

基于 0.22 THz 高功率回旋管的步进频率雷达系统设计与仿真

张成鑫^{1,2}, 鄢扬^{1*}, 傅文杰^{1*}

(1. 电子科技大学 电子科学与工程学院(示范性微电子学院), 四川 成都 610054;
2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 基于 0.22 THz 高功率回旋管振荡器设计了频率步进成像雷达, 采用收发分开的双卡塞格伦天线, 发射信号形式为频率步进脉冲信号, 回旋管频率调节通过调整回旋管电子束电压或者超导磁场强度来实现。给出了成像雷达设计方案, 对雷达最大作用距离和步进频率雷达系统高分辨一维距离像进行了分析, 开展了 ISAR 成像仿真。理论计算和仿真结果表明, 该雷达对于散射面积为 0.01 m² 的目标探测距离可达到 1.982 km, 可分辨 500 m 处间距 2 cm 的点目标。该雷达可对低高度小目标进行高精度探测, 比如对可携带武器和危险物质的无人机进行高精度探测与目标识别。

关键词: 太赫兹; 步进频率雷达; 逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR); 高分辨率; 回旋管
中图分类号: TN958.5 **文献标识码:** A

Design and simulation of 0.22 THz stepped frequency radar system based on high power gyrotron

ZHANG Cheng-Xin^{1,2}, YAN Yang^{1*}, FU Wen-Jie^{1*}

(1. School of Electronic Science and Engineering (National Exemplary School of Microelectronics), University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China;
2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: A stepped frequency imaging radar based on 0.22 THz high-power gyrotron oscillator was designed. The dual Cassegrain antenna with separate transceiver was used for transmitting stepped frequency pulse signal. Frequency adjustment of gyrotron oscillator was achieved by adjusting gyrotron electron beam voltage or superconducting magnet strength. The design schemes for imaging radar were given, the radar detected range and high-resolution range profile of the stepped frequency radar system were analyzed, and inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging simulation was carried out. The results of theoretical calculation and simulation show that the radar could detect the target with scattering area of 0.01 m² by 1.982 km and distinguish the targets with a distance of 2 cm at 500 m. The radar can be used for investigations on target recognition of small objects such as UAV which can take concealed weapons and threat material.

Key words: terahertz, stepped frequency radar, inverse synthetic aperture radar (ISAR), high resolution, gyrotron oscillator

PACS: 84.40.Xb

引言

太赫兹波是指频率在 100 ~ 1 000 GHz(波长在

3 mm ~ 30 μm)之间的电磁波, 介于毫米波与红外波之间。由于其频率高、带宽大, 所以太赫兹雷达的

收稿日期: 2020-02-01, 修回日期: 2020-09-05

Received date: 2020-02-01, Revised date: 2020-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61971097), 四川省科技项目(2018HH0136)。

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61971097), Sichuan Science and Technology Program (2018HH0136)

作者简介(Biography): 张成鑫(1982-), 男, 甘肃庆阳人, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究领域为太赫兹雷达、太赫兹功率器件
E-mail: zhangchengxin12@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: yanyang@uestc.edu.cn, fuwenjie@uestc.edu.cn

空间分辨率和距离分辨率都很高,使其在成像雷达、卫星通信、遥感、国土安全、反恐探测、医疗诊断、环境监测等领域具有重大的科学价值和广阔的应用前景^[1]。

太赫兹高分辨率雷达有着巨大的发展潜力,近年来已成为国内外太赫兹技术研究的重要方向之一^[2-14]。最早关于太赫兹雷达的报道是1988年马萨诸塞大学的McIntosh等^[9]基于当时真空器件扩展互作用振荡器(EIO)的发展在215 GHz的大气窗口附近实现了一部高功率非相干脉冲雷达。随后在1991年佐治亚理工学院的McMillan等^[10]为美国军方提出并实现了225 GHz脉冲相干实验雷达。德国的220 GHz太赫兹实验雷达利用逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像方式实现了对实物卡车、自行车与人体的高分辨成像^[11]。2012年中国科学院电子学研究所设计实现了一种0.2 THz聚焦波束扫描成像系统,可对人体携带的隐藏目标进行成像^[12]。北京理工大学则基于脉冲步进频信号体制研制了0.2 THz成像雷达系统,并完成了分辨率与距离实验测量^[13]。

目前,大部分太赫兹功率源输出功率低,成像雷达系统的作用距离近,极大地限制了科研与应用发展。回旋管是目前太赫兹低频段功率最大的辐射源,可以产生千瓦以上的功率输出,在远距离探测、高分辨雷达方面极具潜力,但传统太赫兹回旋振荡器仅能点频工作或跳频工作,极大地限制了其在雷达探测领域的应用。传统的可调频回旋管(回旋返波管)由于结构和工作原理,无法实现太赫兹频段内的工作。电子科技大学太赫兹研究中心长期开展频率可调谐回旋管的研究^[19-24],近期成功研制出新型高功率频率连续可调准光回旋管,实验中在220 GHz频点实现了3 GHz以上的调谐带宽,最大20 kW的功率输出^[25]。仿真结果表明,通过进一步优化工作参数,该回旋管有望实现12 GHz以上的调谐带宽。本论文基于上述回旋管,探索设计了高功率频率步进成像雷达的设计方案,分析了其关键技术指标,开展了频率步进雷达及ISAR成像仿真。

1 步进成像雷达原理

频率步进脉冲体制雷达利用多个宽脉冲合成一个窄脉冲,即在每一个完整的脉冲周期内,通过多次递增频率的脉冲跳步,雷达发射一系列脉冲频率步长为 Δf 的宽脉冲,尽管每一个宽脉冲在频率域

的频带很窄,但从宏观效果上来看,这一系列脉冲的合成效果在频域内与一窄脉冲的效果相同,这样既相当于等效获得了一个高强度、窄脉冲回波的频谱。

频率步进信号的数学表达式为:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} u_1(t - iT_r) \exp(j2\pi i \Delta f t). \quad (1)$$

子脉冲串 $u_1(t)$ 为矩形脉冲,其数学表达式为:

$$u_1(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right), \quad (2)$$

式中 T 为子脉冲宽度, T_r 为脉冲重复频率, N 为步进的脉冲个数, Δf 为频率变化量, $i\Delta f$ 为第 i 个脉冲的载频增量。

距离为 R 的目标回波信号接收混频后可得到:

$$r(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - iT_r - \frac{2R}{c}}{T}\right) \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2R}{c}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi i \Delta f \frac{2R}{c}\right). \quad (3)$$

在发射载波频率均匀步进的 N 个脉冲后,对 N 个脉冲回波进行相参脉冲压缩处理,从而得到合成的目标高分辨力一维距离像。

当采用频率步进技术时,其距离分辨率理论极限由系统信号带宽 B 决定,距离分辨率表达式为:

$$\Delta r = c/2B = c/2N\Delta F, \quad (4)$$

式中 c 为光速。当步进雷达中心频率为0.22 THz,合成带宽为12 GHz,系统发射信号范围为0.214~0.226 THz,则系统距离分辨率极限为1.25 cm。若回旋管可调谐带宽越大,则系统距离分辨率可以更小,频率步进雷达可以达到更高的分辨率。

2 0.22 THz频率步进雷达系统设计

2.1 系统总体设计

系统整体结构框图如图1所示。整套系统由高压调制器、超导磁场系统、冷却系统、钛泵电源、同步信号发生器、回旋管、准光模式转换器、卡塞格伦天线、混频器、中频处理系统等组成。

高功率脉冲回旋管在同步信号发生器的控制下产生0.22 THz高频脉冲信号,经准光模式转换器转换为高斯波束,再经卡塞格伦天线辐射至自由空间。回波信号经卡塞格伦天线接收后,传输至混频器,与本机振荡器混频后得到中频信号,中频信号经放大、滤波、相干处理、A/D转换后至数字信号

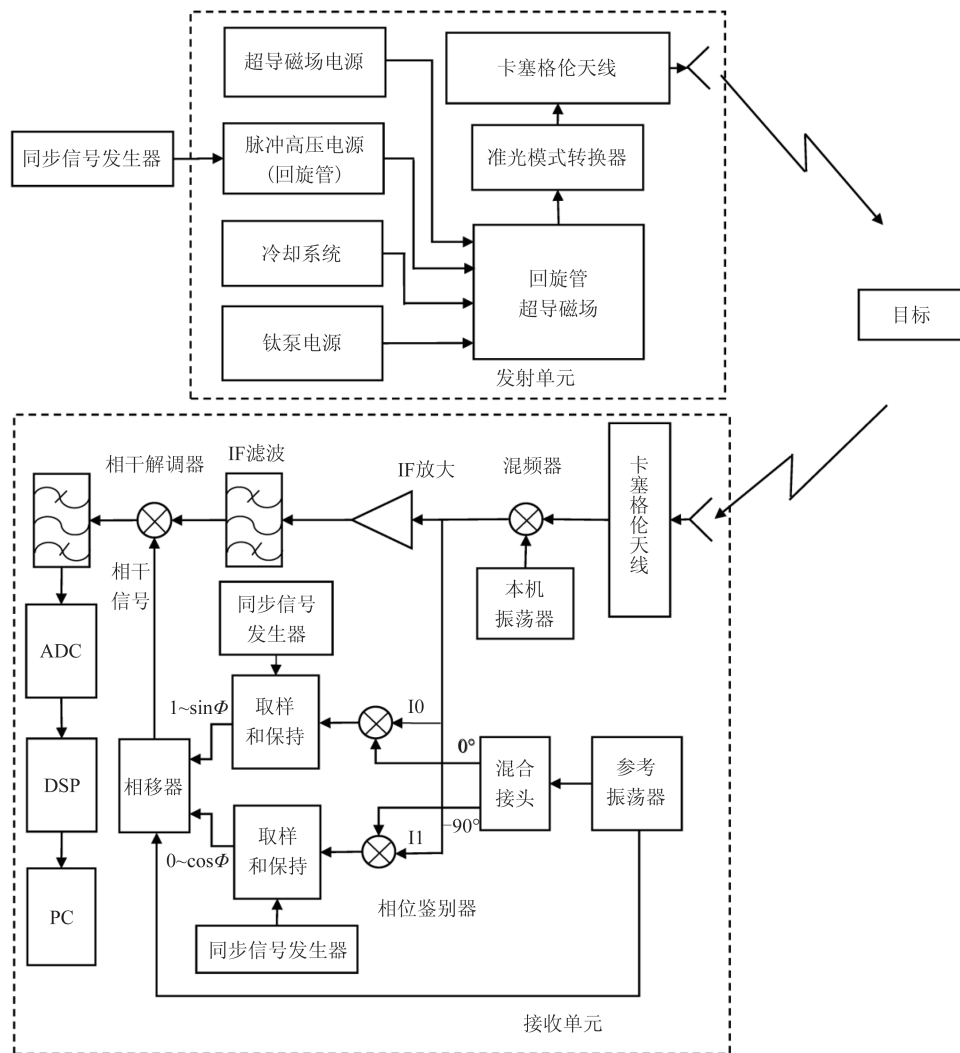


图1 0.22 THz步进频率雷达收发单元框图

Fig. 1 Diagram of 0.22 THz stepped frequency radar TR module

处理系统。同步信号发生器为回旋管以及相干处理系统提供同步信号。

由于回旋管振荡器属于非相参太赫兹波脉冲功率源,所以需要对其信号进行相干处理,以获取到相参太赫兹信号。另外该系统使用的是频率步进体制,本机振荡器及参考振荡器需要跟随回旋管频率的变化同步改变振荡频率。混频器可采用常温谐波混频器,也可采用低温超导混频器,以获得更低的噪声系数^[14]。

根据雷达成像原理,调频的频谱越宽,雷达系统的性能(精度、抗干扰性等)越好。可调频回旋管的频率可通过调节回旋管的工作电压和/或工作磁场实现,工作电压和工作磁场同时调节可实现最大的调频范围,但超导磁场受工作原理所限,调节速度慢;只调节工作电压可以实现快速

调节。

2.2 作用距离计算

由于采用频率步进脉冲雷达信号体制,雷达系统采用收发双天线模式,脉冲压缩体制的雷达方程为:

$$R = \left[\frac{P_t \tau G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e F_N L_d L_s (R_{SN})_{o,\min}} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (5)$$

式中 P_t 为发射机输出功率, τ 为雷达脉冲宽度, G_t 和 G_r 分别为收、发天线增益, λ 为工作波长, σ 为雷达散射面积, k 为玻尔兹曼常量, T 为开尔文温度, F_N 为接收机噪声系数, L_d 为大气衰减系数, L_s 为各种连接损耗及未知损耗, $(R_{SN})_{o,\min}$ 为最小可检测信噪比。考虑到雷达工作在地面,取大气衰减系数为 $L_d = 3.2$ dB/km。另外根据虚警概率和检测概率要求,最

小检测信噪比 $(R_{SN})_{0,\min}$ 取为16 dB。回旋管振荡器最大发射功率为40 kW,工作模式为TE₀₃模,需要使用准光模式转换器转换为高斯波束,再通过卡塞格伦天线向外辐射,功率转换效率取值为50%。具体参数如表1所示。

根据不同雷达散射面积,最大作用距离如下:当散射面积 $\sigma = 0.001\text{ m}^2$ 时,最大雷达作用距离为1.387 km,当散射面积 $\sigma = 0.01\text{ m}^2$ 时,最大雷达作用距离为最大作用距离为1.982 km,当散射面积 $\sigma = 0.1\text{ m}^2$ 时,最大雷达作用距离为2.702 km。其中 $\sigma = 0.01\text{ m}^2$ 为小型飞行器的散射面积。仿真计算结果表明,基于回旋管的0.22 THz雷达相比同类型其它雷达有很大的作用距离。在仿真计算中发现,大气衰减系数对仿真结果有很大的影响。因此,根据不同的气象条件、杂波、噪声和干扰,雷达最大探测距离会不同。

表1 0.22 THz 步进频率雷达设计参数

Table 1 Design parameters of 0.22 THz stepped frequency radar

参数	数值
频率范围	0.214~0.226 THz
发射信号功率(P_t)	20 kW
发射信号宽度(τ)	2 μs
雷达系统损耗(L_d)	5 dB
大气衰减系数(L_a)	3.2 dB/km
发射天线增益(G_t)	50 dBi
接收天线增益(G_r)	50 dBi
接收机噪声系数(F_N)	15 dB
最小可检测信噪比 $((R_{SN})_{0,\min})$	16 dB
工作温度(T_e)	300 K
工作波长(λ)	1.4 mm
玻尔兹曼常数(k)	1.38×10^{-23} J/K

在不考虑大气衰减的情况下,根据雷达方程分别对雷达散射面积 σ 为0.001 m²、0.01 m²和0.1 m²的目标进行计算,从图2可以看出,随着发射功率的增加,雷达对散射面积大的目标探测能力明显增加,而对小散射面积的探测能力增加相对较少。从图3可以看出,随着作用距离增加,各散射目标对最小可检测信噪比的要求是一致的。

3 0.22 THz 步进频率雷达高分辨率一维距离像

对于静止目标,式(3)的回波混频信号第一个指数项是常数,第2个指数项可以看成时间点是

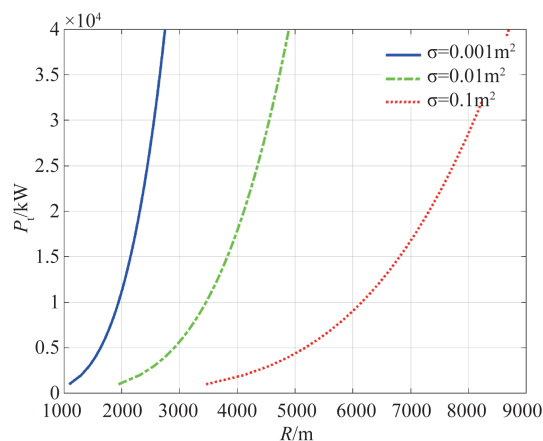


图2 雷达发射功率随最大作用距离的变化曲线图

Fig. 2 Radar transmitted power versus objected distance

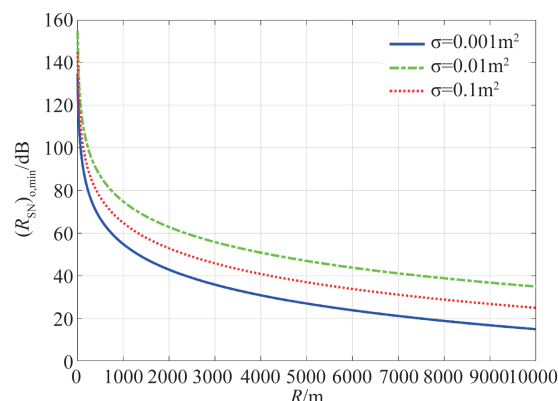


图3 雷达最小可检测信噪比随最大作用距离的变化曲线图

Fig. 3 Radar minimum detectable signal-to-noise ratio versus objected distance

2R/c、频率线性增加的频域信号,对每个回波信号在 $t_n = nT_r + 2R/c$ 处采样,并且归一化以后可以得到:

$$r(n) = \exp\left(-j2\pi n \frac{l}{N}\right), \quad (6)$$

式中 $l = \text{round}\left(\frac{2NR\Delta f}{c}\right)$, $n = 1, 2, 3, \dots, N - 1$ 。

提取 N 个脉冲时间窗内的任一采样点,会得到 N 个式(6)的信号采样值,对其做IDFT处理并取模,可得回波信号时域响应的包络,其表达式为:

$$|H(k)| = \left| \frac{\sin\pi(k-l)}{N \sin \frac{\pi}{N}(k-l)} \right|, k = 1, 2, 3, \dots, N - 1. \quad (7)$$

这就是点目标对步进频率信号的目标响应回波波形。显然,在 $k = l$ 时 $|H(k)|$ 取最大值,从而可以从 k 值计算出 l 值,然后反解出一维距离像。

电子科技大学的回旋管当前工作重复频率为

100 Hz, 脉宽为 2 μ s, 取步进频率为 0.1 GHz, 步进数为 120, 对 500 m 远处的点目标进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。从仿真结果可以看出, 可对 500 m 远处相距 2 cm 的点目标进行分辨。而对于运动目标, 如图 5 所示, 点目标波形发散, 目标回波幅度下降, 有耦合时移, 且分辨率降低。从图 6 可以看出, 目标速度越快, 波形发散和耦合时移现象越严重。

由于太赫兹波长比微波短, 频率步进信号合成时间较长, 对多普勒效应比较敏感, 因此, 在成距离像之前必须做脉内运动补偿, 以消除目标运动对相干合成处理的影响。

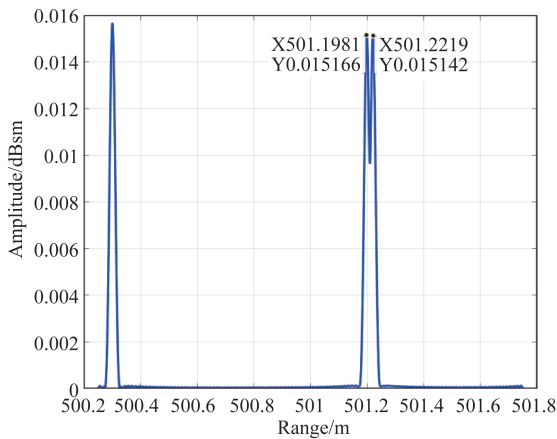


图 4 点目标高分辨一维距离像

Fig. 4 High resolution ranged profile of point target

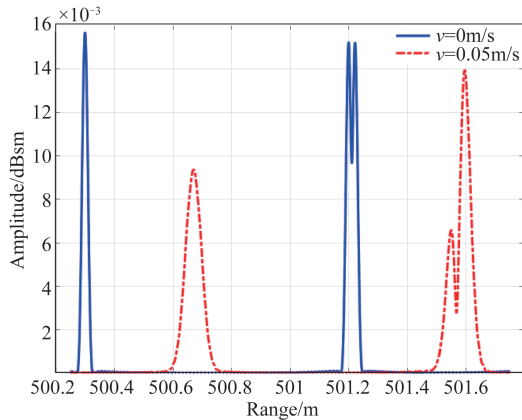


图 5 目标运动速度对雷达高分辨一维距离像的影响

Fig. 5 Velocity influences on the high resolution range profile

假设目标径向运动速度为 v_t , 目标归一化的时域响应可表示为

$$H(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} e^{j \left\{ \frac{2\pi}{N} ki - 2\pi i \Delta f \left[\frac{2R}{c} - \frac{2v_t}{c} \left(iT_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{c} \right) \right] \right\}} \quad (8)$$

从式(8)可以看出速度补偿的有效方法是获得一个目标速度的估计值, 则对运动目标的信号处理

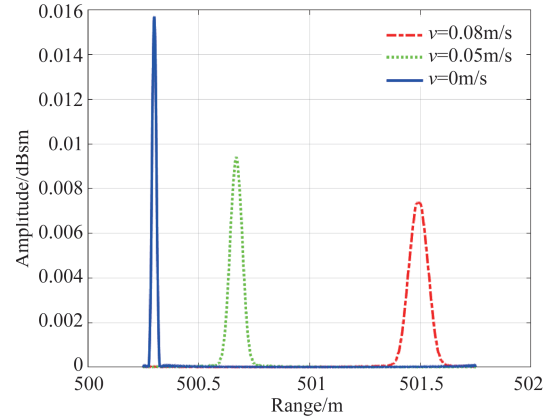


图 6 不同目标运动速度对雷达高分辨一维距离像的影响

Fig. 6 Influence of different velocities on the high resolution range profile

只要在对回波采样数据做傅里叶变换之前, 把目标运动的多普勒频率在相位中减掉即可。速度补偿的方法主要有频域互相关法、时域相关法、最小波形熵法、最小脉组误差法等。

用目标的距离和速度来表示目标回波信号混频输出信号的相位, 由式(3)可得

$$\Psi_i = -2\pi \left(f_0 + i\Delta f \right) \left[\frac{2R}{c} - \frac{2v_t t}{c} \right] \quad (9)$$

多普勒频率为

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = \left(f_0 + i\Delta f \right) \cdot \frac{2v_t}{c} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 对于速度相同的运动目标, 太赫兹雷达观测的多普勒频率要比常规的微波、毫米波雷达观测到的多普勒频率大得多。太赫兹雷达的大多普勒带宽为系统实现和信号处理会带来一定的困扰。比如在使用时, 信号采样为满足 Nyquist 采样定理, 需要进一步提高脉冲重复频率, 增加了雷达系统实现难度, 否则容易发生混叠, 增加信号处理的难度。但从另一方面来说, 大多普勒带宽对于目标微动特征的识别是非常有利的。

4 ISAR 成像仿真

利用 0.22 THz 步进频率雷达的优点, 可以对观测到的目标进行高分辨率二维成像, 进而实现目标成像、分类和识别。利用上述雷达系统参数, 对目标模型目标进行了 ISAR 成像仿真, ISAR 仿真参数如下: 步进频率为 100 MHz, 目标旋转角为 5° , 目标距离为 500 m, 四旋翼飞行器模型目标尺寸为 10 cm \times 10 cm, 无径向运动, IFFT 点数为 1 024。仿真结果如图 7 所示, 从仿真结果可以看出, 太赫兹

ISAR成像具有较高的分辨率,能够更好地反映目标的细节。

5 结论

基于0.22 THz回旋管振荡器进行了步进频率雷达系统方案设计,对最大作用距离及步进频率雷达系统一维高分辨力距离像等进行了仿真分析,开展了ISAR成像模拟。从仿真结果可以看出,对于散射面积为 $\sigma = 0.01\text{m}^2$ 的小型飞行器模型,在标准气象条件下最大雷达探测距离为1.982 km,在气候较干的区域,探测距离会更远;另外系统可对500 m外的静止小目标进行2 cm的高分辨率探测。最后,对该步进频率雷达系统对转台目标进行了ISAR成像仿真实验,仿真结果显示,该雷达成像系统成像精度很高,可用于低高度小目标飞行器的目标探测、分类和识别。

References

- [1] LIU Sheng-Gang, ZHONG Ren-Bin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China(刘盛纲,钟任斌.太赫兹科学技术及其应用的新发展.电子科技大学学报)2009, 38(5): 481-486.
- [2] Liu Z, Su K, Gary D E, et al. Video-rate terahertz interferometric and synthetic aperture imaging[J]. Applied optics. 2009, 48(19): 3788-3795.
- [3] Su K, Liu Z, Barat R B, et al. Two-dimensional interferometric and synthetic aperture imaging with a hybrid terahertz/millimeter wave system[J]. Applied optics. 2010, 49(19): E13-E19.
- [4] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. IEEE transactions on terahertz science and technology. 2011, 1(1): 169-182.
- [5] CAI Ying-Wu, YANG Chen, ZENG Geng-Hua, et al. Experimental research on high resolution terahertz radar imaging[J]. High Power Laser and Particle Beams(蔡英武,杨陈,曾耿华,等.太赫兹极高分辨力雷达成像试验研究.强激光与粒子束)2012, 24(1): 7-9.
- [6] CAI Zhen-Mao, GAO Jing-Kun, LU Bin. Real time 3D imaging system based on sparse MIMO array at 340 GHz[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves(蔡振茂,高敬坤,陆彬等.340GHz稀疏MIMO阵列实时3-D成像系统,红外与毫米波学报)2017, 36(1): 102-106.
- [7] YU Yang, PI Yi-Ming. Terahertz target radar cross-section measurement with ISAR technique[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves(喻洋,皮亦鸣.基于ISAR技术的太赫兹目标RCS测量.红外与毫米波学报)2015, 34(5): 545-550.
- [8] LIANG Mei-Yan, ZHANG Cun-Lin. Scattering characters of the corner reflectors in THz band[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves(梁美彦,张存林.角反射器在太赫兹波段的散射特性研究.红外与毫米波学报)2018, 37

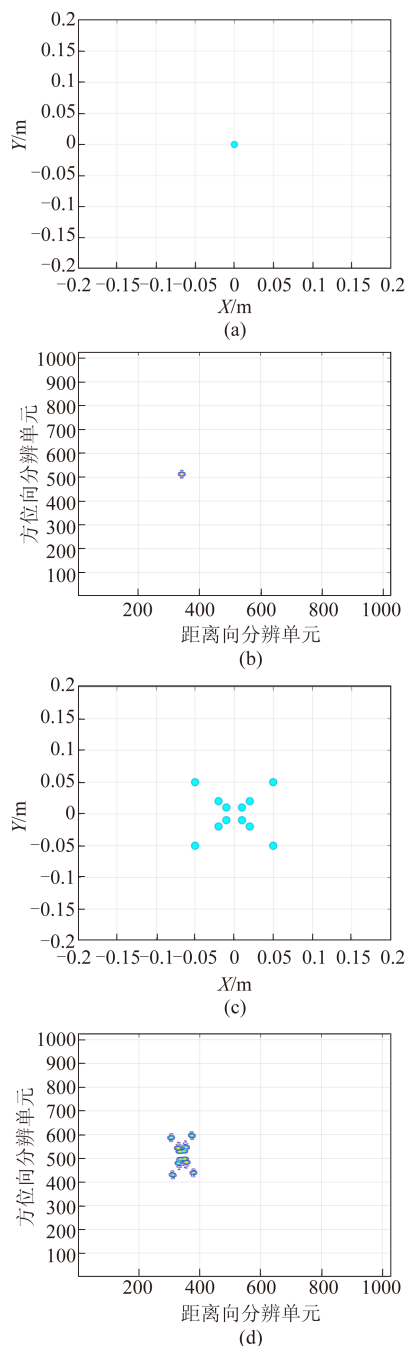


图7 ISAR成像雷达系统仿真结果(a)点目标,(b)点目标成像结果,(c)四旋翼飞行器模型,(d)四旋翼飞行器成像结果
Fig.7 Result of simulation for ISAR imaging system (a) point target, (b)point target imaging result, (c)four rotor aircraft model, (d)four rotor aircraft model imaging result

(3): 307-314,324.

- [9] McIntosh R E, Narayanan R M, Mead J B, et al. Design and performance of a 215 GHz pulsed radar system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1988, 36(6): 994-1001.
- [10] Mcmillan R W, Trussell C W, Bohlander R A, et al. An experimental 225 GHz pulsed coherent radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1991,

- 39**(3): 555–562.
- [11] Danylov A A, Goyette T M, Waldman J, *et al.* Terahertz inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter [J]. *Optics express*. 2010, **18**(15): 16264–16272.
- [12] Gu S, Li C, Gao X, *et al.* Three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz Gaussian beam—theory and experiment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013, **51**(4): 2241–2249.
- [13] HU Wei-Dong, ZHANG Meng, WU Hua-Feng, *et al.* Research on step-frequency terahertz pulses imaging technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (胡伟东, 张萌, 武华锋, 等. 频率步进太赫兹脉冲成像技术研究. *强激光与粒子束*) 2013, **25**(6): 1605–1608.
- [14] LI Jin, PI Yi-Ming, YANG Xiao-Bo. Spaceborne imaging radar system based on gyrotron in terahertz band design and simulation [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument* (李晋, 皮亦鸣, 杨晓波. 基于回旋管的星载太赫兹成像雷达设计与仿真. *电子测量与仪器学报*). 2010, **24**(10): 892–898.
- [15] YAN Yang, LIU Sheng-Gang, LI Xiao-Yun, *et al.* Design and demonstration of a 0.22 THz gyrotron oscillator [J]. *Chinese Science Bulletin* (鄢扬, 刘盛纲, 黎晓云, 等. 0.22THz 回旋管振荡器的研制与实验. *科学通报*) 2009, **54**(4): 522–526.
- [16] Yan Y, Fu W, Li X, *et al.* Experimental results of a 0.42 THz harmonic gyrotron [C]. *Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2010 35th International Conference on. IEEE, 2010.
- [17] FU Wen-Jie, YAN Yang, LI Xiao-Yun, *et al.* Generating 0.42 THz radiation from a second harmonic gyrotron [J]. *Chinese Science Bulletin* (傅文杰, 鄢扬, 黎晓云, 等. 二次谐波回旋管产生 0.42THz 辐射输出. *科学通报*) 2011, **56**(28): 2380–2382.
- [18] YAN Yang, FU Wen-Jie. Development of terahertz gyrotrons [J]. *Vacuum Electronics* (鄢扬, 傅文杰. 太赫兹回旋管研究进展. *真空电子技术*) 2013, **302**(1): 27–30, 40.
- [19] LEI Lei, LIU Di-Wei, YAN Yang. Continuous frequency tunable 0.42 THz coaxial gyrotron [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (雷蕾, 刘頔威, 鄢扬. 0.42 THz 频率连续可调同轴回旋管. *红外与毫米波学报*) 2013, **32**(6): 559–562.
- [20] Guan X, Fu W, Lu D, *et al.* Demonstration of a high power frequency-tunable 0.22-THz gyrotron operating in high-order axial modes [C]. 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Paris, France, 2019, pp. 1–2.
- [21] Guan X, Chen C, Fu W, *et al.* Design of a 220-GHz continuous frequency-tunable gyrotron with quasi-optical cavity [C]. 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Beijing, 2015, pp. 1–2.
- [22] Song T, Wang W, Huang J, *et al.* Investigations on the effect of the electron beam misalignments on a continuously frequency-tunable gyrotron [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, **67**(4): 1819–1825.
- [23] Huang J, Song T, Zhang C, *et al.* Investigations on a 0.5-THz ultrabroadband, continuously frequency-tunable gyrotron [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, **48**(2): 581–586.
- [24] Liu D W, Song T, Hu Q, *et al.* Detailed investigations on a multisection cavity for a continuously frequency-tunable gyrotron [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, **66**(6): 2746–2751.
- [25] Fu W J, Guan X T, Yan Y. Generating high-power continuous-frequency tunable sub-terahertz radiation from a quasi-optical gyrotron with confocal waveguide [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, **41**(4): 613–616.