

量子雷达技术介绍

临菲信息技术港

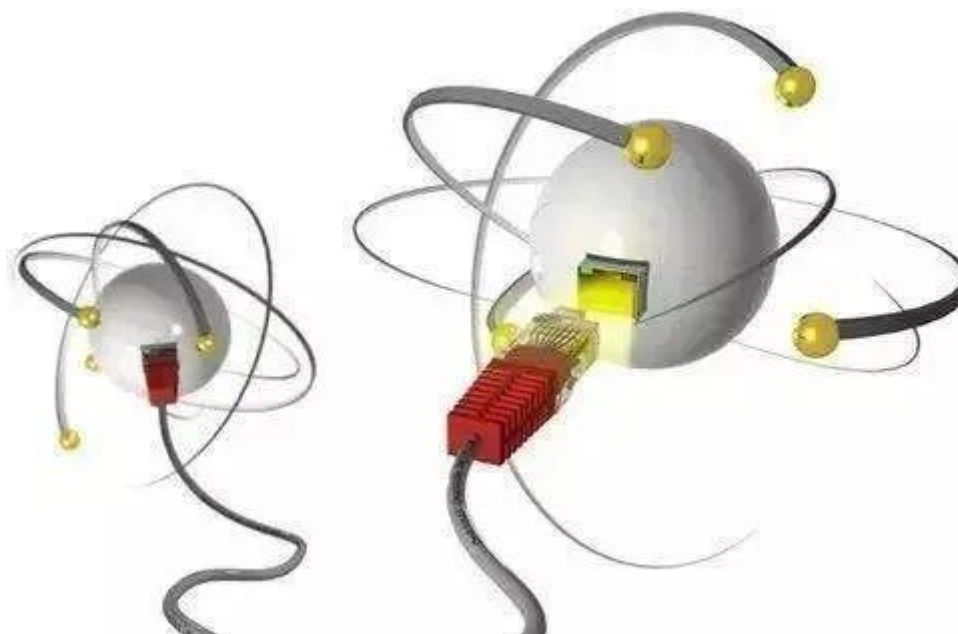
以下文章来源于云脑智库，作者相控阵老刘

最近笔者经常看到关于量子雷达技术的文章，为了搞懂这个知识，查阅了一些文献资料，简单整理下来供大家交流学习！

一、什么是量子雷达？

在介绍量子雷达之前首先科普下量子和量子纠缠：

量子（quantum）是现代物理的重要概念。最早是德国物理学家 M·普朗克在 1900 年提出的。他假设黑体辐射中的辐射能量是不连续的，只能取能量基本单位的整数倍。后来的研究表明，不但能量表现出这种不连续的分量化性质，其他物理量诸如角动量、自旋、电荷等也都表现出这种不连续的量子化现象。这同以牛顿力学为代表的经典物理有根本的区别。量子化现象主要表现在微观物理世界。



量子纠缠是粒子在由两个或两个以上粒子组成系统中相互影响的现象，虽然粒子在空间上可能分离。纠缠是关于量子力学理论最著名的预测。它描述了两个粒子互相纠缠，即使相距遥远距离，一个粒子的行为将会影响另一个的状态。当其中一颗被操作（例如量子测量）而状态发生变化，另一颗也会即刻发生相应的状态变化。爱因斯坦将量子纠缠称为“鬼魅似的远距作用”（spooky action at a distance）。但这并不仅仅是个诡异的预测，而是已经在实验中获得的现象。



中科大量子信息实验室的老大郭光灿院士曾经打过一个比方比喻，说在美国的女儿生下孩子那一瞬间，远在中国的母亲就变成了姥姥，即便她自己还不知道。之所以她是姥姥别人不是，而且她一定会成为姥姥，就是因为她和女儿之间有一种“纠缠”关系。

1. 概念

1934 年，美国海军研究实验室开发了世界上首部脉冲雷达之后，世界各国竞相发展了雷达技术，并一直在不断的完善、改进和探索。如要提高雷达的精确性并获得高质量的图像，雷达需发射更高频率的电磁波，然而经典雷达受到了经典电磁波理论的限制，所以需要发展一种新的雷达体制——量子雷达。从概念上讲，量子雷达是将量子信息调制到雷达信号中，发射/接收量子信号从而实现目标探测的量子传感器，可用于探测、识别和分辨射频隐身平台和武器系统等，并且理论上探测距离极远，可用于行星防御和空间探测。

简单来说，经典雷达通过发射电磁信号并接收目标反射的回波信号来感知目标位置、速度等信息。而量子雷达只将少数几个甚至一个光子作为信息载体对目标进行探测，利用的是光的粒子特性。

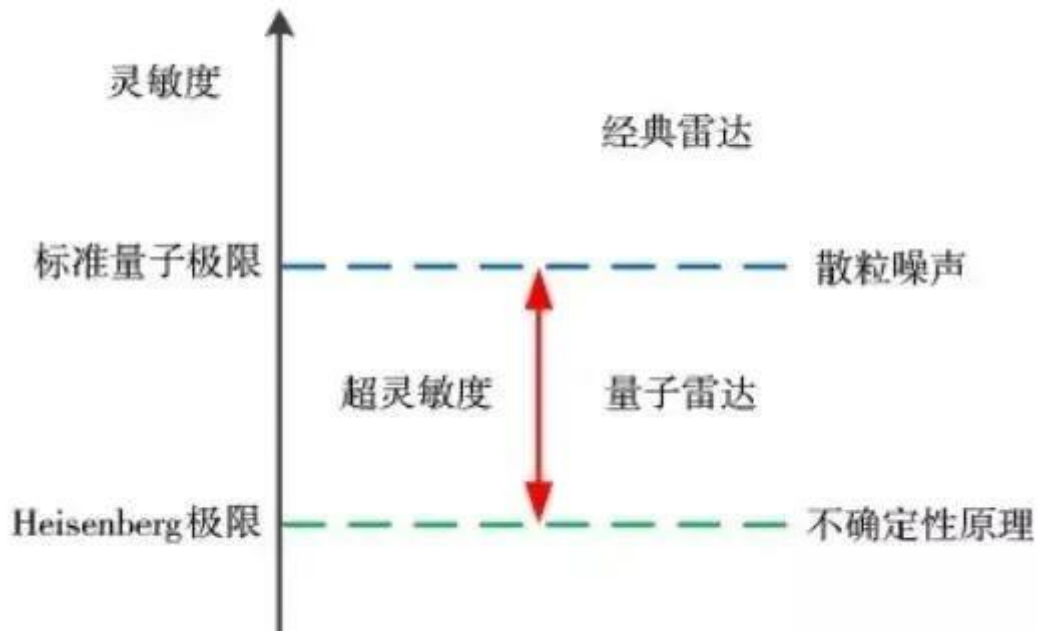
以隐形飞机为例，飞机依靠特殊的油漆和机身设计来吸收和偏转无线电波，使其对传统雷达不可见。但当它拦截量子雷达所发出光子后，光子原来的量子特征会被破坏，而由于光子的不可复制性，隐形飞机所发出的虚假信号也不能重新模拟出之前光子的物理特征。量子雷达只要通过对目标反射回来的单光子状态进行识别，就能识破其干扰行为。此外，量子雷达可发射纠缠态的电磁波，将纠缠光子对其中一个作为成像光子，另一个作为探测光子。进行探测时，成像光子留在量子存储器中，探测光子被发射出去，经目标反射后被量子雷达重新接受。这样根据量子纠缠的原理，通过比较纠缠光子对中两光子各自的量子状态，可显著提高雷达的探测性能。

与经典雷达相比，除了不易受干扰，量子雷达同时具有灵敏度更高、隐蔽性更强的优点。

经典雷达通过向目标发射电磁信号并接收目标调制的回波信号来实现测量。测量的精度（如距离、角度和速度等）信噪比极限为 N ， N 为信号中的探测到的平均光子数。由此，经典雷达的测量精度极限为 $1/\sqrt{N}$ ，由散粒噪声导致，称之为标准量子极限。

而量子测量的极限受限于量子世界的基本准则——不确定性原理，称海森堡极限。

如果在测量过程中采取一些策略，则测量灵敏度将有可能突破标准量子极限，并接近海森堡极限，即 $1/N$ 。当测量的灵敏度优于标准量子极限并接近海森堡极限时，则称其为超灵敏测量。



量子雷达的另一个好处是：由于它们发射的能量（光子）很少，因此很难被探测到。

现代所有的雷达都发射电磁辐射来探测物体。这种辐射也能使雷达本身被探测到。这很像在黑暗的房间里有许多人拿着手电筒，打开手电筒可以让你找到其他人，但是手电筒的光束会直接回到你的身上，暴露出你的存在和位置。

量子雷达不易受干扰、灵敏度更高、隐蔽性更强的优点，具有很强的现实意义。

2012 年，在美国 DARPA 单光子量子信息项目(Information in a Photon)的资助下，罗切斯特大学光学研究所成功研发出一种抗干扰的量子雷达，利用偏振光子的量子特性来对目标进行探测和成像。

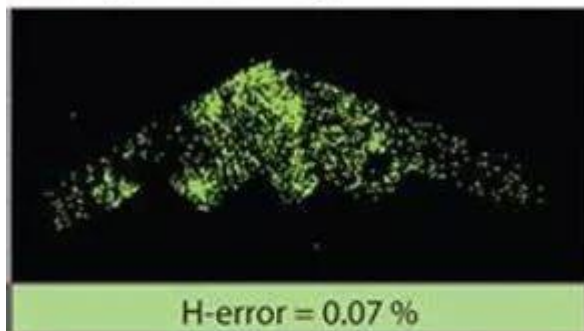
该研究团队宣称，由于任何物体在收到光子信号之后都会改变其量子特性，**这种雷达可轻易探测到隐身飞机，而且几乎不可被干扰。**

2012 年东京大学的团队采用超导回路，取得了微波频段单光子态与后续压缩态产生、接收技术的元件新突破。2013 年意大利的 Lopaeva 博士在实验室中达成量子雷达成像探测，证明其有实战价值的可能性。

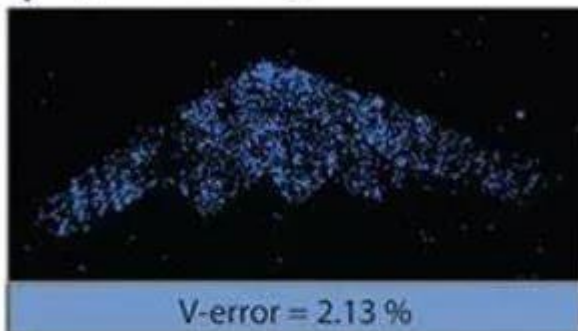
2016 年 8 月中国电科 14 所“智慧感知技术重点实验室”发布成功研制单光子检测量子雷达系统成品，在中国科学技术大学、中国电科 27 所以及南京大学等协作单位的共同努力下，完成了量子探测机理、目标散射特性研究以及量子探测原理的实验验证，并且在外场完成真实大气环境下探测试验，获得了百公里级探测威力，探测灵敏度极大提高，指标均达到预期效果。

(a) Secure Image

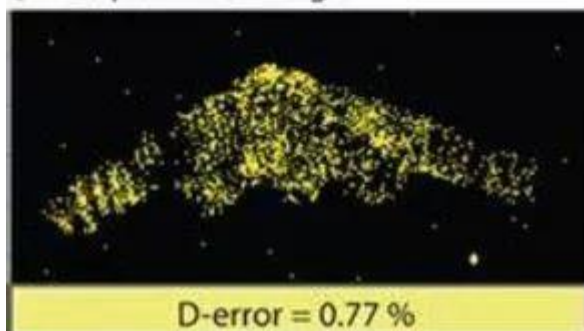
→ H-polarized Image



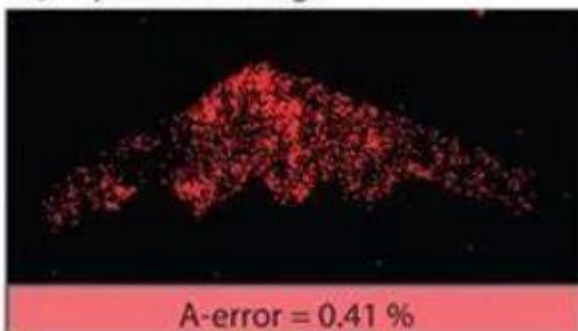
⊕ V-polarized Image



↗ D-polarized Image

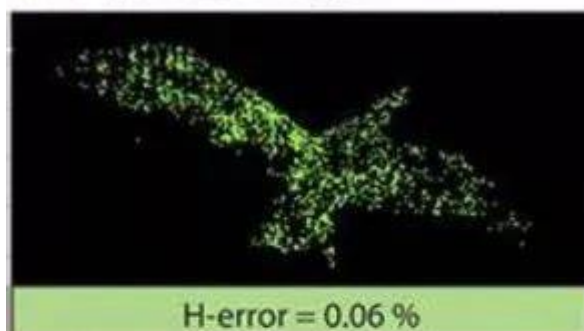


↘ A-polarized Image



(b) Compromised Image

→ H-polarized Image



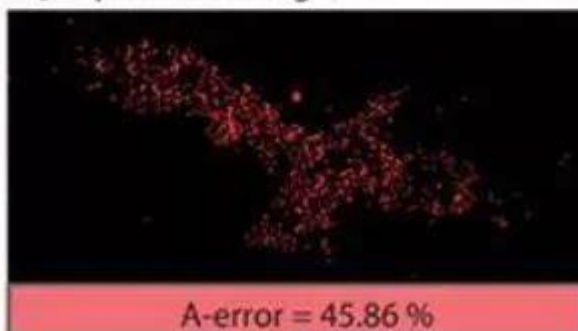
⊕ V-polarized Image



↗ D-polarized Image



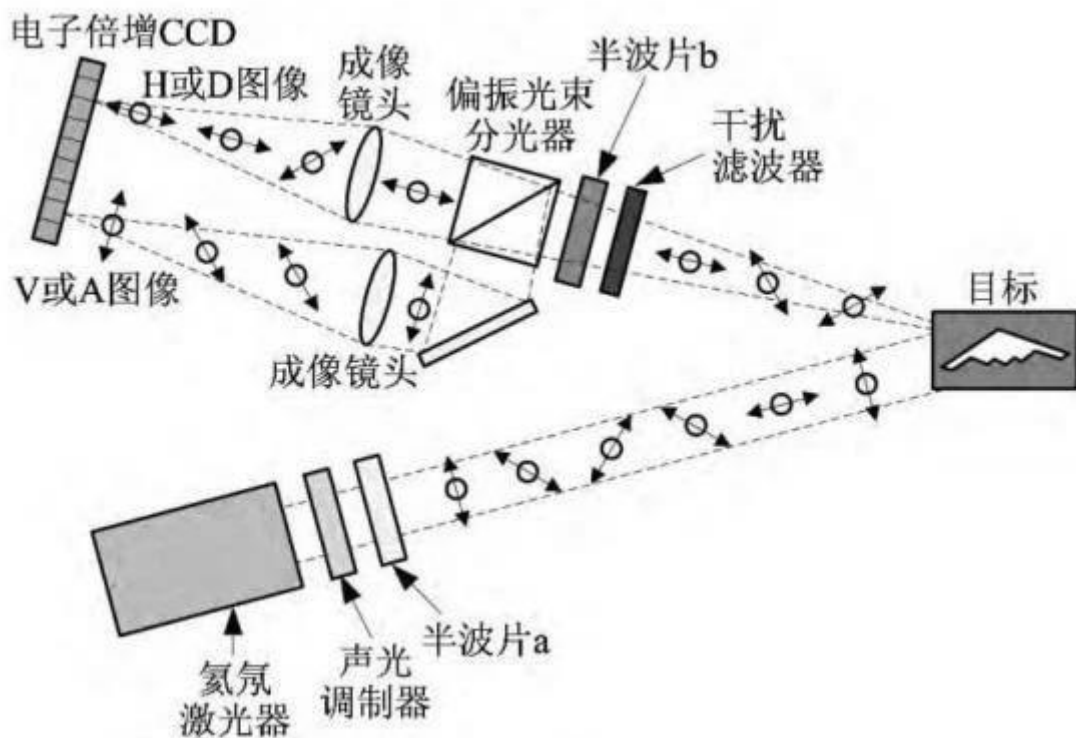
↘ A-polarized Image



2. 原理

在本项研究中，工程师们使用新型侦测技术能够揭穿频率干扰等反制手段，来自纽约罗彻斯特大学的研究小组展示了如何通过光子的量子属性来获得先进的反隐身技术。对此，麻省理工学院的科学家认为这项新的侦测技术依赖于任何一个测量光子的行为总会摧毁它自身的量子特性，由此就可通过破坏原来光子的量子特征来重新模拟出虚假的光子属性，以达到欺骗目的。

如果一架雷达隐形的飞机试图拦截这些光子并重新发送虚假信号，雷达回波仅相当于一只鸟的面积就可以掩盖自身的真实位置，但量子雷达在这一欺骗过程中也发现了敌方飞机的踪迹。这项新发明在技术工程上也有相似的运用，比如可以用类似的方式进行量子密钥加密，通过改变密钥的量子属性来达到目的。来自罗彻斯特光学研究所的科学家梅胡尔·马利克(Mehul Malik)利用该技术对远程隐形轰炸机进行反射光子测试实验，测量反射信号的极化错误率。



3. 用途

研究人员计划将来用该技术于识别**隐身**作战飞机，当截获到敌方防空雷达信号时，将信号的量子特征进行修改，并自动形成一只鸟的信号发送往敌方雷达，这样似乎可以达到传统的隐身目的，但新型量子雷达却很容易揭穿这一诡计。**麻省理工学院**的研究人员认为这是第一次使用**量子力学**研制的成像系统，成果是令人印象深刻的，可以不受到任何雷达干扰措施的影响。然而，量子侦测技术所需的设备可以由全球范围的实验室研制出来，但还没有装备到军队。

4. 分类

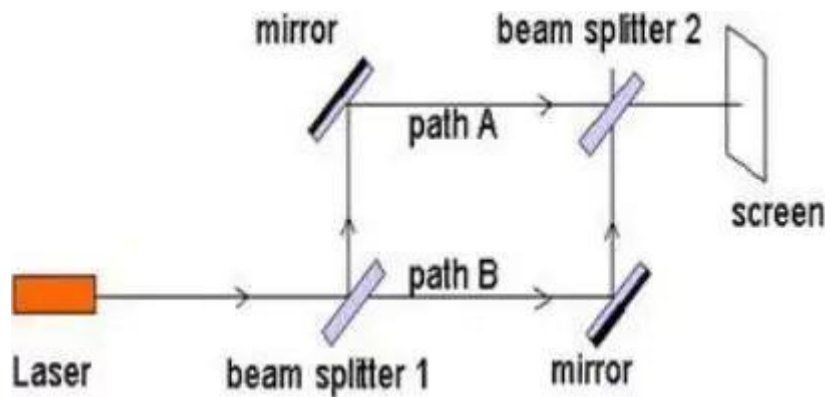
早在 1966 年，P. A. Bakut 首次提出在雷达系统中使用量子信号的可行性论证，在 20 世纪 80 年代，不断涌现出突破标准量子极限的研究进展。1991 年，美国海军提出了一种专利即利用量子探测器来提高传统雷达的灵敏度。

继而催生了量子测距、量子同步、量子传感和量子成像等新兴研究领域，并引起了美国国防高级研究计划局 (DARPA) 的关注，DARPA 在 2007 年启动了量子传感项目 (Quantum Sensor Program, QSP) 和量子激光雷达项目 (Quantum Lidar)，标志着量子雷达研究领域的正式形成。

21 世纪初，以麻省理工学院、路易斯安那州立大学、西北大学、德克萨斯大学、雷神 BBN 公司、哈里斯公司和 ITT 公司等研究团队为代表的研究人员提出了多种不同体制的量子雷达方案，主要包括干涉式量子雷达 (interferometric quantum radar)、接收端量子增强激光雷达 (quantum enhanced lidar) 和量子照射 (quantum illumination)。

最早被提出的干涉式量子雷达使用非经典光源 (纠缠或压缩) 照射目标区域，在接收端进行经典的相干检测。利用光源的量子特性，可以使雷达系统的距离分辨能力和角分辨能力突破经典性能极限。

我们可以通过 Mach-Zender 干涉仪进行相位测量。在该干涉仪中，来自输入端光源的光被分成两束，经两个不同的镜子反射后到达输出检测器 (屏幕)。通过测量两束光在输出端的相位差，可以确定目标的距离。



但是，通过研究发现，干涉式量子雷达的性能易受损耗、大气的影响。因此，在量子传感器项目的后期，DARPA 将研究重点转向了接收端量子增强激光雷达。

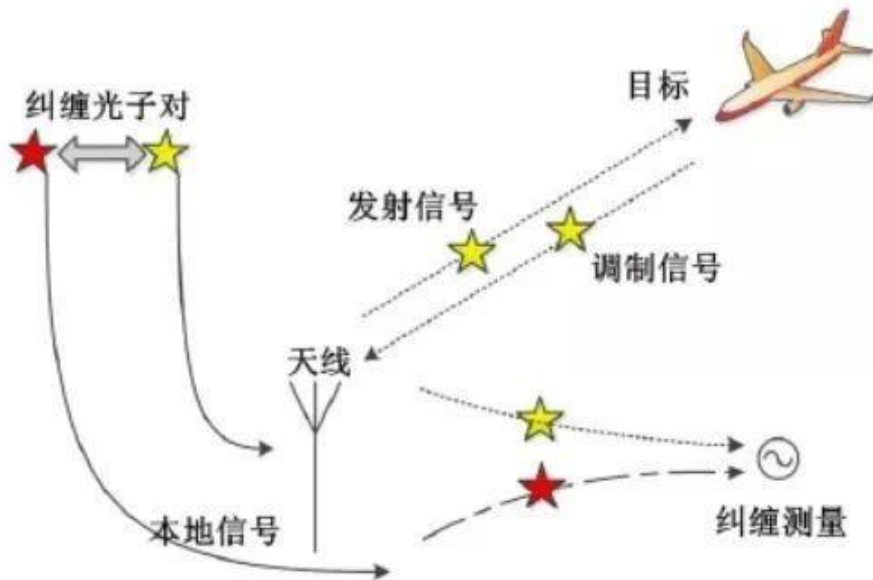
这种量子雷达与干涉式量子雷达不同，它采用经典光源扫描目标区域，在接收处理中，利用微观量子所具有高纬度相参特性，达到提高雷达的角度分辨率和增加雷达探测距离的目的。

接收端量子增强激光雷达是目前三种量子雷达方案中发展最快的一种方案，但理论上性能最好的方案是量子照射雷达。

量子照射雷达在发射信号中使用非经典光源扫描目标区域，在接收处理中，利用量子高纬度相参特性，进行量子最优联合检测，从而实现目标的高灵敏探测。

从 2008 年麻省理工学院的 Seth Lloyd 提出了基于量子照射的目标探测方案以来，MIT 的研究团队研究了基于高斯态的量子照射、量子照射目标探测系统接收机设计、量子照射目标探测系统的角分辨能力等问题。

目前的理论和实验研究表明，即使因为真实环境导致信号具有加大损耗，且存在背景噪声的条件下，基于量子照射的目标探测系统依然具有高灵敏度的优异特性。



量子照射示意图

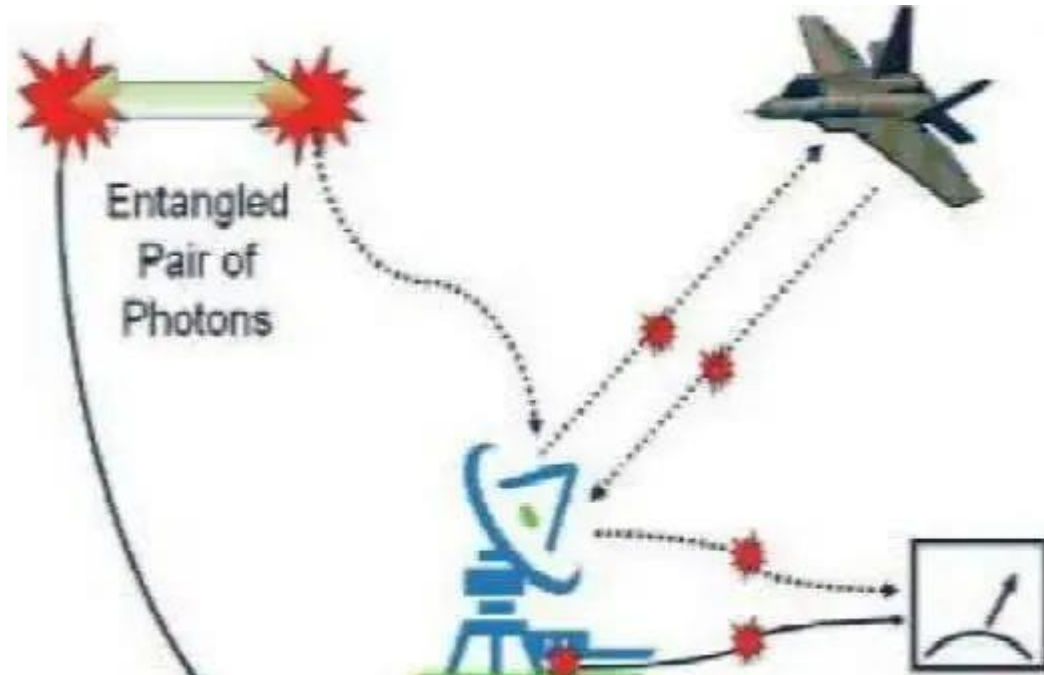
简单地说，干涉式量子雷达只在发射端采用非经典态（量子态）信息处理技术；接收端量子增强雷达只在接收端采用非经典态（量子态）信息处理技术；量子照射雷达发射端和接收端都采用非经典态（量子态）信息处理技术机都采用量子技术。

而相比之下，量子照射技术实现要复杂得多，但能极大突破现有雷达性能的极限，受到更大关注，近些年国内外的研究大都集中于后者。

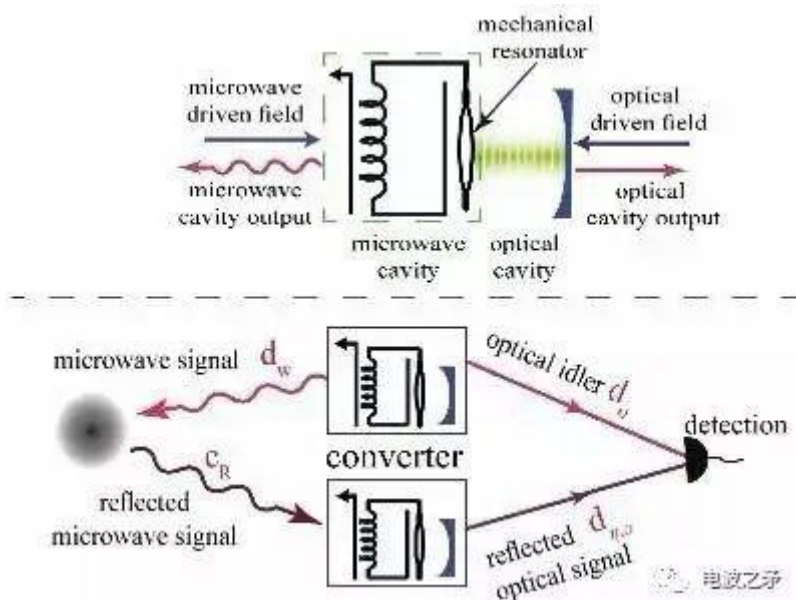
另外，根据探测信号形式的不同，量子雷达可以分为单光子探测量子雷达和多光子探测量子雷达。前者为一种理想的探测方案，其优点是几乎不受干扰，缺点是实现困难；后者虽然会受到一定程度的干扰，但实现起来相对容易些，具有更大的现实意义。量子雷达发射非纠缠的量子态电磁波。发射机发射单光子脉冲探测目标可能存在的区域，如果目标存在，则信号光子将会以一定的概率返回至接收机处，通过对返回光子状态的测量可以提取出目标信息。



量子雷达发射纠缠的量子态电磁波。其探测过程为利用泵浦光子穿过（BBO）晶体，通过参量下转换产生大量纠缠光子对，各纠缠光子对之间的偏振态彼此正交，将纠缠的光子对分为探测光子和成像光子，成像光子保留在量子存储器中，探测光子由发射机发射经目标反射后，被量子雷达接收，根据探测光子和成像光子的纠缠关联可提高雷达的探测性能。与不采用纠缠的量子雷达相比，采用纠缠的量子雷达分辨率以二次方速率提高。



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。



其他

为了占领战略制高点，洛克希德·马丁公司已经在 2008 年申请了相关的专利，该专利设想了纠缠不同的用途。目前的雷达系统变得和范围的增加用处不大，因为频率需要长距离传输不太敏感。根据专利这个问题可以通过在不同的频率缠结的光，然后一起发送出来作为束被除去。该专利表示：“纠缠雷达波可以进行更有效的传播

较低频率结合一个或多个颗粒具有相对高的频率分辨率，与一种或多种的颗粒。”然后，雷达波束可能会“通过传播不同类型的介质，解决不同类型的目标。



US007375802B2

(12) **United States Patent**
Allen et al.

(10) **Patent No.:** **US 7,375,802 B2**
(45) **Date of Patent:** **May 20, 2008**

(54) **RADAR SYSTEMS AND METHODS USING ENTANGLED QUANTUM PARTICLES**

(75) Inventors: **Edward H. Allen**, Lancaster, CA (US);
Markos Karageorgis, Palmdale, CA (US)

(73) Assignee: **Lockheed Martin Corporation**,
Bethesda, MD (US)

(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 187 days.

(21) Appl. No.: **11/198,829**

(22) Filed: **Aug. 4, 2005**

(65) **Prior Publication Data**

US 2007/0296953 A1 Dec. 27, 2007

(51) **Int. Cl.**
G01C 3/08 (2006.01)

(52) **U.S. Cl.** **356/4.01**; 356/28; 342/105;
342/118

(58) **Field of Classification Search** 356/28,
356/4.01

See application file for complete search history.

(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

5,796,477 A * 8/1998 Teich et al. 356/318
6,512,488 B2 1/2003 Schmitz
6,822,605 B2 11/2004 Brosche
6,864,827 B1 3/2005 Tise et al.
2001/0053608 A1 * 12/2001 Williams et al. 438/706
2002/0003213 A1 * 1/2002 Mukasa et al. 250/310
2002/0034191 A1 3/2002 Shattil
2003/0031279 A1 * 2/2003 Bloant et al. 375/346
2003/0043071 A1 * 3/2003 Lilly et al. 342/368

2003/0053071 A1 * 3/2003 James et al. 356/491
2003/0123045 A1 * 7/2003 Riegl et al. 356/401
2003/0133714 A1 7/2003 Gat
2003/0176176 A1 * 9/2003 Lemonen et al. 455/277.1
2005/0025200 A1 * 2/2005 Santori et al. 372/25
2005/0280814 A1 * 12/2005 Iuliano 356/301
2007/0002307 A1 * 1/2007 Zaugg 356/501

OTHER PUBLICATIONS

Kuklewicz et al., A High-Flux Entanglement Source Based on a Doulby-Resonant Optical Parametric Amplifier, pp. 1-12.
Titel et al., Violation of Bell Inequalities by Photons More Than 10 km Apart, Physical Review Letters, vol. 81, No. 17, pp. 3563-3566, Oct. 26, 1998.
S. Takeuchi et al., Development of a High-Quantum-Efficiency Single-Photon Counting System, Applied Physics Letters, vol. 74, No. 8, pp. 1063-1065, Feb. 22, 1999.
H. Lee et al., Entanglement Generates Entanglement: Entanglement Transfer by Interaction, Physics Letters A, 338, pp. 192-196 (2005).
K. Mishima et al., Entanglement in Scattering Processes, Physics Letters A, 333, pp. 371-377 (2004).
Miller et al., Demonstration of a Low-Noise Near Infrared Photon Counter with Multiphoton Discrimination, Applied Physics Letters, vol. 83, No. 4, pp. 791-793, Jul. 28, 2003.

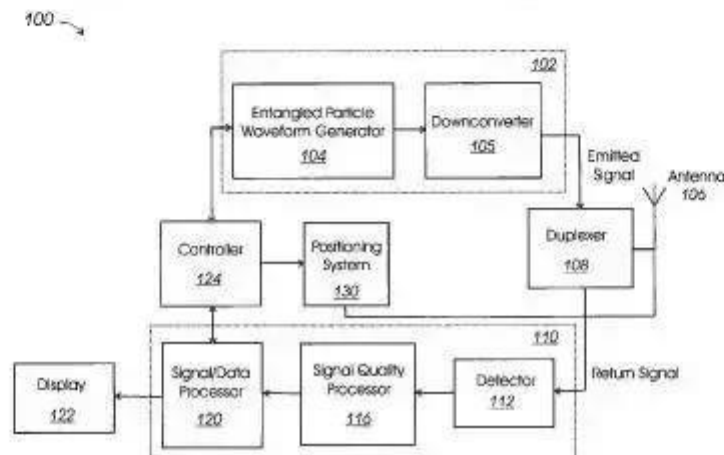
(Continued)

Primary Examiner—Thomas H. Tarcza

(57) **ABSTRACT**

An entangled quantum particle generator generates a signal including a plurality of entangled particles. The wavelength of the signal is the sum of the wavelengths of the entangled particles. A signal processor determines a characteristic of the target based on information derived from at least some of the entangled particles in the return signal. The frequency of the signal is selected to propagate the signal through a medium and the frequencies of the entangled particles are selected to provide sufficient data in the return signal to resolve the characteristic of the target.

27 Claims, 5 Drawing Sheets



量子雷达是将量子信息技术引入经典雷达探测领域，解决经典雷达在探测、测量和成像等方面的技术瓶颈，提升雷达的综合性能。量子雷达属于一种新概念雷达，首要应用是实现目标有无的探测，在此基础上可以进一步扩展应用领域，包括量子成像雷达、量子测距雷达和量子导航雷达等，从本质上来说，量子雷达并没有脱离经典雷达探测的框架体系，只是在利用量子理论进行系统分析时，对雷达中一些概念和物理现象，如接收机噪声等，

具有全新的、更准确的理解。在此基础上，量子雷达从信息调制载体和检测处理等方面入手，提升雷达的性能。总体而言，量子雷达是对经典雷达理论的更新和补充，

5. 优势

经典雷达存在一些缺点，一是发射功率大（几十千瓦），电磁泄漏大；二是反隐身能力相对较差；三是成像能力相对较弱；四是信号处理复杂，实时性弱。针对经典雷达存在的技术难点，量子信息技术均存在一定的技术优势，可以通过与经典雷达相结合，提升雷达的探测性能。

首先，量子信息技术中的信息载体为单个量子，信号的产生、调制和接收、检测的对象均为单个量子，因此整个接收系统具有极高的灵敏度，即量子接收系统的噪声基底极低，相比经典雷达的接收机，噪声基底能够降低若干个数量级。再忽略工作频段、杂波和动态范围等实现因素，则雷达作用距离可以大幅提升数倍甚至数十倍。从而大大提升雷达对于微弱目标，甚至隐身目标的探测能力。

其次，量子信息技术中的调制对象为量子态，相比较经典雷达的信息调制对象，量子态可以表征量子“涨落变化”等微观信息，具有比经典时、频、极化等更加高阶的信息，即调制信息维度更高。从信息论角度出发，通过对高维信息的操作，可以获取更多的性能。对于目标探测而言，通过高阶信息调制，可以在不影响积累得益的前提下，进一步压低噪声基底，从而提升噪声中微弱目标检测的能力；从信号分析角度出发，通过对信号进行量子高阶微观调制，使得传统信号分析方法难以准确提取征收信号中调制的信息，从而提升在电子对抗环境下的抗侦听能力。综合而言，通过量子信息技术的引入，通过量子化接收，原理上可以有效降低接收信号中的噪声基底功率；通过量子态调制，原理上可以增加信息处理的维度，一方面可以提升信噪比得益，另一方面可以降低发射信号被准确分析和复制的可能性，从而在目标探测和电子对抗领域具有广阔的应用潜力。

6. 难点

全世界可控的量子只有光子，也只能利用光子做量子雷达，但面临的技术难题有三个：

一是找到量子纠缠源，全世界最高超技术是中国科学技术大学做出来的 10 光子纠缠，10 个光子实在是啥也探测不到。

二是非经典信号的调制，就是操作量子进行编码，扩频等操作，这个问题超越了当前人类物理学发展的极限。

三是非经典信号的监测，该技术已有突破，可用单光子探测器和超导探测器，但还未完全成熟。

人类最先进的技术是在 2015 年 7 月由加拿大、美国、德国和意大利科学家取得的，他们使用了激光量子雷达发射了数个没有经过调制的光子，作用距离仅为 15-20 千米，根本无法用来真正探测目标，而且是在-150 摄氏度的环境下才能有效运转。

二、谁才是世界第一？

现在可以回答开篇时的问题了。一般来说，世界上第一个量子雷达系统是 2012 年罗切斯特大学研发的量子雷达，但技术处于非常早期的阶段。而 2020 年 5 月宣布的量子雷达是世界上第一个微波量子照射雷达。

量子照射雷达方案于 2008 年提出，2013 年意大利的 Lopaeva 等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高损耗时依然有目标探测能力。

2015 年，当时还在德国亚琛工业大学的 Shabir Barzanjeh 对微波量子照射探测进行了深入研究。Barzanjeh 现在是加拿大卡尔加里大学的副教授，也是今年 5 月发表的微波量子照射雷达文章的第一作者。

SHARE

RESEARCH ARTICLE | PHYSICS



Microwave quantum illumination using a digital receiver

S. Barzanjeh^{1,*†}, S. Pirandola^{2,3}, D. Vitali^{4,5,6} and J. M. Fink¹

¹Institute of Science and Technology Austria, 3400 Klosterneuburg, Austria.

²Department of Computer Science, University of York, Deramore Lane, York YO10 5GH, UK.

³Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA.

⁴School of Science and Technology, Physics Division, University of Camerino, Camerino (MC), Italy.

⁵INFN, Sezione di Perugia, Perugia Italy.

⁶CNR-INO, Florence, Italy.

[†]Corresponding author. Email: shabir.barzanjeh@ucalgary.ca

^{*} Present address: Institute for Quantum Science and Technology (IQST), University of Calgary, Canada.

– Hide authors and affiliations

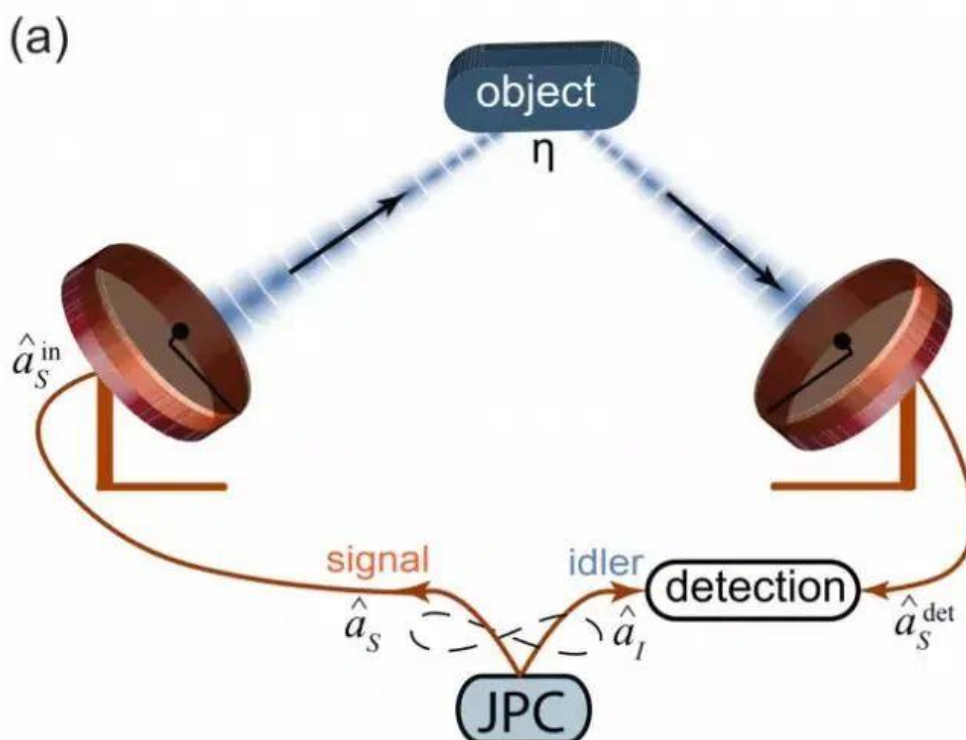
Science Advances 08 May 2020:

Vol. 6, no. 19, eabb0451

DOI: 10.1126/sciadv.abb0451

这项研究由奥地利科学技术研究所(IST)的 Johannes Fink 教授研究小组发起, Barzanjeh 也是成员之一。另外, 还有来自美国麻省理工学院、英国约克大学和意大利卡梅里诺大学的合作者。研究人员展示了一种称为“微波量子照射”(microwave quantum illumination)的新型探测技术, 它利用纠缠微波光子作为探测方法。

该系统从一个约瑟夫森参量转换器(JPC)开始, 该转换器位于一个稀释冰箱内, 它在仅高于绝对零度以上千分之一度 (-273.14 摄氏度) 的寒冷温度下产生纠缠微波光子。



研究人员用两组光子纠缠在一起，这两组光子被称为信号光子和闲置光子，而不是使用传统的微波。信号光子被发射到探测目标，而闲置光子是在相对隔离的情况下测量的，没有干扰和噪声。

当信号光子被反射回来时，信号光子和闲置光子之间的量子纠缠会丢失，但仍存在少量的相关性，以明确区分反射信号光子和背景噪声，从而产生一个特征或图案，描述目标物体的存在或不存在。

量子雷达受背景噪声的影响较小，并且功耗低，在探测远距离的目标时不会暴露自己。研究人员认为，该技术在超低功耗生物医学成像和安全扫描仪方面具有潜在的应用前景。

回过头来再说中国的量子雷达。早在 2016 年 8 月，中国电科宣布了首部基于单光子检测的量子雷达系统在 14 所研制成功，达到国际先进水平。

中国电科称“该量子雷达系统由中国电科 14 所智能感知技术重点实验室研制，在中国科技大学、中国电科 27 所和南京大学等协作单位的共同努力下，经过不懈的努力，完成了量子探测机理、目标散射特性研究以及量子探测原理的实验验证。”

研究人员在外场完成真实大气环境下目标探测试验，获得百公里级探测威力，探测灵敏度极大提高，指标均达到预期效果，取得阶段性重大研究进展与成果。

2018 年 11 月举办的第 12 届珠海航展上，中国电科首次公开展示首部单光子检测量子雷达样机。据工作人员介绍，属于量子增强型激光雷达。



据“中外舰闻”分析，该雷达是一部基于单光子检测的，工作在近红外光谱的量子增强技术的激光雷达。属于第二类量子增强型雷达和第三类量子照射雷达之间的产品。基于光的波粒二相性，为了提高探测介质的粒子特性而使用近红外频段的激光雷达，同时在接收端使用了量子增强技术。但由于未使用量子纠缠的技术，所以尚未达到真正的第三种量子照射雷达的阶段。

实用性也有待商榷，100 公里的探测能力不足以提供隐形飞机或导弹的防空需求，需要更大的探测范围才能达到最佳军事用途。

客观地说，今年 5 月由奥地利科学技术研究所提出的微波量子照射雷达系统，是一种更先进的量子雷达。不过，量子雷达总体上仍处在研究初期，还必须克服一些问题，目前没有一台具备实用性的量子雷达。

量子雷达的一个主要障碍是量子退相干问题，长时间暴露在外界环境中，量子系统就会失去其量子行为。这对现有的量子雷达系统施加了距离限制，因为距离越长，暴露在周围环境中的时间就越长。

国防科技大学国家安全与军事战略研究中心军事专家王群教授说：“量子雷达的研究总体上还非常初级，基本处在实验验证阶段，远未满足技术推广的程度和要求。”

比如，2007 年以来，美国国防承包商洛克希德·马丁公司就一直试图建造自己的用于远程探测的量子雷达，但没有公开的部署报告。

近年来在一些媒体报道中，多次提到“世界上第一个量子雷达系统”的字眼。实际上，目前各国对量子雷达的研究几乎处在同一起跑线上，因此“世界第一”尚不具备现实意义。

三、量子雷达在反隐身上的应用

想要缩小与西方国家的差距，必然需要一个明确的努力方向，中国一方面在追赶西方先进四代机的技术，另一方面又在致力于四代隐身战机的“克星”。如今我国的“量子雷达”进入实战化部署，显而易见这会成为最引人注目的反隐身武器。在中国突破了量子雷达技术难关的那一刻，国际上曾经炙手可热的隐身战机光芒已经逐渐暗淡。就连俄媒都为中国欢呼，表示对我国量子雷达的力挺。



量子雷达对传统电磁波雷达的工作原理进行仿制，但是在工作介质上却出现了彻明显的变化。传统的电磁波很难不受敌方干扰设备的干扰，失去作用的可能性很高。美国的电子战机就是钻了这个空子，才一再让对手的雷达预警系统瘫痪。



隐身战机之所以能吸收衰减电磁波，就是因为深知电磁波具备易衰减的特性，所以才设计了特殊的机身造型，选择了特殊的表面材料。和电磁波的光子不同，它结合了量子纠缠的特性，基本不会被地方发射的干扰光子所骗，进而达到不易被对手干扰的目的。



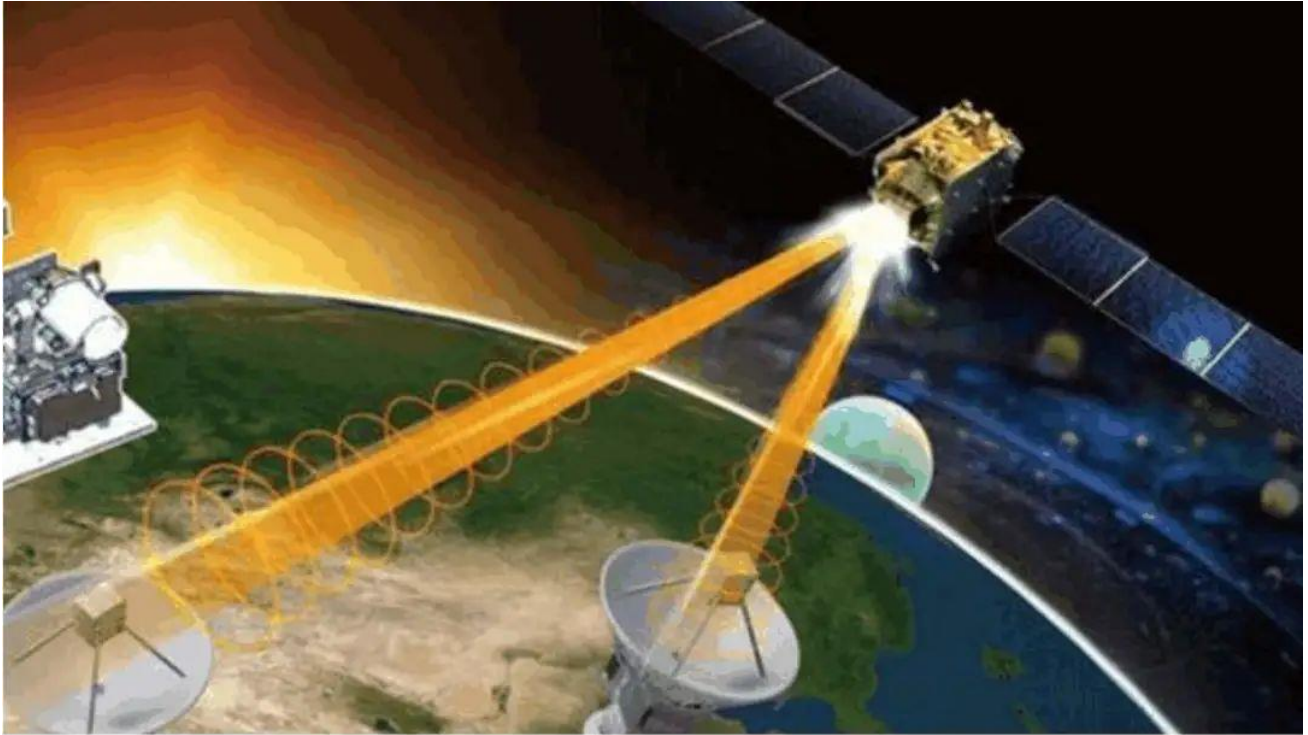
开机之后，量子雷达会生成大量的处于纠缠状态的光粒子，且通常一出现就是一对一对的。雷达会发射出探测光子，而量子存储器中会保留成像光子。光子被目标反射回来后，会与存储器里光子进行匹配，得出的数据可用来对目标的具体数据进行衡量。从基本原理上来讲，和传统雷达也差不了多少。



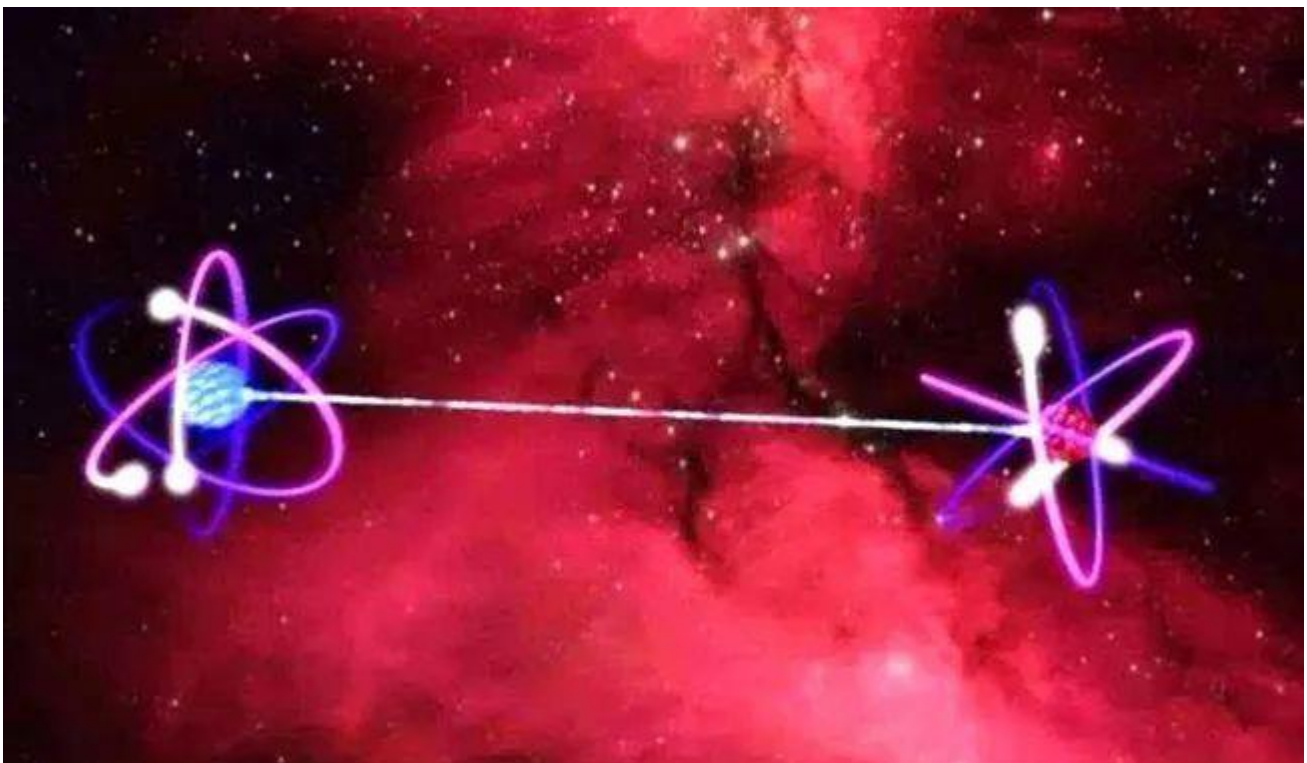
因为自然界里布满了光粒子，那些被量子雷达照射的目标难以察觉，所以它的隐蔽性要更好。光的特性给量子雷达带来不少好处，比如更远的探测距离，衰减的光粒子，较远的传播距离等等。据悉它甚至能用来对太阳系的边缘目标进行探测，它的传播速度可达到宇宙极限速度，超短的反应时间意味着它的预警能力不是一般的快，这对于实战来说具有关键意义。



当然，光的普遍缺点在它身上也体现的淋漓尽致，比如很容易被折射，那些光子被发射出去后很容易出现曼反射情况，或许那些被发出去的光子根本不会被雷达接收到。这倒是给研发下一代隐身战机提供了一种思路，但无可否认的是已经进行装备的四代机注定要被淘汰。



大多数国家都没有发展隐身战机的实力，倒是很想搏一搏开发量子雷达，这也给隐身战机的命运抹上了一笔悲哀的私彩。中国在量子雷达的研究问题上行走世界前端，量子探测机理与目标散射特性等实验都已完成。



我国部署的量子雷达能探测到数百公里外的目标，已经可以初步参与实战了，可见美国及其盟友换装四代机的步调已经落后了，如今的趋势是开发出针对量子雷达与传统电磁波雷达的隐身战机。



四、量子成像及量子雷达技术

量子成像又称为双光子关联成像、强度关联成像、鬼成像等，是利用量子纠缠现象发展起来的一种新型成像技术。由于微观客体的关联具有非局域的性质，可以延伸到很远的距离，在这种纠缠状态下即使分布于空间两个分离点的粒子也表现出相同的性质，如电荷、频率、极化等。

在军事和科学应用需求的牵引下，国内外在可见光、红外波段主被动强度关联遥感成像、微波关联成像雷达的研究方面竞争激烈，同时尝试将其应用于对地观测领域，以突破常规光学遥感和微波遥感的性能局限。

量子雷达是量子度量学的另一个重要研究方向，其本质是将光量子作为光频电磁波微观粒子对目标进行探测，利用它不同于常规雷达电磁波的物理特性，提升对目标的探测性能，同时提高雷达的抗干扰和抗欺骗能力。量子现象能够大幅度提高传感器灵敏度，促使量子传感器得到优先研发，如磁力计、光电探测器和密度计等。量子雷达比传统雷达的目标能见度更高，且量子旁瓣为射频隐身目标的探测提供了一种新方法。量子雷达具有优越的电子对抗性能，非常适合军事应用，因此受到各国军方的高度重视。

1. 量子成像的原理和优势

量子成像是基于双光子符合探测恢复待测物体空间信息的一种新型成像技术，其物质基础是纠缠的光子对。产生纠缠光子方法很多，其中自发参量下转换（SPDC）方法是最常用的一种。自发参量下转换双光子场是一种非经典场，它由单色泵浦光子流（Ar 量子激光器）和量子真空噪声对非中心对称的非线性晶体的综合作用，使得每个入射光子以一定概率自发地分裂为能量较低的两个光子，由这些在时间和空间上高度相关的光子对所构成的场就是自发参量下转换双光子场。它具有从泵浦波频率一直到晶格共振频率的宽范围光谱分布。

现有的研究表明，光量子的纠缠特性并不是实现量子成像的必要条件，热光源同样可以实现量子成像。但是，由于光场关联形式的差异，热光子成像的可见度较低且热光子成像遵循的高斯成像公式与纠缠量子成像公式不同。当物体和成像透镜都在同一个光路中时，纠缠量子成像与两个光路的纵向距离之和有关，而热光子成像和两个系统的纵向距离之差有关。对于相同的物距，两种量子成像的放大率是相同的，但是成像的位置不同。

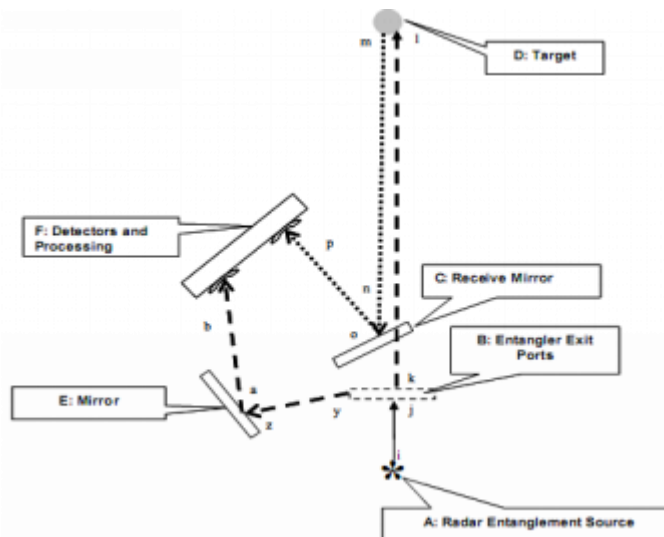
量子成像比常规的激光全息成像更方便。但是,量子成像需要的成像时间较长,一般要几秒钟时间,不适于快速成像的场合,而且就目前的技术而言,产生大量的纠缠光子对还有困难,不过随着量子信息技术的发展,这些问题都有望解决,因此量子成像将成为成像领域中的一个重要分支。要在红外波段获得高分辨率图像很难,使用量子成像却能很容易获得成像效果良好的图像,所以量子成像技术将以其高清晰的图像在航空探测、军事侦察、远红外成像等领域发挥重要作用。

2. 量子雷达的原理和优势

传统雷达利用电磁波的波动性,通过测量目标回波的幅度、频率、相位、极化等参数来获取目标信息,但由于它们不能详细反映目标信息的空间序列特性,因此探测能力有限。根据电磁波的波粒二象性,如果对其粒子性进行测量,可以获得信号的动量和位移,其中包含了目标信息的空间序列特性。以此作为目标探测的信息载体,将会获得目标状态的大量精准信息,这就是量子雷达的工作机理。凡是采用微波光子进行远程目标探测,利用光子的某些特性来提高其探测、识别和分辨目标能力的电子系统就称之为量子雷达。

量子雷达的探测信号是原子中的电子从一个能级跃迁到另一个能级时辐射的电磁波,它具有特定的状态,一般是指电子的自旋。多个已知自旋状态(相当于信号编码)的电子辐射电磁波,该电磁波经目标反射后被接收机接收。接收机通过分析电子吸收反射波后自旋状态的改变规律,可以获取目标信息。所以,电磁波与电子自旋状态之间的关系及其持续时间很重要,它决定了量子雷达的探测能力和探测距离。

一个典型量子雷达的工作原理图,如图所示。



量子雷达具有常规雷达无法比拟的灵敏性,这是因为信息以量子信息的形式调制在单个光子状态上,接收机识别单个光子的能量模式,而常规雷达的信息是调制在大量光子组成的电磁波上,接收机识别大量光子组成的能量模式,因此量子接收机对信息的感知更灵敏。当量子光特性转换成真空波动时,会影响到电磁场幅度的测量,所以现代大多数传感器的灵敏度都受到标准量子极限的限制。而量子雷达采用纠缠光子时,可以克服标准量子极限限定的相位测量极限,达到海森堡极限,这就是其重要的超灵敏性。

量子雷达的另一个显著优势是其固有的抗干扰性。这来源于光量子的一个奇异特性,即在测量光子的同时往往会改变其量子特性,通过对量子特性的检测可以发现是否受到干扰,这对雷达对抗日益严重的欺骗式干扰非常有效。

量子雷达未来的工作频段最可能处于微波频段(如X波段),从而继承了微波的许多优点,如微波光子能够穿透云层和雾气,具有全天时、全天候的工作能力,比光学传感器具有更好的穿透性,使导弹制导、海事监测、气象、地面警戒和机场交通导航等成为其潜在的应用领域。

3. 量子成像的研究现状

1994年,巴西的Ribeiro等人通过参量下转换的动量纠缠光源,以符合计数的方式观测到第一例双光子干涉条纹,1995年美国马里兰大学史砚华小组也通过参量下转换获得的动量纠缠光源,观察到鬼干涉和衍射,这些工作揭开了量子成像研究的序幕。

2002 年, Rochester 大学的 Bennink 等人巧妙利用一个随机旋转的反射镜反射激光, 得到了和量子符合成像类似的结果, 虽然没有解释经典光源实现鬼成像的原因, 但这项工作却引起了人们的极大关注。

2004 年 Bennink 等人又通过经典相关光重现了物体的衍射图, 但在实验中对实验装置做了改变, 如成像物体的位置、棱镜设备等, 以确定量子纠缠是否是实现鬼成像和鬼干涉实验的必要条件。

上海光机所的程静、韩申生从理论上分析了利用高斯随机分布光源做关联成像, 并提出 X-Ray 光源的实现方案。2004 年底, 类热光作为光源实现了关联成像的实验。吴令安等人完成了真正热光的符合成像实验。关于经典热光源和量子纠缠光源成像的讨论还在继续。最终会形成统一结论。由于热光场量子成像在现有技术条件下更容易转化为实际技术, 因此更引人关注。

量子成像受到国际学术界的广泛重视, 据不完全统计, 目前世界上已有 10 多个著名实验室在开展量子成像理论与技术的研究, 欧盟从 2001 年起就专门设立了包括 12 个子课题在内的欧盟量子成像研究计划(QUANTIM 项目), 并于近期又启动了后续研究计划。目的是研究量子纠缠光束的空间性质对光学成像和信息并行处理的影响, 并探索利用量子成像技术突破当前成像品质极限的方法, 以达到最终的量子极限。美国国家自然科学基金会、美国海军研究局、国家航空和宇宙航行局以及美国国防部的国防先进技术研究计划署等机构均给予量子成像研究大量的资助。2005 年, 美国国防部组织美国多所国际一流大学, 启动了针对国防应用需求、包含量子成像系统及量子成像技术两个层次共 8 个子课题的量子成像大学联合研究计划 (MURI 计划), 美国波士顿大学还成立了专门的量子成像实验室。

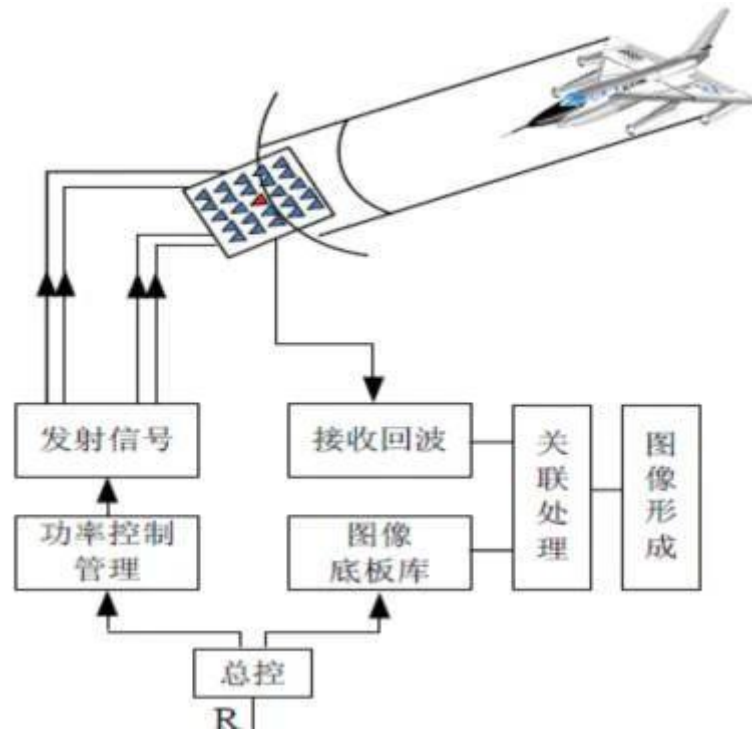
在上述欧美各国的量子成像研究计划中, 强度关联成像都是其中的重要研究方向。2005 年美国马里兰大学的史砚华小组提出了将强度关联成像技术应用于空间对地观测的设想, 并获得了美国军方的大力支持。2009 年 11 月美国国防部新闻网站又报道了美国陆军装备研究实验室 (ARL) 开展强度关联遥感成像研究的最新进展。此外, 从美国麻省理工学院量子成像课题组的报告及其它相关课题组研究论文中披露的信息来看, 除被动式强度关联遥感成像研究外, 美国有可能也已经开展了 (或即将开展) 主动式光学强度关联遥感成像雷达及新概念微波强度关联凝视成像雷达的研究工作。

将量子成像应用于遥感探测领域, 可以同时为目标进行探测和识别, 并具有成像速度快, 抗侦察、抗干扰、抗反辐射导弹能力强的优势, 还可以对动、静目标成像, 因此具有很好应用前景。

4、量子雷达的研究现状

量子雷达的概念是量子信息理论在遥感探测领域的具体应用, 通过对量子不同物理特性的观测和测量, 可以构成不同原理和形式的量子雷达。根据系统采用的量子效应的不同, 可以把量子雷达分成三种基本类型, 即发射非纠缠态光子的量子雷达、发射量子态光并与接收机中的光量子纠缠的量子雷达、发射经典态光但使用量子光探测提升性能的量子雷达。

在量子雷达领域出现的单光子量子雷达采用了非纠缠态光子, 工作过程与传统雷达类似, 由量子雷达发射机向目标发射单个光子, 经过目标反射后被雷达接收机接收并进行测量。这种量子雷达的优点是, 当发生的脉冲中包含的光子数目较少时, 目标的雷达散射界面被放大, 有利于探测小尺寸目标, 而且信号几乎不受干扰, 效率极高。基于光的纠缠态的量子雷达可以发挥量子雷达的最大优势, 发射机向目标辐射纠缠光子对中的一个光子, 另一个光子留在雷达系统中, 辐射出去的光子经目标反射后被雷达接收机接收, 测量光子纠缠态所包含的相关性, 可以提高系统的探测性能。



1) 干涉量子雷达

干涉量子雷达类似于一个干涉仪，目的是测量两个输出波束的光子数来计算相位延迟。目前研究的测量方法有量子干涉测量法、衰减量子干涉测量法、可分离态测量法、大气量子干涉测量法等。理论研究表明，使用高纠缠态的干涉相位测量可以达到海森伯极限；只有在无衰减的情况下衰减量子干涉测量法才能获得海森伯极限；而对于可分离态即使没有衰减也无法突破标准量子极限。研究人员仔细研究了大气衰减对量子干涉测量相位误差的影响，结果表明采用 NOON 状态的基本量子干涉测量法进行远程相位估计可能受到大气衰减的严格限制，单独的 NOON 态不足以建立实用的干涉测量的量子雷达。

由于大气衰减的影响，NOON 状态的使用不足以保证量子雷达的超级灵敏度，因此美国海军研究室（NRL）的 J.F.Smith 开发了一种自适应光学校正方法，在大气的电磁性能发生显著变化时可使超级灵敏度的范围达到 5000km。

2) 量子照明

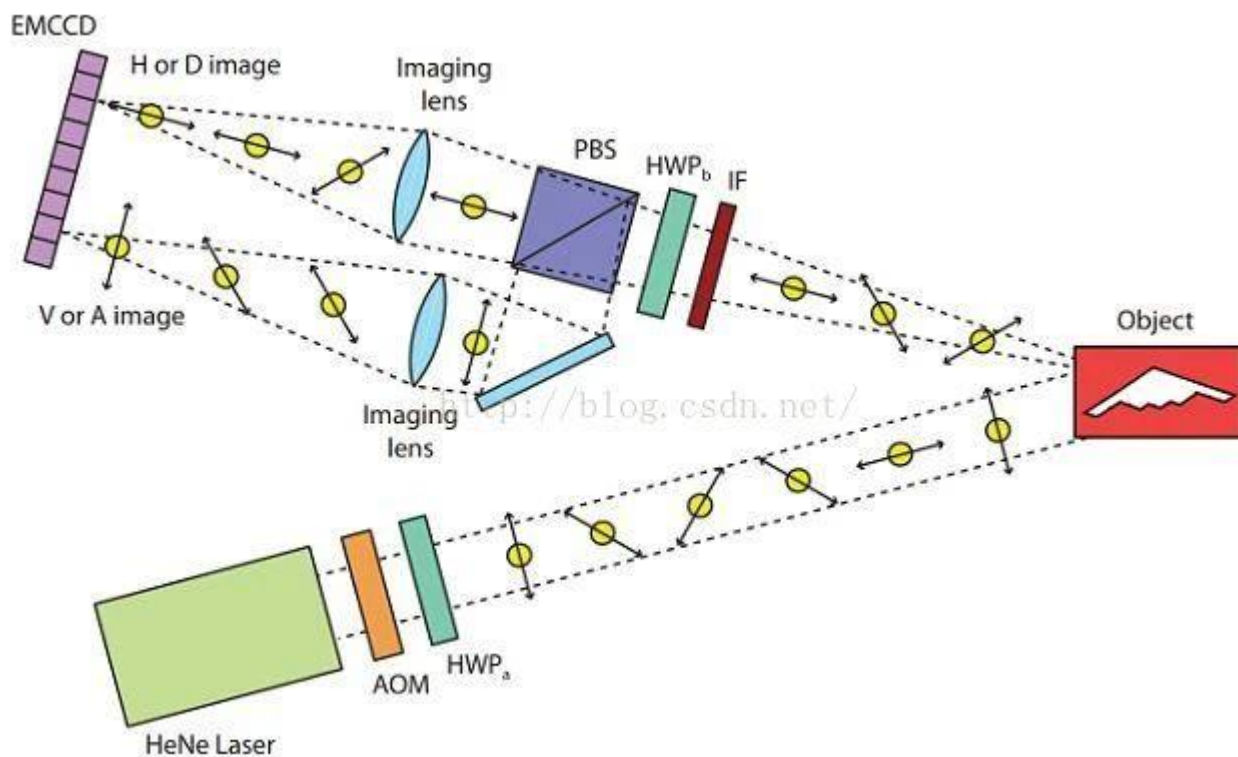
量子照明是 MTI 的 S.S.Lloyd 发明的一个革命性的远程光子量子传感技术，它提高了光在嘈杂和耗散环境中的光电探测灵敏度。理论上，量子照明不局限于任何特定的频率，可以被量子雷达使用。研究结果表明，纠缠可以提高检测系统的灵敏度，而且在嘈杂和耗散的环境中表现更明显。

3) 量子雷达散射界面

在量子信息技术提高常规雷达探测性能的激励下，一些研究者提出了实现量子雷达的方案，并申请了专利。如 Lockheed Martin 在其专利中提出了一个基于量子纠缠原理的扫描仪概念；专利号为 EP1750145 的一项欧洲专利描述的量子雷达是“使用纠缠量子的雷达系统和方法”。为验证这些方案和雷达性能的提高，研究人员们作了一系列有益的实验探索。

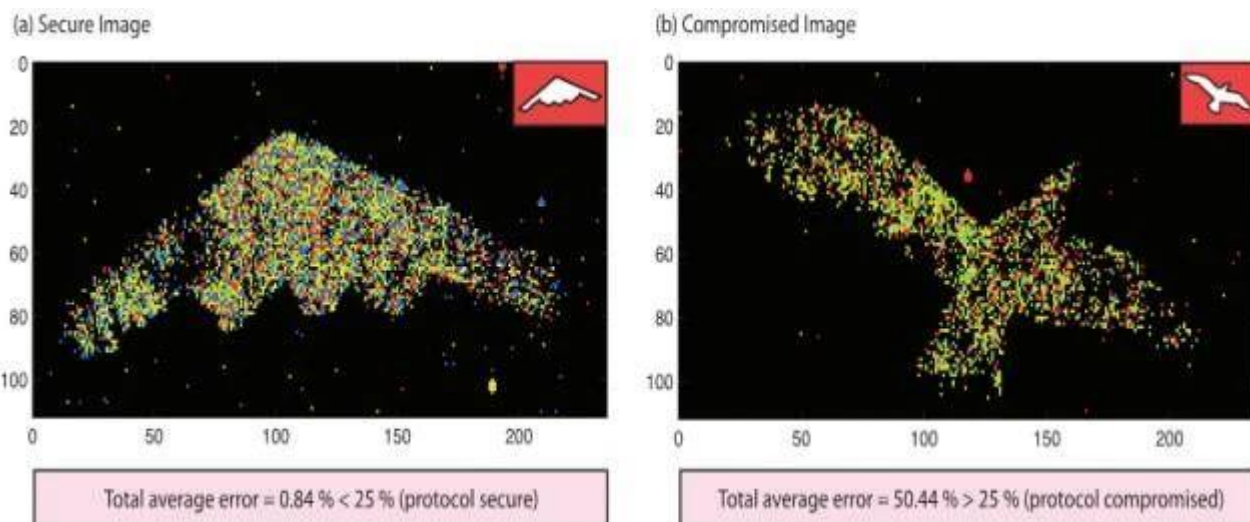
2012 年，美国罗彻斯特大学光学研究所的 Mehul Malik 等人建立了一个成像系统，利用光子的位置或飞行时间信息对目标进行成像，利用光子的极化检测来发现欺骗干扰。其基本原理是，干扰者在实施欺骗干扰时，必然会扰乱成像光子微妙的量子态，从而在极化特性检测时引入误差，根据误差可以判断是非受到干扰。

这个安全成像系统的结构如图所示。HeNe 激光器发出一个极化单光子脉冲，经目标反射后，通过干扰滤波器 (IF) 进入电子增强 CCD 相机 (EMCCD)，其中的半波平板 (HWP) 和极化波束分解器 (PBS) 用于适当的极化基测量，EMCCD 作为单光子检测器可以得到四个极化测量的图像。



图：基于光子极化检测的安全成像系统结构图

联合这四个极化图像可以得到目标的图像，如图所示。图（a）为一个隐身飞机的真实图像，其中不同颜色的像素点对应于不同的极化；图（b）为受到欺骗干扰后的成像结果。通过检测光子的极化误差率，成像系统很容易检测到人为干扰的存在与否，如图（a）的平均误差率为0.84%，远小于25%的安全限，因此成像结果是安全的，而图（b）的平均误差率高达50.44%，表明受到了人为干扰，图像不可信。



图：基于光子极化检测的安全成像系统的结果

量子的远距离传输一直是影响量子通信和量子雷达发展的关键技术之一，近年来研究人员通过各种试验装置增加量子的传输距离，已由最初的16Km扩展到97Km。研究人员用紫外光激发水晶，制造出纠缠光子，使其穿越了青海湖，达到了前所未有的传输距离，进一步研究光子的远距离传输，达到通信和雷达工作所需要的传输距离仍是今后的研究课题。

美国等军事大国和一些著名的研究结构非常重视量子雷达的研究，如美国国防高级研究局（DARPA）提出了“量子传感器计划（QSP）”；美国海军研究办公室（ONR）近期专门组织了一场研讨会，讨论量子雷达的科学性；美国海军实验室（NRL）的研究发现，即使考虑大气衰减，工作于 9GHz 的量子雷达理论上也可以提高目标探测能力；荷兰莱顿大学的一个研究小组提出了一种机械装置方案，可利用量子点产生纠缠态的微波光子；西班牙 Pais Vasco 大学已经开发出多个工作在微波的单光子探测器的理论模型。

5、量子成像的关键技术

作为一类正在探索的全新概念的成像技术，量子成像虽然在突破奈奎斯特采样定理限定的图像获取效率和成像孔径衍射极限的超分辨能力方面的得到了实验验证，并逐渐进入应用实验阶段，但仍有大量的基础性问题需要研究，这些问题包括：

1) **基于图像稀疏特性的量子成像的超分辨理论极限。**主、被动量子成像原理方案的超分辨能力已经获得实验验证，并对其机理做了定性解释，但还缺乏一个经过实验考核的定量理论。

2) **主动量子成像中的线性无关光源数、目标图像稀疏度和成像分辨率之间的关系。**在量子成像的应用模式中，稀疏阵列发射和接收将会大大降低系统复杂度，提高目标图像的获取速度，其原理演示已经完成，但是还缺乏一个可以将其与 MIMO 雷达和稀疏阵列天线理论统一起来的完整的理论体系。

3) **量子成像中时域-空域探测模式的自由转换和实现方法。**传统的强度关联成像的一个缺点是只能通过时域的多次测量来获取目标图像，在遥感应用中更适合于凝视成像。该技术在更多遥感场合中的应用很大程度上依赖于其时域-空域探测模式的自由转换程度，即可以单点探测/多次采样成像，也可以多点探测/一次采样成像。

4) **强干扰环境下量子成像的高效数据图像复原算法、欠采样和临界采样时的图像复原以及探测模式的最优化问题。**

5) **可直接进行目标识别的量子成像方案。**因为利用目标稀疏先验的量子成像可以直接探测压缩后的目标图像，因此可以将其与目标特征识别结合起来，在目标探测阶段直接进行目标特征识别。

6) **量子成像探测灵敏度的量子极限。**在压缩感知中可以直接探测压缩后的图像数据，因此（特别对遥感应用而言）其探测灵敏度的量子极限就是一个需要重新研究的新课题。

6、量子雷达的关键技术

1) 量子信息调制

量子信息调制包括量子信道编码、量子信息调制和量子信号发射。其中，量子信息编码又包括电子自旋态辨识和量子信息编码，电子自旋态辨识就是要通过一定的方法产生 100% 单一极化的自旋状态，目前的方法还不能满足这一要求；量子信息编码的目的是通过量子编码纠正或防止量子信息论中普遍存在的消相干引起的量子错误。量子信息调制就是将电子的自旋与激发出的电磁波特性进行关联（如电磁波的频率和极化形式），实现电子自旋态在电磁波上的调制。由于在解调量子信息时要测量微观粒子的状态，这会引起量子状态的变化，从而模糊原有的调制信息，因此在调制量子信息时必须考虑如何消除量子态的变化引起的调制信息丢失，这也是量子信息调制要解决的关键问题之一。

2) 量子信息解调

量子信息解调包括量子信息解调和量子信息解码，其中量子信息解调就是从发射的光子（电磁波）中辨识出电子的自旋态。目前主要是通过光学方法或电学方法来探测自旋极化，其中光学方法包括光致/电致发光、Hanle 效应、时间分辨的 Faraday 旋转和 Kerr 效应，电学方法是利用铁磁材料和半导体界面的自旋以来的输运性质，比如测量通过不同磁化方向的铁磁电极的电阻差来给出自旋极化度。量子信息解码主要是纠正微观粒子状态变化引起的编码错误。所以，电子自旋态辨识和编码纠错是量子信息解调要解决的关键问题。

3) 量子信息处理

量子雷达通过调制、传输、解调所传递的目标信息，最终要通过量子信息处理器提取出来。由于信息载体和传递的信息量均不同于传统雷达，因此在处理内容、处理方法和处理速度上也不同于传统信号处理器，主要取决于量子计算和量子计算机技术的发展。当前的量子信息处理是通过构造量子算法和量子神经网络来获得一定的应用，远不能满足量子雷达的要求。因此，构建新的量子信息处理方法和体系结构是实现量子雷达的一个关键问题。

无论量子雷达的系统结构如何变化，其工作过程都包括量子信息的调制、解调和传输过程，与这些过程有关的量子态特殊性都需要研究，如量子的纠缠特性、相干性、量子微弱能量的接收与处理等。

结 语

量子信息技术是当前科学攻关的主要领域之一，美国、日本、欧洲等国家很早就意识到它的军事和民用价值，不断加大投入，促进理论研究成果向实用技术转化。近几年来，有关量子计算、量子通信、量子雷达等方面的研究论文突然增多，昭示着该领域研究热潮的到来。未来量子信息技术的主要应用领域将瞄准安全信息传输、高速信息处理、武器控制、网络攻击、目标探测以及更深入的思维模拟与攻击等方面。

今天就到这里了，后续会持续关注这个方向，有新的进展在和大家分享交流！

参考文献：

1. 百度百科 <https://baike.baidu.com/item/%E9%87%8F%E5%AD%90%E9%9B%B7%E8%BE%BE>
2. 量子雷达，谁才是世界第一？ https://m.sohu.com/a/424330391_120762490?_trans_=010004_pcwzy
3. 公众号：电波之矛
4. http://k.sina.com.cn/article_6242886630_1741ae3e600101yrxp.html
5. 量子成像与量子雷达技术，《中国电子科学研究院学报》第9卷第1期



临菲信息技术港



临菲信息技术港公众号



临菲学堂



临菲少年