Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2018)02-0205-07

直升机平台振动对太赫兹 SAR 成像的影响分析

张晓灿1,张玉玺*2,孙进平2

(1.中国电子科技集团公司 第3研究所,北京 100015; 2.北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191)

摘 要:太赫兹合成孔径雷达(SAR)能够克服传统机载SAR成像帧率低,慢动目标检测困难等问题。然而相比传统微波波段的SAR,由于载波的波长极短,太赫兹SAR对平台高频振动误差更为敏感。对于适合应用太赫兹SAR系统的直升机平台而言,其振动也明显强于传统的固定翼载机平台,平台振动引起的相位误差将严重影响成像效果。为克服平台振动对太赫兹SAR的影响,采用数值仿真方法,结合直升机平台的振动特性,较为全面地仿真分析了振动谱宽、振动幅度、谐振分量等因素对太赫兹SAR成像质量的影响,得出了平台振动参数与成像系统参数之间的约束条件。

关键词:太赫兹;合成孔径雷达;成像;振动误差 中图分类号:TN958 文献标志码:A

doi:10.11805/TKYDA201802.0205

Effects analysis of helicopter platform vibration on terahertz SAR imaging

ZHANG Xiaocan¹, ZHANG Yuxi^{*2}, SUN Jinping²

(1.No.3 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China;
 2.School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The terahertz Synthetic Aperture Radar(SAR) can tackle with the problems of the low imaging frame rate and poor ability of detecting slow targets for the traditional airborne SAR. However, compared with the traditional SAR in microwave band, the terahertz SAR is more sensitive to the high frequency vibration error of the platform because of the very short carrier wavelength. Meanwhile, the vibration of helicopter platform which is suitable for the terahertz SAR is more violent than that of the traditional fixed wing aircraft platform. Thus, the phase error caused by the platform vibration has a serious effect on the imaging quality. To eliminate the effects of platform vibration spectrum width, vibration amplitude and resonance components on the imaging quality of terahertz SAR, combining the vibration characteristics of helicopter platform. The constraint conditions between the vibration parameters of platform and the parameters of imaging system are obtained.

Keywords: terahertz; Synthetic Aperture Radar(SAR); imaging; vibration errors

太赫兹波频率范围在 100 GHz 至 10 THz 之间,在长波段与毫米波重合,在短波段与红外线重合。就雷达应用而言,太赫兹频段可以实现微波频段不具有的极窄波束,同时具有红外波段不具备的穿透性。此外,太赫兹频 段内目标的多普勒效应更为显著,有利于低速运动目标的检测;太赫兹频段的极大信号带宽更易实现,有利于高 分辨力成像,获取目标更精细的信息。与传统微波波段合成孔径雷达(SAR)系统相比,工作在太赫兹频段的 SAR 系统具有一些独特的优势,例如能够以较高的帧率输出观测区域的雷达视频图像,从而实现对地面运动目标的连 续观测;对目标表面粗糙程度更为敏感,成像效果更接近于光学图像等。近年来,随着太赫兹器件技术的迅速发展,太赫兹 SAR 已成为雷达领域的热点研究方向^[1-5]。机载 SAR 系统普遍受到空气阻力影响而产生低频运动误差,通常通过机上位置测量装置进行补偿。平台振动这种运动形式虽然对飞行轨迹没有影响,但是对雷达回波相 位具有调制作用,仍然会影响成像质量。直升机在飞行过程中,每片桨叶承受的载荷是非均匀的,桨叶在与空气 作用时会产生高频振动并传至机身,其振动频率通常为几十赫兹,飞行速度较快时振动幅度可达到数毫米^[6]。高

)

(3)

频振动使目标成像结果产生成对回波现象,而常规 SAR 成像算法会导致成对回波散焦,加剧图像质量的恶化^[7-9]。 由于载波的波长极短,太赫兹 SAR 对平台高频振动误差更为敏感。对于适合应用太赫兹 SAR 系统的直升机平台 而言,其振动也明显强于传统的固定翼载机平台,平台振动引起的相位误差将严重影响成像效果。由于现有的运 动传感器系统一般无法精确测量亚毫米量级的位置偏移,直升机作为太赫兹 SAR 平台面临的主要问题就是平台 高频振动对成像的影响。本文结合直升机平台的振动特性,仿真分析了振动谱宽、振动幅度、谐振分量等因素对 太赫兹 SAR 成像质量的影响,以及平台振动参数与成像系统参数之间的约束关系。

1 直升机振动模型

直升机在向前飞行时,由于空气动力学原因,不同位置的桨叶承受的载荷是不同的,在桨毂处会产生周期性 交变力矩,并通过桨毂传至机身,导致机身产生振动频率为 N/rev(N表示桨叶数目,rev 为桨叶转动周期)的高频 振动。通常直升机的瞬时振幅可以通过三轴加速度计精准地测量至毫米量级,经过测量得到的数据做频谱分析还 可以得到振动频率。图 1 是文献[6]给出的 BO105 型直升机振动实测频谱图。从实际数据分析可以看出,直升机 振动更接近于多个简谐运动分量的叠加,并且这些简谐运动具有倍频关系,直升机平台振幅就是各级谐振叠加的 结果。因此,文献[9]按照简谐运动模型进行问题分析,同时还指出 BO105 型直升机第 1 谐振的振动频率通常在 10~30 Hz 范围内,各级谐振的振幅与飞行状态有关,一般最大不超过 0.15 g,最小为 0.01 g(g 为重力加速度,通 常 g≈10 m/s²),分别对应加速度 1.5 m/s²和 0.1 m/s²。对"黑鹰"直升机振动水平进行的详细测试结果也表明,其最 大振幅为 0.689 g,出现在振动频率为 16 Hz 时,位于客舱地板中部^[10]。加速度与振动幅度换算关系式如下:

$$G_m = A_m (2\pi f_m)^2 \tag{1}$$

式中: G_m 是第 m个谐振振幅的加速度; A_m 表示第 m个谐振的振幅; $f_m = mN/rev$ 表示第 m个谐振的频率。



由上述分析对瞬时振动幅度建模如下:

$$e = \sum_{m=1}^{M} \mathcal{E}_m(t) \tag{2}$$

$$\varepsilon_m(t) = A_m \sin\left(2\pi f_m t + \varphi_m\right)$$

式中: e 表示平台瞬时振幅, 由 M 个谐振分量 $\varepsilon_m(t)$ 组成; φ_m 是第 m 个谐振的初相; t 是方位向时间。

2 太赫兹 SAR 信号模型

直升机载太赫兹 SAR 系统成像几何见图 2。直升机沿 Y 轴 方向飞行,平均速度是 ν,飞行高度是 h。机身振动导致雷达相 位中心产生振动,图中的振动曲线进行了放大示意。相位中心 的振动方向与 Z 轴夹角为 φ,振动方向与 OZ 轴组成的平面与 OX 轴夹角为 θ。

下面推导点目标斜距模型,以地面静止点目标 S1 为例, 坐标位于 $(x_0, vt_0, 0)$, t_0 表示零多普勒时刻。在 t 时刻, 雷达相 位中心坐标处于 $(esin \phi cos \theta, vt + esin \phi sin \theta, h + ecos \phi)$,则点目 标 S1 的斜距公式可以通过计算雷达相位中心与目标之间的欧 氏距离得到:



$$R(t) = \sqrt{e^2 + r_s^2(t) - 2ex_0 \sin\phi\cos\theta + 2ev(t - t_0)\sin\phi\sin\theta + 2he\cos\phi}$$
(4)

式中 $r_s(t) = \sqrt{r_0^2 + v^2 (t - t_0)^2}$ 表示平台沿理想直线飞行时 S1 点在 t 时刻的斜距值, r_0 为 S1 的近距。由于振幅相对斜距很小,即 $e \ll r_s(t)$,因此式(4)依据菲涅尔近似得到

$$R(t) \approx r_s(t) + \overline{C} \cdot e \tag{5}$$

式中 $\bar{C} = \cos \theta_L \cos \phi - \cos (\beta + \theta) \sin \theta_L \sin \phi$, θ_L 表示雷达与S1视线方向的下视角,由于太赫兹SAR的合成孔径时间很短,在1个合成孔径时间内 θ_L 基本保持不变。 $\beta = \arctan [v(t-t_0)/x_0]$ 在1个合成孔径时间内变化通常不到1°。 此外与振动方向相关的几何角度 θ 和 ϕ 是常量。因此,式(5)中 e 的系数 \bar{C} 视作常量。由式(5)可以看出,平台振动情况下静止目标的斜距,相当于无振动情况下的斜距值附加了一个振动量 e,此振动量由多个谐振叠加构成。

假定太赫兹 SAR 系统发射的线性调频脉冲信号为:

$$s(\tau) = \operatorname{rect}(\tau) \cdot \exp\left[j\left(2\pi f_{\rm c}\tau + \pi K_{\rm r}\tau^2\right)\right]$$
(6)

式中: rect(·)是矩形窗函数; f_c 是雷达载频; τ 是快时间; K_r 是距离向脉冲调频率。首先对回波信号进行解调, 然后沿距离向变换到距离频域,并进行匹配滤波,消除距离频域二次项后得到慢时间—距离频域信号:

$$sS(t, f_{\rm r}) = \operatorname{rect}\left(\frac{f_{\rm r}}{B_{\rm r}}\right) \cdot \operatorname{rect}\left(\frac{t - t_{\rm c}}{T_{\rm a}}\right) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}\left(f_{\rm c} + f_{\rm r}\right) \cdot \left[r_{s}(t) + \overline{C} \cdot e\right]\right\}$$
(7)

式中: f_r是距离向频率; t_c是波束中心穿越时刻; c 是光速; B_r是距离向带宽; T_a是合成孔径时间。

基于文献[11]的结果,将谐振表达式(3)代入式(7),可进一步近似得到:

$$sS(t, f_{\tau}) \approx \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) \operatorname{rect}\left(\frac{f_{\tau}}{B_{\tau}}\right) \cdot \operatorname{rect}\left(\frac{t-t_{c}}{T_{a}}\right) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}(f_{c}+f_{\tau})r_s(t)\right\} \cdot \exp\left\{n \cdot j2\pi f_m t\right\} \cdot \exp\left\{n \cdot j(\varphi_m+\pi)\right\}$$
(8)

式中: $J_n(\cdot) \ge n$ 阶贝塞尔函数; $z = 4\pi (f_c + f_r) \overline{C} A_m / c$ 。可以看出,平台振动时的每个谐波分量,都会在回波信号的方位向引起一系列的成对回波,对谐振频率分量 f_m ,其对应的成对回波频率分别位于 $n \cdot f_m$, $n = \pm 1, \pm 2, \cdots$ 处。成对回波经常规成像处理后,将输出周期性的鬼影目标,严重影响 SAR 成像结果的质量^[11]。

为了有效抑制平台振动所产生的成对回波,在文献[11]中提出了一种级联多普勒 Keystone 变换成像算法 (Sequential Doppler Keystone Transform, SDKT),本文在对不同直升机平台振动谱及振动参数下太赫兹 SAR 成像 质量影响的仿真分析中,均采用 SDKT 算法进行太赫兹 SAR 回波的成像处理。

3 仿真分析

本节仿真采用正侧视 SAR 成像几何,太赫兹 SAR 系统仿真参数见表 1。根据直升机载平台振动特点,在仿 真中加入不同的直升机平台振动谱及振动参数。仿真目标是一辆多点目标构成的坦克模型,以及由一幅实际高分 辨力 SAR 图像生成的扩展目标场景。

Table1 Simulation parameters carrier frequency scene center range helicopter height helicopter velocity pulse duration range sampling frequency pulse repetition frequency /Hz f₀/GHz F./GHz h/m $v/(m \cdot s^{-1})$ $T_{\rm p}/{\rm GHz}$ r_c/m 200 2 000 100 30 3 000 1.5 1.8

表1 仿真参数

3.1 振动谱宽度的影响

在确定系统参数和相同振动幅度情况下,通过设置不同的振动谱宽度,分析其对 SDKT 成像结果的影响。振动谱采用线性调频信号方式生成,即根据谱宽设置调频斜率,以主振动频率为中心产生线性调频信号,其幅度对应瞬时位移量。这里设置振动频率为 22 Hz,无谐振分量,振动幅度 1 mm。分别设置振动谱宽为 5 Hz 和 10 Hz,振动谱见图 3(a)和图 3(c)。仿真目标 SDKT 成像结果见图 3(b)和图 3(d)。仿真结果表明,振动谱的展宽对 SDKT 成像算法的影响有限。

3.2 振动幅度的影响

在确定系统参数和相同振动谱宽情况下,通过设置不同的振动幅值,分析其对 SDKT 成像结果的影响。设置 振动频率为 22 Hz,振动谱宽为 5 Hz,无谐振分量。场景分为无强点场景和有强点场景。



图 4 振动幅度的影响(场景内无强点)

1) 场景内无强点:振幅为1mm和2mm时 SDKT 所得成像结果见图 4(a)和图 4(b)。可以看出,当振动幅度为2mm时,补偿后目标明显散焦,因此有效成像振幅不能超过1mm。

2) 场景内有强点:对扩展场景进行仿真,分别设置振幅为 2 mm,3 mm,4 mm 和 5 mm, SDKT 所得成像结果 见图 5(a)~图 5(d)。可以看出,当振幅为 5 mm 时,场景图像无法聚焦。

由实验结果总结可得,场景内无强点时,主振动幅度不高于1mm;场景内有强点时,主振动幅度不高于4mm。



(c) after vibration compensation, major vibration A_m=0.004 0 m
 (d) after vibration compensation, major vibration A_m=0.005 0 m
 Fig.5 Effect of the vibration amplitude(with strong points in scene)
 图 5 振动幅度的影响(场景内有强点)

3.3 谐振幅度的影响

在确定系统参数和相同主振动参数情况下,通过设置不同的谐振振动幅值,分析其对 SDKT 成像结果的影响。 设置振动频率为 22 Hz,振动谱宽为 5 Hz,振动幅度为 1 mm。分别设置谐振振幅为主振幅的 0.5,0.3 和 0.2 倍, 振动谱见图 6(a)、图 6(c)和图 6(e)。仿真目标 SDKT 成像结果见图 6(b)、图 6(d)和图 6(f)。仿真结果表明,谐振 分量对 SDKT 成像算法基本无影响。

3.4 结果分析

从上述仿真结果可以看出,对 SDKT 成像算法而言,振动谱宽及谐振分量对太赫兹 SAR 的影响并不大,但 振动幅度的影响较大,对无明显强点目标的场景,振动幅度要求控制在 1 mm 左右。通过直升机载的设备减振装 置虽然可以实现此要求,但无疑会额外增加成本。振动相位误差补偿的难度主要体现在成对回波引起的鬼影像上, 如果鬼影像与主像在方位向未分开,则可以直接应用 ωK(一种 SAR 精确成像算法名称)算法加上相位梯度自聚焦 (Phase Gradient Autofocus, PGA)处理实现成像处理。通过分析式(8)中成对回波频率位置的特性,可以得出鬼影 像与主像不分开的条件是:

$$f_m \leqslant 4 \frac{\rho_a v}{\lambda R} \tag{9}$$

式中: ρ_a是方位向分辨力; λ是波长; R是场景中心斜距。只要成像分辨力与振动频率满足以上约束关系,即 可采用常规 PGA 处理补偿振动引起的相位误差,得到聚焦成像结果。

4 结论

由于太赫兹 SAR 的波长极短,对直升机平台高频振动误差更为敏感。平台振动引起的相位误差将严重影响 成像效果。本文结合直升机平台的振动特性,仿真分析了振动谱宽、振动幅度、谐振分量等因素对太赫兹 SAR 成像质量的影响,结果表明振动谱宽及谐振分量对太赫兹 SAR 的影响并不大,但振动幅度的影响较大。除采用 减振设备外,也可按实际平台振动频率合理设置成像分辨力,通过常规的自聚焦处理补偿振动引起的相位误差。



参考文献:

- [1] 梁美彦,邓朝,张存林. 太赫兹雷达成像技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):189-196. (LIANG Meiyan, DENG Zhao,ZHANG Cunlin. Terahertz radar imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):189-196.)
- [2] HEREMANS R, VANDEWAL M, ACHEROY M. Synthetic aperture imaging extended towards novel THz sensors[C]// IEEE Sensors. Lecce, Italy: IEEE, 2008:438-441.
- [3] ZHANG B,PI Y M,LI J. Terahertz imaging radar with inverse aperture synthesis techniques: system structure, signal processing, and experiment results[J]. IEEE Sensors Journal, 2015,15(1):290-299.
- [4] 魏明贵,梁达川,谷建强,等. 太赫兹时域雷达成像研究[J]. 雷达学报, 2015,4(2):222-229. (WEI Minggui,LIANG Dachuan, GU Jianqiang, et al. Terahertz radar imaging based on time-domain spectroscopy[J]. Journal of Radars, 2015,4(2):222-229.)

- [5] DING J S,KAHL M,LOFFELD O,et al. THz 3D image formation using SAR techniques-simulation, processing and experimental results[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013,3(5):606-616.
- [6] CERUTI A,LIVERANI A,RECANATESI L. Improving helicopter flight simulation with rotor vibrations[C]// Proceedings of International Conference on Innovative Methods in Product Design. Venice,Italy:[s.n.], 2011:636-645.
- [7] 李增局,吴谨,刘国国. 振动影响机载合成孔径激光雷达成像初步研究[J]. 光学学报, 2010,30(4):995-1001. (LI Zengju, WU Jin,LIU Guoguo. Preliminary investigation on airborne SAL imaging with platform vibration[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4):995-1001.)
- [8] 马萌,李道京,杜剑波. 振动条件下机载合成孔径激光雷达成像处理[J]. 雷达学报, 2014,3(5):591-602. (MA Meng,LI Daojing,DU Jianbo. Imaging of airborne synthetic aperture radar under platform vibration condition[J]. Journal of Radars, 2014,3(5):591-602.)
- [9] 赵雨露,张群英,李超. 视频合成孔径雷达振动误差分析及补偿方案研究[J]. 雷达学报, 2015,4,4(2):230-239. (ZHAO Yulu,ZHANG Qunying,LI Chao. Vibration error analysis and motion compensation of video synthetic aperture radar[J]. Journal of Radars, 2015,4,4(2):230-239.)
- [10] 程金送,许宁."黑鹰"直升机振动水平测试分析[J]. 直升机技术, 2004(4):11-18. (CHENG Jinsong, XU Ning. Test and analysis of 'Black Hawk' helicopter vibration level[J]. Helicopter Technique, 2004(4):11-18.)
- [11] ZHANG Y,SUN J P,LEI P,et al. High frequency vibration compensation of helicopter-borne THz-SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016,52(3):1460-1466.

作者简介:

第2期



张晓灿(1986-),男,河北省邢台市人,硕 士,工程师,主要研究方向为传感器探测的硬 件设计与信号处理等.email:chill0523@163.com. 张玉玺(1985-),男,河南省驻马店市人,博士, 实验师,研究方向为雷达信号处理、高速电路设计 等.email:zhangyuxi@buaa.edu.cn.

孙进平(1975-),男,甘肃省秦安市人,教授,博士生导师,研究方向为高分辨率雷达信号处理、数据处理、目标识别等.

(上接第 204 页)

- [12] EXTER M V,GRISCHKOWSKY D R. Characterization of an optoelectronic terahertz beam system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1990,38(11):1684-1691.
- [13] WITHAYACHUMNANKUL W,FISCHER B M,ABBOTT D. Material thickness optimization for transmission-mode terahertz time-domain spectroscopy[J]. Optics Express, 2008,16(10):7382-7396.
- [14] FISCHER B M,ABBOTT D,LIN H,et al. Uncertainty in terahertz time-domain spectroscopy measurements[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008,25(6):1059-1072.
- [15] LIANG Qijun, KLATT G, KRAU N, et al. Origin of potential errors in the quantitative determination of terahertz optical properties in time-domain terahertz spectroscopy[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(9):82-86.
- [16] WITHAYACHUMNANKUL W,LIN H,MICKAN S P,et al. Analysis of measurement uncertainty in THz-TDS[J]. Proc. of SPIE, 2007(6593):659326-1-659326-18.
- [17] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2007. (XU Jingzhou, ZHANG Xicheng. Terahertz science and technology and application[M]. Beijing:Peking University Press, 2007.)

作者简介:



臧元章(1988-),男,山东省昌邑市人,硕 士,工程师,主要研究方向为太赫兹光时域光 谱及光学系统设计.email:zangyzh@126.com. **邹** 锶(1987-),男,武汉市人,博士,高级 工程师,主要研究方向为太赫兹光谱与超短脉冲 激光.