太赫兹单光子雷达探测技术

罗成高, 刘康, 王宏强*, 邓彬

国防科技大学电子科学学院, 长沙 410073

*联系人, E-mail: oliverwhq@163.net

收稿日期: 2020-07-06; 接受日期: 2020-08-25; 网络出版日期: 2021-04-07

国家自然科学基金(编号: 61701513, 61971427, 61921001, 61871386)资助项目

摘要 太赫兹单光子雷达信号检测门限为单光子尺度, 具有极低的噪声水平和极高的探测灵敏度, 有望显著提升现有太赫兹雷达系统的作用距离. 本文首先介绍了太赫兹单光子雷达探测技术提出的背景, 系统阐述了其原理、特点以及现状, 然后提出了直接探测与外差探测两种典型的系统实现方式, 并给出了一种雷达系统设计思路, 最后分析了当前太赫兹单光子雷达探测技术面临的关键问题, 讨论了其在雷达增程、远程防空预警、反隐身等领域的潜在应用. 研究成果有望为突破太赫兹雷达在探测能力与作用距离等方面的技术瓶颈提供一条可行的技术途径, 并进一步推动太赫兹探测机理、方法、体制和器件的创新发展, 最终为太赫兹技术在军事和民用领域的发展应用提供强大动力.

关键词 太赫兹, 单光子雷达, 光子计数

PACS: 84.40.Xb, 07.57.Hm, 07.57.Kp, 42.50.Ar, 42.50.Lc

1 引言

雷达探测技术作为一种全天时、全天候、远距离的信息获取手段, 在防空预警、精确制导、空间监视、对地观测、安检反恐、无人驾驶等军事和民用领域有着非常广泛和重要的应用, 已成为诸多国家竞相发展的关键技术. 传统微波雷达由于频率较低、波长较长、带宽有限、角分辨率低, 难以利用有限的天线孔径对目标进行精细探测.

“太赫兹”一词正式出现于1970年^[1]. 太赫兹(Terahertz, THz)波频率范围覆盖0.1–10 THz, 对应光子能量为0.414–41.4 meV. 近年来, 随着太赫兹波产生、探

测、传输等技术的逐步发展, 太赫兹技术已经成为雷达探测领域的研究热点. 太赫兹波处于电子学向光学的过渡频段, 相比于光波, 对烟雾穿透性更好, 且对空间目标高速运动产生的热环境效应与气动光学效应不敏感, 可用于空间高速运动目标探测; 相比于微波, 具有更短的波长和更大的绝对带宽, 能够实现对探测目标方位向细节的精细表征和距离向的高分辨成像, 具有极高的“空时频”分辨力^[2,3]. 因此, 太赫兹雷达技术在目标探测与识别、天文观测、医学检测^[4]以及无人驾驶等领域具有广阔的应用前景, 受到国内外研究机构的高度关注.

然而, 在实际探测应用中, 根据雷达方程, 目标后

引用格式: 罗成高, 刘康, 王宏强, 等. 太赫兹单光子雷达探测技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 054202

Luo C G, Liu K, Wang H Q, et al. Terahertz single-photon radar detection technology (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 054202, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0255

向散射的回波功率与作用距离的四次方成反比, 远距离目标(尤其是隐身目标)的回波信号功率极弱, 再加上现阶段太赫兹雷达发射功率较低, 接收机灵敏度不够, 太赫兹波大气衰减较为严重, 使得回波中的目标信息被淹没在噪声信号中难以有效检测. 因此, 常规太赫兹雷达体制难以满足对远距离非合作目标(尤其是隐身目标)及时准确的探测预警需求.

单光子又称为光量子, 是传递电磁相互作用的基本粒子, 单个光子的能量为 $h\nu$, 其中 h 为普朗克常量, ν 为光波频率. 在光学频段, 得益于工作在盖革模式下的雪崩光电二极管(Geiger Mode-Avalanche Photo Diode, GM-APD)探测器的出现, 国内外相关科研机构相继开展了大量单光子激光雷达探测与成像方面的技术工作, 并取得了诸多可喜的成果. 单光子激光雷达探测技术中的信息载体为单个或数个光子, 具有极高的探测灵敏度, 与传统雷达接收机相比, 单光子雷达接收机最小可检测信号功率要低若干个数量级, 根据雷达方程, 其最大作用距离有望提升数倍甚至数十倍, 使得单光子雷达可以探测到回波信号极弱的微小或隐身目标, 在微弱光电信号探测、雷达增程以及反隐身方面极具应用价值.

在此背景下, 本文提出的太赫兹单光子雷达探测技术将太赫兹雷达技术与单光子探测技术相结合, 将传统太赫兹雷达的信号检测门限下探到单光子尺度, 在太赫兹频段开展单光子探测技术研究, 最大限度地利用太赫兹波的高分辨特征和单光子雷达的极高灵敏度特征, 解决太赫兹雷达在目标探测与远距离应用等方面的技术瓶颈, 提升雷达在探测、测量和成像等方面的综合性能. 本文对太赫兹单光子雷达探测技术进行分析和研究, 首先介绍其提出的技术背景, 然后从基本原理、技术特点、研究现状、实现方式、关键问题等方面作进一步阐述, 最后对太赫兹单光子雷达技术的应用前景进行展望, 并对全文进行总结. 希望本文相关工作能为太赫兹单光子雷达探测技术方面的研究提供一定借鉴.

2 太赫兹单光子雷达内涵及原理

单光子雷达可定义为在低回波强度时, 光电转换器件中回波光子产生的平均初始电子数小于 10, 且噪声引起的虚警远小于信号光子触发的探测概率的探测

成像雷达^[5]. 本文提出的太赫兹单光子雷达探测技术将太赫兹雷达技术与单光子探测技术有机融合, 发射端利用大功率太赫兹源发射经典太赫兹波照射目标, 接收端采用单光子探测器接收单光子量级的极弱太赫兹回波信号, 再利用时间相关单光子计数, 结合相关增强检测技术, 实现目标探测.

太赫兹单光子雷达可参照激光单光子雷达的分类方式^[6], 按照探测体制分为非相干探测与相干探测两种. 非相干探测体制直接探测太赫兹回波光功率, 转换为电信号, 不关心太赫兹波的频率、相位或偏振态等信息, 也被称为直接探测技术. 而相干探测体制通过本振信号与回波信号的光场交叠产生光混频, 利用外差等方式接收, 再从中解调出目标的信息. 与直接探测方式相比, 相干探测可以同时获取回波信号所携带的振幅、频率或相位信息, 具有更高的灵敏度和更强的抗干扰性能. 但相干探测要求本振信号与回波信号具有良好的相干性, 系统实现较为复杂.

2.1 探测原理

在太赫兹单光子探测系统中, 由于太赫兹波的量子特性, 弱回波信号在时间轴上是随机离散分布的光子流, 因此, 对于光子回波信号的检测, 常规的包络检测与阈值检测手段不再适用, 需要从统计的角度去探查回波中包含的目标回波光子的分布特性, 进而分析太赫兹单光子探测系统的作用距离、探测概率以及虚警概率等探测性能. 单光子探测器探测到的回波信号能量以光子为单位, 回波光子流在探测器上会激发出一系列光电子脉冲并输出离散化的电脉冲信号, 每一个电脉冲代表探测器探测到一个或多个光子, 通过分辨这些光子激发的电脉冲即可实现单光子计数. 光子计数是实现微弱信号检测的一种有效途径. 然而, 太赫兹单光子探测中的回波信号包含真实目标回波以及噪声, 当回波信号的强度下降到光子级别时, 目标回波光子与噪声光子难以有效甄别, 从而造成虚假计数, 形成虚警探测.

实际上, 探测器检测到的目标回波信号是有规律可寻的, 具有较好的时间相关性; 而噪声信号没有规律, 信号特征随机变化, 时间相关性很差. 因此, 太赫兹单光子雷达系统通过发射和接收太赫兹脉冲序列, 进行多次重复测量与相关积累, 在设定的距离门宽度内形成光子统计直方图, 目标回波光子由于较好的时

间相关性可实现叠加增强, 集中分布在特定的位置上, 而噪声光子却因其随机性, 无规律散布在整个距离门内. 从而, 利用时间相关单光子计数方法结合相关增强检测技术可将目标真实的距离和形态信息提取出来, 显著提高探测的重复精度和绝对精度, 有效抑制探测虚警率, 实现改善雷达系统的检测能力与综合性能的目的^[7,8]. 典型的时间相关单光子计数过程如图 1 所示.

2.2 探测概率与虚警概率

采用距离门工作方式的太赫兹单光子雷达系统工作时序如图 2 所示, 其中 T_0 是相对于发射脉冲时刻的距离门开始时间, τ_p 是相对距离门开始时刻的接收脉冲到达时间, T_G 为距离门宽度. 只有在距离门内探测器才正常工作, 在距离门外不发生探测, 为保证光子计数的时间精度, 可将距离门离散分割为多个时间区间, 每个区间称为时隙 τ_s , 时隙的宽度主要由单光子探测器的响应速率以及探测系统的时间精度需求等因素共同决定.

由于当前太赫兹雷达发射功率较低, 因此太赫兹单光子雷达需采用较宽的发射脉宽以确保足够的探测概率, 同时, 发射脉宽的设定还应兼顾雷达系统距离分辨率, 假设太赫兹脉冲宽度大于探测器时隙, 即 $\tau > \tau_s$. 为便于理解脉宽对目标探测概率和虚警概率的影响, 本文在接下来将太赫兹发射脉冲简化为方波脉冲. 单光子探测器在回波光子的激励下产生光电子, 即初始光电子. 考虑到噪声的影响, 在距离门 T_G 内探测器中产生的总初始光电子数可表示为

$$N_t = N_s + N_n, \quad (1)$$

其中, N_s 为目标回波光子产生的初始光电子数, N_n 为噪声光子产生的初始光电子数.

由于太赫兹回波信号微弱, 为单光子量级, 因此, 回波信号光子服从的负二项分布可近似为 Poisson 分布, 根据探测器工作机理, 太赫兹单光子雷达的目标探测概率可表示为^[6,9-12]

$$P_D = \exp(-N_T \tau_p) [1 - \exp(-N_s - N_T \tau)], \quad (2)$$

其中, $N_T = N_n / T_G$ 表示距离门内探测器的噪声率函数.

由于存在噪声, 使得单光子探测器可能被错误触发, 从而形成虚警, 系统的虚警概率可表示为

图 1 时间相关单光子计数过程示意图. 图片出自文献[8], 并获得授权

Figure 1 Principle of the time-correlated single-photon counting technique. Reprinted from ref. [8] with permission.

图 2 太赫兹单光子雷达系统工作时序. 图片出自文献[6], 并获得授权

Figure 2 Timing sequence of the THz single-photon radar. Reprinted from ref. [6] with permission.

$$P_F = 1 - P_D - \exp(-N_s - N_n), \quad (3)$$

其中, 第三项 $\exp(-N_s - N_n)$ 表示即使目标回波与噪声均存在, 探测器却没有被触发的概率.

为直观反映信号脉宽和目标回波初始光电子数对探测概率与虚警概率的影响, 设计参数如下: $\tau_p = 4 \mu\text{s}$, 时隙 $\tau_s = 0.2 \mu\text{s}$, 距离门 $T_G = 40 \mu\text{s}$, 在噪声较弱时 $N_n = 0.5$, 则噪声率函数 $N_T = 12.5 \text{ kHz}$, 根据式(2)和(3)绘制探测概率与虚警概率曲线如图 3 所示. 由图可知, 随着初始光电子数的增加, 目标探测概率增大, 虚警概率逐渐降低, 当初始光电子数多于 3 个时, 探测概率与虚警概率趋于饱和. 在相同的初始光电子数条件下, 发射信号脉宽增大, 探测概率略有提升, 虚警概率略有降低.

图 3 (网络版彩图)初始光电子数与脉宽对探测概率与虚警概率的影响

Figure 3 (Color online) The influence of the echo primary electrons and pulse width on the detection probability and false alarm rate.

2.3 雷达方程

太赫兹单光子雷达系统包含大功率太赫兹源、太赫兹信号发射前端、太赫兹信号接收前端、单光子探测器以及处理与显控终端. 雷达方程可以将雷达作用距离与系统各组件以及目标和环境特性关联起来, 不仅可用于评估雷达系统可探测目标的最大作用距离, 还可以作为雷达系统设计的重要工具.

假设太赫兹单光子雷达的平均发射功率为 P_t , 发射前端增益为 G_t , 探测目标与雷达距离为 R , 目标雷达横截面积为 σ , 接收前端物理孔径为 A , 孔径效率为 ρ_a , 系统损耗为 L , 则雷达系统接收到的回波功率可表示为

$$P_r = \frac{P_t G_t \rho_a A \sigma}{(4\pi)^2 R^4 L}. \quad (4)$$

雷达系统的最大作用距离 $R_{\max}$ 为是否能够检测到目标的临界距离, 此时, 雷达系统接收到的回波功率 P_r 与单光子雷达最小可检测信号功率 $S_{\min}$ 正好相等, 将 $P_r = S_{\min}$ 代入式(4)并整理可得

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t \rho_a A \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min} L} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (5)$$

太赫兹单光子探测器的灵敏度可用最小可响应的信号功率表征, 由等效噪声功率(Noise Equivalent Power, NEP)以及测量带宽 B_w 确定^[13-16], 考虑到系统探测概率与虚警概率, 引入最小可检测信噪比 $(S_0/N_0)_{\min}$ 进行修正, 则单光子雷达最小可检测信号功率 $S_{\min}$ 可表

示为

$$S_{\min} = NEP \cdot \sqrt{B_w} \cdot (S_0/N_0)_{\min}, \quad (6)$$

其中, 最小可检测信噪比 $(S_0/N_0)_{\min}$ 由系统探测概率与虚警概率决定.

实际上, 并非系统接收到的回波能量所对应的所有入射光子均能在单光子探测器上激发出初始光电子, 激发产生的初始光电子数与入射总光子数的比值定义为探测器的量子效率, 用 η_q 表示. 基于前述方波脉冲假设, 单个脉冲 τ 内对应于系统最小可检测信号功率的最小可探测初始光电子数可表示为

$$N_{\min} = \frac{S_{\min} \tau}{h\nu} \eta_q. \quad (7)$$

其中, 普朗克常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$, $h\nu$ 为单个太赫兹光子的能量.

3 太赫兹单光子雷达技术特点

太赫兹单光子雷达探测技术通过将太赫兹技术与单光子探测技术有机融合, 提升雷达在探测、测量和成像等方面的综合性能. 具有诸多突出优势.

(1) 相比于微波频段, 太赫兹频率高、波长短, 具有更高的光子能量, 更容易实现单光子量级的发射与接收, 具有更高的天线增益和角跟踪精度, 太赫兹高频段具有显著的近光学传播特性, 可利用准光技术对波束进行扩束、准直、聚焦等调控; 相对于光学频段, 太赫兹波具有更好的穿透性和更宽的波束, 能够不受环境光照影响实现全天时工作, 并更容易实现对目标的覆盖, 且对空间目标高速运动产生的热环境效应与气动光学效应不敏感, 可用于空间高速运动目标探测^[17].

(2) 太赫兹单光子探测雷达系统发射经典太赫兹波, 接收信号为单个或数个光子, 信息载体下探至单光子尺度, 属于微观测量范畴, 因此具有极低的噪声基底和极高的探测灵敏度. 相比于传统雷达接收机, 灵敏度能够提高若干个数量级, 从而显著提升雷达对于微弱或隐身目标的探测能力.

(3) 太赫兹单光子探测器的技术突破, 将使得传统太赫兹雷达中对电磁场的观测与分析转化为对光子的观测与分析, 观测空间从场空间转化为粒子空间, 用太

赫兹波的微观粒子性去反演目标的距离和速度等宏观特征, 进而牵引太赫兹频段大功率信号产生、单光子信号探测、单光子信号处理、单光子目标特性等前沿交叉学科的创新发展.

4 单光子雷达研究现状

下面分别从激光单光子雷达、太赫兹源、太赫兹高灵敏度探测器三个方面介绍单光子雷达的研究现状, 梳理各项关键技术的发展脉络, 以期太赫兹单光子探测技术的创新发展提供有效借鉴.

4.1 激光单光子雷达研究现状

美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)的林肯实验室是单光子探测成像系统应用研究方面的先驱, 一直致力于单光子激光三维成像系统的研发和改进. 尤其是具有片上计时电路的GM-APD阵列研发成功极大地促进了单光子激光三维成像系统技术的发展. 2002–2007年, MIT林肯实验室相继推出了三代基于GM-APD探测器和激光飞行时间测量法的激光三维成像雷达^[18–22]. 为了对植被或伪装下的隐藏目标进行探测和分类, 从2001年开始, 由美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)领衔开始了JIGSAW计划研究, 旨在研发一款基于光子计数模式的三维成像激光雷达. 该系统采用激光分束照明, 通过 32×32 阵元GM-APD阵列结合双光楔镜扫描技术, 实现 256×256 的高分辨率成像, 在150 m的作用距离处横向分辨率可达5 cm左右. 2003年, 该系统进行了外场机载实验, 搭载于UH-1直升机上从150 m左右飞行高度对隐藏在树林中的坦克进行了多角度成像, 准确识别出了遮蔽物下方的坦克目标^[23,24].

2008年, 波音公司研究人员设计研发了 32×32 阵元的GM-APD阵列, 阵列工作于1.06和1.55 μm 波长, 且在1.55 μm 波长下光子探测效率高于30%. 基于该探测器阵列, 研究人员研制出工作于1.06 μm 波长的激光雷达并开展了三维成像实验^[25].

2012年, 清华大学研制了基于 1×16 线阵APD的一维非扫描激光雷达系统. 该系统使用红外脉冲式纳秒激光器作为探测光源, 利用飞行时间法获得了16 m远处台阶目标的一维距离图像, 距离分辨率达到10 cm

左右^[26].

2015年, 意大利米兰理工大学研究人员利用 32×32 阵元的单光子雪崩二极管阵列和时间分辨率达350 ps的时间数字转换电路开发了一套激光三维成像系统, 如图4所示, 该系统具有高达100 kfps的成像帧率, 能够通过二维强度图像与三维深度图像的融合实现三维场景的准确重建, 并通过光子到达时序的精确分割实现了部分遮挡目标的成像^[27].

2015年, 中国电子科技集团公司第十四研究所基于光子计数目标检测原理研制成功激光单光子雷达系统, 并在青海湖外场开展了对132 km处目标的远程探测试验, 成功验证了单光子探测技术应用于雷达目标探测的可行性, 如图5所示^[28].

2016年, 中国电子科技集团公司第四十四研究所研制成功 32×32 阵元的GM-APD探测器阵列, 基于该探测器阵列, 哈尔滨工业大学搭建了激光雷达成像系

图4 (网络版彩图)激光单光子相机. (a) 实验样机; (b) 实验成像场景; (c) 成像结果. 图片出自文献^[27], 并获得授权

Figure 4 (Color online) Single-photon avalanche diodes camera. (a) System photograph; (b) photograph of the scene; (c) imaging results. Reprinted from ref. ^[27] with permission.

图5 (网络版彩图)超导激光单光子雷达系统. (a) 试验系统; (b) 青海湖试验环境; (c) 试验结果. 图片出自文献^[28], 并获得授权

Figure 5 (Color online) Superconductor based single-photon radar. (a) System photograph; (b) actual scene at Qinghai Lake; (c) imaging results. Reprinted from ref. ^[28] with permission.

统并开展了成像实验, 获得了720 m和11 km处建筑目标表面结构的距离像^[29].

2017年, 英国Leonardo MW公司与Heriot-Watt大学联合研制了单光子三维成像系统, 该系统采用In-GaAs/InP单光子雪崩二极管探测器和工作于1550 nm波长的脉冲激光器, 通过时间相关单光子计数实现了对800 m–10.5 km范围内不同目标的高分辨三维成像^[30].

2018年, 华东师范大学研制成功高速光子计数激光雷达测距系统, 该系统利用多重频激光脉冲拓展雷达的最大不模糊距离, 在实验中, 雷达系统发射10 MHz左右的三种不同重频的激光脉冲, 将最大不模糊距离从15 m外推至165 km, 并能以较高的距离分辨率对分布在不同距离上的目标进行高精度测量, 在青海湖外场对21 km外的目标实现了测距^[31].

综上可知, 目前国际上在光学频段开展了较多单光子探测与成像技术研究, 这主要得益于当前激光器可以实现高重频大功率脉冲输出(输出功率可达兆瓦量级), 光学半导体探测器在常温下具有单光子量级的探测灵敏度, 且可实现大规模阵列集成, 同时, 激光光束具有良好的相干性和准直性, 易于实现外差探测和三维扫描成像. 然而, 由于太赫兹波与微波频率较低, 单光子能量低, 高灵敏探测技术难度大. 因此, 虽有部分文献提及单光子信号的产生或探测, 尚未见太赫兹单光子探测系统集成或应用方面的公开报道.

4.2 太赫兹源研究现状

太赫兹波的产生方式主要分为电子学与光学两大类, 其产生机理与典型代表如图6所示.

4.2.1 电子学太赫兹源

电子学方式主要基于固态电子学器件与真空电子学器件. 固态电子学器件采用类似于常规微波雷达的实现方法, 通过将基带信号进行一系列倍频和放大实现太赫兹波的输出. 20世纪90年代末, 美国弗吉尼亚大学在肖特基二极管倍频技术方面的突破有力地推动了基于固态电子学倍频源的太赫兹雷达技术的快速发展^[32,33]. 在此基础上, 2004年成立的弗吉尼亚半导体公司(Virginia Diodes Inc., VDI)迅速成长为业界在固态电子学倍频源领域的主要代表. 在欧洲方面, 德国、瑞典、英国、丹麦、荷兰以及以色列等国研究机构分别

采用不同的技术路线研制了固态电子学太赫兹雷达系统并开展了实验研究, 其中, 德国在系统与实验研究方面的工作最具代表性^[34–37]. 在国内方面, 虽然在固态电子学太赫兹雷达技术方面起步稍晚, 但多家单位均开展了持续研究且成效显著, 在短时间内取得了一系列重要成果^[38–40].

太赫兹电真空器件输出功率高, 对于推动太赫兹雷达系统的发展与应用具有重要意义. 1988年, 马萨诸塞大学的研究人员基于真空器件扩展互作用振荡器首次实现了一部215 GHz高功率非相干脉冲雷达, 这是已知关于真空电子学太赫兹雷达的最早公开报道^[41]. 对于基于固态或真空电子学器件的太赫兹源而言, 当发射频率增加至太赫兹频段时, 可获得的发射功率急剧下降, 因此, 常规电子学方式难以在1 THz以上的高频段获得大功率输出.

4.2.2 光学太赫兹源

太赫兹波的光学产生方式主要基于飞秒激光泵浦光电导天线或非线性晶体的光整流效应, 主要包括太赫兹时域光谱技术、光差频技术、太赫兹远红外激光器以及太赫兹量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)等.

太赫兹时域光谱技术可以实现高频输出, 工作带宽大、分辨率高且易于集成. 2000年以来, 美国、英国、丹麦等国家的相关研究机构以及国内首都师范大学、国防科技大学、西安理工大学等单位相继研制了太赫兹时域光谱系统. 就工作频段而言, 太赫兹时域光谱系统当前的工作频段主要位于0.1–3 THz区间, 国外最高可达5–6 THz. 然而, 太赫兹时域光谱技术输出功率与采集效率偏低、波束窄, 现阶段难以应用于太赫兹雷达探测领域, 主要面向无损检测、医疗诊断以及雷达横截面积测量等特定应用场景.

光差频技术利用晶体的二阶或三阶非线性效应使得具有频率差的两束入射波差频产生太赫兹辐射. 2019年, 天津大学采用近化学计量比LiNbO₃晶体实现了调谐范围覆盖1.04–5.15 THz的太赫兹辐射, 3 dB带宽接近2.1 THz, 在1.79 THz最大输出能量达5.46 μJ ^[42]. 基于光差频技术的太赫兹波产生方式频率连续可调, 且调谐范围宽、峰值功率高, 在光谱分析、材料等领域具有广泛的应用前景. 但转换效率较低, 属于光泵浦方式, 采用非固态器件, 系统集成难度较大.

图 6 (网络版彩图)太赫兹波产生方式. 图片出自文献[17], 并获得授权

Figure 6 (Color online) The generation approaches of THz waves. Reprinted from ref. [17] with permission.

太赫兹远红外激光器采用光泵浦方式, 通过高功率激光泵浦气体形成转动跃迁, 产生单频太赫兹波输出, 功率可达毫瓦至百毫瓦量级^[43,44]. 这种方式也可以输出两路相干的太赫兹信号. 太赫兹远红外激光器具有频率稳定性高以及可实现宽频段间断调谐的优势, 但由于采用光泵浦方式, 同样面临系统集成难度较大的问题, 一定程度上限制了其在太赫兹雷达探测领域的应用.

太赫兹QCL是1–5 THz频段辐射源中非常重要的一种紧凑型激光源, 通过光抽运电子在不同子带间跃迁来辐射太赫兹光子, 并通过级联重复释放光子进而提高器件的输出功率. QCL概念最早是由苏联的物理学家Kazarinov和Suris^[45]在1971年提出的, 直到1994年贝尔实验室研制出世界上第一个GaInAs/AlInAs QCL^[46]. 意大利和英国的科学家于2002年合作研制成功了世界上第一个太赫兹QCL^[47]. 美国马萨诸塞大学亚毫米波技术实验室(Submillimeter-wave Techniques Laboratory, STL)在2010年基于QCL实现了一部2.408 THz相干雷达, 实现了对旋转目标的相干成像^[48,49]. 经过不懈努力, 太赫兹QCL在输出功率、工作温度、工作频率范围等方面得到了长足发展^[50,51], 2014年, 研究报道了脉冲工作模式下峰值功率高于1 W的太赫兹QCL器件, 该器件能够在123 K温度下实现3.4 THz的频率输出^[52]. 2015年, 研究人员在评论文章中回顾梳理了能够在室温下工作的太赫兹QCL前沿进展, 其中提到已能在室温下实现2 mW的峰值功率

输出^[53]. 2018年, 美国的研究人员提出了一种太赫兹量子级联垂直外腔面发射激光器, 在77和6 K温度下分别实现了830 mW和1.35 W的脉冲激励^[54]. 截至目前, 太赫兹QCL的激励频率已经可以覆盖1.2–5.2 THz范围^[55,56], 在连续波工作模式下最大输出功率为230 mW^[57], 脉冲工作模式下峰值输出功率可达1.56 W^[58].

太赫兹QCL沿用了中红外QCL的设计概念, 主要是将激励频率从中红外延伸到太赫兹频段. 梳理国际上太赫兹QCL的发展趋势, 可以看出, 随着时间的推移和技术的进步, 激励频率呈现逐渐下降的趋势^[59]. 这也从侧面说明由于其独特的产生机理, 太赫兹QCL更容易在较高频段实现太赫兹波的激励, 这恰与基于倍频放大的电子学太赫兹源更易在低频段实现大功率输出相反. 就器件而言, 太赫兹QCL辐射功率可超过光学泵浦源和热辐射源好几个数量级, 并且其在紧凑型成像系统的潜在发展能力也使我们不再依赖庞大而昂贵的超快激光源或气体激光器. 上述特性不仅促使人们对基于太赫兹QCL的雷达系统产生极大的研究兴趣, 也为本文提出的太赫兹单光子雷达系统的具体实现提供了关键器件支撑.

4.3 太赫兹高灵敏度探测器研究现状

单光子探测器具有极低的噪声水平和极高的探测灵敏度, 能够探测单光子量级的极弱能量并进行光子计数统计, 是单光子雷达系统的核心组成部分.

4.3.1 光学单光子探测器

近年来, 随着新的探测材料的运用和信息技术的发展, 单光子探测器率先在可见光和红外波段取得突破, 光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)、单光子雪崩二极管(Avalanche Photo Diode, APD)、超导纳米线单光子探测器(Superconductor Nanowire Single-Photon Detector, SNSPD)^[60,61]等单光子探测器发展迅速, 并在量子通信、生物光子学、激光测距、空间碎片探测等领域展现了优异的性能和良好的应用前景.

国外方面, 2002年, 美国林肯实验室利用桥接集成技术成功研制了硅基GM-APD探测器阵列, 包含 32×32 阵元, 在532 nm波长下对应的量子效率约为40%^[21]. 2008–2009年又进一步将阵元规模扩充到 64×256 像素^[62]. 2012年, 美国Princeton Lightwave公司研制出基于InGaAs材料包含 32×32 阵元的GM-APD阵列, 并计划进一步将阵列规模扩展至 32×128 阵元^[63]. 同年, 法国和以色列研究人员联合研制了基于HgCdTe的APD探测器阵列, 阵列规模为 320×256 , 单个像素尺寸为30 μm , 工作于1570 nm波段^[64]. 2015年, 英国剑桥大学的研究人员研制了基于InGaAs/InP材料的门控APD阵列, 器件工作于1550 nm波段, 量子效率超过55%, 由于利用自差技术, 门控速率达到1 GHz量级, 工作过程几乎不受死时间影响^[65]. 可见, 当前国外光学单光子探测器的发展主要朝着大规模阵列化方向发展, 同时兼顾低噪声、高速率、高精度以及高量子效率等特性.

国内方面, 从2000年开始, 中国科学院物理研究所研制成功了硅基GM-APD的单光子探测器, 并在超低温条件下完成了1.1 km的量子通信演示实验^[66,67]. 2015年, 重庆光电技术研究所制备出由InGaAs/InP雪崩二极管阵列与时间计数型CMOS读出电路组成的 8×8 阵列规格GM-APD阵列^[68]. 2017年, 中国科学技术大学研制出基于InGaAs/InP材料和单片集成读出电路的单光子探测器, 门控速率达到1.25 GHz, 量子效率超过27.5%^[69]. 综合来看, 目前国内相关单位在光学单光子探测器研制方面已经取得长足进步, 主要性能已接近国外同类器件水平.

4.3.2 室温太赫兹高灵敏度探测器

然而, 太赫兹波与可见光相比, 单光子能量要低两个数量级, 在太赫兹频段具有较高响应灵敏度的材料

和器件十分匮乏, 因此要实现太赫兹波的高灵敏度探测, 技术难度非常高.

常用的室温太赫兹检测器主要有微测热辐射计、高莱探测器、热释电探测器、肖特基二极管和场效应管. 目前, 微测热辐射计、场效应管和肖特基二极管发展较快, 在太赫兹探测方面备受青睐.

从2009年开始, 南京大学提出了基于 Nb_5N_6 薄膜材料的微测热辐射计方案, 并开展了持续的研究, 截至2014年, 研制的 Nb_5N_6 微测热辐射计阵列芯片单个器件的直流响应率达 730 V W^{-1} , 在调制频率为4 kHz时, 直流NEP可达 $1.3 \times 10^{-11} \text{ W Hz}^{-1/2}$, 检测器的响应时间小于20 μs ^[70–72].

场效应晶体管是近年来发展起来并研究较多的一种利用等离子体波的非线性来探测太赫兹信号的检测器. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所近年来进行了基于GaN/AlGaN场效应自混频太赫兹检测器的研究, 2012年报道实现的单个器件的NEP为 $10^{-11} \text{ W Hz}^{-1/2}$ 左右^[73]. 2017年, 研制成功基于AlGaN/GaN的高电子迁移率场效应晶体管, 用于实现宽带太赫兹信号的非相干直接检测, 在77 K的低温条件下NEP达到 $10^{-12} \text{ W Hz}^{-1/2}$ 左右, 如图7所示^[74].

美国VDI公司研制的基于肖特基二极管的零偏检测器(Zero-Bias Detector, ZBD)在500 GHz频段NEP可达 $4.1 \times 10^{-12} \text{ W Hz}^{-1/2}$, 最高响应速率约40 GHz, 是截至目前报道的具有最高灵敏度的室温直接检测器, 详情可参见VDI公司主页<https://www.vadiodes.com/en/products/detectors>.

4.3.3 低温太赫兹高灵敏度探测器

太赫兹单光子能量极低, 对于4.3 THz的太赫兹波, 单个光子能量为 $2.9 \times 10^{-21} \text{ J}$, 上述室温太赫兹探测器的NEP典型值 $10^{-12} \text{ W Hz}^{-1/2}$ 显然难以满足单光子雷达探测应用的需求, 需要研究具有更高灵敏度的探测器. 目前, 具有代表性的低温太赫兹高灵敏度探测器主要包括非本征光电导探测器(Extrinsic Photoconductive Detector, EPD)、超导相变边缘探测器(Transition Edge Sensor, TES)^[75]、半导体量子点探测器(Quantum Dot Detector, QDD)和超导量子电容探测器(Quantum Capacitor Detector, QCD)等. 其中, EPD的概念提出已有数十年, 受限于光电导材料中浅施主的电离能, EPD主要适用于探测波长200 μm 以下的高频信号. 2016年, 日

图 7 (网络版彩图)高电子迁移率场效应晶体管。(a) 实物图; (b) 298和77 K对应的NEP曲线。图片出自文献[74], 并获得授权

Figure 7 (Color online) High-electron-mobility field-effect transistor. (a) Picture of the product; (b) different NEPs at 298 and 77 K. Reprinted from ref. [74] with permission.

本的研究人员利用表面激活晶片键合技术, 设计了Ge:Ga阻塞杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)结构的Ge结, 将EPD的探测波长范围拓展到250 μm 附近, 在温度约2 K时, NEP优于 $2 \times 10^{-17} \text{ W Hz}^{-1/2}$, 理论上NEP可达 $2 \times 10^{-19} \text{ W Hz}^{-1/2}$ [76,77]。

超导TES是一类高灵敏的太赫兹探测器, 由于超导薄膜的电阻在正常态与超导态转变温度区间内具有很高的温度灵敏度, 吸收太赫兹光子后将引起电流的剧烈变化, 利用超导量子干涉仪构成的电流放大器读出电流的变化, 即可实现高灵敏度太赫兹波的检测[78]。2012年, 荷兰研究人员研制了Ti/Au超导TES探测器, 在85 mK温度下测量NEP达到了 $5.0 \times 10^{-19} \text{ W Hz}^{-1/2}$ 左右, 拟应用在SPICA望远镜的SAFARI成像光谱仪上[79]。目前国内在超导TES研究方面还处于起步阶段, 中国科学院紫金山天文台、清华大学、中国科学技术大学等单位开展了相关的研究工作。2015年, 中国科学院紫金山天文台采用NbSi薄膜所制备的超导TES探测器, 在288 mK温度下, 根据电流噪声测量结果得到的NEP达到 $8.0 \times 10^{-17} \text{ W Hz}^{-1/2}$ 的水平, 可以满足地面天文观测应用的需求[80]。

在20世纪90年代和21世纪初, 太赫兹半导体QDD

技术得到了广泛关注与研究[81,82]。2000年, 日本东京大学研究人员[83]在*Nature*上撰文, 提出一种基于半导体量子点(Quantum Dot, QD)的单电子晶体管(Single Electron Transistor, SET)单光子探测器方案, 在强磁场作用下, 可实现1.4–1.7 THz频段的单光子检测, 其结构如图8所示。图8(a)为QD基本结构示意图, 灰色区域表示两个朗道能级组成的金属内核和外环。图8(b)为扫描电子显微镜下的QD像, 尺寸为700 nm $\times$ 700 nm, 由带负偏置的金属栅极环绕的二维电子气组成, QD中包含大约350个电子, 金属栅极充当偶极子天线将入射太赫兹波耦合到QD中。图8(c)为QD朗道能级谱, 当QD中的电子-空穴对吸收太赫兹光子, 电子和空穴会在不同朗道能级之间跃迁, 从而造成器件的电导随时间发生变化, 如图8(d)所示, 通过统计单位时间内器件电导的变化次数即可实现光子计数。在磁场强度为3.4–4.15 T、温度为0.05 K时, 暗计数率0.001 s $^{-1}$ 对应的量子效率约1%。

2002年, 研究人员对上述结构进行了进一步改进, 提出了一种双QD结构, 摆脱了对外加磁场的依赖。器件工作在500 GHz附近, NEP达到了 $10^{-21} \text{ W Hz}^{-1/2}$ 左右的极低水平, 但暗计数率0.01 s $^{-1}$ 对应的量子效率仅为0.1%[84]。尽管半导体QDD具有极低的NEP, 但由于半导体QD器件在纳米尺度, 且电阻较高, 因此半导体QD与太赫兹波的高效耦合非常困难, 探测器的量子效率极低。此外, 由于QD的特性受到异质结外延生长和纳米加工条件影响较大, 太赫兹QDD加工较为困难, 且一致性较差。

超导QCD是近年来涌现的一类新型太赫兹单光子探测器, 工作原理如图9所示, 主要由天线、超导吸收器、隧道结、超导岛、谐振电路以及读出电路组成, 其中一个小面积的超导岛通过一对超小隧道结与吸收器耦合形成单超导库珀对箱(Single Cooper-pair

图 8 太赫兹QDD结构与原理图。(a) QD结构示意图; (b) QD电子显微镜像; (c) QD朗道能级谱; (d) 电导随时间的变化曲线。图片出自文献[83], 并获得授权

Figure 8 Configuration of the THz QDD. (a) Diagram of the QD; (b) scanning electron microscopy of the QD; (c) energy spectra of the Landau levels in the QD; (d) time-trace representation of conductance. Reprinted from ref. [83] with permission.

图 9 (网络版彩图)超导QCD工作原理示意图. 图片出自文献[85], 并获得授权

Figure 9 (Color online) Schematic of the QCD concept. Reprinted from ref. [85] with permission.

Box, SCB). 工作时, 入射的太赫兹波被天线耦合进入超导吸收器, 由于太赫兹光子能量高于超导能隙, 超导材料中的库珀对被拆散产生准粒子, 准粒子通过超导隧道结进入SCB. 由于SCB具有显著的量子电容效应而对透穿进入的非平衡态准粒子非常敏感, 其量子电容随之发生显著变化, 进而引起谐振电路的响应(频移或相移), 通过与之耦合的读出电路读取该响应即可得出准粒子的密度, 最终实现太赫兹信号的高灵敏探测[85].

2005年, 芬兰赫尔辛基理工大学研究人员[86]提出采用单库珀晶体管测量栅极与基底之间的有效电容实现超导相移探测的方法, 预估其灵敏度可实现量子比特级别的电流-相位读取. 2009年, 美国南加州大学和加州理工大学的研究人员[85]提出利用SCB制作超导QCD实现高灵敏度太赫兹波探测的技术方案, 通过对噪声来源的分析, 理论上最佳NEP可达 $10^{-21} \text{ W Hz}^{-1/2}$ 量级. 2017年, 加州理工大学的学者[87]通过优化QCD

的器件设计和测试系统, 在1.5 THz频段获得了低于 $1 \times 10^{-20} \text{ W Hz}^{-1/2}$ 的NEP, 并证实这一探测器可以实现太赫兹单光子计数.

截至目前, 国内相关单位在太赫兹高灵敏度探测器方面已经开展了较为广泛的研究, 部分研究成果在天文观测等领域已得到初步应用, 但灵敏度距离单光子探测的需求仍然存在不小的差距. 国内在太赫兹单光子探测器方面的研究仍停留在理论研究阶段, 目前未见器件与实验研究方面的公开报道. 由于光子能量与频率成正比, 太赫兹频率越高, 单光子能量越大, 实现单光子探测的技术难度相对更低. 结合前述太赫兹QCL更容易在较高频段实现太赫兹波激射的结论, 有理由认为采用太赫兹QCL作为辐射源不失为实现太赫兹单光子雷达的一种可行技术途径.

5 太赫兹单光子雷达实现方式及设计思路

5.1 太赫兹单光子雷达实现方式

太赫兹单光子雷达最典型的两种实现方式包括直接探测和外差探测.

5.1.1 太赫兹单光子雷达直接探测方式

太赫兹单光子直接探测方式原理示意框图如图10所示. 太赫兹单光子雷达系统包含太赫兹辐射源、分束器、波束控制组件、发射天线、滤波组件、单光子探测器、计时模块以及处理与显控终端. 其工作过程为: 太赫兹辐射源发射经典大功率高重频

图 10 (网络版彩图)太赫兹单光子雷达直接探测方式示意图

Figure 10 (Color online) Schematic diagram of the direct detection process of THz single-photon radar.

太赫兹脉冲信号, 经分束镜后, 小部分脉冲信号作为计时电路的开始信号, 触发计时电路开始计时, 其余大部分信号经波束控制组件调制后由高增益发射天线辐射至目标区域, 对于远距离、低散射目标, 回到雷达接收天线的后向散射回波极其微弱, 为单光子量级, 经滤波组件滤除其他频率的噪声信号后触发太赫兹单光子探测器响应, 计时模块同时停止计时, 得出脉冲飞行时间, 进而实现目标的精确测距。

直接探测方式系统结构相对较简单, 但只能响应回波光功率, 通过测量脉冲飞行时间实现目标精确测距, 对于相位和多普勒等其他信息却无能为力。不同于激光单光子雷达, 由于太赫兹波长较长和探测器需要低温冷却, 太赫兹单光子探测器难以实现大规模阵列集成, 难以采用探测器阵列实现目标三维成像。因此, 直接探测方式几乎不能用于测量目标的运动状态和外形特征, 不能用于目标识别。其主要应用场景为远程预警探测和反隐身。

5.1.2 太赫兹单光子雷达外差探测方式

太赫兹单光子外差探测方式原理示意框图如图 11 所示。与直接探测系统相比, 主要区别在于发射端需采用连续波太赫兹辐射源, 并由分束器分出一束连续本振信号用于与回波进行外差接收, 另一束调制为脉冲信号用于目标探测。在接收端, 微弱的目标后向散射回波与本振信号在单光子探测器上进行混频接收, 并进行光子计数, 根据脉冲飞行时间可得出目标距离。同时根据脉冲外差原理, 可获得混频信号中的差频信息, 从而提取出由于目标运动引起的多普勒频移, 确

定目标的运动速度。这里需要说明单光子外差探测与常规外差探测存在区别, 在常规外差探测系统中, 一般通过提高本振光强度获得较高的转换增益, 抑制暗电流和热噪声等, 显著提高对微弱信号的检测灵敏度。但在太赫兹单光子外差探测系统中, 由于回波信号极其微弱, 为单光子量级, 过强的本振信号将引入较大的散粒噪声, 降低信噪比, 因此, 应采用弱本振信号进行外差探测。

外差探测方式的系统设计与信号处理较为复杂, 但一方面通过光子计数统计实现目标精确测距, 另一方面还能记录并反演目标多普勒频率信息进而提取目标的运动特征, 可显著增加单光子雷达的探测信息量, 在远程非合作目标预警探测与识别方面具有广阔的应用前景。

需要注意的是, 直接探测与外差探测仅代表在当前技术条件下可能实现的两种典型的单光子雷达系统方案, 随着研究的深入和技术的进步, 不排除会出现其他更为先进的实现方式和探测体制。

5.2 太赫兹单光子雷达系统设计思路

在进行太赫兹单光子雷达系统设计时, 可采用不同的设计思路, 但总体来说, 应根据具体的应用场景确定雷达的主要功能指标, 再据此对雷达分系统核心参数进行逆向优化设计。根据前述分析, 对太赫兹单光子雷达主要功能指标、太赫兹源与单光子探测器核心参数以及各项指标参数之间的相互关系进行了分析与梳理, 给出了一种太赫兹单光子雷达系统设计思路, 如图 12 所示。雷达主要功能指标包括最大作用距离、

图 11 (网络版彩图)太赫兹单光子雷达外差探测方式示意图

Figure 11 (Color online) Schematic diagram of the heterodyne detection process of THz single-photon radar.

图 12 (网络版彩图)太赫兹单光子雷达系统设计思路
Figure 12 (Color online) Design scheme of the THz single-photon radar.

距离分辨率以及探测概率与虚警概率, 太赫兹源的核心参数包括发射功率、工作频率以及脉宽, 单光子探测器的核心参数包括NEP与测量带宽. 首先, 根据设定的探测概率与虚警概率确定最小可检测信噪比, 再结合NEP与测量带宽可确定最小可检测信号功率, 而最小可检测信号功率在工作频率、信号脉宽以及量子效率支撑下可与最小可探测初始光电子数互相转化, 其中, 信号脉宽与距离分辨率、探测概率与虚警概率之间又存在相互制约和依赖关系, 可为参数优化设计提供另一层约束. 最后, 根据设计的雷达最大作用距离以及最小可检测信号功率计算出太赫兹源需提供的发射功率水平.

6 太赫兹单光子雷达关键问题及前景展望

目前, 国内外关于单光子雷达的研究主要停留在光学频段, 太赫兹频段尚处于研究空白, 由于技术的前沿性和频段的特殊性, 诸多基础性、理论性问题亟待研究, 主要包括以下3个方面.

(1) 单光子雷达工作机理尚不完全明晰, 探测体制较为单一

太赫兹单光子雷达探测技术利用光子探测的半经典理论, 通过对微弱回波信号的光子计数统计获取脉冲信号的飞行时间, 进而实现目标距离的精确测量, 但缺乏有效手段实现目标的精确反演成像, 对于非合

作目标自身的转动、微动、平动、外形等典型特征也无能为力. 亟需通过机理与体制创新, 研究单光子量级的信息编码、调制与解调, 充分利用太赫兹光子的偏振、轨道角动量、纠缠等量子特性, 提高单光子雷达系统的信息传输、挖掘和利用效率, 进而推动太赫兹单光子雷达探测技术的创新发展.

(2) 大功率太赫兹源与太赫兹单光子探测器仍不成熟

太赫兹波产生方式主要分为电子学和光学两类, 当前, 电子学太赫兹源在低频段的输出功率约在毫瓦量级, 当发射频率升高时, 输出功率将显著下降, 因此, 电子学方式难以在1 THz以上的高频段获得大功率输出. 光学方式的太赫兹QCL是1–5 THz频段辐射源中非常重要的一种紧凑型激光源, 脉冲工作方式下峰值输出功率可达到瓦量级^[58]. 但太赫兹QCL电光转换效率低, 需要工作在低温环境, 体积较大, 功耗较高, 连续波工作模式下输出功率较低. 太赫兹单光子探测器目前尚不能像激光单光子探测器一样工作于常温状态下, 需要额外制冷设备, 体积较大, 功耗较高, 难以实现大规模阵列集成. 探测灵敏度与量子效率也有待进一步提升. 总的来说, 考虑到实际应用, 应大幅提升辐射源的功率输出水平和探测器的灵敏度与量子效率, 提高器件的工作温度, 并着力解决太赫兹源与单光子探测器的集成化和小型化难题.

(3) 单光子雷达信号处理方法有待进一步研究

在太赫兹单光子雷达探测系统中, 远程非合作目标后向散射回波极其微弱, 为单光子量级, 且特性复杂, 太赫兹回波光子具有随机和离散分布特性, 因此, 对于光子回波信号的检测, 传统雷达探测中基于包络检测和阈值检测的统计信号估计与检测理论不再适用, 需研究如何从单个光子或少数光子的涨落特性反演目标的宏观特征, 并提出改善光子计数精度与目标探测精度, 实现虚警抑制的有效技术手段. 因此, 需探索适用于太赫兹单光子雷达的新型高效信号处理方法.

太赫兹单光子雷达探测技术可显著提升太赫兹雷达系统的探测精度和作用距离, 助推太赫兹技术的实用化. 当单光子探测器 NEP 为 $10^{-18} \text{ W Hz}^{-1/2}$ 量级时, 接收灵敏度相比传统雷达提升约 4 个数量级, 根据雷达方程可知, 相同条件下将给雷达的最大作用距离带来约 10 倍的提升. 因此, 太赫兹单光子雷达探测技术在太

赫兹雷达增程、远程防空预警、反隐身以及城市公共安全防护等方面极具应用价值.

7 结论

太赫兹单光子雷达探测技术将太赫兹雷达技术与单光子探测技术相结合, 将传统太赫兹雷达的信号检测门限下探到单光子尺度, 最大限度地利用太赫兹波的高分辨特征和单光子雷达的极高探测灵敏度, 解决太赫兹雷达在探测成像和作用距离方面的技术瓶颈. 通过探测机理、系统体制以及处理方法创新, 有望为太赫兹雷达和太赫兹技术的实用化探索一条有效的技术途径, 并牵引整个太赫兹领域核心器件的发展. 最终为目标探测等应用提供重要理论和方法支撑, 为太赫兹理论与技术在军事和民用领域的应用提供强大动力.

致谢 感谢南京大学陈健教授与吴敬波副教授、中国科学院上海微系统与信息技术研究所曹俊诚研究员与谭智勇副研究员以及哈尔滨工业大学孙剑峰副教授的有益讨论.

参考文献

- Wiltse J C. History of millimeter and submillimeter waves. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 1984, 32: 1118–1127
- Siegel P H. Terahertz technology. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 2002, 50: 910–928
- Horiuchi N. Endless applications. *Nat Photon*, 2010, 4: 140
- Liu Y S, Wu K J, Liu C L, et al. Amplification of terahertz/infrared field at the nodes of Ranvier for myelinated nerve. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 274211
- Seitz P, Theuvsen A J P. Single-Photon Imaging. New York: Springer, 2011. 9–11
- Luo H J. Research on Key Technique of the Single Photon Imaging and Detection (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013 [罗韩君. 单光子成像探测关键技术研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2013]
- Milstein A B, Jiang L A, Luu J X, et al. Acquisition algorithm for direct-detection ladars with Geiger-mode avalanche photodiodes. *Appl Opt*, 2008, 47: 296–311
- Wang A Y, Tao Y L, Li X, et al. Design and test of high repetition frequency photon counting lidar prototype (in Chinese). *Laser Infr*, 2017, 47: 803–807 [王傲游, 陶宇亮, 李旭, 等. 高重复光子计数激光雷达样机设计及测距试验. *激光与红外*, 2017, 47: 803–807]
- Fouche D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors. *Appl Opt*, 2003, 42: 5388–5398
- Henriksson M. Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system. *Appl Opt*, 2005, 44: 5140–5147
- Goodman J W. Statistical Optics. New York: Wiley, 1985. 466–521
- Goodman J W. Some effects of target-induced scintillation on optical radar performance. *Proc IEEE*, 1965, 53: 1688–1700
- Benford D J, Hunter T R, Phillips T G. Noise equivalent power of background limited thermal detectors at submillimeter wavelengths. *Int J Infrared Millimeter Waves*, 1998, 19: 931–938
- Richards P L. Bolometers for infrared and millimeter waves. *J Appl Phys*, 1994, 76: 1–24

- 15 Leclercq S. Discussion about Noise Equivalent Power and Its Use for Photon Noise Calculation. Technical Report. Institut de Radioastronomie Millimétrique, 2007
- 16 Mackowiak V, Peupelmann J, Ma Y, et al. NEP—Noise Equivalent Power. Technical Report. Thorlabs Inc., 2015
- 17 Wang H Q, Deng B, Qin Y L. Review of terahertz radar technology (in Chinese). *J Radar*, 2018, 7: 1–21 [王宏强, 邓彬, 秦玉亮. 太赫兹雷达技术. 雷达学报, 2018, 7: 1–21]
- 18 Aull B F, Marino R M, McIntosh A K, et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays. In: *Proceedings of SPIE 4377, Laser Radar Technology and Applications VI*. Orlando: SPIE, 2001
- 19 Albota M A, Aull B F, Fouche D G, et al. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays. *Lincoln Lab J*, 2002, 13: 351–370
- 20 Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger mode APD arrays: System and measurements. In: *Proceedings of SPIE 5086, Laser Radar Technology and Applications VIII*. Orlando: SPIE, 2003
- 21 Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G, et al. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser. *Appl Opt*, 2002, 41: 7671–7678
- 22 Zhang C. Prototype of Three-Dimensional Imaging Lidar for Arrays Detectors (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2017 [张驰. 小面阵三维成像激光雷达原理样机. 博士学位论文. 上海: 中国科学院大学, 2017]
- 23 Marino R M, Davis W R. Jigsaw: A foliage-penetrating 3D imaging laser radar system. *Lincoln Lab J*, 2005, 15: 23–35
- 24 Vaidyanathan M, Blask S, Higgins T, et al. Jigsaw phase III: A miniaturized airborne 3-D imaging laser radar with photon-counting sensitivity for foliage. In: *Proceedings of SPIE 6550, Laser Radar Technology and Applications XII*. Orlando: SPIE, 2007. 65500N
- 25 Sudharsanan R, Yuan P, Boisvert J, et al. Single photon counting Geiger mode InGaAs(P)/InP avalanche photodiode arrays for 3D imaging. In: *Proceedings of SPIE 6950, Laser Radar Technology and Applications XIII*. Orlando: SPIE, 2008. 69500N
- 26 Zheng R T, Wu G H. Pulsed one-dimensional scannerless LiDAR system based on linear APD array (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2012, 41: 96–100 [郑睿童, 吴冠豪. 基于线阵APD探测器的脉冲式一维非扫描激光雷达系统. 红外与激光工程, 2012, 41: 96–100]
- 27 Lussana R, Villa F, Mora A D, et al. Enhanced single-photon time-of-flight 3D ranging. *Opt Express*, 2015, 23: 24962–24973
- 28 Jin L. Research progress of quantum radar (in Chinese). *Mod Radar*, 2017, 39: 1–7 [金林. 量子雷达研究进展. 现代雷达, 2017, 39: 1–7]
- 29 Sun J F, Jiang P, Zhang X C, et al. Experimental research of 32×32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2016, 45: 1206006 [孙剑峰, 姜鹏, 张秀川. 32×32面阵InGaAs Gm-APD激光主动成像实验. 红外与激光工程, 2016, 45: 1206006]
- 30 Pawlikowska A M, Halimi A, Lamb R A, et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range. *Opt Express*, 2017, 25: 11919–11931
- 31 Du B, Pang C, Wu D, et al. High-speed photon-counting laser ranging for broad range of distances. *Sci Rep*, 2018, 8: 4198
- 32 Crowe T W, Hesler J L, Bishop W L, et al. Integrated GaAs diode technology for millimeter and submillimeterwave components and systems. In: *Proceedings of MRS Spring Meeting*. San Francisco: Cambridge University Press, 2000. AA2.3
- 33 Crowe T W, Bishop W L, Porterfield D W, et al. Opening the terahertz window with integrated diode circuits. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2005, 40: 2104–2110
- 34 Essen H, Hagelen M, Johannes W, et al. High resolution millimetre wave measurement radars for ground based SAR and ISAR imaging. In: *Proceedings of IEEE Radar Conference*. Rome: IEEE, 2008. 1–5
- 35 Essen H, Wahlen A, Sommer R, et al. High-bandwidth 220 GHz experimental radar. *Electron Lett*, 2007, 43: 1114–1116
- 36 Stanko S, Palm S, Sommer R, et al. Millimeter resolution SAR imaging of infrastructure in the lower THz region using MIRANDA-300. In: *Proceedings of the 46th European Microwave Conference*. London: IEEE, 2016. 1505–1508
- 37 Dahlbäck R, Rubæk T, Bryllert T, et al. A 340 GHz CW non-linear imaging system. In: *Proceedings of the 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves*. Rome: IEEE, 2010. 1–2
- 38 Cheng B B, Jiang G, Wang C, et al. Real-time imaging with a 140 GHz inverse synthetic aperture radar. *IEEE Trans THz Sci Tech*, 2013, 3: 594–605
- 39 Cheng B B, Jiang G, Chen P, et al. 0.67 THz high resolution imaging radar (in Chinese). *J Terahertz Sci Electron Inform Tech*, 2013, 11: 7–11 [成彬彬, 江舸, 陈鹏, 等. 0.67 THz高分辨力成像雷达. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11: 7–11]
- 40 Gu S, Li C, Gao X, et al. Three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz Gaussian beam-theory and experiment. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2013, 51: 2241–2249

- 41 McIntosh R E, Narayanan R M, Mead J B, et al. Design and performance of a 215 GHz pulsed radar system. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 1988, 36: 994–1001
- 42 Tang L, Xu D, Wang Y, et al. Injection pulse-seeded terahertz-wave parametric generator with gain enhancement in wide frequency range. *Opt Express*, 2019, 27: 22808–22818
- 43 Goyette T M, Dickinson J C, Waldman J, et al. 1.56-THz compact radar range for w-band imagery of scale-model tactical targets. In: Proceedings of the SPIE 4053, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VII. Orlando: SPIE, 2000
- 44 Coulombe M J, Horgan T, Waldman J, et al. A 160 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements. In: Proceedings of Antenna Measurements and Techniques Association Proceedings. Seattle, 1996
- 45 Kazarinov R F, Suris R A. Possibility of the amplification of electromagnetic waves in a semiconductor with a superlattice. *Sov Phys Semicond*, 1971, 5: 707
- 46 Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser. *Science*, 1994, 264: 553–556
- 47 Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser. *Nature*, 2002, 417: 156–159
- 48 Danylov A A, Goyette T M, Waldman J, et al. Coherent imaging at 2.4 THz with a CW quantum cascade laser transmitter. In: Proceedings of the SPIE 7601, Terahertz Technology and Applications III. Orlando: SPIE, 2010. 760105
- 49 Danylov A A, Goyette T M, Waldman J, et al. Terahertz inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter. *Opt Express*, 2010, 18: 16264–16272
- 50 Tan Z Y, Wan W J, Li H, et al. Progress in real-time imaging based on terahertz quantum-cascade lasers (in Chinese). *Chin Opt*, 2017, 10: 68–77 [谭智勇, 万文坚, 黎华, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的实时成像研究进展. *中国光学*, 2017, 10: 68–77]
- 51 Vitiello M S, Scalari G, Williams B, et al. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges. *Opt Express*, 2015, 23: 5167–5182
- 52 Li L H, Chen L, Zhu J X, et al. Terahertz quantum cascade lasers with >1 W output powers. *Electron Lett*, 2014, 50: 309–311
- 53 Belkin M A, Capasso F. New frontiers in quantum cascade lasers: High performance room temperature terahertz sources. *Phys Scr*, 2015, 90: 118002
- 54 Curwen A C, Reno L J, Williams S B, et al. Terahertz quantum cascade VECSEL with watt-level output power. *Appl Phys Lett*, 2018, 113: 1–4
- 55 Scalari G, Walther C, Fischer M, et al. THz and sub-THz quantum cascade lasers. *Laser Photon Rev*, 2009, 3: 45–66
- 56 Chan C W I, Hu Q, Reno J L. Ground state terahertz quantum cascade lasers. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 151108
- 57 Wang X, Shen C, Jiang T, et al. High-power terahertz quantum cascade lasers with ~0.23 W in continuous wave mode. *AIP Adv*, 2016, 6: 075210
- 58 Li L H, Zhu J X, Chen L, et al. The MBE growth and optimization of high performance terahertz frequency quantum cascade lasers. *Opt Express*, 2015, 23: 2720–2729
- 59 Li H, Cao J C. Manufacturing and imaging applications of terahertz quantum cascade lasers (in Chinese). *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2008, 38: 485–493 [黎华, 曹俊诚. 太赫兹量子级联激光器制备及其成像应用. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 485–493]
- 60 Zhang L B, Kang L, Chen J, et al. Development of superconductor nanowire single photon detector (in Chinese). *J Nanjing Univ (Nat Sci)*, 2014, 50: 254–261 [张蜡宝, 康琳, 陈健, 等. 超导纳米线单光子探测器研究新进展. *南京大学学报(自然科学)*, 2014, 50: 254–261]
- 61 Miki S, Yamashita T, Terai H, et al. High performance fiber-coupled NbTiN superconducting nanowire single photon detectors with Gifford-McMahon cryocooler. *Opt Express*, 2013, 21: 10208–10214, arXiv: 1303.6381
- 62 Younger R D, McIntosh K A, J. W. Chludzinski, et al. Crosstalk analysis of integrated Geiger-mode avalanche photodiode focal plane arrays. In: Proceedings of SPIE 7320, Advanced Photon Counting Techniques III. Orlando: SPIE, 2009. 73200Q
- 63 Entwistle M, Itzler M A, Chen J, et al. Geiger-mode APD camera system for single-photon 3D LADAR imaging. In: Proceedings of SPIE 8357, Advanced Photon Counting Techniques VI. Orlando: SPIE, 2012. 83750D
- 64 de Borniol E, Rothman J, Guellec F, et al. Active three-dimensional and thermal imaging with a 30- μm pitch 320 $\times$ 256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array. *Opt Eng*, 2012, 51: 061305
- 65 Comandar L C, Fröhlich B, Dynes J F, et al. Gigahertz-gated InGaAs/InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at 1550 nm. *J Appl Phys*, 2015, 117: 083109, arXiv: 1412.1586
- 66 Liang C, Liao J, Liang B, et al. Performance of a silicon avalanche diode as a single photon detector (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2000, 29: 1142–1147 [梁创, 廖静, 梁冰, 等. 硅雪崩光电二极管单光子探测器. *光子学报*, 2000, 29: 1142–1147]
- 67 Liang C, Fu D H, Liang B, et al. Quantum key distribution over 1.1 km in an 850 nm experimental all-fiber system (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2001, 50: 1429–1433 [梁创, 符东浩, 梁冰, 等. 850 nm 光纤中 1.1 km 量子密钥分发实验. *物理学报*, 2001, 50: 1429–1433]

- 68 Zhang X C, Jiang L Q, Gao X J, et al. Fabrication of InGaAs/InP Geiger-mode avalanche focal plane arrays. *Semicond Optoelectron*, 2015, 36: 356–391
- 69 Jiang W H, Liu J H, Liu Y, et al. 125 GHz sine wave gating InGaAs/InP single-photon detector with a monolithically integrated readout circuit. *Opt Lett*, 2017, 42: 5090–5093, arXiv: [1711.02796](#)
- 70 Kang L, Lu X H, Chen J, et al. Room temperature Nb₃N₆ bolometer for THz detection. In: *Proceedings of 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. Busan: IEEE, 2009. 1–2
- 71 Tu X C, Kang L, Liu X H, et al. Antenna-coupled microbolometer array for terahertz detection. In: *Proceedings of 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave*. Wollongong: IEEE, 2012. 1–1
- 72 Mao Q, Tu X, Xu L, et al. Effective receiving area of the antenna-coupled terahertz detector. *Opt Eng*, 2014, 53: 023103
- 73 Sun J D, Sun Y F, Wu D M, et al. High-responsivity, low-noise, room-temperature, self-mixing terahertz detector realized using floating antennas on a GaN-based field-effect transistor. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 013506
- 74 Qin H, Li X, Sun J, et al. Detection of incoherent terahertz light using antenna-coupled high-electron-mobility field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 171109, arXiv: [1703.03128](#)
- 75 Shi S C, Li J, Zhang W, et al. Terahertz high-sensitivity superconducting detectors (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 28501 [史生才, 李婧, 张文, 等. 超高灵敏度太赫兹超导探测器, *物理学报*, 2015, 64: 28501]
- 76 Hanaoka M, Kaneda H, Oyabu S, et al. Development of blocked-impurity-band-type Ge detectors fabricated with the surface-activated wafer bonding method for far-infrared astronomy. *J Low Temp Phys*, 2016, 184: 225–230
- 77 Wada T, Arai Y, Baba S, et al. Development for germanium blocked impurity band far-infrared image sensors with fully-depleted silicon-on-insulator CMOS readout integrated circuit. *J Low Temp Phys*, 2016, 184: 217–224
- 78 Irwin K D, Hilton G C. Transition-edge sensors. In: Enss C, ed. *Cryogenic Particle Detection in Topics in Applied Physics*. Berlin: Springer, 2005. 63–150
- 79 Hijmering R A, Khosropanah P, Ridder M, et al. Effect of magnetic fields on TiAu TES bolometers for the SAFARI instrument on the SPICA FIR telescope. *J Low Temp Phys*, 2012, 167: 242–247
- 80 Zhang W, Zhong J Q, Miao W, et al. Characterization of a superconducting NbSi transition edge sensor for TeSIA. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2015, 25: 1–4
- 81 Kleinschmidt P, Giblin S P, Antonov V, et al. A highly sensitive detector for radiation in the terahertz region. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2007, 56: 463–467
- 82 Sizov F. Terahertz radiation detectors: The state-of-the-art. *Semicond Sci Tech*, 2018, 33: 1–26
- 83 Komiyama S, Astafiev O, Antonov V, et al. A single-photon detector in the far-infrared range. *Nature*, 2000, 403: 405–407
- 84 Astafiev O, Komiyama S, Kutsuwa T, et al. Single-photon detector in the microwave range. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 4250–4252
- 85 Shaw M D, Bueno J, Day P, et al. Quantum capacitance detector: A pair-breaking radiation detector based on the single Cooper-pair box. *Phys Rev B*, 2009, 79: 144511, arXiv: [0902.4194](#)
- 86 Roschier L, Sillanpää M, Hakonen P. Quantum capacitive phase detector. *Phys Rev B*, 2005, 71: 1–5, arXiv: [cond-mat/0408145](#)
- 87 Echternach P M, Pepper B J, Reck T, et al. Single photon detection of 1.5 THz radiation with the quantum capacitance detector. *Nat Astron*, 2018, 2: 90–97

Terahertz single-photon radar detection technology

LUO ChengGao, LIU Kang, WANG HongQiang* & DENG Bin

College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Terahertz single-photon radar detection technology implements single-photon detection in the terahertz region. It combines the high-resolution characteristics of the terahertz wave and the extreme high detection sensitivity of the single-photon radar. Because the power response threshold is as low as the single-photon level, terahertz single-photon radar has an extremely low noise level with fairly high sensitivity. It is capable of detecting weak signals via the time-correlated single-photon counting technique, and it is expected to significantly extend the detection range of the current terahertz radar systems. In this paper, we at first reviewed the background of the terahertz single-photon radar detection technology, and expounded its principles, characteristics, and state-of-the-art technologies. We then proposed two typical technical approaches, including the direct detection and heterodyne detection methods, and presented an insight into the design of radar systems. Finally, we analyzed the current key issues in the terahertz single-photon radar detection technology and discussed its potential applications such as the radar range-extending, remote air defense early-warning, and anti-stealth. We believe that the results will provide a feasible technical approach to break through the bottlenecks of the detection capability and detection range of terahertz radar systems. Furthermore, the results would promote the innovation and development of the detection mechanism, methods, systems, and devices employed in terahertz technology. Thus, this study can provide a powerful impetus for the development and application of the terahertz technology, both in military and civilian fields.

terahertz, single-photon radar, photon counting

PACS: 84.40.Xb, 07.57.Hm, 07.57.Kp, 42.50.Ar, 42.50.Lc

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0255](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0255)