文章编号: 2095-4980(2013)02-0163-05

0.67 THz ISAR 成像雷达收发链路设计

陈 鹏,成彬彬

(中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要:介绍了一种工作频率为 0.67 THz 的逆合成孔径雷达(ISAR)成像系统,该系统作用距离为 2 m~8 m,成像分辨力 1 cm×1 cm,采用收发分开的天线,发射信号形式为宽带线性调频连续波信号,可应用于安检和无损检测等多个领域。给出了其收发链路的设计方案,对作用距离、发射功率、信号相噪、分辨率、接收灵敏度、接收增益等指标进行了具体论证,并对收发链路各功能模块的组成结构进行了详细描述,为后续开展成像雷达系统的整机研制工作提供理论基础和技术支持。

 关键词:太赫兹; ISAR 成像雷达;收发信道;线性调频

 中图分类号:TN952

 文献标识码:A

TR link design of a 0.67 THz ISAR imaging radar

CHEN Peng, CHENG Bin-bin

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A 0.67 THz Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) imaging radar system is introduced. The radar detect range is 2 m-8 m, and the image resolution is $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$. This radar takes two antennas to transmit and receive signals separately, and the transmitting signal is wide band linear frequency modulated continuous wave. The image radar can be used to safety inspection, nondestructive inspection and many other areas. The design scheme of the TR link is given, and the parameters of the link such as detect range, transmitting power, phase noise, resolution and receiving sensitivity are analyzed. The structure of the transceiver link is described in detail as well. The design lays theory foundation for the development of the imaging radar system on the following.

Key words: Terahertz; ISAR imaging radar; TR link; Linear Frequency Modulation

太赫兹(THz)波是指电磁频率在 0.1 THz~10 THz(波长在 3 mm~30 µm)之间的电磁波,波段介于微波与远红外 光之间,兼有微波毫米波与红外光 2 个频段的特性,该频段是宏观电子学向微观电子学过渡的频段,也是最后一 个人类尚未完全认知和利用的频段。太赫兹波相比毫米波、红外线,在传播、散射、反射、吸收、穿透等方面有 着显著的优点:太赫兹波的波长短,空间分辨率很高;太赫兹波具有很好的穿透沙尘烟雾的能力,对非金属材料 具有良好的穿透性;太赫兹波光子能量小,没有类似 X 射线的电离效应,不会对物质产生破坏作用。基于太赫 兹波的这些独特优点,其广泛用于雷达、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, 太赫兹科学技术已成为对现代科学技术、国民经济、国防建设有重要影响的非常活跃的前沿学科。太赫兹频段具 有诸多优点,对雷达而言,是一个极具研究和开发价值的频段资源,尤其对高分辨成像雷达有着巨大的发展潜力。 太赫兹雷达系统已经成为国内外太赫兹技术研究的重要方向之一。

本文介绍了一种工作频率为 0.67 THz 的 ISAR 成像雷达系统,给出了其收发链路的设计方案,分析了其关键 的技术指标,并对各功能模块的组成结构进行了详细描述。

1 系统方案

0.67 THz 成像雷达系统由信号产生单元、发射链路、天线、接收链路、ISAR 快视信号处理单元 5 部分组成。 系统采用超外差体制、大带宽的线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号。收发分别采用独立的天线,

太赫兹科学与电子信息学报

第11卷

两天线之间通过拉开距离,采用太赫兹吸波材料的方法来隔离,实现同时收发。该成像雷达的主要技术指标为: 工作频率: 660 GHz~688.8 GHz;线性调频带宽: 28.8 GHz;线性调频周期: 100 μs;发射功率: 1 mW;作用距 离: 2 m~8 m;距离分辨率: 0.5 cm。雷达收发链路的原理如图 1 所示。发射信号和接收谐波混频器的本振信号 均在线性调频周期内按照调频斜率进行线形扫描。将 K 波段 25 GHz、24.9 GHz 的信号通过 24 倍频的倍频链路, 获得 660 GHz~688.8 GHz 发射信号。发射信号经过距离为 R 的单目标反射后,接收信号将是一个和本振信号相 似的信号,其差别仅为一个由飞行时间引入的时延^[1]。将该时间差与调频斜率相乘,即得到发射信号和接收信号 之间的频移(图 2 中 2 条线间的水平距离)。该频移等于接收机第 2 级混频器的中频频率。因此,该中频信号频率 与目标距离间存在固定的比例关系。对于具有不同距离多散射点的复杂目标,中频信号将包含与不同距离成线性 关系的多个频率。



Fig.1 Diagram of 0.675 THz FMCW imaging radar TR modul 图 1 0.675 THz 调频连续波成像雷达收发链路原理框图



Fig.2 Principle of FMCW radar ranging 图 2 FMCW 雷达测距原理

2 技术指标论证

2.1 作用距离与发射功率

考虑到本方案采用线性调频连续波的雷达信号体制,雷达系统采用收发双天线模式。根据目前的加工工艺水 平和设计成本,该系统采用的天线增益为 25 dBi。由于该太赫兹雷达系统主要工作于地面环境,考虑到大气衰减 的影响,采用脉冲压缩体制的雷达方程形式为^[2]:

$$R = \left[\frac{P_{\rm t} G_{\rm r} G_{\rm r} \lambda^2 \sigma \tau G_{\rm N}}{\left(4\pi\right)^3 k T F_{\rm N} L_{\rm d} L_{\rm s} (R_{\rm SN})_{o,\rm min}}\right]^{\frac{1}{4}}$$
(1)

式中: P_t 为发射机输出功率; 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, 取 0.01 m²; τ 为雷达脉冲宽度; G_N 为脉冲积累增益; 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,为 16 dB。考虑到本地海拔高 度为 0.5 km,此处的大气衰减系数约为 L_d =70 dB/km= 0.07 dB/m^[3]。此外, L_s =5 dB。本方案拟采用的 0.67 THz 谐波混频器变频损耗约为 15 dB,噪声系数为 15 dB, 2.4 GHz 低噪放的噪声系数为 0.9 dB,增益 30 dB,后 级器件的噪声和增益对接收机整机噪声系数的影响 微弱,因此得到接收机噪声系数为 15.9 dB,保留一定余量,计算发射距离时,接收机噪声系数按照 20 dB 计算,工作温度为常温状态 *T*=300 K(约为 25 ℃)。

天线增益为 25 dBi 时,对雷达探测距离 R 与发射 功率 P_t之间的关系进行计算,仿真参数为:

 $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K, $\tau=0.1$ ms, $G_t=G_r=25$ dB, T=300 K, $F_N=15$ dB, $L_d=0$ dB, $L_s=5$ dB, $R_{SN}=16$ dB, $\sigma=0.01$ m², $\lambda=3 \times 10^8/675 \times 10^9$ m, $G_N=1$ dB_o





由图 3 可以看出, 探测距离与发射功率成正比,随着探测距离的增大, 雷达发射功率迅速增加。在上文所示 仿真条件下, 对于 σ=0.01 m²的目标, 当发射功率达到 1 mW 时, 未考虑大气衰减时的作用距离可达到 10.5 m; 若大气衰减按 1.5 dB 来计算, 作用距离可达到 9 m。考虑一定的性能余量,系统成像的作用距离可以达到 8 m。 根据目前的器件工艺水平,中心频率为 675 GHz,带宽达到 28.8 GHz 的发射功率在全频带内可达到 1 mW,可以 满足作用距离 2 m~8 m 的要求。

2.2 相位噪声

低的相位噪声对于保证大动态范围的探测至关重要,为适应目标不同散射点最大散射强度相差 30 dB 的要求,在 IF 处的相噪要求不大于-30 dBc。由此值进行反推,假定发射信号和本振信号具有相同的相位噪声,则混频带来的相位噪声恶化为 3 dB,按照 100 μs 的扫频时间,检测带宽为 10 kHz(40 dB),则要求发射信号的相位噪声要优于-30 dBc/Hz-3 dBc/Hz-40 dBc/Hz=-73 dBc/Hz。

由于发射频率高达 670 GHz,目前还缺乏相应的测试仪器,该指标要求难以考核,因此对发射信号相位噪声的评估采用等效的办法,折算到发射倍频链路的输入端。整个发射倍频链路的倍数为 24,带来的相位噪声恶化 为 20lg (24)=27.6 dB,因此,对基带 2.5 GHz~3.7 GHz 的扫频源及 25 GHz,24.9 GHz 点频源,在 10 kHz 到 100 kHz 的载频偏移处的相位噪声测量值应不大于-100 dBc/Hz。

2.3 距离与方位分辨率

理想线性调频雷达的距离分辨力只取决于雷达的带宽,而与信噪比无关。要理解其原因,考虑 2 个距离很近的目标产生 1 个包含 2 个频率的中频信号的情况,每个信号的频带宽度决定了两者是否能被分离,因此也就决定 了雷达的距离分辨力。最小距离分辨力通过 Fourier 分析谱信号的宽度得到,它是总测量时间的倒数。雷达信号 的测量时间为 Δt_{chirp},因此,单目标在频域的谱宽度为 δf_{min}=1/Δt_{chirp}。将频率变换到距离,最小距离分辨力为:

$$\delta r_{\min} = \frac{c \,\delta f_{\min}}{2K} = \frac{c}{2K\Delta t_{\rm chip}} = \frac{c}{2\Delta F} \tag{2}$$

上式表明,只有总的扫频带宽对距离分辨力有影响。在本设计中,线性调频带宽 ΔF=28.8 GHz,因此,距离 分辨力 δr_{min}=0.5 cm。

由于 ISAR 成像中方位分辨率为:

$$\rho_{\theta} = \frac{\lambda}{2\theta} \tag{3}$$

即系统的方位分辨率只与雷达波长与目标转角有关^[4],因此,只要保证足够的目标转角即可实现系统指标所要求的方位向分辨率。本课题中,雷达波长约为 0.44 mm,只需要保证目标转角为 0.0234 rad,即 1.34°,即可实现方位向 1 cm 的指标要求。

-70

2.4 接收灵敏度与接收增益

设发射机功率为 P₁,发射天线增益为 G₁,接收天线增益为 G_r,目标距离为 R,则到达目标的功率密度:

$$\left(4\pi R^2\right)^2,$$

有效孔径
$$A_{e} = \frac{G_{r}\lambda^{2}}{4\pi}$$
,于是,接收机的输入功率:

$$P = \frac{P_t G_t \sigma}{\left(4\pi R^2\right)^2} A_e = \frac{P_t G_t \sigma}{\left(4\pi R^2\right)^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad . \quad \text{Itherefore Itherefore Ither$$



1 mW, 天线增益 25 dBi, 探测距离 R 从 2 m 到 10 m, 步进 0.5 m, 目标散射面积 σ=0.01 m² 计算, 可以得到不同 距离下所需要的接收机灵敏度^[5]。 由图 4 可以看出, 2 m~8 m 作用距离对应的接收功率范围为-82 dBm~-106 dBm, 对于信号处理组件,所需要的输入信号功率需达到-20 dBm 以上,因此要求接收链路的总增益达到 86 dB 以上。675 GHz 收发天线的波束宽度较窄,只有 5°。从发射天线直接到达接收天线的信号只能从发射天线的 90°旁瓣进入接收天线 90°旁瓣。收发天线 90°旁瓣均比主瓣低 50 dB,再加上收发天线之间采用隔离措施,最后直接泄露到接收机的发射信号功率只有-80 dB 左右。因此在接收链路增益 86 dB 的条件下,泄露的发射功率不会使得接收机饱和。接收机的检测带宽为 10 kHz,噪声系数为 20 dB,可以计算出其灵敏度为: $S_{\min} = KTB_nF = -114 + 10 \lg B_n + 10 \lg F = -114 dBm$,小于最小回波功率,其灵敏度满足系统要求。

3 链路组成结构

该雷达系统收发链路共有 3 个频率源,其中 2 个频率分别为 25 GHz 和 24.9 GHz 的 K 波段锁相频率源用以 驱动发射和接收链路,其组成结构如图 5 所示。调频连续波(Frequency Modulation Continuous Wave, FMCW)波 形由传统的快速线性调频产生器产生,其频率跨度为 2.5 GHz~3.7 GHz,该信号接着被上变频到发射和接收链路^[6-7]。



Fig.5 Structure of 0.675 THz FMCW imaging radar TR module 图 5 0.675 THz 调频连续波成像雷达收发链路组成结构

发射链路: 25 GHz 锁相频率源输出信号经过耦合器的直通端与快速线性调频产生器产生的 1.2 GHz 带宽的 调频连续波信号混频并且带通滤波,得到频率范围 27.5 GHz~28.7 GHz 的调频连续波信号。然后,经过 3 次 2 倍频和 1 次 3 倍频,共计 24 倍频,产生频率范围 660 GHz~688.8 GHz,带宽 28.8 GHz,功率为 1 mW 的发射信号。

接收链路:24.9 GHz 锁相频率源输出信号经过耦合器的直通端与快速线性调频产生器产生的 1.2 GHz 带宽的 调频连续波信号混频并且带通滤波,得到频率范围 27.4 GHz~28.6 GHz 的调频连续波信号。然后,经过 2 次 2 倍 频和 1 次 3 倍频,共计 12 倍频,得到频率范围 328.8 GHz~343.2 GHz 的本振信号。该本振信号经由谐波混频器 与回波信号混频后产生中频信号。由于线性调频信号的调频带宽为 28.8 GHz,调频周期为 0.1 ms,根据 $f_{\rm IF} = f\Delta + 2KR/c$,其中 $f\Delta$ 为中频本振频率 2.4 GHz, K 为调频斜率, R 为目标距离, c 为光速,可知目标距离 每增加 1 m,中频信号频率会增加 1.92 MHz。对于 8 m 的目标距离,中频信号最大频率为 2.416 GHz,选择中频 滤波器通带为 2.4 GHz~2.42 GHz。中频信号经过低噪放和带通滤波以后,与 2.4 GHz 的本振信号混频得到基带信号进行信号处理。2.4 GHz 的本振信号是通过 24.9 GHz 和 25 GHz 锁相频率源的 100 MHz 差频信号经过 24 倍频 以及带通滤波产生的。

4 结论

根据 0.67 THz ISAR 成像雷达的系统工作要求,设计了其收发链路,通过理论计算,得到了链路的主要指标参数,并详细介绍了链路的组成结构。该收发链路设计方案能够满足 0.67 THz ISAR 成像雷达作用距离 2 m~8 m,成像分辨率 1 cm × 1 cm 的要求,为下一步样机研制奠定基础。

参考文献:

- Cooper K B, Dengler R J, Nuria L, et al. THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):169-182.
- [2] Mahafza B R. 雷达系统分析与设计(MATLAB 版)[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2008. (Mahafza B R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB[M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [3] 李晋. 太赫兹雷达系统总体与信号处理方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010. (LI Jin. Research on Terahertz Radar System and Its signal Processing[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2010.)
- [4] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 4 版. 北京:电子工业出版社, 2008. (DING Lufei,GENG Fulu,CHEN Jianchun. Radar Principle[M]. 4th ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [5] 王峰,李中云. 基于多芯片组装技术的小型微波收发前端研制[J]. 信息与电子工程, 2009,7(1):25-27. (WANG Feng, LI Zhongyun. Development of a Miniature T/R Front-end Using Microwave Multi-Chip Module Technology[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(1):25-27.)
- [6] 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.
- [7] Cooper K B,Dengler R J,Llombart N,et al. Fast,high-resolution terahertz radar imaging at 25 meters[C]// Proceeding of SPIE. Orlando,Florida:[s.n.], 2010:76710Y-76710Y-8.

作者简介:



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.email:cpwhu@yeah.net. 成彬彬(1982-),男,湖北省随州市人,博士, 副研究员,主要研究方向为雷达信号处理、雷达 系统设计.

四川省电子学会传感技术专委会关于召开第十三届学术年会征文通知

各会员单位、广大科技工作者:

四川省电子学会传感技术专委会初定于 2013 年 10 月举行。本届年会由四川省电子学会、四川省电子学会传感技术专委会联合主办,中国工程物理研究院总体工程研究所等单位联合承办。届时,会议将邀请省内外专家、学者和科技人员,围绕科技创新 及近年来传感测试技术最新科研成果开展学术交流,编印"第 13 届学术年会论文集",向专业期刊推荐优秀论文。请各会员单位 积极组织,广大科技工作者踊跃撰写论文积极参加会议。

一 征文通知

1.征文范围

1) 传感器开发、研制新技术及新工艺; 2) 传感器标定技术及新方法; 3) 仪器、仪表开发与应用技术;

4) 集成技术以及传感器信号处理新技术; 5) 元器件及敏感材料应用技术研究;

6) 传感器抗恶劣环境技术研究;

7) 自动控制技术与自动测量;微电子与微机电技术; 8) 智能传感器、虚拟仪器、网络传输、应用软件等技术的研究与应用。2.征文要求和论文格式

征文要求和论文格式要求见《太赫兹科学与电子信息学报》网站(http://www.iaeej.com)。

二 联系方式

通讯地址:四川省绵阳市 919 信箱 405 分箱联系人:齐勇、魏建玲Email: weijl@caep.ac.cn jmfzc04@163.com

邮政编码: 621900 联系电话: 0816-2483824、2486480

四川省电子学会传感技术专委会 2013 年 3 月 27 日