

文章编号: 2095-4980(2013)01-0007-05

0.67 THz 高分辨力成像雷达

成彬彬^{a,b}, 江 舸^a, 陈 鹏^{a,b}, 杨 陈^a, 陆 彬^{a,b}, 蔡英武^{a,b},
邓贤进^{a,b}, 陈 樟^{a,b}, 张 健^{a,b}, 周传明^b

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

摘 要: 为达到厘米甚至亚厘米级的成像分辨力, 从电子学角度出发, 设计并构建了 0.67 THz 线性调频连续波(FMCW)成像实验平台。平台通过将 Ka 波段带宽 1.2 GHz、功率 2 W 的线性调频信号 24 倍频, 获得 0.66 THz~0.688 8 THz 的发射信号, 功率约为 1.2 mW, 接收端的回波经过谐波混频完成去斜(Dechirp)形成 2.4 GHz 中频信号, 二次变频后经高速采样送入信号处理机箱完成成像。雷达发射信号带宽为 28.8 GHz, 经系统非线性校正处理后, 成像分辨力达到 1.3 cm, 验证了太赫兹雷达的高分辨成像能力。

关键词: 太赫兹雷达; 高分辨力; 成像; 调频连续波

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

0.67 THz high resolution imaging radar

CHENG Bin-bin^{a,b}, JIANG Ge^a, CHEN Peng^{a,b}, YANG Chen^a, LU Bin^{a,b}, CAI Ying-wu^{a,b}, DENG Xian-jin^{a,b},
CHEN Zhang^{a,b}, ZHANG Jian^{a,b}, ZHOU Chuan-ming^b

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

Abstract: A 0.67 THz imaging radar is designed and constructed by using Frequency Modulated Continuous Wave(FMCW) technique. The peak output power of the transmitting signal is about 1.2 mW with a bandwidth of 0.66 THz–0.688 8 THz, which is attained by using a $\times 24$ frequency multiplication chain fed by a Ka-band 27.5 GHz–28.7 GHz linear frequency-modulated input source with 2 W driving power. After reflecting, the received signal is de-chirped by a $\times 12$ multiplier chain pumping Subharmonic Receiver Mixer(SHM) to get a 2.4 GHz IF signal. With an operating bandwidth of 28.8 GHz, the range resolution of terahertz radar is about 1.3 cm after calibration procedure compensating for signal distortion from radar waveform nonlinearities. Experiment results demonstrate the high resolution imaging ability of terahertz radar.

Key words: Terahertz radar; high resolution; imaging; Frequency Modulated Continuous Wave

近年来, 由于太赫兹源及检测器的飞速发展, 基于太赫兹波的主动式探测手段已逐渐走上应用, 特别是在成像方面, 太赫兹波由于其高分辨、无害性而获得广泛关注。太赫兹雷达作为太赫兹成像的重要手段, 在机场安检^[1]、跑道异物监测^[2]、缩比模型雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)测量^[3]等方面具有重要用途。典型的太赫兹成像雷达有扫描和(逆)合成孔径(SAR/ISAR) 2 种体制, 扫描成像以美国喷气推进实验室(JPL)的 0.6 THz 系列雷达为代表, 成像分辨力达到厘米甚至亚厘米量级^[4-6], 其应用场景设定为隐藏物品检测。而在 ISAR 成像方面, 德国应用科学研究所(FAGN)和美国马萨诸塞州立大学则分别从电子学和光学的角度出发, 研制出分辨力 1.8 cm 的 COBRA-220 雷达^[7]和分辨力 0.6 mm 的 2.5 THz 雷达^[8]。中科院电子所^[9]将 2 种体制相结合, 在 0.2 THz 频率上研制出一维扫描、另一维合成孔径的成像装置。中国工程物理研究院太赫兹研究中心在 0.14 THz ISAR 成像雷达实验^[10]的研究基础上, 基于电子学的方式构建了 0.67 THz 成像雷达实验平台, 平台以毫米波驱动的倍频链作为太赫兹辐射源, 肖特基二极管谐波混频器作为相参检测器, 对接收的大带宽线性调频信号进行去斜处理后完成高分辨成像, 成像分辨力达到 1.3 cm, 验证了太赫兹雷达的高分辨成像能力。

1 THz 雷达系统设计

为达到厘米到亚厘米级的雷达成像分辨率,发射信号带宽需达到 15 GHz(对应 1 cm 分辨率)以上,考虑到实际处理中加窗对主瓣的展宽效应,需要的信号带宽会更大,传统的宽带信号产生方法已难以满足。0.67 THz 雷达成像平台采用了倍频方式,在提高发射频率的同时对发射信号的带宽进行扩展,其原理框图如图 1 所示。在发射支路中,利用 DDS 配合锁相环产生 11.3 GHz~12.5 GHz 的线性调频信号,通过 Ku 频段频率相差 100 MHz 的 2 个点频源上变频到 Ka 波段,经功率放大后,分别作为发射倍频链和接收倍频链的驱动。在发射支路中,频率为 27.4 GHz~28.6 GHz,功率为 2 W 的毫米波信号驱动 $\times 2 \times 2 \times 2 \times 3$ 的倍频链,产生 0.66 THz~0.688 8 THz 的太赫兹波输出,功率 1 mW,同时,发射信号带宽也由 1.2 GHz 提升到 28.8 GHz,有效实现了发射带宽的扩展。接收支路与发射支路具有相近的结构, $\times 2 \times 2 \times 3$ 的频率链在 0.328 8 THz~0.343 2 THz 输出 10 mW 左右的功率,驱动肖特基二极管谐波混频器完成回波信号的去斜处理。发射和接收支路两 Ku 波段点源 100 MHz 的差频信号经 24 倍频后产生的 2.4 GHz 信号作为二次变频的本振,与谐波混频器去斜获得的中频信号混频得到基带信号,送入信号采集与处理模块完成成像。

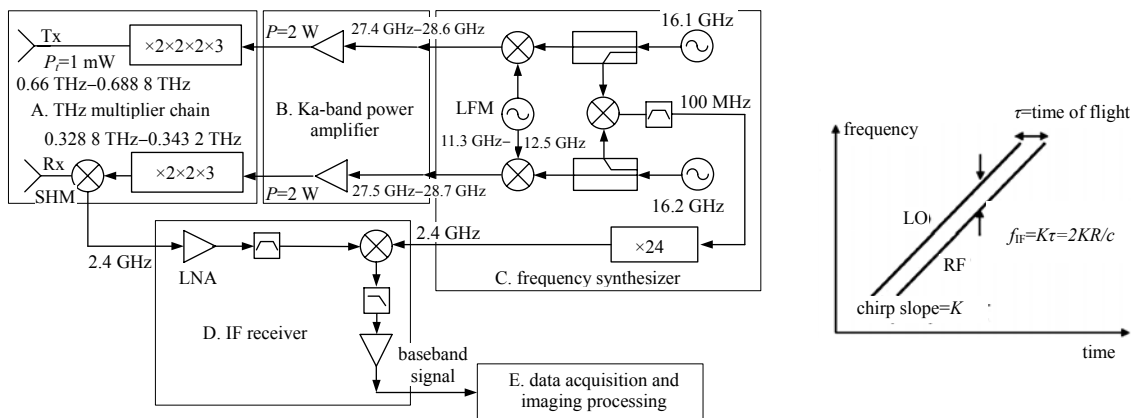


Fig.1 0.67 THz radar architecture and operation principle
图 1 0.67 THz 雷达架构及工作原理框图

与直接变换到零中频相比,2.4 GHz 差频的存在虽然增加了系统的复杂度,但可有效减小 $1/f$ 噪声的影响。另一方面,2.4 GHz 本振取自发射和接收 Ku 点源的差拍信号,可在较近的工作距离上起到相位对消的作用,大幅降低系统的相位噪声,由于倍频链倍频过程中的相噪恶化,低相噪的线性调频源和相位对消结构设计对系统的动态范围和成像分辨率意义重大。

在图 1 中,太赫兹雷达实验平台的功能组件划分为频率源、功放模块、太赫兹倍频链路、收发锥角喇叭天线、中频接收机、数据采集与成像处理单元等部分。对频率源、功放模块和中频接收机进行了集成,形成毫米波中频机箱,与太赫兹倍频链及信号采集处理单元配合,形成了太赫兹雷达实验平台,如图 2 所示。

2 成像实验与结果分析

为了测试 0.67 THz 雷达成像实验平台的性能,验证 0.67 THz 雷达宽带高分辨成像能力,设计了如图 3 所示的实验场景完成太赫兹雷达成像实验,雷达实验参数如表 1 所示。

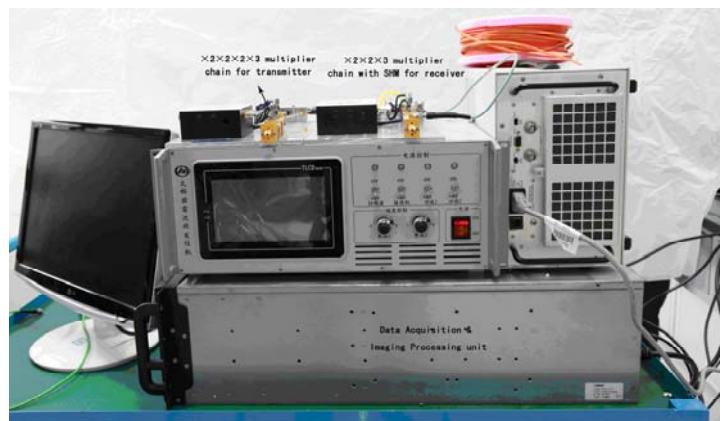


Fig.2 Integrated 0.67 THz experimental radar
图 2 0.67 THz 雷达实验平台集成实物图

表 1 0.67 THz 雷达实验参数表

Table 1 Parameters of the 0.67 THz radar for imaging experiment

parameter	value	parameter	value
RF frequency	0.675 THz	band width	28.8 GHz
signal mod	LFM	PRT	125 μ s
pulse width	100 μ s	transmit power	1 mW

由于发射信号带宽达到 28.8 GHz，在功率放大和混频过程中，信号带内平坦度和与频率有关的相位延迟均可能受到影响，发射和本振信号的相位和幅度调制会被引入到中频信号中，造成中频信号的严重展宽。为了保证系统的分辨力，需对雷达系统的采集信号进行非线性失真校正。校正采用发射与接收对传的方式，如图 3(a)所示，一次校正后点目标的一维距离像和二维图像分别如图 4(a)和图 4(b)所示，一维距离像中主瓣宽度约为 1 cm，主旁瓣比约为 13 dBc。一次校正后，由于旁瓣较高，可在图 4(b)中看到由旁瓣引起的虚假目标。为了压低旁瓣，处理中进行了二次校正处理，其结果如图 5 所示，主旁瓣比提高到 23 dBc 左右，但主瓣宽度也由 1 cm 展宽到约 1.3 cm。

为了验证雷达的高分辨成像能力，利用角反射器进行分辨成像实验，如图 3(b)所示，2 个角反射器的间距约为 1.3 cm，其成像结果如图 6 所示。太赫兹雷达在一维距离像和二维图像上均能将这 2 个点目标分开，验证了太赫兹雷达的高分辨成像能力，成像分辨力优于 1.3 cm。

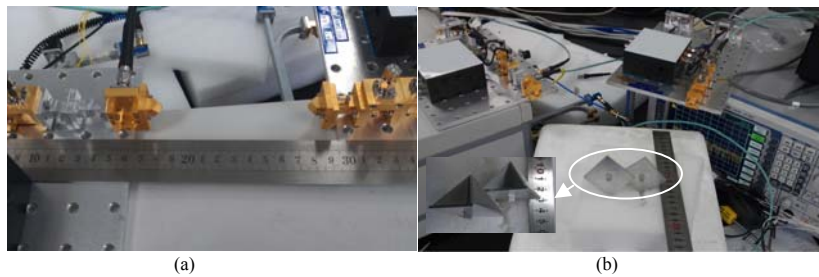


Fig.3 Calibration and imaging scenes for 0.67 THz radar
图 3 0.67 THz 雷达校正与成像实验场景

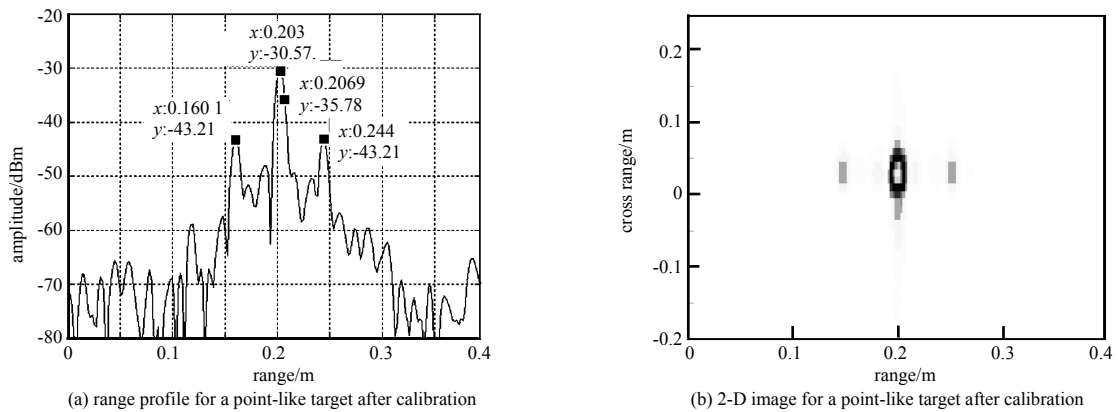


Fig.4 Imaging results for point like target after first calibration
图 4 一次校正后点目标成像结果

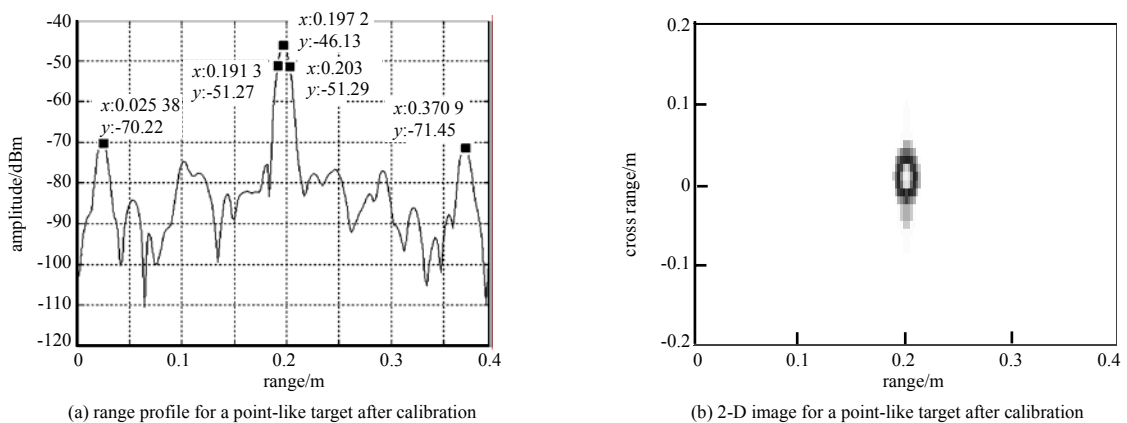


Fig.5 Imaging results for point like target after second calibration
图 5 二次校正后点目标成像结果

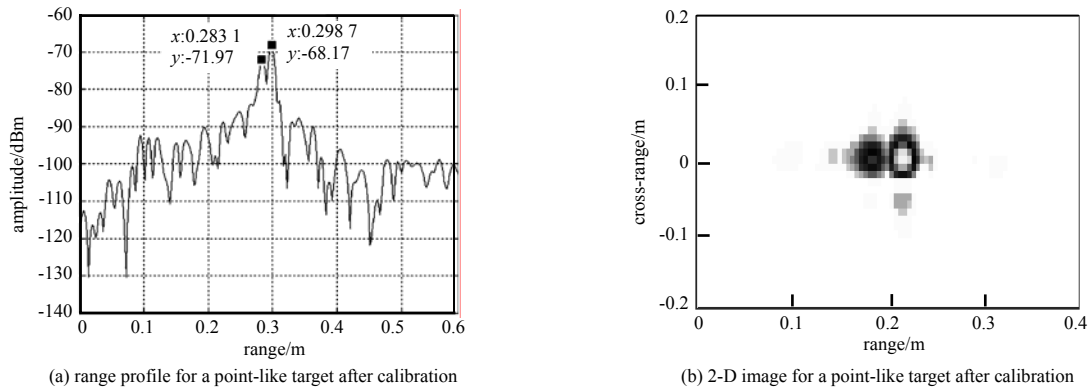


Fig.6 Imaging results for two corner reflectors(spacing 1.3 cm)

图 6 两角反射成像结果(间距 1.3 cm)

3 结论

为研究太赫兹雷达特性,实现厘米级的成像分辨力,本项目构建了一套 0.67 THz 成像雷达实验平台,采用线性调频连续波工作体制,发射信号带宽达到 28.8 GHz,功率 1 mW,经系统非线性校正后成像分辨力可达到 1 cm 左右,验证了太赫兹雷达的成像分辨力,同时为太赫兹高分辨成像在安全监测、隐藏物品检测等方面的应用提供了技术支撑,具有广阔的应用前景。系统研制中还存在一定的问题,在成像分辨力方面,设计理论分辨力为 0.52 cm(对应 28.8 GHz 带宽),而实测结果只能达到 1.3 cm,分辨力的进一步提高还需从发射信号的预失真补偿、接收匹配滤波算法等方面进行改进,在系统非线性校正方面,目前采用的是二次校正,由于一次校正后主旁瓣比只有 13 dBc 左右,为了压低旁瓣,进行了二次校正,将主旁瓣比降低到 23 dBc,但同时主瓣宽度也由 1 cm 展宽到 1.3 cm,成像分辨力降低,还需探索更合适的校正方法。

参考文献:

- [1] Sheen D M, Hall T E, Severtsen R H, et al. Standoff concealed weapon detection using a 350 GHz radar imaging system[C]// Proceedings of SPIE, 2010. United States: DA Wikner and AR Luukanen, 2010:8-12.
- [2] Essen H, Lorenz F, Hantscher S, et al. Millimeterwave Radar for Runway Debris Detection[C]// Proceedings of TIWDC/ESAV'11, 2011. Capri:[s.n.], 2011:65-68.
- [3] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements[J]. OPTICS EXPRESS, 2010, 18(25): 26399-26408.
- [4] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G, et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(1):64-66.
- [5] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. Penetrating 3-D imaging at 4 and 25 meter range using a submillimeter-wave radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(12):2771-2778.
- [6] 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.
- [7] Weg C A, Spiegel W V, Henneberger R, et al. Fast Active THz Cameras with Ranging Capabilities[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2009, 30(12):1281-1296.
- [8] 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.
- [9] Gu Shengming, Li Chao, Gao Xiang, 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.
- [10] 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[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1):7-9. (CAI Yingwu, YANG Chen, ZENG Genghua, et al. Experimental Research on Imaging Technology for High Resolution Terahertz Radar System[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1):7-9.)

作者简介：



成彬彬(1981-), 男, 湖北省随州市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹雷达及成像技术. email: chengbinbin@tsinghua.org.cn.

江 舸(1982-), 男, 四川省乐山市人, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为雷达成像与信号处理.

陈 鹏(1983-), 男, 湖北省孝感市人, 硕士, 主要研究方向为微波电路与系统.

杨 陈(1983-), 男, 重庆市垫江县人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为雷达信号处理.

陆 彬(1985-), 男, 重庆市巴山县人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹系统及应用.

蔡英武(1971-), 男, 四川省乐山市人, 硕士, 研究员, 主要从事雷达系统研究.

邓贤进(1973-), 男, 四川省安岳县人, 硕士, 副研究员, 主要从事微波技术研究.

陈 樟(1982-), 男, 四川省开江县人, 博士, 副研究员, 主要从事 MEMS 技术研究.

张 健(1968-), 男, 重庆市大竹县人, 博士生导师, 研究员, 主要从事太赫兹技术研究.

周传明(1941-), 男, 成都市人, 博士生导师, 研究员, 主要从事高功率微波、太赫兹技术研究.