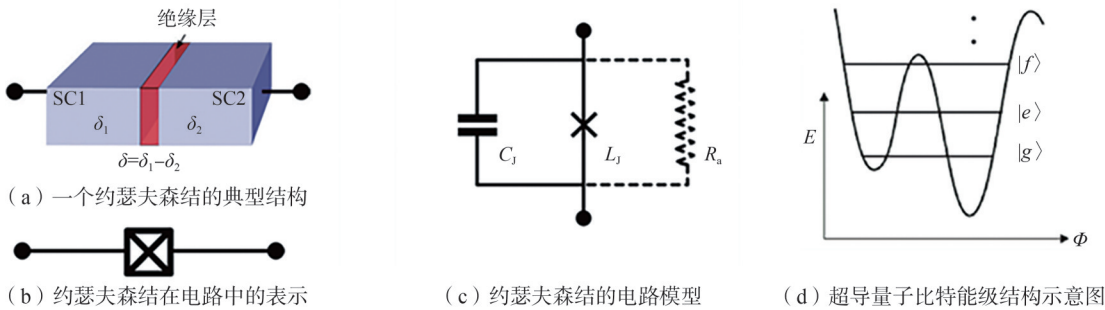


图 1 约瑟夫森结基本结构^[17]

Fig. 1 Basic structures of Josephson junction^[17]

从原理层面上讲,只有分立的能级间隔与待测的微波频率相同,能级结构清晰可辨,才能实现共振接收,所以只有在毫开尔文量级的低温环境中才能有效抑制热涨落对量子态相干性的破坏,实现对能级的调控。因此,目前的实验结果都是在极低的温度下实现的,且超导量子回路的制备也面临

着诸多技术挑战,包括超导薄膜的外延生长、约瑟夫森结的纳米级加工和电路图形的精确刻蚀等微纳加工难题。超导量子探测技术的实用化进程依赖于材料、加工与低温系统的协同创新。在材料领域,高临界温度超导材料及稳定约瑟夫森结工艺的突破正显著提升器件性能;在微纳加工层面,电子束光刻与反应离子刻蚀等技术的成熟为芯片精密制造提供支撑;低温系统则通过新型制冷方案和紧凑腔体设计降低实验复杂度。以上这些基础支撑超导量子芯片的关键工艺,包括抑制杂散约瑟夫森结的高良率空气桥结构、实现多比特控制的倒装焊互连及三维集成的硅通孔封装等,共同推动芯片集成度突破百比特量级。未来研究将聚焦材料生长工艺优化与成本控制、微纳加工流程标准化与良率提升、低温系统集成化与可靠性增强,以及探测系统与读出电路的兼容性设计等工程化方向。此类技术的深度融合将加速超导微波量子探测从实验室走向空间应用、高灵敏度传感等实际场景,为构建可扩展的量子信息系统奠定基础^[20]。

1.2 里德堡原子

里德堡原子是指主量子数远大于1的原子,其最外层束缚电子离原子核很远。第一,里德堡原子具有巨大的电偶极矩,因此对外电场响应灵敏;第二,随着里德堡原子主量子数的变化,邻近里德堡态的能级跃迁频率可覆盖MHz~THz的超宽频率范围;第三,相较于基态原子和低激发态原子,里德堡原子具有更长的辐射寿命,可获得更长的相干测量积分时间,有利于获得更高的相干测量灵敏度^[21]。原子系统因其参数本身的绝对性、稳定性,是实现精密测量的理想载体,尤其是为信息安全和超灵敏探测提供了一种全新的物理机制。美国、日本和欧洲各国已经意识到其在军事和民用领域的应用价值,正在不断加大投入,推进基于原子体系的量子理论研究成果向实用技术转化^[22-27]。

基于里德堡原子测量微波电场是量子精密测量领域的一个重要方向。通过特定量子态的原子作为传感单元,利用量子干涉光谱实现环境电磁场或者有源电磁场的高灵敏度识别,为微波电场的测量提供新原理、新方法和新技术,可将微波电场溯源到标准物理量,提升现有微波场强的校准能力。使用激光在室温原子气室中制备里德堡原子,基于光与原子的量子干涉效应使微波电场与原子参数联系到一起,实现微波电场的量子精密测量。该技术具有自校准的特点,已经实现了远超传统微波天线的测量精度,是下一代电场测量标准^[28]。原子与电磁波作用时产生量子相干效应,使弱探测光在原子共振处的吸收减小甚至变为完全透明的现象就是电磁感应透明(EIT)效应。基于里德堡原子的电场计采用四能级系统,探测光和耦合光相向传播,在没有微波场作用时,是一个标准的阶梯型能级EIT的透射峰;当增加一束与邻近里德堡原子能级共振的微波场时,该透射峰出现分裂,这种分裂现象在量子光学中被称为Autler-Townes(AT)分裂。其物理机理可阐述为:当一束较强的微波场与两个里德堡能级共振耦合时,会在该能级系统中引发动态斯塔克效应,导致原能级劈裂为两个新的量子态,即“缀饰态”。此劈裂的能量间距,在光谱上表现为透射峰的分裂间隔,AT分裂的大小直接反映了施加的微波电场强度(图2)^[29]。利用里德堡EIT探测微波耦合相邻里德堡能级产生的AT分裂,形成EIT-AT光谱,利用其光谱特征可实现微波场的实时监测,进而提出提高微波场空间分辨率的测量方法。

利用里德堡原子进行微波探测,通常是利用原子能级差处在微波频段的特征,且微波跃迁的电偶极矩与主量子数 n 的平方成正比,所以微弱的微波电场也能产生较高的耦合强度,通过量子干涉相消效应,将微波场或微波量子的检测转换为频率或光波信号进行探测。里德堡原子微波量子测量技术可用于测量频率1~1000 GHz的微波电场,可在大的范围内实现高于传统偶极天线的探测灵敏度和信噪比。基于里德堡原子的微波电场量子传感已经在精度、灵敏度、宽带可调谐性和亚波长分辨率的空间电场特征刻画等方面显示出巨大的潜力,而且能够在室温下直接探测微波场,由于使用的探头是玻璃泡原子气体,其对待测电场产生的干扰较小,且易于实现微型化和集成化,很适合在空间飞行器和机动性很强的战车上搭载。这种原子电场计可溯源到基本物理量——普朗克常数,测量也不需要额外校准,防止了随机误差的引入,能够实现较高的测量准确度,具有较强的技术实用化及工程应用转换能力^[30]。在某些防御系统和太空通信等场景下,原子天线全光学的结构保护其免遭电子器

件的损坏,从而有效地抵御电磁脉冲的攻击。在里德堡原子微波测量的研究中,国外研究起步稍早,已经形成大学、军方、公司多方共同参与的研究生态,国内的工程应用研究近一两年开始起步,目前呈现出迅速增长态势,已经成为雷达、通信相关工程单位的关注焦点,有望在短期内实现工程化应用。

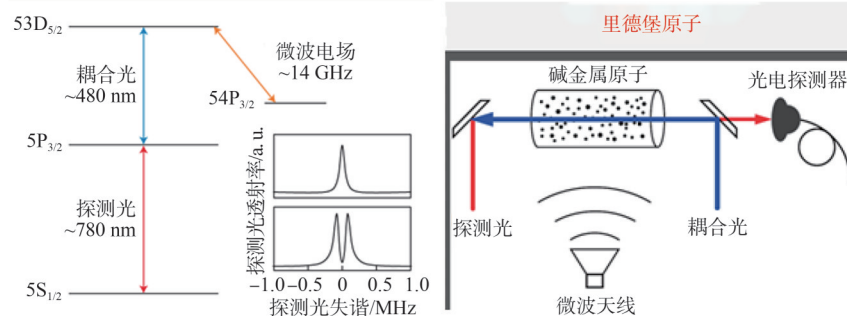


图2 使用EIT效应测量微波电场的能级示意图和实验装置图^[29]

Fig. 2 Level diagram and experimental set-up using EIT effect to measure the microwave electric field^[29]

1.3 微波-光波转换体系

针对单微波量子级别的探测,目前主要采用微波-光波转换方案,其基本原理是基于非线性光学效应进行频率上转换,将能量极低的微波光子转换为能量较高的光波光子。由于微波光子难以直接探测,而光波频段的单光子探测技术已较为成熟,通过探测转换后的光波信号即可反演微波量子信息。因此,微波-光波转换是实现微波单量子高效探测的关键途径。这种方案常用到法布里-珀罗谐振腔和回音壁模式等高品质因子的微腔来增强非线性效应强度。常用的转换体系包括电光耦合体系、光机械耦合体系、原子或类原子体系以及磁光耦合体系等。

电光耦合体系是利用晶体中的二阶非线性效应实现微波到光波的频率转化。具体而言,微波光子与泵浦光子在非线性介质中相互作用,产生和频或差频信号,从而实现微波到光波的转换。该方案的优势在于转换速度快、带宽较宽,但受限于非线性晶体的耦合效率,通常需要极高的泵浦光功率和精密的相位匹配条件。

光机械耦合体系是利用电机机械耦合实现微波子与声子的耦合,同时光机械相互作用实现机械声子与光波光子的耦合,从而实现微波到光波的转化。其中,机械振子起到了桥梁的作用,通过与微波谐振器的静电力耦合可实现微波与机械振动模式的转换,同时基于光弹簧效应耦合到光腔,实现机械振动模式与光信号的转换,如图3所示^[31]。其基本原理以经典的法布里-珀罗腔为例可以描述为:法布里-珀罗腔由一个固定的腔镜和一个可移动的腔镜构成,可移动腔镜一端连接弹簧,激光从固定腔镜入射腔内,进而对可移动腔镜造成光压并使其受迫振动,同时腔内光场不断往返压迫腔镜,腔镜的微小位移使得腔长改变,从而改变腔内光场频率,两者达到平衡后,稳定的光场和简谐运动形成,即光子与声子相互作用稳定进行^[31-34]。基于光力系统实现微波-光波转换是目前光子转换效率最高的系统,该方案的关键挑战在于如何降低机械振子的热噪声,因此通常需要在极低温(mK级)环境下工作,并采用高品质因子机械谐振腔来增强耦合效率^[34]。

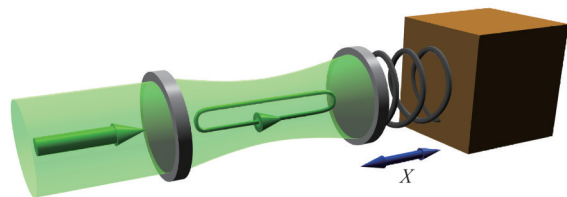


图3 法布里-珀罗腔光力系统原理图^[31]

Fig. 3 Schematic of Fabry-Perot cavity^[31]

对于原子或类原子体系,由于其具有分立能级,选取其中的任意3个能级,允许微波通过三波混频向上转换,即可实现频率转换,如图4所示^[35]。该方案的优点在于原子能级可精密调控,但受限于原子系统的相干时间及光学激发效率。磁光材料中存在的法拉第效应可以使光子和磁振子耦合,微波磁场驱动材料中的磁偶极子发生磁矩进动,进而实现频率转换。磁光耦合方式的转化效率较低,

但磁振子的频率较高,且具有可调谐的优点。

实现微波-光相干转换是连接不同能量尺度的系统、构建分布式量子计算与长距离量子网络的关键,同时也为提高微波单光子探测效率、光频光子的非破坏性测量和宽谱探测等提供了全新的手段。微波-光波转换方案往往需要制备高品质因子微腔、极低温环境、高精度控制和高稳定度等极端的实验条件,且转换效率较低,目前不具备实用化应用的价值,短期内其发展趋势主要还停留在实验室原理验证阶段。

1.4 发展趋势分析

微波量子探测技术作为量子精密测量领域的重要分支,近年来呈现出快速发展的态势。通过对现有技术路线的分析总结,可以清晰地看到不同技术体系的发展现状和未来潜力。在这些技术中,里德堡原子潜力巨大,在计量方面已经逐渐开始迈入实用化阶段,并且有望短期实现工程化应用。里德堡原子除了将电场强度测量转化为频率测量外,还可以将电场强度测量转化为相位测量,这种转换机制不仅大幅提高了测量灵敏度,还显著增强了系统的抗干扰能力。同时相位测量可以通过实验累积来提高测量精度,为突破现有测量极限提供了可能;其次,相位测量对系统噪声具有更好的鲁棒性,有利于在复杂环境中保持测量稳定性;最后,相位信息更易于与现有的光学测量系统兼容,为系统集成提供便利,有望进一步提高电场测量的精度^[29]。在未来里德堡原子微波信号探测研究中,要加快研究其在空间的主要应用和开展工程样机研制,促进微波量子探测技术在空间应用的发展,为未来突破航天装备的发展瓶颈提供技术支撑。

2 工程应用面临的难题

在未来微波量子探测技术的空间工程化应用中,为更充分挖掘其在高灵敏度、宽频覆盖和小型化方面的优势,必须克服的关键技术主要包括新型接收天线设计、探头微型化设计与集成和信号处理系统设计等。在微波量子信号的探测中,迫切需要小型化、低功耗、低成本、高度集成的量子传感器,然而在样机研制中,由于微波量子探测技术发展不成熟,还需要克服很多关键技术难题,图5给出不同探测体系面临的主要难题。

在超导体系中,面临的主要难题包括高质量超导薄膜生长、深低温制冷、微纳结构加工工艺以及高效率行波光子的接收等。在里德堡原子中,主要难题包括高精度激光稳频、新型接收天线结构设计和探头微型化设计与集成等。例如在原子气室的制备中,传统原子气室制作方法(玻璃管高温熔接、玻璃泡吹制,以及玻璃纤维激光诱导封接等)并不满足要求,导致腔室形状难以精准控制,无法实现批量化,并且不兼容微加工技术,不符合元件微型化、器件芯片化的趋势^[36]。在微波-光波转换方案中,面临高品质因子微腔的制备以及行波光子的接收等难题。

里德堡原子接收机是基于里德堡原子对微波场高灵敏度探测发展而来的微波探测技术。目前实验室内最高水平的里德堡原子接收机的探测灵敏度仍未超过成熟的电子技术接收机,面临诸多关键的技术难题需要突破^[37-38]。例如,里德堡原子的关键技术之一是提升原子系统相干时间,在室温下的热原子系统受各类热效应影响,量子态的相干时间较短,能级相应展宽,限制了测量灵敏度,这些退相干因素包括但不限于:原子间及原子与气泡壁的碰撞引起的碰撞展宽,原子与激光运动速度差导致的多普勒展宽,原子与光场有限的相互作用时间导致的渡越时间展宽。未来发展的核心目标就是克服以上退相干因素影响,发挥出原子蒸气技术的全部潜能。图6从原子接收系统及信息处

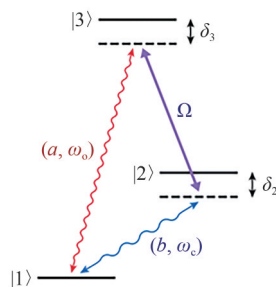


图4 三能级系统原子辅助微波-光学光子转换工作原理示意图^[35]

Fig. 4 Schematic diagram of microwave-optical photon conversion assisted by three-level system atoms^[35]

理系统两方面梳理了里德堡原子样机实现微波信号探测面临的主要技术难题。在原子接收系统中,精密激光控制技术需要解决双频激光的窄线宽稳频、功率稳定性以及里德堡态高效激发等关键问题;接收天线结构设计需突破传统微波天线的尺寸限制,实现与原子气室的高效耦合及宽带阻抗匹配;原子气室结构设计则面临工作温度控制、抗环境干扰以及长寿命维持等挑战,特别是如何平衡气室尺寸与原子数密度之间的关系。在信息处理系统中,样机小型化研制需要集成激光系统、微波谐振腔和探测模块,同时解决各组件间的电磁兼容性问题。而在弱信号提取与处理算法方面,需开发抗噪声干扰的高灵敏度解调方法,并实现快速动态响应与高精度信号重建。这些技术难题的突破对推动里德堡原子微波探测技术的实用化至关重要。

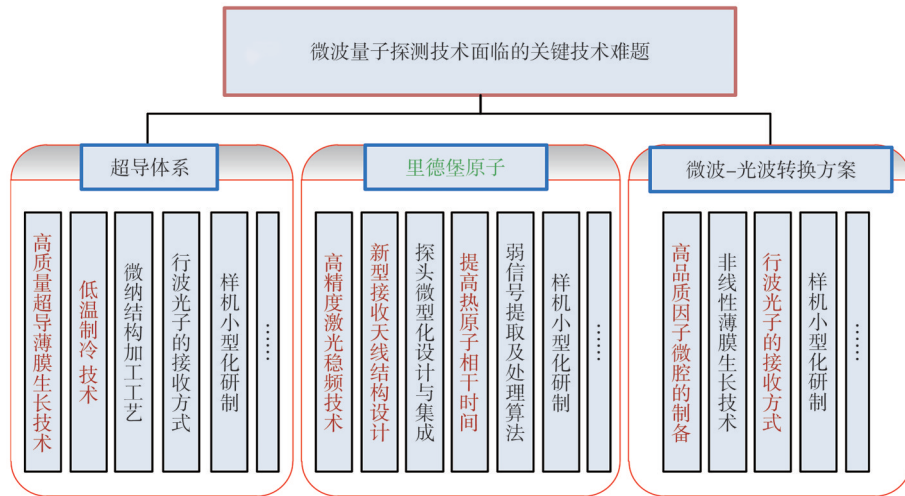


图5 微波量子探测技术面临的关键难题

Fig. 5 Key challenges faced by microwave quantum detection technology

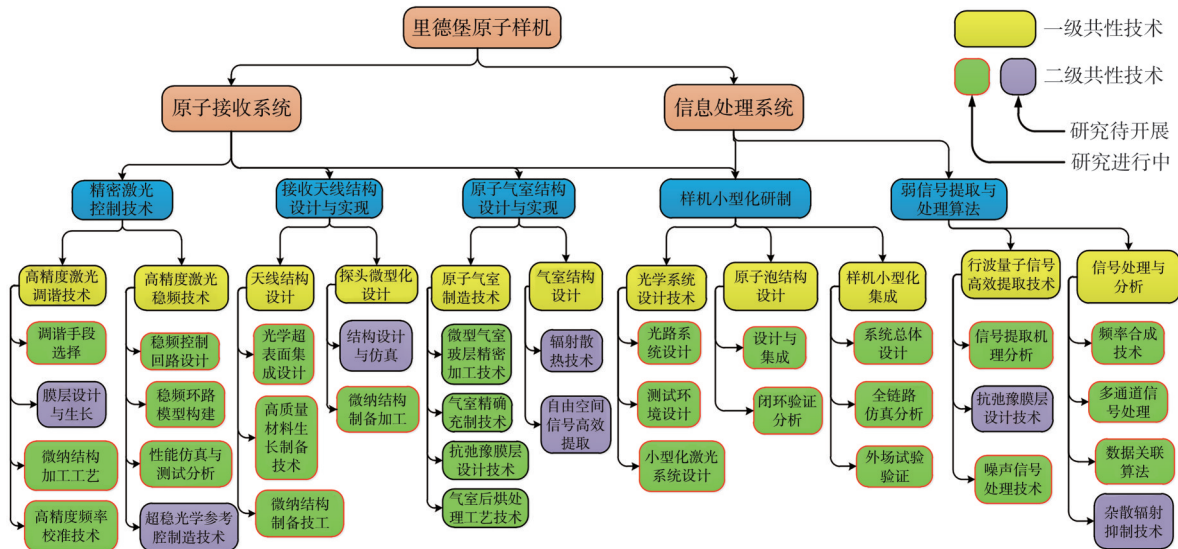


图6 里德堡原理样机面临的主要技术难题

Fig. 6 Main technical challenges faced by the Rydberg principle prototype

3 空间应用展望

在微波量子探测技术的空间应用中,最为典型的军事需求与应用场景如图7所示。主要包括全球态势高灵敏度侦察监视、反隐身目标跟踪识别、中远程精确打击目标指示(针对海空无线电静默目

标、高速移动目标及时间敏感目标的打击)、全球全天时全天候空天海目标探测、低功率通信(涵盖宽带、窄带、抗干扰及战役战术通信保障)、对抗环境下可靠精准定位导航服务、强干扰环境下高精度探测、黑障通信等。

3.1 海面移动目标探测

在基于星载接收平台的海面移动目标高时效性探测中,目前国内外的研究主要侧重于目标反演模型及方法的原理性仿真与验证,一个重要的原因是接收机灵敏度低,需要通过一定的积分时间来获取足够的信噪比,然而随着目标的移动,积分时间过长会导致回波信号的相干性变差,信号提取及数据处理算法

变得异常繁琐,难以对目标进行连续跟踪探测。随着近年来微波量子探测技术的快速发展,为星载接收平台的海面移动目标高时效性探测带来了希望。基于超导量子干涉器件(SQUID)或里德堡原子的量子接收机可实现接近量子极限的灵敏度。实验数据显示,里德堡接收机具备大动态范围(目前已超过 120 dB)接收能力,其高灵敏度测量能力为雷达远距离探测和高速率、高可靠性通信等应用提供了可能性^[39]。2008年,Mohapatra等^[40]首次提出可利用里德堡原子的EIT效应实现电场的测量。2012年,Sedlacek等^[6]首次基于铷里德堡原子实现了高于传统微波电场计灵敏度两个数量级的工作,且测量结果可直接溯源至普朗克常数。2017年,Kumar等^[41]利用马赫-曾德尔干涉仪进行光相位零拍测量,其实验系统如图8所示。探测光分束后,一束经里德堡原子气室作为信号光,另一束作为本振光,二者合束进行零差探测。同时,一束参考激光从检测端注入,光路与探测光重合,其输出经差分光电二极管检测并反馈以稳定干涉仪。该零差测量有效抑制了探测激光读出噪声,增强了EIT信号,最终实现了灵敏度为 $5\mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的电场探测。此后,该团队再次改进实验测试系统,使用频率调制光谱技术提高系统信号读出的信噪比,同时开展信号的匹配滤波,进一步提高灵敏度至 $3\mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,最小可测电场强度达到 $1.8\mu\text{V}/\text{cm}$ 。

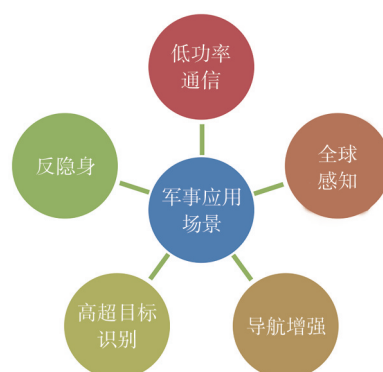


图7 高灵敏度原子接收机典型空间应用场景
Fig. 7 Typical spatial application scenarios of a high-sensitivity atomic receiver

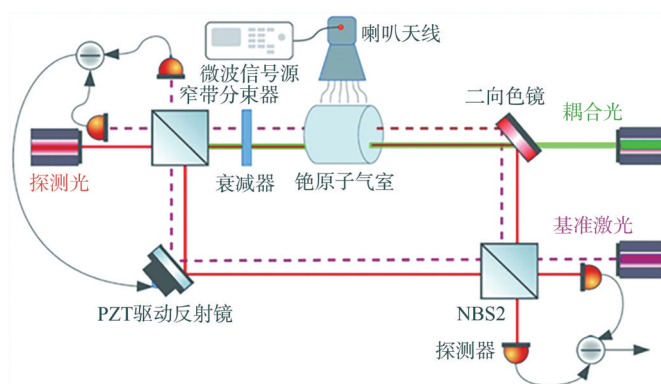


图8 利用马赫-曾德尔干涉仪测量电场实验系统^[41]

Fig. 8 Experimental system for measuring electric fields using the Mach-Zehnder interferometer^[41]

3.2 空中目标探测

空中目标飞行速度快,回波存在信号能量弱、距离徙动大、多普勒模糊严重、多普勒时变性强、相干性减弱(相干时间短至毫秒级)等特点,为回波信号的相参积累和成像带来了极大困难。在隐身飞机(天基视角)探测中,隐身飞机对地基雷达视区内的雷达散射截面(RCS)很小,天基视角的RCS值

可能比仰视或侧视的 RCS 值高一或多个数量级。此外,隐身飞机通常在 18~25 km 的高空突防,该高度大气密度仅为地面的 5%~10%,对微波信号的衰减系数可降低至 0.01 dB/km 以下,这种环境特性为微波量子探测技术的应用提供了独特优势。在一定高度突防时,大气密度低,对微波的衰减作用小,利用微波量子探测技术可实现对隐身飞机进行高精度距离分辨率和高精度成像分辨率探测,该技术通过量子态制备、量子相干操控和量子测量等核心环节,能够有效弥补传统雷达在探测灵敏度极限(突破标准量子极限)和抗干扰能力方面的不足。相比而言,传统可见光探测受限于昼夜交替和气象条件,红外探测则易受背景辐射干扰,微波量子探测技术可以很好地弥补传统可见光和红外探测手段的不足。2021 年,冯胜等^[42]对被动量子雷达机理以及被动量子雷达探测隐身目标的机理进行了分析和研究,探讨了用于隐身目标探测的基于新机理的雷达方案,并提出了一种被动量子雷达方案。该方案属于新体制、新概念雷达范畴,为隐身类目标的探测开辟了一条富有挑战性的科学研究与工程实现新途径,电光调制器(EOM)如图 9 所示。

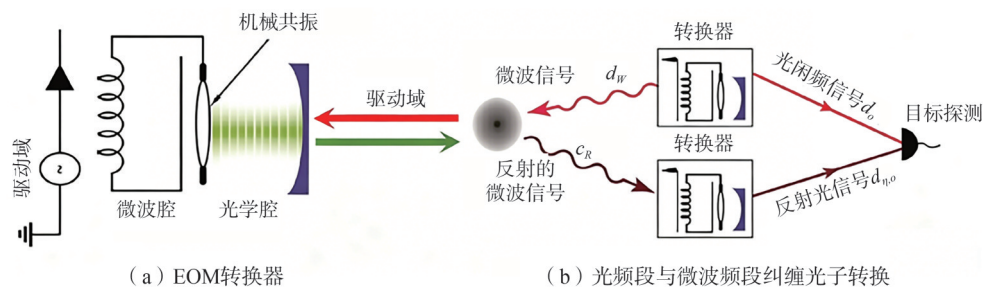


图 9 EOM 转换器示意图^[42]

Fig. 9 EOM converter^[42]

被动微波量子雷达的核心在于对微波电磁波信号进行量子化处理,并利用量子雷达处理方式使系统探测灵敏度能够接近海森堡极限,从而极大地提高系统探测能力。其技术核心是连接微波与光波的电光调制器,该器件的关键作用并非产生量子纠缠,而是将微波信号高保真地转换为光量子信号,从而借助光学领域中成熟的量子测量技术实现后续处理。这种机制使得探测远距离、低辐射的隐身目标成为可能。由于微波受大气环境影响较小,云雾穿透能力和远距离传播能力较强,量子微波场的生成为微波频段量子信息处理、量子密集编码,特别是微波量子通信、微波量子雷达以及量子超精密测量等基于空间传输的量子信息技术提供了可资利用的重要信号源^[32]。基于微波量子探测技术对空中目标进行探测所需回波光量子能量小,有望对空中目标本体进行有效探测与识别。

4 总结

本文从微波量子探测技术行不行-工程转化能不能-空间应用怎么用 3 个层面进行展开。首先,通过分析微波量子探测技术的基本原理,研判其技术发展潜力,是否在灵敏度、准确度和宽频带等方面相比传统微波测量技术更具优势,是否能够解决如低功率通信、暗弱信号的接收与识别问题,是否满足星载接收平台的海上移动目标和空中目标探测等新型的空间应用中对高性能的微波传感器的迫切需求;其次是结合具体的实验条件,判断其到底能不能在未来转换到工程应用,及其在工程实践中面临的关键技术难题,正确识别从实验室样机向工程应用转化需要克服的问题,为后续有针对性地进行突破研究打下坚实基础,同时为未来新型量子接收机、量子成像雷达等空间应用设备和背景型号的发展提供支撑;最后针对未来的空间应用场景,从目标特性出发,提出探测需求,并对微波量子探测的解决方案进行可行性分析。

参考文献:

- [1] LANZAGORTA M. Quantum radar[M]. London: Morgan & Claypool Publishers, 2011.

- [2] 张雪皎,万钧力.单光子探测器件的发展与应用[J].激光杂志,2007,28(5):13-15.
- [3] 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.
- [4] 中国信息通信研究院.量子信息技术发展与应用研究报告[R].北京:中国信息通信研究院,2021.
- [5] KUNG J,FANCY M. A quantum revolution: Report on global policies for quantum technology[R]. Toronto: CIFAR, 2021.
- [6] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, KÜBLER H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. Nature Physics, 2012, 8(11): 819-824.
- [7] STUART A W, JONECKIS L G, WARUHIU S, et al. Overview of the status of quantum science and technology and recommendations for the DOD[R]. Alexandria, Virginia: Institute for Defense Analyses, 2019.
- [8] GORDON J A, SIMONS M T, HADDAB A H, et al. Weak electric-field detection with sub-1 Hz resolution at Radio frequencies using a Rydberg atom-based mixer[J]. Applied Physics Letters, 2019, 9: 045030.
- [9] BAGCI T, SIMONSEN A, SCHMID S, et al. Optical detection of radio waves through a nanomechanical transducer[J]. Nature, 2014, 507(7490): 81-85.
- [10] O'CONNELL A D, HOFHEINZ M, ANSMANN M, et al. Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator[J]. Nature, 2010, 464(7289): 697-703.
- [11] TEUFEL J D, LI D L, ALLMAN M S, et al. Circuit cavity electromechanics in the strong-coupling regime[J]. Nature, 2011, 471(7337): 204-208.
- [12] RODRIGUES I C, BOTHNER D, STEELE G A. Coupling microwave photons to a mechanical resonator using quantum interference[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 5359.
- [13] GRÖBLACHER S, HAMMERER K, VANNER M R, et al. Observation of strong coupling between a micromechanical resonator and an optical cavity field[J]. Nature, 2009, 460(7256): 724-727.
- [14] ZOU C L, HAN X, JIANG L, et al. Cavity piezomechanical strong coupling and frequency conversion on an aluminum nitride chip[J]. Physical Review A, 2016, 94(1): 013812.
- [15] FORSCH M, STOCKILL R, WALLUCKS A, et al. Microwave-to-optics conversion using a mechanical oscillator in its quantum ground state[J]. Nature Physics, 2020, 16(1): 69-74.
- [16] 金贻荣,郑东宁.超导量子计算:长退相干量子比特发展之路[J].科学通报,2017,62(34):3935-3946.
- [17] 金贻荣.超导与量子计算[J].自然杂志,2020,42(4):301-310.
- [18] 于扬.约瑟夫森器件中的宏观量子现象及超导量子计算[J].物理,2005,34(8):578-582.
- [19] 高吉,马平,戴远东.高温超导量子干涉器中的约瑟夫森结[J].物理,2007,36(11):869-878.
- [20] 郑东宁.超导量子干涉器件[J].物理学报,2021,70(1):164-177.
- [21] 张临杰,景明勇,张好.基于里德堡原子的微波电场量子传感[J].山西大学学报(自然科学版),2022,45(3): 712-722.
- [22] 栗栗,周子恒,徐忻怡,等.量子微波及其接收方法综述[J].量子光学学报,2021,27(3):253-266.
- [23] JING M Y, HU Y, MA J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed rydberg spectroscopy [J]. Nature Physics, 2020, 16(9): 911-915.
- [24] BOZYGIT D, LANG C, STEFFEN L, et al. Antibunching of microwave-frequency photons observed in correlation measurements using linear detectors[J]. Nature Physics, 2011, 7(2): 154-158.
- [25] HISATOMI R, OSADA A, TABUCHI Y, et al. Bidirectional conversion between microwave and light via ferromagnetic magnons[J]. Physical Review B, 2016, 93 174427.
- [26] FAN L R, ZOU C L, CHENG R S, et al. Superconducting cavity electro-optics: A platform for coherent photon conversion between superconducting and photonic circuits[J]. Science Advances, 2018, 4(8): 4994.
- [27] HIGGINBOTHAM A P, BURNS P S, URMEY M D, et al. Harnessing electro-optic correlations in an efficient mechanical converter[J]. Nature Physics, 2018, 14(10): 1038-1042.
- [28] 白金海,胡栋,贡昊,等.里德堡原子微波电场测量[J].计测技术,2021,41(1):1-9.
- [29] 黄巍,梁振涛,杜炎雄,等.基于里德堡原子的电场测量[J].物理学报,2015(16):160701-160702.
- [30] 安强,姚佳伟,林沂.基于里德堡原子的微波电场测量技术[J].电波科学学报,2023,38(5):729-738.
- [31] 罗均文,吴德伟,苗强,等.腔光力系统制备微波非经典态研究进展[J].物理学报,2020,69(5):1-15.

- [32] 苗强,李响,吴德伟,等. 量子微波制备方法与实验研究进展[J]. 物理学报,2019,68(7):59-72.
- [33] 谷开慧,严冬,张孟龙,等. 原子辅助光力系统中快慢光的量子调控[J]. 物理学报,2019,68(5):110-118.
- [34] 苗强,吴德伟. 量子微波-光波相干转换实验系统与研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2025,62(1):35-47.
- [35] HAN X,FU W,ZOU C L. Microwave-optical quantum frequency conversion[J]. Optica,2021,8(8):1050-1064.
- [36] 廖开宇,涂海涛,张新定,等. 基于里德堡原子的微波传感与通信[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学),2021,51(7):3-16.
- [37] 夏凌昊,肖俊祥,董岫,等. 里德堡原子雷达接收灵敏度极限[J]. 微波学报,2024,40(2):1-7.
- [38] 吴逢川,王坤,田壮壮,等. 微波脉冲干扰下里德堡原子的动目标检测[J]. 电波科学学报,2025,40(5):872-879.
- [39] 付云起,林沂,武博,等. 基于里德堡原子的无线电技术[J]. 电波科学学报,2022,37(2):279-287.
- [40] MOHAPATRA A K,BASON M G,BUTSCHER B,et al. A giant electro-optic effect using polarizable dark states [J]. Nature Physics,2008,4(11):890-894.
- [41] KUMAR S,FAN H Q,KÜBLER H,et al. Atom-based sensing of weak radio frequency electric fields using homodyne readout[J]. Scientific Reports,2017,7(1):42981.
- [42] 冯胜,胡光桃,卢亚鹏. 基于被动量子雷达的隐身目标探测研究[J]. 重庆大学学报,2021,44(3):100-106.

(责任编辑 朱成军)

Research on Space Application of Microwave Quantum Detection Technology

YUE Pengyi¹, ZHAO Yilana², GUO Beidou²

(1. *Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology,
Beijing 100094, China;*

*2. School of Physical Science and Technology, Inner Mongolia University, Hohhot
010021, China)*

Abstract: In recent years, the preparation, manipulation and measurement of single or multiple microwave quanta have been realized by using superconducting quantum circuits, atoms or atom-like system to provide a new idea for breaking though the bottleneck of classical technique in detecting extremely weak microwave signals. The detection of extremely weak microwave singles is of great significance in wireless communication, satellite remote sensing and space technology. The future development trend and potential of extremely weak microwave signal detection technology in different technical systems are analyzed and judged from two aspects of basic physical principles and technical practical ability, the key technical problems faced by its engineering implementation are systematically sorted out, and the space application of this technology in the future is prospected.

Key words: microwave quantum; superconducting; Rydberg atom; quantum precision measurement; space application