2014 年 8 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2014)04-0501-04

太赫兹单频雷达的二维成像仿真

於建生¹,张 静^{2a,2b}, 尹治平^{2b*}

(1.海军驻合肥地区军事代表室, 安徽 合肥 230009; 2.合肥工业大学 a.仪器科学与光电工程学院; b.光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:当目标相对雷达存在二维转动时,即使采用单频雷达也可获得目标的二维图像。特别是在目标围绕 2 根垂直于雷达视线的正交转轴旋转时,成像投影平面垂直于雷达视线,获得视 角类似于光学照相机的成像结果。分析了单频雷达二维成像的原理,并利用图形电磁计算软件 (GRECO)模拟 1.5 THz 单频雷达的坦克模型回波,通过二维快速傅里叶变换(FFT)进行二维方位向压 缩,获得目标的侧视图像。

关键词: 单频雷达; 二维成像; 正交转轴; 多普勒频率 中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A

doi: 10.11805/TKYDA201404.0501

2-D imaging simulation of THz single frequency radar

YU Jian-sheng¹, ZHANG Jing^{2a,2b}, YIN Zhi-ping^{2b}

 (1.Military Delegate Office of Navy in Hefei, Hefei Anhui 230009, China;
 2a.School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering; 2b.Academy of Opto-Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: The 2-D imaging will be realized by using single-frequency radar, when the target executes 2-D rotation relative to the radar. Especially when the target rotates around two orthogonal rotation axes which are both perpendicular to the radar line-of-sight, therefore the projection image plane is perpendicular to the radar line-of-sight, the image whose angle of sight is similar as photographic camera will be obtained. The principle of 2-D imaging using single frequency radar is analyzed. The single frequency THz(at 1.5 THz) radar echo from a tank model is simulated by using GRECO(Graphical Electromagnetic Computing) software. The side view of the model is obtained through 2-D azimuth compression using Fast Fourier Transform(FFT).

Key words: single frequency radar; 2-D imaging; orthogonal rotation axis; Doppler frequency

频率范围为 0.1 THz~10 THz 的太赫兹频段恰好处于微波频段与光学频段之间,同时具备微波穿透力和光波 方向性两方面的优势,因此,近年来有关太赫兹的研究引起了国内外学者的广泛关注,成像是太赫兹最主要的研 究热点之一。德国高频物理与雷达技术研究所(FGAN)在 2008 年研制了 220 GHz 的调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)成像雷达,并对自行车与卡车等目标进行成像实验,获得分辨力为 1.8 cm 的二维图像^[1]。以色列撒玛利亚 Ariel 大学在 2010 年研制了一部 330 GHz 的 FMCW 太赫兹雷达用于隐藏目标成 像^[2]。美国加州喷气推进实验室(JPL)在 2011 年利用 GaAs 肖特基二极管倍频技术研制了一套 675 GHz 的太赫兹 成像雷达,其带宽达到 29 GHz,配合方位向窄波束扫描技术可获得厘米级的成像结果^[3]。中国工程物理研究院 在 2011 年研制出我国首部 140 GHz 全固态成像雷达^[4],2013 年进一步研制出 670 GHz 全固态成像雷达^[5]。现有 太赫兹成像采用的都是宽带系统,其系统结构复杂,实现难度大,成本高,而根据逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)的方位向分辨力原理,在目标向对雷达存在二维转动时,即使采用单频雷达也可获得目标 的二维图像。特别是在目标围绕 2 根垂直于雷达视线的正交转轴旋转时,成像投影平面垂直于雷达视线,获得视 角类似于光学照相机的成像结果。在此方面美国马萨诸塞大学亚毫米波技术实验室(STL)走在前列,该实验室在 2010 年利用太赫兹量子级联激光器(Quantum cascade lasers,QCL)实现了一部 2.4 THz 的单频成像系统,并获得 分辨力高达 0.6 cm 的高质量图像^[6]。本文分析了单频雷达的二维成像原理,并利用 GRECO 模拟缩比坦克模型在 1.5 THz 频率下的雷达回波,通过二维快速傅里叶变换

(FFT)进行二维方位向压缩,获得坦克的侧视图像。

1 ISAR 方位向成像原理

ISAR 的距离向分辨依靠发射宽带信号,方位向分 辨的基础是多普勒频率的差异,下面用简单的转台模 型解释方位向成像原理。

转台模型如图 1 所示,目标围绕聚焦中心匀速转动,转动角频率为 ω ,雷达到参考点的距离为r,目标上某散射点在起始时刻(t=0)相对于聚焦中心的坐标为(r_0, θ_0),则在以后的时间里该点到雷达的距离为:

$$r(t) = \left[r_0^2 + r_a^2 + 2r_0r_a\sin(\theta_0 + \omega t)\right]^{\frac{1}{2}}$$
(1)

实际工作中, 雷达与目标之间的距离往往远大于 目标尺寸, 则式(1)可近似为:





$$r(t) = r_a + x_0 \sin \omega t + y_0 \cos \omega t \tag{2}$$

式中: $x_0 = r_0 \cos \theta_0$, $y_0 = r_0 \sin \theta_0$ 。

该散射点子回波信号的多普勒频移可写为:

$$f_{\rm d} = \frac{2}{\lambda} \frac{\mathrm{d}r(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{2x_0\omega}{\lambda} \cos\omega t - \frac{2y_0\omega}{\lambda} \sin\omega t \tag{3}$$

式中: λ 为雷达信号波长,若成像积累时间在 t=0 附近,则 sin $\omega t \approx 0$, cos $\omega t \approx 1$,即式(3)可近似为:

$$f_{\rm d} = \frac{2}{\lambda} \frac{\mathrm{d}r(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{2x_0\omega}{\lambda} \tag{4}$$

可见散射点回波的多普勒频移与散射点方位向坐标成正比,因此利用各散射点回波多普勒频移的差异可以实现目标方位向的分辨。设成像积累时间为*T*,则多普勒频率分辨力为:

$$\delta_{f_d} = \frac{1}{T} \tag{5}$$

联合式(4)和式(5)可推出目标方位向分辨力为:

$$\rho = \frac{\lambda}{2\omega T} = \frac{\lambda}{2(\theta_{\max} - \theta_{\min})}$$
(6)

式中: θ_{max} - θ_{min} 为目标成像积累总转角。 方位向最大不模糊距离为:

2 单频雷达二维方位向成像原理

从经典 ISAR 原理的推导公式可见,

方位向成像完全依赖于目标相对雷达转

动形成的多普勒频率,即使发射单频信号

也能够实现方位向成像。目标绕两个正交 且垂直于雷达视线的旋转轴转动时,即可 实现二维方位向成像,成像投影平面垂直

于雷达视线。如图2所示,目标置于1个

二维转台上,通过控制转台,目标可以绕

式中: Δθ表示角度采样间隔。

 $D = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \tag{7}$



Fig.2 Schematic diagram of 2-D azimuth imaging of single frequency radar 图 2 单频雷达二维方位向成像示意图

Y 轴和 Z 轴精确转动,使得目标相对雷达视线产生方位向和俯仰向的二维变化。两轴转动是独立进行的,当绕 Z 轴水平转动时,保持俯仰角不变,当绕 Y 轴垂直转动时,保持方位角不变。在数据采集时,绕 Z 轴和 Y 轴的转动都是等间隔转动,二维转动的结果是形成方位角φ 和仰角θ 的二维角度扫描,方位角扫描范围为 [$\varphi_{min}, \varphi_{max}$],扫描间隔为 Δ φ ,仰角扫描范围为 [$\theta_{min}, \theta_{max}$],扫描间隔为 Δ θ ,每个角度上做一次测量,并记录回波数据。将回波数据排列为与角度扫描对应的二维矩阵,然后进行二维 FFT 即可获得二维方位向图像。

根据 ISAR 成像公式,可写出系统在 Y和 Z方向的成像分辨力分别为:

$$\rho_Y = \frac{\lambda}{2(\varphi_{\max} - \varphi_{\min})} \tag{8}$$

$$\rho_Z = \frac{\lambda}{2(\theta_{\max} - \theta_{\min})} \tag{9}$$

Y和Z方向最大不模糊距离为:

$$D_{\rm Y} = \frac{\lambda}{2\Delta\phi} \tag{10}$$

$$D_Z = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \tag{11}$$

传统宽带 ISAR 的投影平面包含了雷达视线,而单频雷达的成像投影平面却是垂直于雷达视线的,其成像视 角与毫米波焦平面成像和光学透镜成像相似。单频雷达独特的成像视角使得它能够获得与传统宽带 ISAR 大不相 同的目标图像和目标电磁散射特征,为目标识别和分类提供更加丰富的信息。目前太赫兹人体安检成像是太赫兹 应用研究的热门方向,单频二维成像可简化太赫兹成像系统结构,降低系统的硬件实现难度。实用的太赫兹人体 安检成像系统,一般都被设计为许多天线阵元构成的二维阵列,二维阵列分布在垂直于雷达视线的平面上,这样 就能够保证在被检测人体固定不动的条件下,二维阵列雷达一次照射即可获得以上实验中需要目标二维转动才能 形成的成像结果,其成像速度非常快,可以大幅提高检测效率。然而,二维阵列需要许多个天线和阵元通道,其 成本非常高昂,利用单频成像技术,可以将传统宽度系统简化为单频系统,大幅降低各通道的硬件实现难度和系 统成本,推动太赫兹人体安检成像系统向实用化方向发展。

3 仿真验证

GRECO方法是由 Juan M Rius 等人提出的一种快速高频雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS)数值计算方法^[7],近年来相关研究者发现 GRECO方法也可用于模拟 ISAR 回波^[8-9],它能够高效地计算目标的宽带 散射响应,并且回波模拟精确度较高。本文利用 GRECO 软件模拟坦克模 型的单频雷达回波,雷达模型如图所示,模型大小为 3 cm ×8 cm ×4 cm, 雷达视线垂直于坦克侧面。雷达发射频率为 1.5 THz 的单频信号,转台距 雷达为 4 m,目标位于转台中心,在转台带动下二维旋转。方位向转角范 围为[-5°,5°],转角间隔为 0.05°,俯仰向转角范围也为[-5°,5°],转角间隔 也为 0.05°,将以上数据带入上节公式,可计算得到系统 Y和 Z方向成像 理论分辨力均为 0.57 mm,最大不模糊距离均为 114 mm。模型尺寸相对真 实坦克的缩小比例为 100 左右,因此,本仿真结果可等效于 15 GHz 单频 雷达对真实坦克的成像。将由 GRECO 软件模拟得到的雷达回波数据进行 二维 FFT 处理即可得到坦克二维图像(如图 4 所示),图中基本呈现了坦克 的侧视轮廓,其中炮管和负重轮的特征特别突出,非常有利于后期的目标 识别。



Fig.3 Model of tank 图 3 坦克模型



4 结论

ISAR 的方位向分辨依靠的是目标相对雷达转动形成的多普勒频率,当目标围绕垂直于雷达视线的正交二维 转轴转动时,则能够在二维方位向上形成相互独立的多普勒频率,可利用该特点对目标进行二维方位向成像,获 得成像视角类似于光学照相机的目标图像。本文分析了二维方位向成像的原理,利用 GRECO 软件模拟缩比坦克 模型的单频雷达回波,并通过二维 FFT 进行二维方位向压缩,获得坦克的侧视图像。

参考文献:

- [1] Essen H,Biegel G,Sommer R,et al. High resolution tower-turntable ISAR with the millimetre wave radar COBRA (35/94/220GHz)[C]// 2008 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar(EUSAR). Friedrichshafen, Germany:[s.n], 2008:1-4.
- [2] Kapilevich B,Pinhasi Y,Arusi R,et al. 330 GHz FMCW image sensor for homeland security applications[J]. Journal of Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves, 2010,31(11):1370-1381.
- [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] CHENG Bin-bin, JIANG Ge, WANG Cheng, et al. Real-time imaging with a 140 GHz inverse synthetic aperture radar[J].
 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013,3(5):594-605.
- [5] 成彬彬,江舸,陈鹏,等. 0.67 THz 高分辨力成像雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):7-11. (CHENG Bin-bin, JIANG Ge,CHENG Peng, et al. 0.67 THz high resolution imaging radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):7-11.)
- [6] 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):64-72.
- [7] Rius J M, Ferrando M, Jofre L. High-frequency RCS of complex radar targets in real-time[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993,41(9):1308-1319.
- [8] YUAN Xiao-feng,XIAO Zhi-he,REN Hong-mei. Simulation of wide-band radar echo of satellite in orbit[C]// International Conference on Space Information Technology. Wuhan, China: [s.n.], 2005.
- [9] 计科峰,王世唏. 空间目标宽带雷达特征信号仿真建模[J]. 现代雷达, 2007,29(3):32-36. (JI Ke-feng, WANG Shi-xi. The simulation modeling of the space target wideband radar character signal[J]. Modern Radar, 2007,29(3):32-36.)

作者简介:



於建生(1967--),男,江苏省江阴市人,学 士,高级工程师,主要研究方向为雷达工程. email: yjs8564@163.com.

张 静(1988-),女,河南省周口市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波器件的设计与仿真.

尹治平(1980-),男,湖南省常宁市人,博士, 副研究员,硕士生导师,研究方向为雷达与微波 成像.