

量子技术对现代战争的影响^{*}

唐苏妍^{**}

(国防大学联合勤务学院,北京 100036)

摘 要:随着量子力学与信息技术的深度融合,世界各国高度关注新型量子技术的研究与发展,而量子技术的巨大优势同样引发了各国军事领域的广泛关注。本文重点分析了量子通信、量子计算、量子雷达技术对现代战争的影响及当前发展现状,并从作战理念、作战样式、武器装备发展等方面给出思考与启示。

关键词:量子通信;量子计算;量子雷达;现代战争

中图分类号:E919 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2019.06.010

Influence of Quantum Technologies on Modern War^{*}

TANG Suyan^{**}

(Joint Logistics College, National Defense University, Beijing 100036, China)

Abstract: With the deep integration of quantum mechanics and information technologies, countries around the world pay great attention to the research and development of emerging quantum technologies. This paper analyzes the influences of quantum communication technology, quantum computation technology and quantum radar technology on the modern war, including the current development status of the said technologies. Some thoughts and enlightenments are given from the aspects of operational notion, operational mode and development of weapon and equipment.

Key words: quantum communication; quantum computation; quantum radar; modern war

从 20 世纪 20 年代量子力学理论发展成熟以来,推动了半导体、激光、核聚变、材料等微观领域技术的发展,极大地改变了人类的生产和生活方式,以及作战模式和战争面貌,在科学界被称为“第一次量子革命”。近 20 年来,随着量子力学与信息技术的深度融合,人类正在拉开“第二次量子革命”的序幕。当前,世界主要国家及全球产业界高度关注量子技术的研发,而量子技术的巨大优势也引发了世界各国军事领域的广泛关注。

从国家和军事战略规划层面看,早在 2007 年,美国国防高级研究计划局 DARPA 就将量子科技作为核心技术基础列入其战略规划^[1],并在 2015 年设定的战略投资领域中将量子物理学列为三大前沿技术之一,尤其是 DARPA 启动的“微型曼哈顿计划”,将研究量子芯片提升至与研制原子弹同等重要的高度^[2,3]。美国国防部“2013—2017 年科技发展五年计划”将量子信息和量子调控列为美国军方六大颠覆性基础研究领域之一,认为其未来将对美军战略需求和军事行

^{*} 装备预研基金重点项目(9140A22010115KG01059),国防大学创新资助课题(17GDC038)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: tsy2977162@163.com; Tel: 15801153109

动产生深远影响^[4]。

从技术研究方面看,2014 年,美国陆军研究实验室利用量子特性实现图像增强与改进,在低光和气流紊乱的情况下,在 2.33 km 距离成像测试中获得清晰图像,为侦察探测领域提供了新的技术途径。2017 年 8 月,上海交通大学金贤敏教授团队成功实现世界上第一个水下量子通信实验^[5],为建立水下以及空海一体的量子通信网络迈出了重要一步。未来,水下量子通信技术的应用将极大地改变海上作战样式。在量子计算技术研究方面,继 2017 年 11 月,IBM 公司宣布研制出 50 个量子位的量子计算机之后,2018 年,Google、阿里巴巴等公司和研究机构竞相研制量子计算技术,通过刷新量子比特数量,抢占该领域的技术话语权。

目前,量子技术的重点研究领域主要包括量子通信、量子计算、量子精密测量。其中,量子通信可实现无条件安全的通信手段;量子计算具备超快计算能力,可有效揭示复杂物理系统规律;量子精密测量使得测量精度可超越经典测量手段的极限。在量子精密测量领域,量子雷达由于与作战领域关系密切,因此多年来备受世界军事强国的高度关注。

未来,量子技术的发展和应用,将打破以微电子技术为基础的电子信息技术物理极限,颠覆现有电子信息技术体系,促进战争形态演变,对现代战争产生深远影响。本文重点分析量子通信、量子计算、量子雷达技术对现代战争的影响,并从作战理念、作战样式、武器装备发展等方面给出思考与启示。需要说明的是,量子技术是一个广阔的领域,众多问题有待解决,但分析其对战争将会产生的影响对认识和设计未来战争非常必要。本文抛砖引玉,列出一些我们认为可能存在的影响,期

望能引起研究学者们的广泛思考。

1 量子通信技术对现代战争的影响

量子通信技术,是利用量子态和纠缠效应进行信息传递的一种新型通信方式,是量子论和信息论相结合的新型研究领域,主要涉及量子密码通信、量子隐形传态、量子密集编码等。作为量子通信技术中最具实用化前景的分支之一,基于量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)的量子通信经过 30 余年的研究和发展,在协议技术、系统器件和组网架构等各方面初步成熟并进入推广试用阶段,近年来呈现出加速发展的趋势^[6]。基于量子的不可分割性和测不准原理,量子密钥分发技术可以确保在量子通道内密钥传输的安全性。

1.1 实现安全通信,可确保军事通信信息内容安全

目前,作战体系中应用的通信技术主要包括有线通信和无线通信两种。然而,有线和无线通信技术在通信信息安全方面存在漏洞,主要表现为通信信号容易被截获和窃听^[7]。虽然加密技术可以在一定程度上阻止对方获知具体通信内容,但是经典信息加密技术依然面临困境。经典信息加密技术包括两大类,对称密码体系和非对称密码体系。对称加密体系中的“一次一密”加密方式曾被香浓等人从理论上证明,在满足密码随机产生、密码不重复使用、密钥密文长度一样的条件下,可确保通信过程具备无条件安全性^[8],但其密钥分发过程仍然存在被窃听的隐患。而非对称加密体系仅具有计算安全性,已在理论上证明,所有经典非对称密码体系都能够被量子 Shor 算法破解^[9],不存在无条件安全的非对称密码体系^[10]。因此,无条件安全性,只有在对称密码体

系“一次一密”加密方式下,结合安全的密钥分发技术才能实现。

量子密钥分发技术能够有效满足军事通信信息安全的需求。量子密钥分发技术与对称密码体系中的“一次一密”加密方式相结合,可消除“一次一密”加密方式中密码更换后传输过程的安全隐患,从而确保军事通信过程的无条件安全^[11,12]。首先,量子的不可分割性和不可克隆定理使得量子通信过程存在窃听必然被发现,而发送方和接收方一旦发现通道内存在窃听,则可不使用该密钥对信息内容加密,直到双方确保密钥传输过程中无窃听为止。量子密钥分发可用于建立和传输军事通信信息密码本,即首先在量子通道中为通信双方分配安全密钥^[13],再用密钥对明文进行加密,将密文在军事通信经典信道中传输,以确保通信过程的无条件安全。

1.2 实现通信隐蔽,可确保军事通信双方安全

目前,应用于作战领域的现代通信技术通常无法确保通信双方安全,即目标很可能由于与外界通信而暴露自身位置。例如,针对无线通信技术,敌方可通过通信信号分析技术与辐射源定位系统相结合的方式,解算出上行通信信号的发送端位置信息。对于有线通信技术,可通过溯源等手段对通信双方进行定位。

相比之下,量子通信技术隐蔽性更强。量子通信采用单光子传播原理,光辐射量非常少,窃听者很难发现通信双方的存在。通常情况下,连续或脉冲式光传输条件下,1 微瓦中大约含有 10^{15} 个光量子,因此经典通道很容易被探测手段发现并进行无感接入实现窃听。而量子通信采用单光子传播原理,光辐射量极小,现有的探测手段很难探测到光缆中是否存在量子通信,从而在一定程度上确保了通信双方安全。

量子通信隐蔽性强的优势,可助力提升水下综合作战能力。长期以来,水下武器装备的通信手段大部分仍然采用低频通信方式,存在发信台站庞大、发信困难、通信效率极低、与岸基指挥所通信易暴露等弊端。量子通信则能够较好地弥补这些缺陷。一是量子通信所需的信噪比,同等条件下比其他手段低 30 ~ 40 分贝左右,即使获取的通信信号信噪比较低,量子通信也能够从中获取高质量信号,因此从理论上讲可以较好地应用于深海和远洋通信,目前已有相关实验予以证实^[14]。二是量子通信隐蔽性强,因此可确保水下武器装备不会由于通信而暴露自身位置。三是量子密钥分发的安全性可确保通信内容安全,这对于战略级水下武器装备极为重要。从理论上讲,水下武器装备在制作好密钥后,可以通过技术手段将光子传输至量子通信卫星,再由卫星作为中继将信号传输至地面指挥所。未来,量子通信卫星发射组网后,可与水下武器装备进行通信,而一旦水下通信问题得到解决,将极大地改变海上作战样式,“海狼群”将会成为现实,航母战斗群或将面临巨大威胁。

2 量子计算技术对现代战争的影响

量子计算以量子比特作为信息处理单元,并根据具体问题和算法要求,按照量子力学规律执行计算任务(变换、演化编码量子态),根据量子测量理论提取计算结果^[15]。与经典计算机的串行运算模式相比,量子计算机由于信息处理单元是量子比特,因此可实现并行计算操作,从而解决诸多大规模计算难题,包括密码分析、气象预报、药物设计、金融分析、石油勘探等领域。在作战领域中,计算已经发展成为影响作战效能的基础领域,而量子计算强大的并行计算优势一旦应用到

作战中,将全面提升信息化作战能力,为体系作战效能和作战进程带来颠覆性影响。

2.1 提高网络空间作战能力

当前,网络空间作为陆、海、空、天之外的第五维空间,已成为未来战争的重要作战领域,其军事力量建设也日益成为世界各国关注与发展的重点^[16]。网络空间作战的基本样式包括网络情报作战、网络阻瘫作战、网络防御作战和网络心理作战^[17]。其中,在实施网络情报作战和网络阻瘫作战的过程中,通常需要破译复杂密码才能获取重要情报或实施下一步作战行动。因此,密码破译能力是影响网络情报作战和网络阻瘫作战效能发挥的关键。多年来,网络空间作战通常由于密码破译技术受限,从而在作战效率和作战效果上面临较大瓶颈。

从理论上讲,密码破译通常是求解一个数学难题,尤其对于非对称密码体系,原则上可破,但以现有的计算能力,花费的时间远大于信息有效时间,并且破解密文的成本远高于信息价值。因此,密码系统在开发过程中要充分考虑破解计算机技术发展的速度和水平,并随着计算能力的发展做出调整和改进,以确保计算安全性继续成立。

与经典计算技术相比,量子计算技术的并行计算优势将大幅提升密码破译能力。未来,量子计算将对密码系统尤其是以数学理论为基础的加密算法带来最直接的威胁。当前,世界各国网络、银行以及电子商务等领域中普遍采用的 RSA、DSA 等非对称加密算法,其数学理论基础是大数分解。利用万亿次经典计算机分解 300 位大数,需要 15 万年,而利用万亿次量子计算机只需 1 秒^[18]。2016 年 4 月发布的美国国家标准与技术研究院内部报告,分析和预测了量子计算能力对当前世界各国主流加密算法产生的影响。其中,

AES 等对称加密算法需增大密钥长度,而 RSA、DSA 等非对称加密算法将全面丧失安全性^[19]。未来,在网络空间作战领域,量子计算技术将能够极大地提高密码破译能力,从而破除网络情报作战和网络阻瘫作战的密码技术瓶颈,提高网络空间作战能力。同时,源源不断的战场情报将会极大地改变作战进程。

此外,部分国家采取“现在窃听,未来解密”的方式,先将无法破译密码的数据进行存储,等待未来专用的量子计算机研制成功后再进行解密。例如,美国国家安全局在犹他州建立了一个数据中心,专门用来存储作战对手大量的外交、军事、政治等方面的机密数据,以待未来量子计算机研制成功后破解。其目的是通过推演对手过去的作业方式,从而推测出其如今可能的作业方式。

2.2 提高作战规划能力

现代战争越来越注重“精算、细算”。从军事运筹学的角度看,“精算、细算”指的是一种作战规划能力,包括任务规划、资源规划、兵力规划、部署规划等。作战规划的评价标准通常是作战规划的效率和效果。当前,随着作战体系规模的不断升级,以及作战指挥员“精算、细算、深算”意识的不断深化,越来越多的实践表明,只有在先进的理论基础上,构建合理的模型体系、运用科学的算法,再辅以高效的计算,才能解决作战过程中复杂的规划问题。

作战规划问题的本质是根据任务目标,依据给定的资源和约束条件,运用科学规划的方法产生一系列的作战行动序列^[20],其核心要素是模型、算法和计算能力。当前,作战规划面临的问题,一是战争规模增大、范围扩大、装备复杂、行动变快增加了作战规划模型的复杂度,从而对算法和计算能力提出了新的需求;二是面对作战过程

中的不确定性,作战规划需要站在全局的视角下,通过联动进行实时修正。例如,在遂行武器目标分配的过程中,新增加目标或者武器被击毁无法发挥作用时,都需要推翻正在规划的分配方案,重新进行计算和部署。当武器和目标数量较大时,算法和计算能力将成为作战规划的关键制约因素。

当前,量子计算技术的主要研究领域包括量子算法、量子计算模型以及量子计算物理实现。在量子算法领域,典型的量子算法包括 Shor 因子分解算法、Grover 量子搜索算法、量子进化算法 (Quantum Evolutionary Algorithm, QEA) 等。与经典搜索算法相比, Grover 量子搜索算法具有更加高效的搜索效率。与传统进化算法相比,量子进化算法具有种群规模小且不影响算法性能、全局搜索能力强、收敛速度快且易于与其他算法融合等优点,能够在较短时间内收敛于全局最优解^[21],目前已广泛应用于各类规划问题^[22,23]。同时,量子计算物理实现领域的研究将使量子计算技术更快地走向实用。量子计算技术一旦应用于战争指挥决策领域,将提高大规模任务规划、资源规划等复杂问题的规划效率和规划效果,使得作战规划系统在充满不确定性的战场环境中具备快速反应能力,从而对作战进程和体系整体作战效能带来深远影响。

3 量子雷达技术对现代战争的影响

当前,随着综合电子技术的发展,隐身技术、电子干扰、反辐射导弹对基于电磁波理论的传统雷达带来了严峻挑战。而量子雷达基于量子力学基本原理,利用了更先进的量子理论进行系统分析,对雷达中诸如接收机噪声等概念和物理现象进行了全新的、更准确的理解^[24],其主要依靠收

发量子信号并采用单光子检测或量子纠缠态实现目标探测,不仅具有更高的探测精度和灵敏度,同时具有更强的抗干扰和抗欺骗能力。量子雷达的工作机理和流程与经典雷达相似,虽然并没有从本质上颠覆传统雷达的技术框架,但却将量子信息技术引入传统雷达领域,解决了传统雷达在探测成像精度等方面的技术瓶颈,从而提升了雷达综合性能,是一种新概念雷达^[25]。

3.1 探测隐身目标

当前,战斗机实现隐身的途径主要包括两大类,一是改变气动外形减小 RCS,或在机身上涂抹吸波材料,使得雷达接收回波减少从而探测不到目标。二是通过发送虚假信号对雷达进行欺骗,使雷达误判从而实现隐身。在探测隐身目标时,传统雷达通常由于接收回波减少或被欺骗,使得探测距离被大幅压缩。

与接收电磁波的传统雷达相比,量子雷达接收系统产生、调制、接收、检测的对象是单个量子,因此量子雷达接收机具有极高的灵敏度,其噪声基底比传统雷达低若干个数量级,探测距离远、精度高,可在高背景噪声中识别出远距离微小信号^[26]。此外,当战斗机通过更改雷达信号特征对雷达进行欺骗时,量子雷达可以识别出欺骗行为。例如,罗彻斯特光学研究所梅胡尔·马利克 (Me-hul Malik) 的实验结果表明,更改量子雷达信号特征将破坏量子态,使得雷达接收信号的偏振态误码率高于 25%,由此量子雷达可识别出欺骗行为,从而继续对目标进行跟踪^[27]。

3.2 发挥制导武器作战潜能

长期以来,对于中段采取指令制导或包含指令制导在内的复合制导模式的防空导弹来说,其飞行距离、打击精度以及作战潜在在很大程度上受到制导雷达的性能限制,尤其是低空突防目标

及隐身目标更是如此。而与传统制导雷达相比,由于量子雷达探测灵敏度和精度极大提高,因此在目标进入防空导弹杀伤区时或进入杀伤区之前,防空导弹就可以发射,从而使得防空导弹的有效交战范围(E3 Range)得到拓展。这不仅意味着防空导弹的作战潜能得到充分发挥,同时意味着如果第一枚防空导弹拦截目标失败,还有发射第二枚防空导弹的反应时间^[28]。此外,由于量子雷达的制导精度提高,防空导弹的命中率也将得到大幅提升。

3.3 提高雷达生存能力

当前,电子侦察和电子干扰设备对传统雷达的威胁日趋显著。由于传统雷达接收电磁波,因此信号较容易被电子侦察设备捕捉,从而为后续实施电子干扰和反辐射打击奠定基础。相比之下,量子雷达发射和接收系统的处理对象是单光子,不发送较强的电磁波或强光波,使其不易被敌方电子侦察设备发现,同时传统的电子干扰手段也很难通过吸收、复制等方式干扰量子雷达^[27,29],从而提高雷达生存能力。

4 量子技术发展现状

目前,量子技术已成为世界各国竞相投入的重要领域,部分国家将量子技术作为获取未来战争主动权的战略制高点。近几年来,世界主要国家及军队纷纷出台量子技术相关的顶层战略^[30-33]。2018 年 6 月,美国众议院科学委员会正式通过《国家量子倡议法案》,标志着未来 10 年,美国联邦政府将全力推动量子科学发展^[34]。与此同时,世界顶尖的高科技公司和著名研究机构纷纷投入巨资研发量子技术,国际竞争异常激烈^[35]。

4.1 量子通信技术发展现状

量子通信作为面向未来的全新通信技术,在

安全性方面具有显著优势,已经引起世界各国的高度重视^[36-38]。

在光纤量子通信方面,我国已建成合肥、芜湖、济南等城域量子通信示范网络。2017 年 9 月底,国家量子安全通信骨干网“京沪干线”正式开通,并当天就在北京节点与“墨子号”量子科学实验卫星建立连接,实现北京到维也纳之间 7600 km 的洲际量子保密视频通话,这是世界上第一个天地一体化的量子广域通信网络的雏形,有望使我国金融、政务信息率先迈入绝对安全的量子保密传输时代。2014 年,美国 NASA 规划量子保密通信干线,铺设从洛杉矶喷气推进实验室(JPL)到 Sunnyvale NASA Ames 研究中心的光纤线路,美国知名研究机构 Battelle 公布了环美量子通信骨干网络项目,计划采用瑞士 IDQ 公司设备,基于分段量子密钥分发结合安全可信节点密码中继的组网方式,为谷歌、微软、亚马逊等互联网巨头的数据中心提供具备量子安全性的通信保障服务。欧洲多个国家和地区相继建成了瑞士量子、维也纳 SECOQC 等量子通信实验网络^[39],演示和验证了城域网、量子电话、基础设备保密通信等应用。英国、意大利等国建立城市间及贯穿全境的量子通信实验网络。2016 年 9 月,俄罗斯先期研究基金会量子光学技术实验室利用量子技术研发了非保护通道的安全密钥部署设备,并在俄罗斯电信公司光纤通信线路上成功进行试验。2010 年,日本通过洲际合作建成了多节点城域量子通信网络^[40]。

在量子卫星建设方面,我国于 2016 年 8 月发射世界首颗量子通信实验卫星“墨子号”,并于 2017 年 1 月正式交付使用。2015 年 7 月,欧洲航天局(ESA)与欧洲通信卫星公司签署价值 1.8 亿欧元的欧洲量子卫星建造合同。2019 年 1 月,

Eutelsat Quantum 卫星平台完成建造,已运至空客防务与航天公司位于法国的卫星工厂进行集成,并计划在 2019 年底搭乘“阿里安”-5 火箭发射;第 2 颗卫星计划于 2020—2021 年发射,主要覆盖亚洲地区。Eutelsat Quantum 卫星通过软件驱动,可灵活更新卫星工作频率、带宽、信号强度、覆盖范围等性能参数^[41]。2019 年 4 月 9 日,欧洲航天局(ESA)和欧盟委员会共同签署一项协议,标志着欧洲为建立“量子互联网”迈出了第一步。目前,双方正在计划建立欧洲量子通信基础设施(QCI)。根据新签署的技术协议,QCI 的地面部分由 DG Connect 负责,它包含一系列的量子通信网络,连接了欧洲的关键基础设施、敏感通信和数据站点。天基组件,即 SAGA(安全和密码算法任务)由 ESA 负责,包含了一个覆盖整个欧洲的量子卫星通信系统^[42]。

目前,量子通信技术在增加安全通信距离、提高安全成码率和提高现实系统安全性等方面还面临重大挑战。虽然从理论上,量子通信的安全性已得到概念性证明和基于物理模型的严格数学证明,但实际的量子通信系统由于不能完全满足物理模型中的假设条件从而存在被窃听和攻击的缺陷。量子通信技术未来一段时间的研究重点主要集中在如何突破速率、传输距离、抗干扰性能方面的局限,以及解决光子损耗及量子退相干等问题。

4.2 量子计算技术发展现状

量子计算是当前的热门科学前沿技术,代表了量子技术的主流方向之一,尤其是在后摩尔时代的大背景下,各国政府高度重视量子计算技术的发展,并提前布局,意图抢占先机。Google、微软、英特尔、东芝以及 IBM 等公司也投入巨资开发量子计算技术潜力,国际竞争异常激烈。近年来,IBM、Google、阿里巴巴等高科技公司不断刷新

量子比特数量,意图争夺量子霸权。

近年来,我国在量子计算研究方面不断取得突破。2017 年 5 月,中国科学院宣布在基于光和超导体系的量子计算机研究方面取得重大突破,建造了世界上第一台超越早期经典计算机的光量子计算机原型机,同时实现了 10 个超导量子比特处理器,打破 Google 公司保持的 9 个超导量子比特记录。2018 年 2 月,阿里云联合中科院宣布 11 个量子比特计算云平台上线;2018 年 7 月,潘建伟教授团队全球首次实现 18 个光量子比特纠缠。

此外,世界主要国家纷纷从国家战略层面重视和规划量子计算技术的研发。2016 年,我国在“十三五”国家科技创新规划 2030 重大项目部署了量子计算项目。美国已经在量子计算领域完成战略布局,在理论研究方面推进量子信息科学的学科建设,在应用技术层面以研发高性能计算系统为牵引,重点突出量子计算硬件设备发展,目前正处在加速推进落实的过程中。2015 年,美国正式启动战略计算倡议(NSCI),该倡议的领导机构为美国国防部、美国能源部,组织执行机构是情报高级研究计划局(IARPA)和美国国家标准与技术研究院(NIST)。其计划管理力度之大,在美国其他的国家级科研项目中非常罕见,而 NSCI 的中长期战略布局聚焦量子计算。2018 年,美国军方将量子计算视为可能改变信息战和太空战的关键技术,并已将量子计算机和相关应用列入五角大楼必须进行的研发投资选项^[43]。

目前,量子计算机研究的瓶颈问题主要集中在硬件实现方面,例如需要提高量子系统中相干操纵的能力,实现更多量子比特的纠缠,研制新的量子算法,增强现有量子算法的实用性和扩展性等问题。从理论上,量子计算是一个广阔的研究领域,众多问题有待解决,诸如量子软件、量子

复杂性、量子电路等相关问题极有可能在五至十年内取得重要进展,关于量子计算能力的问题则需要进行更长时间的探索研究^[44]。

4.3 量子雷达技术发展现状

目前,美国、加拿大、澳大利亚等国正在积极开展量子雷达研究^[45]。从 2008 年开始,DARPA 先后提出了开展量子雷达技术研究的“量子传感器项目(Quantum Sensor Program,QSP)”等多项研究计划^[46],美国麻省理工学院林肯实验室^[47,48]、NASA、美国海军研究实验室^[49]、陆军研究实验室^[50]、哈佛大学^[51,52]、马里兰州立大学、罗彻斯特大学^[53,54]、洛克希德·马丁公司^[55]等 12 家机构都相继开展了量子雷达的研究工作。其中,高校、军队和公司所占比例为 7:3:2,高校研究居多,说明目前量子雷达处于理论研究阶段,尚未走出实验室。军队和公司参与研究,则说明量子雷达必将走向实用,且距离实用化不会太遥远。2016 年,我国电科院 14 所成功研制单光子检测量子雷达系统,先后完成了量子探测机理、目标散射特性以及量子探测原理的试验验证,在真实大气环境下可实现百公里级的探测能力(已达到 160 km),探测灵敏度也得到极大提升^[56]。

目前,量子雷达技术在工程化方面仍存在诸多难题,如量子态的纠缠特性、相干性以及携带量子态信息载体的能量微弱性,都进一步增加了量子信息传输和处理的难度。此外,量子雷达性能在很大程度上受限于相关电子器件的性能。总体来看,目前量子雷达技术仍处于研究和探索阶段,但从国内外的投入和关注程度来看,其实用化进程将会持续加速。

5 思考与启示

半个多世纪以来,以电子技术为主导的信息

技术,不仅改变了人类的生产和生活方式,同时改变了作战方式和战争面貌。未来,量子通信、量子计算、量子雷达等技术物化为装备并应用于军事领域后,将促进战争形态的改变和战争理论的革新。

一是量子通信技术将颠覆技术侦察力量结构和海上作战样式。长期以来,技术侦察力量作为情报作战的中坚力量,为世界各国作战情报的获取提供了技术支撑。未来,安全隐蔽的量子通信技术逐渐走向实用后,技术侦察力量将很难识别量子通信信道并从中获取量子通信信号,传统的信号侦察和分析手段将无法获取情报数据,使得现有技术侦察力量结构或将面临巨大调整。此外,量子通信技术通过解决水下武器装备通信瓶颈问题,提升水下综合作战能力,从而极大地改变海上作战样式。二是量子计算技术或推动战争进入全面算法战争时代。随着高超声速武器的发展,人类将进入“读秒战争”时代,作战指挥员的思维速度将无法满 足作战实时性需求。当量子计算技术走向实用后,面对爆炸式增长的态势感知数据,作战指挥员或将作战经验、作战筹划思路、作战约束条件等以算法和程序的方式预先编入量子计算机中,依赖算法和量子并行计算能力辅助指挥员快速决策,从而推动战争进入全面算法战争时代。三是量子雷达技术将颠覆隐身技术和电子战模式。上世纪 70 年代以来,战斗机隐身技术先后经历了探索、发展、应用三个阶段,由于隐身战斗机在多次军事行动中取得显著战果,因此几十年来,世界军事强国纷纷投入巨资发展战斗机隐身技术。此外,电子战作战模式在现代战争中已被广泛使用。然而,量子雷达一旦走向实用,将使各种战斗机隐身途径失效,与此同时,针对各类雷达开发的电子战模式同样面临挑战。未来,隐

身技术和电子战模式在量子雷达面前将何去何从,同样是作战领域值得研究的课题。

作为颠覆未来战争形态的关键技术之一,量子技术将首先被物化为先进的科技装备,随后催生出新型的作战理念和颠覆性的作战样式,而后再推动更加新型的颠覆性技术出现。随着量子技术的发展和成熟,军事领域需要用全新的视角谋划未来战争的作战理论、作战样式,制定先进的武器装备发展战略,进一步突破传统作战理念的局限,为形成颠覆性作战能力奠定理论和现实基础。

参考文献

- [1] 邹佳同. 美国国防高级研究计划局公布新版战略规划——揭示八大战略重点九大核心基础技术[J]. 现代军事, 2007(8): 17-21.
- ZOU Jiatong. Defense Advanced Research Projects Agency Published the New Version of Strategic Plan that Revealed Eight Strategic Focuses and Nine Core Basic Technologies[J]. Modern Military, 2007(8): 17-21.
- [2] Defense Advanced Research Projects Agency. Breakthrough Technologies for National Security [R]. Arlington: Defense Advanced Research Projects Agency, 2015.
- [3] 李芳. 美国陆军研究实验室量子成像取得新进展[EB/OL]. 2014-01-09. <http://www.dsti.net/Information/News/86503.html>.
- LI Fang. U. S. Army Research Laboratory Made a New Progress in Quantum Imaging [EB/OL]. 2014-01-09. <http://www.dsti.net/Information/News/86503.html>.
- [4] Committee on Science, Technology, Engineering, and Mathematics Workforce Needs for the U. S. Department of Defense and the U. S. Defense Industrial Base. Report of a Workshop on Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Workforce Needs for the U. S. Department of Defense and the U. S. Defense Industrial Base [EB/OL]. 2012. <http://www.nap.edu/read/13318/chapter/5.html>.
- [5] JI Ling, GAO Jun, YANG Ailin, et al. Towards Quantum Communications in Free-Space Seawater [J]. Optics Express, 2015, 25(17): 19795-19806.
- [6] 吴华, 王向斌, 潘建伟. 量子通信现状与展望[J]. 中国科学, 2014, 44(3): 296-311.
- WU Hua, WANG Xiangbin, PAN Jianwei. Quantum Communication: Status and Prospects [J]. Science China Press, 2014, 44(3): 296-311.
- [7] 大数据治国战略研究课题组. 大数据领导干部读本[M]. 北京: 人民出版社, 2017.
- Research Group on Big Data Governance Strategy. A Big Data Book for Leaders [M]. Beijing: People's Publishing House, 2017.
- [8] GILBERT V, SHANNON C. Communication Theory of Secrecy Systems [J]. Bell System Technical Journal, 1949, 28(4): 656-715.
- [9] SHOR P W. Algorithm for Quantum Computation Discrete Log and Factoring [C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1994.
- [10] 苏晓琴, 郭光灿. 量子通信与量子计算[J]. 量子电子学报, 2004, 21(6): 706-718.
- SU Xiaoqin, GUO Guangcan. Quantum Communication and Quantum Computing [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(6): 706-718.
- [11] 王金东, 张智明. 量子密钥分发系统的现实无条件安全性[J]. 量子电子学报, 2014, 31(4): 449-458.

- WANG Jindong, ZHANG Zhiming. Unconditional Security of Quantum Key Distribution Based on Practical Devices[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2014, 31(4): 449-458.
- [12] 黄靖正. 量子密钥分配系统实际安全性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- HUANG Jingzheng. Practical Security Analysis of Quantum Key Distribution System[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [13] 何玲燕, 王川, 焦荣珍, 等. 量子通信原理及进展概述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 10(5): 466-471.
- HE Lingyan, WANG Chuan, JIAO Rongzhen, et al. An Overview on the Principle and Development of Quantum Communication [J]. Journal of CAEIT, 2012, 10(5): 466-471.
- [14] JI Ling, GAO Jun, YANG Ailin. Towards Quantum Communications in Free-Space Seawater[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 19795-19806.
- [15] 李承祖, 陈平形, 梁林梅, 等. 量子计算机研究——原理和物理实现[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- LI Chengzu, CHEN Pingxing, LIANG Linmei, et al. Research on Principle and Physical Realization of Quantum Computer [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [16] 苏彧. 网络军事力量建设加速网络争夺或将掀起新高潮[N]. 解放军报, 2018-01-12(004).
- SU Yu. Network Military Force Accelerates Network Construction or Will Set off a New Climax [N]. PLA Daily, 2018-01-12(004).
- [17] 贾伟涛, 李家安, 靳鹏辉. 略论网络空间作战[J]. 信息对抗学术, 2015(3): 31-33.
- JIA Weitao, LI Jia'an, JIN Penghui. On Cyberspace Warfare [J]. Information Confrontation Academy, 2015(3): 31-33.
- [18] 刘诗瑶. 量子通信, 中国领跑[N]. 人民日报, 2016-08-22(20).
- LIU Shiyao. China Leads Quantum Communication [N]. People's Daily, 2016-08-22(20).
- [19] 武获山. 后量子密码技术发展分析[R]. 江阴: 知远战略与防务研究所, 2017.
- WU Huoshan. Analysis of the Development of Post-Quantum Cryptography Technology [R]. Jiangyin: Knowfar Institute for Strategic and Defense Studies, 2017.
- [20] 胡晓峰, 荣明. 关于联合作战规划系统的几个问题[J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(4): 273-280.
- HU Xiaofeng, RONG Ming. Joint Operation Planning Systems: Issues and Prospects[J]. Journal of Command and Control, 2017, 3(4): 273-280.
- [21] NARAYANAN A, MOORE M. Quantum Inspired Genetic Algorithms[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Japan: Nagoya University Press, 1996: 61-66.
- [22] 张晨, 游晓明. 基于栅格模型机器人路径规划的量子蚁群算法[J]. 电子科技, 2016, 29(7): 1-4.
- ZHANG Chen, YOU Xiaoming. Improved Quantum ant Colony Algorithms of Path Planning for Mobile Robot Based on Grid Model[J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(7): 1-4.
- [23] XIE Renchao, LI Zishu, HUANG Tao, et al. Energy-Efficient Joint Content Caching and Small Base Station Activation Mechanism Design in

- Heterogeneous Cellular Networks[J]. China Communications, 2017, 14(10): 70-83.
- [24] MARCO L. 量子雷达[M]. 周万幸, 吴鸣亚, 胡明春, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- MARCO L. Quantum Radar [M]. ZHOU Wanxing, WU Mingya, HU Mingchun, et al, Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [25] 肖怀铁, 刘康, 范红旗. 量子雷达及其目标探测性能综述[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 140-145.
- XIAO Huaitie, LIU Kang, FAN Hongqi. Overview of Quantum Radar and Target Detection Performance[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(6): 140-145.
- [26] 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 Tao, SUN Jun. The Principle and Development of Quantum Radar Detection Target [J]. Journal of CAEIT, 2014, 9(1): 10-16.
- [27] MEHUL M, OMAR S. Magaña-Loaiza, R W B. Quantum-Secured Imaging [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(24): 1539.
- [28] 唐苏妍. 网络化防空导弹体系动态拦截联盟形成方法与机制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2011.
- TANG Suyan. Research on Dynamic Interception Coalition Formation Mechanism and Method in Networked Air Defense Missile Systems [D]. Changsha: Graduate School of National University of Technology, 2011.
- [29] 葛悦涛, 蒋琪. 量子雷达技术发展研究[J]. 战术导弹技术, 2014(4): 5-9.
- GE Yuetao, JIANG Qi. Research on the Development of Quantum Radar Technology [J]. Tactical Missile Technology, 2014(4): 5-9.
- [30] Innovate UK. £ 14 Million for Ground-Breaking Quantum Technologies [EB/OL]. 2017-07-31. <http://www.gov.uk/government/news/14-million-for-ground-breaking-quantum-technologies>.
- [31] UK Government Office of Science. The Quantum Age: Technological Opportunity [EB/OL]. 2017-01-10. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/564946.html.
- [32] ELIZABETH G. Europe Plans Giant Billion-euro Quantum Technologies Project [EB/OL]. 2017-04-26. <http://www.nature.com/news/europe-plans-giant-billion-euro-quantum-technologies-project-1.19796.html>.
- [33] NSTC. Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities [EB/OL]. 2016-07-24. <https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/images.html>.
- [34] National Quantum Initiative Act- H. R. 6227/S. 3143 [EB/OL]. 2018-11-27. <https://www.congress.gov/bills/115/congress/house-bill/6227>.html.
- [35] 张志强, 陈云伟, 陶诚, 等. 基于文献计量的量子信息研究国际竞争态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2018, 40(2): 37-49.
- ZHANG Zhiqiang, CHEN Yunwei, TAO Cheng, et al. Bibliometric Analysis on International Competitive Situation of Quantum Information Research [J]. WORLD SCI-TECH R&D, 2018, 40(2): 37-49.
- [36] 冯骥, 冯江源. 欧美国家量子通信技术前沿争

- 夺及其优势[J]. 国际研究参考,2013(3):1-5.
- FENG Ji, FENG Jiangyuan. Frontier Competition and Advantage of Quantum Communication Technology in European and American Countries [J]. International Research Reference,2013(3):1-5.
- [37]尹浩,马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京:军事科学出版社,2006.
- YIN Hao, MA Huaixin. Introduction to Military Communication Information[M]. Beijing: Military Science Press,2006.
- [38]许华醒. 迈向基于卫星的全球量子通信时代[R]. 北京:中国电子科学研究院,2013.
- XU Huaxing. Towards the Age of Satellite-Based Global Quantum Communication [R]. Beijing: China Academy of Electronic Sciences,2013.
- [39]PEEV M, LANGER T, LORUNSER T, et al. The SECOQC Quantum Key Distribution Network in Vienna[C]. New Jersey:IEEE Press,2009:1-3.
- [40]SASAKI M, FUJIWARA M, ISHIZUKA H, et al. Field Test of Quantum Key Distribution in the Tokyo QKD Network[J]. Optics Express,2011, 19(11):10387-10409.
- [41]张铃金,李薇濛,陈建光. 世界上第一颗发射后完全可编程卫星(欧洲量子卫星)即将离开英国进行集成(下)[EB/OL]. 2019-02-25. [http://www. dsti. net/Information/News/113942](http://www.dsti.net/Information/News/113942) 2019-02-25. html.
- ZHANG Lingjin, LI Weimeng, CHEN Jianguang. The World's First Fully Programmable Satellite After Launch (European Quantum Satellite) Is Leaving the UK For Integration (II). [EB/OL]. 2019-02-25. [http://www. dsti. net/Information/News/113942](http://www.dsti.net/Information/News/113942) 2019-02-25. html.
- [42]金晶. 欧洲航天局(ESA)和欧盟委员会(EC)共同签署欧洲量子通信协议[EB/OL]. 2019-04-12. [http://www. dsti. net/Information/News/114845](http://www.dsti.net/Information/News/114845) 2019-04-12. html.
- JIN Jing. European Space Agency and European Commission Signed the European Quantum Communication Agreement[EB/OL]. 2019-04-12. [http://www. dsti. net/Information/News/114845](http://www.dsti.net/Information/News/114845) 2019-04-12. html.
- [43]田甜. 美国防部将量子计算视为太空作战的关键武器[EB/OL]. 2018-08-15. [http://www. dsti. net/Information/News/111141](http://www.dsti.net/Information/News/111141) 2018-08-15. html.
- TIAN Tian. The U. S. Department of Defense Regards Quantum Computing As a Key Weapon in Space Warfare [EB/OL]. 2018-08-15. [http://www. dsti. net/Information/News/111141](http://www.dsti.net/Information/News/111141) 2018-08-15. html.
- [44]孙晓明. 量子计算若干前沿问题综述[J]. 中国科学,2016,46(8):982-1002.
- SUN Xiaoming. A Survey on Quantum Computing [J]. Science China Press, 2016, 46(8): 982-1002.
- [45]Mary-Ann Russon. Canada Developing Quantum Radar to Detect Stealth Aircraft[EB/OL]. 2018-04-24. [http://www. bbc. com/news/technology-43877682](http://www.bbc.com/news/technology-43877682).
- [46]Harris Corporation. Quantum Sensors Program [R]. Virginia: Defense Advanced Research Projects Agency,2009.
- [47]LLOYD S. Enhanced Sensitivity of Photo Detection Via Illumination [J]. Science, 2008, 321(5895):1463-1465.
- [48]SHAPIRO J F, LLOYD S. Quantum Illumination versus Coherent-state Target Detection[J]. New

- Journal of Physics, 2009, 11 (6) : 063045-1-063045-5.
- [49] 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, Florida; SPIE, 2009.
- [50] KEVIN McCaney. ARL's Ghost Imaging's Cuts Through Battlefield Turbulence [EB/OL]. 2014-01-06. <http://www.defensesystems.com>.
- [51] MADJID F H, MYERS J M. Lessons for Pulsed-array Radar from Quantum Light Detection [C]. Proceedings of SPIE Intense Microwave and Particle Beams III, Los Angeles; SPIE, 1993.
- [52] MYERS J M. Speaking of Sensing in the Language of Quantum Mechanics [C]. Proceedings of SPIE Quantum Information and Computation V, Orlandp: SPIE, 2007.
- [53] MALIK M, SHIN H, ZEROM P, et al. Quantum Ghost Image Discrimination with Single Photon Pair [C]. Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, Washington . D. C. ; Optical Society of America, 2009.
- [54] MALIC M, OMAR S M, ROBERT W B. Quantum-secured Imaging [J]. Applied Physics Letters, 2012, (101) : 241103-1-241103-4.
- [55] ALLEN E H, KARAGEORGIS M. Radar Systems and Methods Using Entangled Quantum Particles: U. S. , 11/198829 [P]. 2008-05-20.
- [56] JAMIE S. China's Claim It has Quantum Radar May Leave \$17 Billion F-35 Naked [EB/OL]. 2017-02-27. <http://www.news.com.au/technology/innovation/>.