

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.03.010

基于被动量子雷达的隐身目标探测研究

冯 胜¹, 胡光桃², 卢亚鹏³

(1. 北京无线电测量研究所, 北京 100854; 2. 重庆邮电大学, 重庆 400025;
3. 南京大学 电子科学与工程学院, 南京 210023)

摘要: 未来战场, 将是隐身武器的较量, 不论是有人机、无人机, 还是巡航导弹、弹道导弹, 都朝着隐身化方向发展。传统雷达在对付这些隐身目标时存在无法突破的性能极限。笔者将被动雷达与量子技术结合, 提出被动量子雷达, 分析其对隐身目标探测的机理。采取超导电路技术实现对微波光子量子转换处理, 并使用 SVI 和 PSA 量子增强接收技术, 以及 JPA 技术实现高灵敏度微波信号接收, 被动量子雷达可将系统灵敏度最大提高大约 4 个数量级。分析结果表明提出的基于被动量子雷达的隐身目标探测原理可行, 具有很强的应用潜力。

关键词: 量子雷达; 被动雷达; 隐身目标; 压缩态; 相位敏感放大

中图分类号: TN959.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2021)03-100-07

Study on stealth target detection based on passive quantum radar

FENG Sheng¹, HU Guangtao², LU Yapeng³

(1. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, P. R. China; 2. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400025, P. R. China;
(3. School of Electronic and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, P. R. China)

Abstract: There exist a contest of the stealth weapons in the future battlefields, and the manned plane or the unmanned plane, cruise missile or trajectory missile are all developing in the direction of stealth, which makes it difficult for the traditional radar to detect them. In this paper, the passive quantum radar was presented which integrated the quantum technique and passive radar, and its mechanism of stealth target detection was analyzed. Microwave signal was quantized by using the superconducting circuit technique and high sensitivity of the receiver was realized by taking full advantage of advanced methods, including SVI and PSA of quantum enhanced processing at receiver, as well as JPA technique. By using passive quantum radar, the system sensitivity had been improved almost by 4 order in comparison with that of the tradition radar. The analyzed results show that the proposed method of target detection based on passive quantum radar is feasible, and it has good applicable potential.

Keywords: quantum radar; passive radar; stealth target; squeezed state; PSA

收稿日期: 2020-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61571219)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(61571219).

作者简介: 冯胜(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事雷达系统、雷达信号数据处理等方向研究, (E-mail) fengshegn77rh@126.com

随着新型低可观测目标的产生以及雷达在复杂电磁环境下应用的需求,传统雷达在反隐身方面面临难以突破的技术瓶颈。因此,迫切需要探索新的雷达探测体制,建立新的目标检测理论和雷达架构,为目标探测技术的发展提供一条全新的发展道路。

反隐身探测技术通过以下途径实现雷达反隐身探测:一是增大雷达功率口径积;二是扩展雷达工作波段范围;三是扩展雷达的探测视角;四是采用多平台组网技术;五是采用新体制技术,例如量子雷达,被动雷达等^[1-5]。上述前四种技术途径在工程实现与应用时存在能力的限制,且费用较高。

量子雷达是雷达技术与量子技术相结合的一种新体制雷达,与传统雷达相比,它充分利用电磁波的量子特性来突破经典探测的性能极限,具有广阔的应用前景。国内外许多研究机构已在量子最优检测、量子增强接收、量子干涉及量子照明等方面开展了大量工作,取得一定研究成果^[6]。被动雷达由于利用对目标上携带的辐射源的电磁波信号的侦察,搜索和跟踪,实现对目标的探测,对目标探测具有隐蔽性以及探测威力大的优势^[7-8]。

将量子雷达中的量子技术与被动雷达相结合,实现对隐身类目标的探测将同时具备量子雷达和被动雷达的优势,一方面成本降低,另一方面将极大提高系统地探测能力。然而,相关机理分析及可行性尚未有公开的研究报道。

首先给出了量子雷达的定义,在此基础上探讨了量子技术与被动雷达相结合的机理,进一步,对被动量子雷达探测隐身目标的可行性开展了研究,最后,分析了基于被动量子雷达的隐身类目标探测性能。提出的被动量子雷达为隐身类目标探测指明了一个非常具有潜力的技术研究方向。

1 量子雷达基本概念及技术优势

1.1 量子雷达的内涵

量子雷达是将传统雷达技术与量子信息技术相结合,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。在发射端,量子雷达充分利用电磁波的量子统计特性,对其进行偏振态、相干态、Fock 态、纠缠态、压缩态等量子态的调制,将信号调制维度由传统的空、时、频推广至更高维的量子态。在接收端,量子雷达通过量子增强接收、量子最优检测等技术手段,优化接收机的噪声水平和检测能力;同时,利用量子态的相参特性进行接收,增强目标与噪声、杂波、干扰之间的差异,提升低可观测目标的检测概率。

1.2 量子雷达的分类及技术优势

量子雷达主要包括干涉式量子雷达、接收端量子增强激光雷达、量子照射 3 种量子雷达探测体制^[9]。

干涉式量子雷达利用 Mach-Zender 干涉式量子雷达模型,可以分析损耗、大气对量子雷达性能的影响。根据目前的分析结果表明,干涉式量子雷达的性能易受损耗、大气的影响。由于当前无法克服真实环境对干涉式量子雷达性能的影响,该体制的量子雷达应用前景非常有限。

对于接收端量子增强激光雷达,增强接收方式目前主要有两种。一种是利用分量变量两种态,例如,量子关联对。在其具体实施过程中,将光子对中的一个光子作为待测目标的照明光源。当对收集到的目标反射光对进行分析时,可利用光子对中另一个光子与目标照明光子之间的量子关联特性,降低系统收集到的噪声光子对接收器信噪比的影响。另一种是利用连续变量量子态,例如压缩态。在其具体实施过程中,利用参量过程产生的压缩真空态和相敏参量放大器提供的低噪声放大来提高雷达接收器的灵敏度。

基于量子照射的目标探测系统具有高灵敏度的优异特性。图 1(a)是采用经典光作为待测目标的照明光源时,接收器接收到的反射光既有来源于被测目标的,也有来源于环境中其他物体散射或反射的。当物体的反射光很微弱且淹没在环境噪声中时,经典照明方式无法可靠地提取出目标的信息。如图 1(b)所示,若采用一对纠缠的光束作为量子光源照明的光源,用其中一束照明待测目标,另一束作为辅助光与待测目标的反射光同时注入接收器。此时,接收器收到的目标反射光与辅助光发生量子相长干涉,输出有效信号;而进入接收器的噪声光子,则由于与接收器中辅助光束之间无相干作用而被抑制。

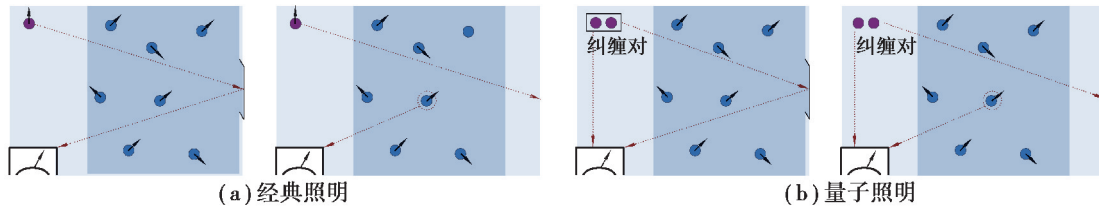


图 1 不同照明反射的接收器示意图

Fig. 1 Receivers of various illumination reflection

量子雷达在系统灵敏度,发射功率,探测手段和抗干扰等方面均有非常强的技术优势^[6-10];优异的系统灵敏度;更低的发射功率;更丰富的探测手段;更强的抗干扰能力。

2 被动量子雷达机理分析

被动量子雷达采用量子雷达的量子增强接收技术、被动微波量子雷达技术,以及被动雷达的智能分布融合处理技术,实现量子雷达与被动雷达的结合。

2.1 量子增强接收技术

在被动雷达的信号接收端引入量子增强策略来降低雷达接收端的噪声水平。如下面的图 2 所示,压缩真空输入 SVI 技术和相位敏感放大 PSA 技术作为利用量子现象的操作方法,联合作用能够有效地降低被动雷达接收端的噪声本底,进而提高了信号噪声比 SNR。

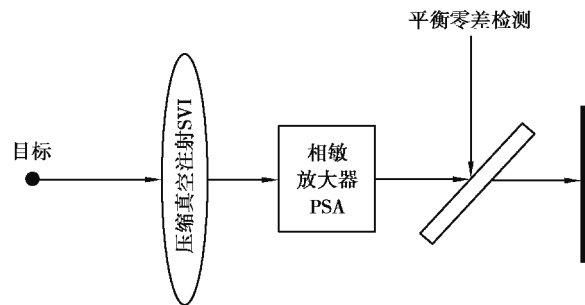


图 2 接收端 SVI+PSA 量子增强处理

Fig. 2 Quantum enhanced processing at receiver by SVI and PSA

采用量子增强接收技术,量子激光雷达能够有效地降低接收端噪声本底。采用类似于接收端激光量子增强雷达处理方式,在被动微波雷达中,运用量子增强接收技术。由于微波信号和激光均属于电磁波信号范畴,因此,原理上采用类似的量子增强技术能够降低被动微波雷达接收端的噪声本底,进而提高被动雷达系统探测灵敏度,增强系统的探测威力。

2.2 被动微波量子雷达技术

对于微波量子雷达,将其微波量子化处理技术作为量子雷达和被动雷达结合的枢纽。被动微波量子雷达的核心是对微波电磁波信号量子化,并利用量子雷达处理方式使得系统探测灵敏度能够接近 Heisenberg 极限,从而极大地提高系统探测威力,使得对远距离低辐射电磁波信号的隐身目标探测成为可能。微波量子雷达的核心是连接微波与光波的双腔转换器 EOM^[11]。

如图 3 所示,利用纳米振荡器实现微波与光波的耦合,可在信号传输过程中产生微波与光波信号的纠缠,并将探测目标返回信号从微波转换为光波。

微波量子雷达利用微波与光束之间的量子相关性进行目标探测,运行功耗比传统系统明显降低,可用于目标探测。被动量子雷达 EOM 转换器不是利用 EOM 转换器进行实现微波和光学的纠缠,而是利用 EOM 转换器的概念实现微波和光学的转换,将微波信号转换为光量子信号,在光量子上进行量子化处理。

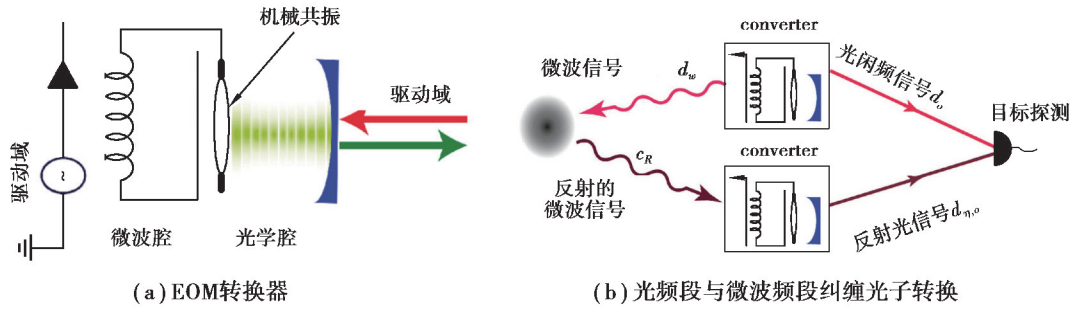


图 3 EOM 转换器示意图

Fig. 3 EOM Converter

2.3 基于微波光量子信号的目标探测

超导能隙低的材料具备探测微波波段入射光信号的可能。可以通过选择合适的超导材料,使得微波波段光子信号能量大于超导库珀对能量,即可实现微波光量子的探测。当前,最理想的适用于微波波段光子探测的超导材料是硅化钨。硅化钨的超导转变温度为 0.1 K,超导能隙为 3.5 Tc 非常低,高于 7 GHz 的入射光子可以很容易拆散超导硅化钨的库珀对。

约瑟夫森参量放大器(JPA)具备接近量子极限的噪声性能,成为微弱量子信号低温检测方面的有力工具^[12-15]。约瑟夫森参量振荡器(JPO)的锁相功能和 JPA 的自激振荡能够实现高保真 single-shot 测量。借助 pump 对 JPA 增益的影响,通过调节 pump 功率工作点,可以改善 JPA 器件的真空压缩性能,降低了量子测量的噪声。

如果 JPA 对微波量子信号的微弱信号放大 10 dB,则原理上可以对高于 0.7 GHz 的入射光子就可以很容易撤散超导硅化钨的库珀对。因此,原理上,可以实现携带工作频段在 0.7 GHz 以上的雷达信号的隐身类目标的电磁波信号的检测和目标的探测。

3 被动量子雷达可行性分析

3.1 量子增强接收技术

这里,主要利用现有实验室环境能够部分支持的被动激光量子雷达增强接收技术的机理分析。下面首先针对可见光波段,阐述 SVI 技术应用研究。被动光学雷达量子接收器原理见图 4 所示,待测目标的反射光进入光学参量放大器的信号输入端口,而参量放大器的另一个端口则注入压缩真空态以抑制放大器输出信号的噪声。被参量放大器放大的信号采用平衡零拍探测器进行测量,并通过数据采集系统分析探测其输出的光电流信号。

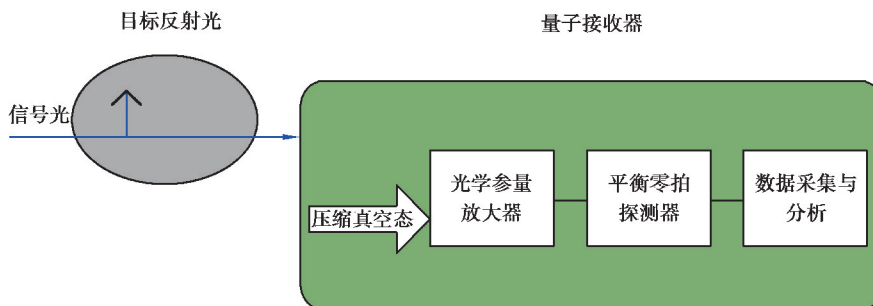


图 4 被动光学雷达的量子接收原理图

Fig. 4 Schematic diagram of passive optical radar at quantum receiver

如图 4 所示,被动光学雷达的核心是其绿色部分的量子接收器,它由如下 3 部分组成:有压缩真空注入的非简并光学参量放大器,平衡零拍探测系统,数据采集与分析系统。当量子接收器工作在最佳状态时,测

量的待测信号信噪比不仅优于传统的直接测量方法的结果,而且可以超越经典测量放大的极限。

完成光纤光学参量放大器 FOPA 的搭建和测试,并对其输出的信噪比进行了测试试验。试验中,经过 FOPA 放大后光信噪比相对直接测量具有显著提高,从图 5 看出信噪比提高了 6.8 dB。

3.2 被动微波量子雷达技术

1) 微波信号量子化制备

利用量子点半导体可以产生微波波段光子信号,即可以利用电子在量子点材料中能级间的跃迁产生微波光子信号。其原理如下:生长出单量子点的半导体材料,量子点的能级有基态 $|g\rangle$, 激发态 $|e\rangle$ 和中间态 $|R\rangle$ 和 $|L\rangle$ 。在这些态之间,偶极跃迁是允许的。利用点泵浦或者光泵浦,让电子从基态 $|g\rangle$ 跃迁到激发态 $|e\rangle$, 然后处于激发态的电子跃迁到低能级态就会发射出单个光子。

要想让这些光子频率处于微波频率段,可以采用带内跃迁,或者利用量子点中的高阶非线性效应,如四波混频。目前,对于单个微波光子研究比较多的是利用超导电路中的约瑟夫森结来产生单个光子。

在微波光子领域,JPA 可以被用在 4K 时宽带 HEMT 前端的作低噪声放大器,JPA 的惊人的信噪比改善已经在许多试验中被确认^[16]。另外,利用超导的可调谐共面波导谐振腔,可以通过测量谐振频率的变化来精确探测微波光子信号。

2) 微波量子信号探测

利用低超导能隙材料的超导单光子探测器来探测微波量子信号。制备纳米线的超导材料决定了探测器的根本性能,如图 6、7 所示。

超导单光子探测器工作时被偏置再稍低于超导临界电流的位置。当纳米线吸收光子信号后,吸收区域的超导态被破坏产生热岛,热岛区域在电流焦耳热的协助下增长到一定范围,随后经过纳米线自身和衬底的冷却,热岛区域消失,纳米线恢复到初始状态。探测器吸收光量子的过程在电路上表现为快速上升,随后指数衰减的电脉冲。通过此信号的放大,可以鉴别光子信号的到达。选择合适的超导材料,使得微波波段光子信号能量大于超导库珀对能量,即可实现微波光量子的探测。热岛模型如所示。

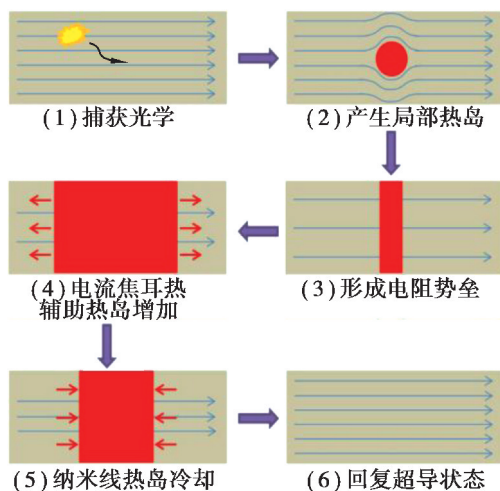


图 6 超导单光子探测器热岛模型示意图

Fig. 6 Heat island model of superconducting single-photon detector

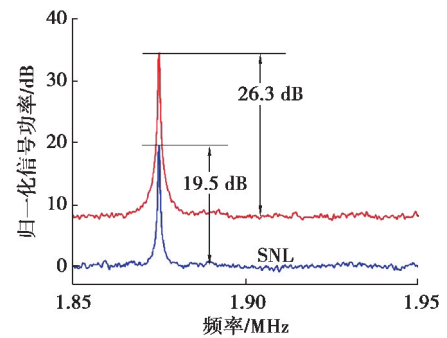


图 5 不经过 FOPA 和经过 FOPA 的测量信号比较图

Fig. 5 Comparison of the measurement signals without FOPA and with FOPA



图 7 Josephson 结制备设备

Fig. 7 Generation device of Josephson junctions

利用超导约瑟夫森结的宏观量子效应与非线性电感效应研制的约瑟夫森参量放大器 JPA, 通过参量调制电抗原件, 可以实现微弱信号的混频放大, 具有接近量子极限的噪声温度^[17]。约瑟夫森参量放大器 JPA 核心器件是由 2 个约瑟夫森结组成的 SQUID。JPA 的制备包括电子束蒸发膜设备, 用于制备 Josephson 结,

最为关键,Josephson 结制备设备示意图如图 7 所示。

在 JPA 测试和使用过程中,必须由稀释制冷机提供极低温的工作环境。目前已经能够稳定制备出带宽 10~20 MHz、增益达 20 dB 以上的 JPA 器件。该器件工作在简并模式下,增益受到信号相位调控,可以实现对微弱信号的放大和压缩。工作在非简并模式时,增益对信号相位变化不敏感,可以提供稳定的放大。目前,该典型 JPA 器件能够实现单个微波光子能量级别的放大,特别是对 -160 dBm~ -120 dBm 的微弱信号能够实现稳定的放大。

而对于目前常用的被动雷达,具有较高性能的雷达,其接收机灵敏度通常在 -83 dBm 左右(接收机噪声系数 5 dB,接收信号有效带宽 20 MHz,处理信号噪声比 13 dB 情况下),假设接收天线增益可以做到 40 dB(对于常规微波频段,例如 X 波段,这个增益指标已经特别高,常规天线技术工程实现起来非常困难),此时天线接收端接收到的信号在 -123 dBm。如果利用上述 JPA 技术,将提高系统灵敏度最高到 37 dB 左右,几乎提高 4 个数量级。

4 隐身目标被动量子雷达探测分析

对于被动量子雷达,利用量子增强接收技术来提高信噪比,借助被动微波量子雷达技术,在量子化处理机制上,在灵敏度极限上比传统微波雷达有大的突破。

在单站被动设备上,对目标上的微波电磁信号获取高精度、实时定位参数提取。在此基础上,精度最优化选取多站测量结果,并进行多站时差定位或者测向交叉定位,获取目标高精度位置。

考虑到隐身目标的低电磁辐射可探测性,因此,开始采用多源异构多站探测的数据进行智能融合增加对目标截获概率和探测稳定性。然后,采用量子增强接收技术、超导 JPA 极低微弱信号放大技术,提高目标检测信噪比 SNR,从而极大地增加了目标携带的辐射源信号的检测概率,提高了辐射源定位参数的测量精度。

考虑到隐身目标的低电磁辐射可探测性,采用多种定位方式,考虑基线 100 km,角度测量精度 0.05° ,时差测量精度 5 ns,频差测量精度 5 ns,典型布站方式下测量精度如图 8 所示。

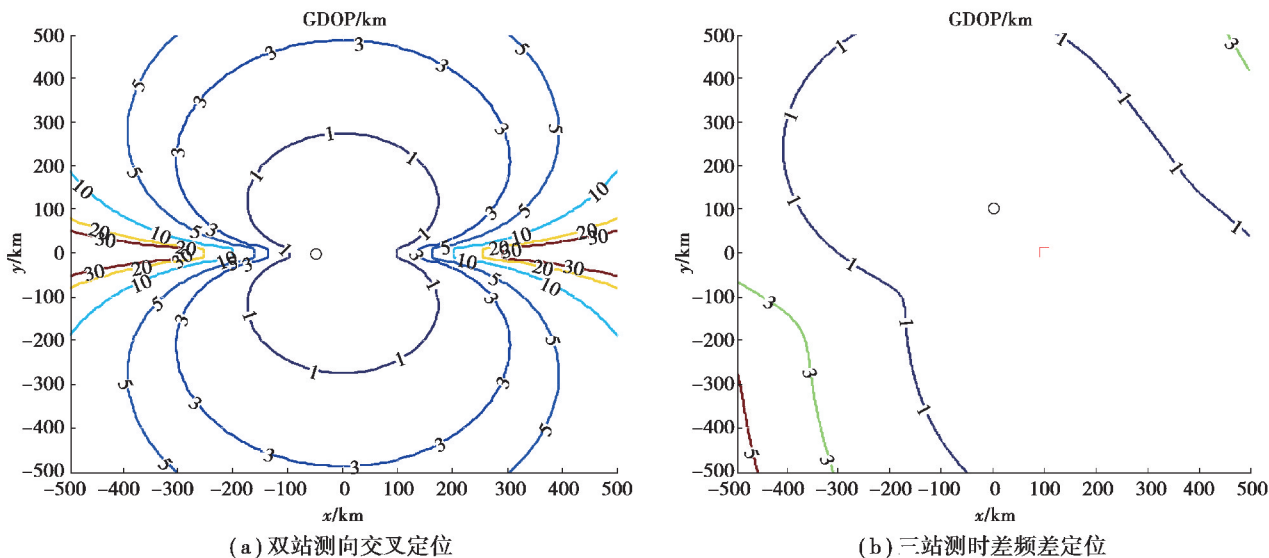


图 8 被动量子雷达定位精度示意图

Fig. 8 Location accuracy of passive quantum radar

5 结 语

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。量子增强接收技术的从机理分析上表明能够极大地提高雷达接收端的信号噪声比,进而提高被动雷达探测威力。被动量子雷达

使用超导电路技术实现对微波光量子转换处理,使用 SVI 和 PSA 量子增强接收技术,以及 JPA 技术实现了高灵敏度接收,能够实现量子接收技术与被动雷达有机地结合。

探讨了隐身目标探测的新机理雷达,提出的被动量子雷达,为新体制、新概念雷达,其为隐身类目标的探测提出了一条非常有挑战性的科学研究和工程实现的途径。

参考文献:

- [1] Richardson D. Stealth warplanes: deception, evasion and concealment in the air[M]. New Jersey: Zenith Press, 2001.
- [2] David L J. Introduction to RF Stealth[M]. SciTech Publishing, 2004.
- [3] 甘杰, 张杰. 隐身目标探测技术现状与发展研究[J]. 现代雷达, 2016, 38(8): 13-16.
Gan J, Zhang J. A study on situation and development of stealth target detection technology[J]. Modern Radar, 2016, 38(8): 13-16. (in Chinese)
- [4] Mohamed B, Peng Z. Optimisation for stealth target detection based on stratospheric balloon-borne netted radar system [J]. IET Radar Sonar Navig, 2015, 9(7): 802-816.
- [5] Habib J L. Quantum frequency-entangled optical spread spectrum for stealthy target detection and communications[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics 2011, Maryland, USA: IEEE, 2018.
- [6] 金林. 量子雷达研究进展[J]. 现代雷达, 2017, 39(3): 1-7.
Jin L. Research progress of quantum radar[J]. Modern Radar, 2017, 39(3): 1-7. (in Chinese)
- [7] Ma H, Antoniou M, Pastina D, et al. Maritime moving target indication using passive GNSS-based bistatic radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(1): 115-130.
- [8] Malanowski M, Borowiec K, Rzewuski S, et al. Detection of supersonic rockets using passive bistatic radar[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2018, 33(1): 24-33.
- [9] Lanzagorta M. Quantum radar[M]. Sam Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2011.
- [10] 王宏强, 刘康, 程永强, 等. 量子雷达及其研究进展[J]. 电子学报, 2017, 45(2): 492-500.
Wang H Q, Liu K, Cheng Y Q, et al. The advances in quantum radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(2): 492-500. (in Chinese)
- [11] Barzanjeh S, Guha S, Weedbrook C, et al. Microwave quantum illumination[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(8): 080503.
- [12] Lin Z R, Inomata K, Koshino K, et al. Josephson parametric phase-locked oscillator and its application to dispersive readout of superconducting qubits[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4480.
- [13] Krantz P, Bengtsson A, Simoen M, et al. Single-shot read-out of a superconducting qubit using a Josephson parametric oscillator[J]. Nature Communications, 2016, 7: 11417.
- [14] Kono S, Koshino K, Tabuchi Y, et al. Quantum non-demolition detection of an itinerant microwave photon[J]. Nature Physics, 2018, 14(6): 546-549.
- [15] Malnou M, Palken D, Vale L R, et al. Optimal operation of a Josephson parametric amplifier for vacuum squeezing [J]. Physical Review Applied, 2018, 9(4): 044023.
- [16] Nakamura Y, Yamamoto T. Breakthroughs in photonics 2012: breakthroughs in microwave quantum photonics in superconducting circuits[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 0701406.
- [17] Lu Y P, Xu W W, et al. Josephson parametric amplifier in readout of a superconducting qubit [C]// ASC2018 Poster, October 28-November 2, 2018 Seattle USA: IEEE, 2018.

(编辑 侯 湘)