

文章编号: 2095-4980(2018)05-0757-06

一种 0.34 THz 站开式三维成像安检仪

经文^a, 安健飞^{a,b}, 成彬彬^{*a,b}, 陈鹏^{a,b}, 何月^{a,b}, 陆彬^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 介绍了一种太赫兹站开式大视角三维成像雷达系统。系统可用于人体隐藏危险品的成像检测, 采用二维非均匀逐点扫描的工作方式, 视场范围达到 0.6 m×1 m, 成像速度达到 2 s。系统工作于 0.34 THz, 采用直径 450 mm 椭球镜聚焦, 在 5.8 m 的成像距离实现了 2 cm 的方位分辨率。为了改善回波动态范围, 采用相位噪声相消的系统结构。系统采用调频连续波(FMCW)雷达线性调频信号作为工作波形, 工作带宽达到 12 GHz。成像结果显示, 系统校正后的距离分辨率可达到 2 cm, 能够实现隐藏危险品的有效检测。

关键词: 站开式成像; 太赫兹成像; 视场; 线性度校正

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0757

A 0.34 THz 3D imaging radar for standoff personal screening

JING Wen^a, AN Jianfei^{a,b}, CHENG Binbin^{*a,b}, CHEN Peng^{a,b}, HE Yue^{a,b}, LU Bin^{a,b}

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Microsystem & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A summary of a 0.34 THz standoff 3D imaging radar is presented which can be used for through-clothes imaging of person-borne concealed objects. Using a two dimensional non-uniform point-by-point scanning mode, a field of view of 0.6 m×1 m and 2 s imaging speed is achieved. The central frequency is 0.34 THz, and a 2 cm azimuth resolution at 5.8 m is obtained by using a ellipsoid with a diameter of 450 mm. In order to improve the dynamic range of the system, a phase noise cancellation structure is adopted. The Frequency-Modulated Continuous-Wave(FMCW) radar technique with a 12 GHz bandwidth is employed in the system. Imaging result shows that 2 cm range resolution can be achieved after calibration and the system can be utilized to detect concealed weapons.

Keywords: standoff imaging; terahertz imaging; field of view; nonlinearity calibration

如何对公共场所的平民的暴力恐怖袭击进行快速预警和检测是目前公共安全领域面临的一个难题。目前的安检领域中应用广泛的金属探测器和 X 射线检测仪在使用场景和应用对象方面存在诸多局限。X 射线的穿透性好, 图像分辨力高, 但是由于属于电离频段, 对人体有潜在伤害, 因此多用于行李检测; 金属探测器结合人工检查的方式是目前应用最为广泛的方式, 且检测正确率高, 但是这种方式需要对待测对象进行全身搜查, 检测速度慢, 比较适合人流量不大的场所, 如机场等场所。毫米波和太赫兹成像技术利用毫米波和太赫兹波对非极性物质, 如大部分衣物, 具有很好的穿透性, 可以实现对人体衣物下隐藏物品的成像识别。毫米波和太赫兹成像技术避免了现有检测手段的不足, 对人体没有伤害, 能够对可疑物品的位置进行标记, 避免了对待测对象进行全身检查, 提高了安检效率。现有的毫米波和太赫兹成像系统主要有 2 种成像方式: 主动成像和被动成像。被动成像通过检测隐藏物体和人体之间的温度差实现成像, 被动成像系统具有结构简单、成像速度快等优势, 但是成像的动态范围小, 成像效果容易受到周围环境的影响^[1-2]。和被动成像系统相比, 主动成像系统因其图像对比度高, 并且能够获得更加丰富的目标信息而受到更多的关注^[3-4]。相比于毫米波频段, 太赫兹波因其波长更短, 在相同检测距离情况下, 其分辨力更高, 并且有助于减小天线尺寸和系统体积, 更适合作为站开式成像系统的首选工作频段。

收稿日期: 2017-08-28; 修回日期: 2018-05-14

*通信作者: 成彬彬 email:chengbinbin@mtrc.ac.cn

从目前太赫兹器件发展水平以及大气衰减等方面综合考虑,满足实际应用的太赫兹安检系统工作频率一般会选择低于 1 THz,原因在于:一方面,在这个频段可以选择固态电路技术实现太赫兹源和探测器,降低系统复杂度;另一方面,在 1 THz 频段以下,存在几个大气窗口,分别在 340 GHz、670 GHz 和 850 GHz 附近,这些窗口大气对电磁波衰减较小,有利于电磁波的传输。太赫兹频段的站开式主动成像系统研究方面国内外比较有代表性的工作如表 1 所示。可以看到,表中所示的系统都工作于 670 GHz 以下,这是由现阶段太赫兹器件发展水平决定的。另一方面,表 1 所列工作都采用了线性调频信号作为探测波形,这样不仅有利于获得高精度距离维信息,而且可以在不提高发射功率的前提下,通过增加脉冲宽度的方法提高信噪比。最后,现有的系统都采用站开式成像方式,这种方式有利于减小光路扫描角度,提高成像速度。

表 1 太赫兹站开式主动成像系统概况

options	f/GHz	waveform	bandwidth/GHz	distance/m	FOV/ m^2	cross resolution/mm	imaging time/s
JPL[3]	676	FMCW	29.0	25	0.4×0.4	10.0	<1.0
PNNL[4]	350	FMCW	9.6	5.0	1.5×2.5	10.0	10.0
UPM[5]	300	FMCW	27.0	8.0	0.5×0.9	16.0	0.5
IECAS[6]	206	FMCW	10.0	3.0	2.0×0.6	10.0	<3.0
St Andrews[7]	340	FMCW	3.6	20.0	0.5×0.5	30.0	0.1
proposed system	334	FMCW	12.0	5.8	1.0×0.6	2.5	1.8

本文详细介绍了一种站开式太赫兹三维扫描成像安检仪原理样机,与其他文献介绍的系统的参数对比如表 1 所示。系统采用了单发单收的架构和二维逐点扫描的工作方式,为了在短时间完成较大视场范围的扫描成像,系统对光路设计和扫描方式进行了优化。系统工作中心频率 340 GHz,带宽 12 GHz,采用宽带线性调频信号作为发射波形,成像距离 5.8 m,视场范围 $2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$,成像时间 1.8 s。本文对系统采用的 FMCW 雷达信号模型和信号处理方法进行了介绍。在此基础上,重点对该系统进行了详细介绍,包括系统总体架构以及各个子系统的结构测试结果。最后给出系统成像实验结果。

1 FMCW 信号处理和距离维成像原理

线性调频发射信号^[8]可以表示为:

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) e^{j2\pi(f_c \hat{t} + \frac{1}{2}\gamma \hat{t}^2)} \quad (1)$$

式中: $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| < \frac{1}{2} \\ 0, & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}$; f_c 为中心频率; T_p 为脉宽; γ 为调频率; $\hat{t} = t - mT$ 为快时间, m 为整数, T 为脉冲重复周期, $t_m = mT$ 为慢时间, t 为全程时间。

模拟去斜过程中,利用一个参考信号与回波在混频器内作共轭相乘,差频处理后回波变成窄带信号,其输出为:

$$S_{if}(\hat{t}, t_m) = S_r(\hat{t}, t_m) S_{\text{ref}}^*(\hat{t}, t_m) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_t/c}{T_p}\right) e^{-j4\pi\gamma(\hat{t})R_t} e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c R_t} e^{-j\frac{4\pi\gamma}{c^2}R_t^2} \quad (2)$$

差频频率与目标的距离 R_t 成正比,其频率值为 $f_i = \gamma \frac{2R}{c}$ 。因此,对解线频调后的信号作傅里叶变换,便可在频域得到对应的各回波的 sinc 状的窄脉冲,脉冲宽度为 $1/T_p$,而脉冲位置与 R_t 成正比。相应的距离分辨力为:

$$\rho = c/2B \quad (3)$$

式中: c 为光速; B 为雷达发射波的带宽。如果雷达发射带宽大于 15 GHz,则系统可以分辨厚度大于 1 cm 的物体。在低频段,如此高的带宽很难达到,但是当工作频段为太赫兹时,获得高带宽的信号难度降低了。

2 系统描述

2.1 总体架构

系统总体结构和实物照片如图 1 所示,从功能上系统可以划分为 4 部分:信号采集与控制子系统、射频子系统、太赫兹收发信道子系统、光路与扫描伺服子系统。

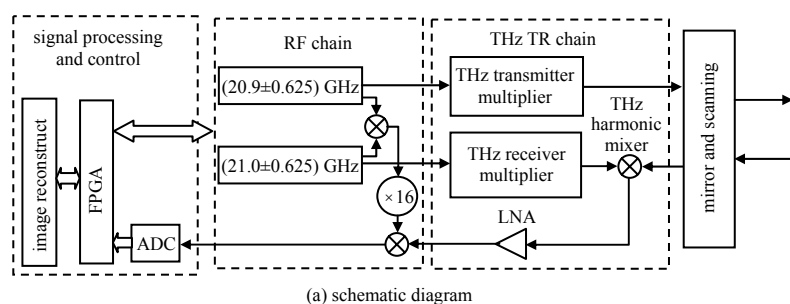


Fig.1 Structure of 0.34 THz 3D imaging system

图 1 0.34 THz 三维成像安检仪系统结构

射频模块生成的宽带信号经过太赫兹倍频链路后带宽扩展，转变为太赫兹频段的宽带线性调频信号。太赫兹发射信号经过光路与扫描子系统后在成像面上聚焦成光斑，一组功能不同的反射镜实现完成了波束聚焦和扫描功能。为提高扫描速度，系统采用一种非匀速二维机械扫描的工作方式。目标的反射回波由馈源接收后在谐波混频器内完成解线频调处理，输出中频窄带脉冲，脉冲的中心频率和成像距离成正比，由此便可得到目标的距离维信息。脉冲经过二次下变频和放大滤波等过程后被一个高速 ADC 采集，在 FPGA 内部完成正交解调、降采样等处理后，通过 PXI 总线上传至控制模块，完成信号的线性度校正和图像重构。系统工作参数如表 2 所示。

2.2 太赫兹雷达电子学系统

太赫兹雷达电子学系统是成像系统的重要部分，很大程度上决定了样机的性能。太赫兹雷达结构如图 2 所示，系统为全相参架构，接收机采用了超外差架构。雷达按照工作频段划分为 2 个部分：射频模块和太赫兹收发倍频链路。

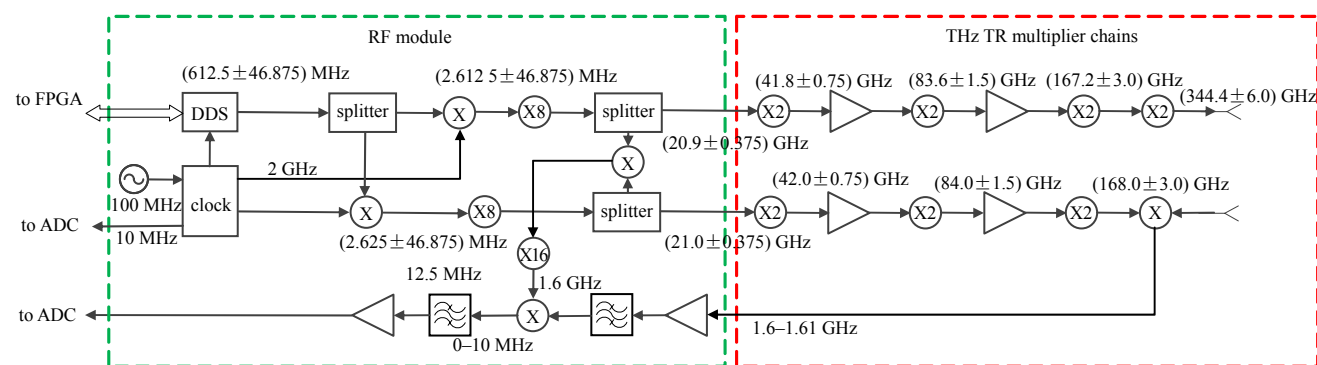


Fig.2 Block diagram of the imaging radar electronic subsystem

图 2 太赫兹雷达电子学系统结构框图

射频模块主要有 2 个功能：首先，为其前端的太赫兹倍频链路提供驱动信号；其次，将谐波混频器输出的中频回波信号进行二次下变频，放大滤波后输入至信号采集模块。系统采用了 DDS+混频或倍频操作的方案实现宽带线性调频信号的产生。DDS 输出信号的相位噪声经过倍频后会被恶化 $20\log N$ ，其中 N 是链路倍频次数。一般情况下，太赫兹频段的信号需要采用多次倍频的方法产生，因此，相位噪声会严重恶化。为改善接收信号的相噪，系统接收机中频的 1.6 GHz 本振信号是由发射链路和接收链路经过混频后再 16 倍频的方式获得，这种相噪抵消结构，有利于改善回波信号近端相噪^[3]。

0.34 THz 收发倍频链路包括发射倍频链路和接收倍频链路，用于产生宽带线性调频信号并为接收机提供本振信号。发射倍频链路将输入的射频信号 16 次倍频至 0.34 THz，工作带宽内的输出功率大于 0.2 mW。接收倍频链路利用谐波混频器实现回波信号去斜，成为中频 1.6 GHz 的窄带信号，整个接收机的噪声温度在 325~355 GHz 频段小于 1 600 K。

表 2 系统工作参数

options	this work
configuration	heterodyne
central frequency/GHz	334
bandwidth/GHz	12
waveform	sawtooth chirp
chirp period/ μ s	100
transmitted power/mW	>0.2
receiver noise figure/dB	11
sampling rate/MHz	250
standoff system/m	5.8
spot size/cm	<2
scanned area/cm ²	60×100
main reflector diameter/mm	450
imaging acquisition time/s	2

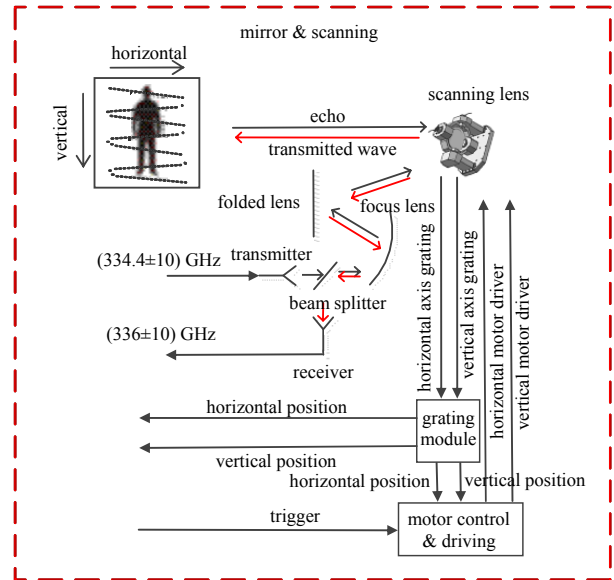
2.3 高速扫描光路

光路与扫描子系统主要实现太赫兹探测信号的聚焦和扫描功能,其结构如图 3(a)所示。为了实现系统在 2 s 时间内完成 $1\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ 的大视场扫描,系统利用 2 个电机的相互配合,在二维成像平面完成逐点扫描。方位维电机进行高速摆动,俯仰维电机进行一维匀速转动一个角度,2 个电机运动的结合,形成了成像平面上类似于正弦波形的焦点运动轨迹。

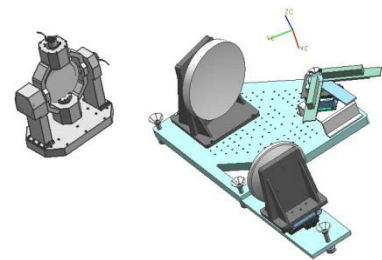
系统利用一组反射镜组成的复合光路将发射波束在成像焦平面聚焦成高斯波束,光路结构如图 3(b)所示。反射光路由分光镜、聚焦镜、折返平面镜和二维扫描镜组成。聚焦镜是一面椭球反射镜,为实现 2 cm 的方位分辨力,并在设计中留有一定余量,镜面直径为 450 mm 。聚焦后的波束经过一面反射平面镜后改变方向,入射到一面由二维高速电机控制的平面镜上,再次反射后在成像焦平面聚焦成高斯波束。

2.4 信号采集与控制子系统

信号采集与处理控制子系统完成对线性调频脉冲信号源、开关、衰减器等前端收发组件的配置和状态的控制。利用同步电缆和网口实现与扫描控制模块的通信和同步,采用大动态范围 ADC 完成去目标回波斜信号的采集,并结合对线性调频信号非线性校正,完成太赫兹收发链控制、扫描时序控制、回波信号采集、非线性校正、一维距离像成像等功能。其组成如图 4 所示,子系统工作在一台 3U 的 PXI 机箱上,所有工作由 2 个模块完成,即 NI-8135 和 NI-7965R。



(a) a quasi-optical system



(b) reflected mirror

Fig.3 Block diagram of the scanning antenna
图 3 光路与扫描子系统结构

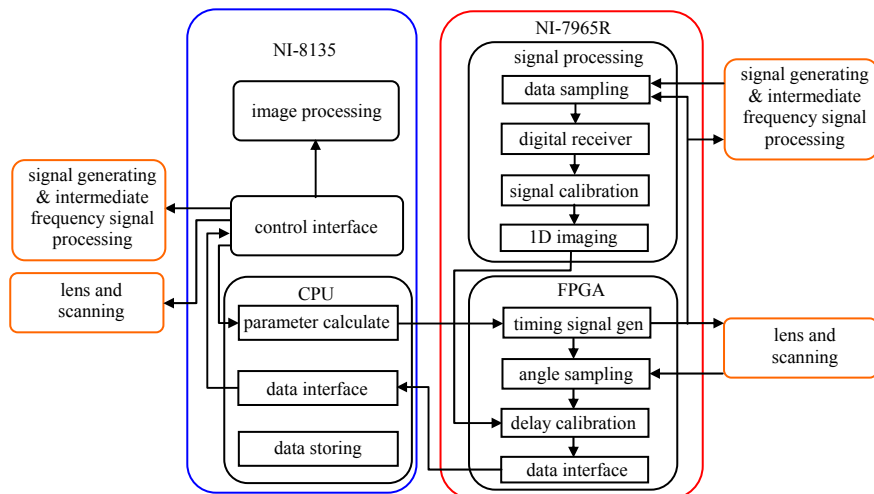


Fig.4 Block diagram of data acquisition and signal processing subsystem
图 4 信号采集与处理控制子系统结构图

NI-8135 控制(CPU)模块与 NI-7965R 上的控制(FPGA)模块相互配合,完成系统的同步、采集数据校正和上传等功能,控制(CPU)模块采用 Labview 软件实现,通过 UDP 端口和显控软件进行通信和数据传输。

NI-7965R 配置了高性能 FPGA 和灵活的可定制 I/O 接口。通过配置 NI5761 的四通道 14 bit,250 MSPS 采样率的 Flex RIO 适配模块,NI-7965R 能够实现高速信号采集、信号预处理和数据打包上传的整个流程。

3 系统实验结果

3.1 线性度校正

将集成后系统用于成像实验,首先对简单的平板目标进行成像,查看平板上任意一点的距离维波形,如图 5(a)所示,从图中可以看到,信号经过多次倍频和放大等环节后,线性度恶化严重,表现在去斜后的点目标一维距离像旁瓣很高,主瓣展宽,必须对信号进行非线性校正。本文采用文献[3]所述方法对回波数据进行线性度校正。在成像焦平面中心处放置一小球作为点目标定标体,用其去斜后的脉冲回波对所有成像点的回波数据进行校正,经过校正后的一维距离像结果如图 5(b)所示。

从图 5 中可以看到,铁板在校正前一维距离像展宽很严重,经过校正后的距离像得到明显改善,加窗后的主旁瓣比达到 17 dB,表明非线性校正方法对系统线性度恶化具有明显改善作用。

3.2 三维成像实验

从已有文献结果来看^[3,5],站开式扫描成像系统回波强度受回波入射角度影响较大,因此利用强度信息的成像方法无法反映目标材质信息,很难实现人体隐藏危险品探测。本文利用太赫兹高带宽的优势和目标的高精确度距离像信息进行成像,避免了入射角度对成像效果的影响,从而实现人体隐藏危险品的有效探测。

图 6 为对人体进行成像的场景和成像结果,待测对象胸前悬挂一模型手枪,手枪厚度约 2 cm,长约 12 cm。待测对象穿一白大褂,利用一维距离像的三维成像结果清晰显示出枪支和人体轮廓,证明系统对隐藏危险品有一定的检测能力。

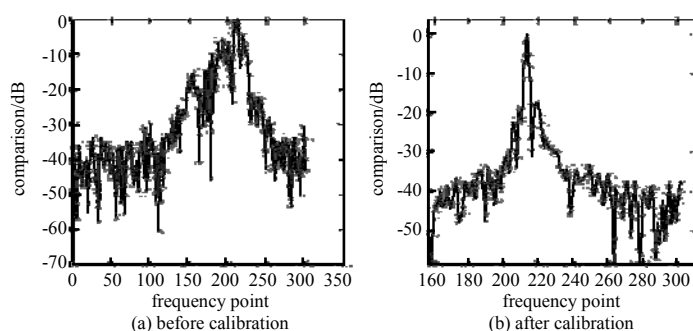


Fig.5 Comparison between range image before and after calibration
图 5 线性度校正前后的一维距离像对比



Fig.6 Radar image of a person with a concealed gun
图 6 人体隐藏危险品雷达成像结果

4 结论

本文介绍了一种用于人体安检的站开式太赫兹人体三维扫描成像系统。系统工作于 340 GHz,方位分辨力达到 2 cm,系统采用线性调频作为探测信号,带宽达到 12 GHz。系统采用单发单收的链路和二维高速电机相互配合,能够在 2 s 时间内完成 1 m×0.6 m 成像平面的扫描成像。测试结果显示,经过校正后的距离分辨力优于 2 cm,能够对隐藏危险品进行成像。下一步,将对系统光路和收发倍频链路进行优化,一方面降低系统体积和质量,另一方面提高信号工作带宽和太赫兹发射功率,提高距离维测量精确度和回波信噪比。

参考文献:

- [1] PETKIE D T,CASTO C,DE LUCIA F C,et al. Active and passive imaging in the THz spectral region: phenomenology, dynamic range, modes, and illumination[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008,25(9):1523–1531.

- [2] MAY T,ZIEGER G,ANDERS S,et al. Passive standoff terahertz imaging with 1 Hz frame rate[J]. Proceedings of SPIE, 2008(6949):69490C-1-69490C-8.
- [3] 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.
- [4] SHEEN D M,HALL T E,SEVERTSEN R H,et al. Active wideband 350 GHz imaging system for concealed weapon detection[J]. Proceedings of SPIE, 2009(7309):73090-1.
- [5] GRAJAL J,BADOLATO A,RUBIO-CIDRE G,et al. 3D high-resolution imaging radar at 300 GHz with enhanced FoV[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015,63(3):1097-1107.
- [6] GU S M,LI C,GAO X,et al. Terahertz aperture synthesized imaging with fan-beam scanning for personnel screening[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60(12):3877-3885.
- [7] ROBERTSON D A,MARSH P N,BOLTON D R,et al. 340-GHz 3D radar imaging test bed with 10-Hz frame rate[J]. Proceedings of SPIE, 2012(8362):836206-1-836206-11.
- [8] CUMMING I G,WONG F H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation[M]. Boston: Artech House, 2005.

作者简介:



经 文(1989-),男,广西壮族自治区桂林市人,在读博士研究生,主要研究方向为毫米波、太赫兹成像技术和目标特性.email: marty1865@foxmail.com.

陆 彬(1985-),男,重庆市人,硕士,研究实习员,主要研究方向为太赫兹通信系统、毫米波太赫兹波电路设计.

何 月(1988-),男,湖南省衡阳市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为毫米波与太赫兹电路.

安健飞(1979-),男,吉林省双辽市人,博士,助理研究员,主要研究方向为太赫兹雷达应用与雷达成像.

成彬彬(1981-),男,湖北省随州市人,博士,副研究员,主要从事太赫兹雷达与成像方面的研究.

陈 鹏(1983-),男,湖北省孝感市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为微波电路与系统、雷达引信设计.