

室内实测数据太赫兹合成孔径雷达成像研究

江兆凤^{1,2} 张群英¹ 李超¹ 吴世有¹ 方广有¹

(1. 中国科学院电子学研究所电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100080)

摘要: 合成孔径雷达实现高分辨率成像要求平台作理想匀速直线运动, 相对传统微波 SAR 而言, 太赫兹波的波长更短, SAR 平台高频微小振动对常规微波频段 SAR 影响几乎可以忽略, 对太赫兹合成孔径雷达 (Terahertz synthetic aperture radar, THz-SAR) 的影响必须精细处理, 研究适用于 THz-SAR 的成像补偿算法是必要的。本文建立 THz-SAR 非理想情况下的回波模型, 分别从时域和频域详细分析运动误差对回波的影响。提出了一种基于回波数据的 THz-SAR 成像运动补偿算法, 采用中心频率 0.3 THz 的 SAR 系统进行实验, 使用 RD 算法对目标进行二维高分辨成像, 得到 3 个角反射器的二维 SAR 图像。实验结果验证了系统的可行性和所给处理算法的有效性, 为外场车载或机载的 THz-SAR 成像奠定了基础。

关键词: 太赫兹波; 运动误差; 运动补偿算法; 合成孔径雷达成像

中图分类号: TN015 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.10

Research on terahertz synthetic aperture radar imaging based on indoor experimental data

Jiang Zhaofeng^{1,2} Zhang Qunying¹ Li Chao¹ Wu Shiyou¹ Fang Guangyou¹

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Detection Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Synthetic aperture radar to achieve high resolution is based on the premise that the platform is an ideal uniform linear motion. Relative to the traditional microwave SAR, because of the short wavelength of terahertz wave, SAR platform of high frequency micro vibration impact on conventional microwave band SAR is almost negligible but terahertz synthetic aperture radar (THz-SAR) must be fine processing. It is necessary to study the imaging compensation algorithm suitable for THz-SAR. In this paper, the echo model of THz-SAR is established, and the effect of motion error on the echo is analyzed from the time domain and frequency domain respectively. A motion compensation algorithm for THz-SAR imaging based on echo data is proposed, the SAR system with center frequency 0.3 THz is used to carry out the experiment, and the 2D image of the corner reflectors is obtained. The experimental results verify the feasibility of the system and the effectiveness of the algorithm, which lays the foundation for the field vehicle or airborne THz-SAR imaging.

Keywords: terahertz wave; motion error; motion compensation algorithm; synthetic aperture radar imaging

1 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是频率范围在 0.1 ~ 10 THz、波长 0.03 ~ 3.00 mm 的电磁波, 其频段介于微波与红外波之间。THz 波在传播、散射、反射、吸收、穿透等方面与微波和红外线有着显著不同的特点。THz 波的波长短, 空间分辨率高, 太赫兹波还有信噪比、稳定性、相干性等具有其他电磁波无法比拟的特点。与微波雷达相比, 太

赫兹雷达易于实现大带宽和极窄天线波束, 具有更高的角跟踪精度和天线增益的特性, 能够提高多目标识别的能力实现高分辨率成像, 通过对地面运动目标的监视, 能够应用在视频合成孔径雷达中。相比激光雷达, THz 波对非金属材料、烟雾、沙尘具有良好的穿透能力, 可以在恶劣的战场环境下工作。太赫兹波具有类似 X 射线的穿透能力, 但其光子能量小, 不会引起生物组织的光离化。THz 电磁波的上述特点决定了 THz 技术在物体成像、反恐探测、安全检

查、环境监测和军用雷达等领域,具有重大的科学价值和广阔的应用前景^[1]。

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是利用信号处理技术对地面景物进行成像的一种新体制雷达,是现代雷达发展的前沿技术。合成孔径成像利用探测器的移动合成一幅图像,图像的分辨率不再受到单个探测器光学孔径的限制,达到利用相对较小的成像元件获得波长量级成像分辨率的目的。SAR 技术使雷达具有了对目标进行二维成像和识别的能力,从而为人们提供更多的有用信息。与可见光和红外等光学成像不同,作为一种微波有源系统,SAR 能够不受光照和气候条件的限制,实现全天时、全天候地观测,应用前景十分广泛^[2]。

合成孔径雷达和太赫兹波的优点相结合,使得太赫兹合成孔径雷达(terahertz synthetic aperture radar, THz-SAR)成像具有极高分辨力,而且具有全天时、全天候的特点;较强的环境适应能力等优点;在动目标检测与识别方面,微多普勒特征在 THz 频段比微波频段更明显,更利于低速及微动目标检测与识别;无论在军事领域还是民事方面有非常广阔的应用前景。近年来,随着 THz 源和探测器^[3-5]性能的不断提高,THz 雷达的研究已经成为国内外的一个研究热点,国内外已经报道 THz 雷达系统,验证了 THz 雷达的高分辨率成像能力^[6-11]。美国国防高级研究计划局(DARPA)正在利用 THz-SAR 成像时间短的优势,开展视频速率的视频合成孔径雷达(video synthetic aperture radar, ViSAR)成像方面的研究论证工作。但就目前的太赫兹成像技术仍存在许多亟待解决的问题,包括传感器的结构和形式、太赫兹源和探测器、信号传输和处理算法上的难题,THz-SAR 成像方面的研究国内鲜有公开报道。本文在此背景下对 THz-SAR 成像技术展开研究。

在 SAR 的技术中,首要解决的问题是获取高质量图像,SAR 图像质量优劣决定着其所反映目标信息可靠性和准确性。需要基于高质量的 SAR 图像,才能顺利开展对 SAR 技术的其它方面的研究工作,比如对运动目标的检测、对目标进行识别等。SAR 成像中要求天线相位中心必须是匀速直线飞行,偏离理想运动的运动误差制约着 SAR 高分辨率成像。载机实际受气流影响,偏离理想轨迹,产生运动误差,损害 SAR 方位向分辨率。并且分辨率越高,运动误差对 SAR 成像结果影响越大,对运动补偿精度的要求越高,所以针对 THz-SAR 成像,提高运动补偿精度是实现高分辨率成像的关键。

针对高分辨 THz-SAR 成像中运动误差的问题,本文提出一种用于 THz-SAR 运动补偿方法,即结合光学隔振平台隔振技术和回波数据自聚焦补偿于一体的运动补偿方法。该方法能够提高图像质量,为 THz-SAR 系统的设计和数据处理提供了理论基础和实施方案研究,适合用于 THz-SAR 成像中。

本文结构安排如下。第 2 节对 THz-SAR 信号特性进

行详尽分析,从理论上分析了平动误差对距离压缩后回波信号的影响。第 3 节对基于特显点的运动补偿成像算法进行了详细阐述给出了包括运动补偿和方位向压缩在内的算法流程的关键步骤的详细说明。第 4 节中,介绍了搭建的 THz-SAR 成像原理性系统,结合隔振平台和相位误差补偿的成像方法得到了角反射器的二维图像。实测数据的成像结果验证了方案的可行性和补偿算法的有效性。最后,第 5 节给出了本文的结论。

2 THz-SAR 运动误差分析

2.1 非理想情况下的几何模型

实际 SAR 成像系统中,受气流和载机自身的影响,天线相位中心存在沿航向和垂直航向的运动误差,一般 SAR 按“一步一停”工作方式处理,同样适用以光速传播的 THz 波,忽略平台运动误差随快时间的变化,只考虑运动误差随慢时间的变化。假设 THz-SAR 系统以正侧视条带模式工作,飞行航迹如图 1 所示,平行 X 轴的实直线代表载机的理想航迹,虚曲线表示实际航迹。天线相位中心(antenna phase center, APC)在时刻 t_a 的实际位置为点 $A[x + \Delta x(t_a), \Delta y(t_a), H + \Delta z(t_a)]$,其在平行于面 YOZ 同时垂直 X 轴的投影为点 $C[x + \Delta x(t_a), 0, H]$, $D[x(t_a), 0, H]$ 表示 APC 的理想位置,点目标 P 的坐标为 $(x_n, y_n, 0)$, $B(x_n, 0, H)$ 表示理想 APC 离 P 最近的位置坐标。 t_a 为方位慢时间, v 为载机理想飞行速度, $x = vt_a$ 表示在 t_a 时刻雷达 APC 理想的方位位置, θ 为雷达的下视角, $[\Delta x(t_a), \Delta y(t_a), \Delta z(t_a)]$ 为三维 O-XYZ 直角坐标系下平台在 3 个方向的运动误差。

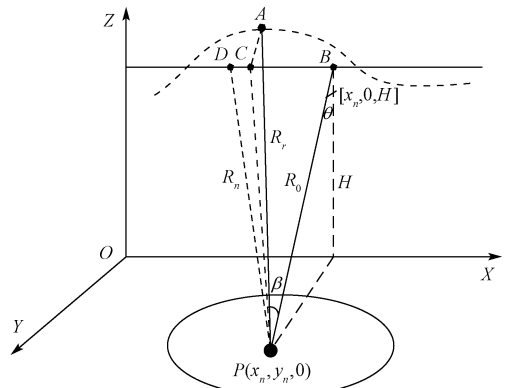


图 1 正侧视条带 SAR 几何成像

t_a 时刻雷达 APC 的位置 A 到目标 $P(x_n, y_n, 0)$ 的瞬时斜距进行泰勒级数展开,保留一阶展开项:

$$R_r(t_a) = \sqrt{(x + \Delta x - x_n)^2 + (\Delta y - y_n)^2 + (H + \Delta z)^2} \approx \sqrt{(x + \Delta x(x) - x_n)^2 + R_0^2} + \frac{R_0}{\sqrt{(x + \Delta x(x) - x_n)^2 + R_0^2}} (\Delta z(x) \cos\theta - \Delta y(x) \sin\theta) \approx$$

$$\sqrt{(x + \Delta x(x) - x_n)^2 + R_0^2} + \cos\beta \cdot \Delta r(x, R_0)$$

式中: $R_0^2 = y_n^2 + H^2$ 为目标与雷达的理想最短斜距, $R_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + R_0^2}$ 为理想的瞬时斜距, $\Delta r(x, R_0)$ 和 $\cos\beta$ 分别表示孔径中心的平动误差和雷达 APC 相对目标 $P(x_n, y_n, 0)$ 的瞬时斜视角:

$$\Delta r(x, R_0) = \Delta z(x)\cos\theta - \Delta y(x)\sin\theta$$

$$\cos\beta = \frac{R_0}{\sqrt{(x + \Delta x(x) - x_n)^2 + R_0^2}} \approx \frac{R_0}{R_n} \quad (2)$$

式中, 第一项表示只包含航向运动误差的斜距, 一般地通过地速追踪补偿方法校正航向运动误差, 第二项表示与理想斜距 R_0 有关沿视线方向的平动误差。

2.2 THz-SAR 回波模型

为获得目标的距离信息, THz-SAR 通常发射具有一定带宽的信号。目前比较常见的两种雷达信号形式为线性调频连续波(FMCW)和步进频调频连续波(SFCW)信号。相比 FMCW 信号, SFCW 信号相干解调得到的回波信号拥有更简单的形式, 更适合理论研究和实验验证。本文使用 SFCW 信号作为 THz-SAR 的发射信号, 设雷达发射的太赫兹信号为 $s_T(f, t) = \exp(j2\pi ft)$, 照射到理想点目标 $P(x_n, y_n, 0)$ 的后向系数为 σ_n , 忽略天线方向图加权因子, 得到雷达接收理想回波信号:

$$s_R(f, t) = \sigma_n s_T(f, t - \frac{2R_n}{c}) \quad (3)$$

式中: $R_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + R_0^2}$ 表示理想的瞬时斜距。雷达接收信号经相干解调得到解调后理想点目标的回波信号:

$$s(f, t) = s_R(f, t) s_T^*(f, t) \quad (4)$$

式中: $(\cdot)^*$ 表示信号的共轭。进一步推导解调后的理想点目标的回波信号:

$$s(f, x) = \sigma_n \exp(-j \frac{4\pi f R_n}{c}) = \sigma_n \exp(-j \frac{4\pi f_c R_n}{c}) \exp(-j \frac{4\pi f_r R_n}{c}) \quad (5)$$

式中: x 是隐含在 R_n 中表示 APC 的位置坐标, f_c 为 SFCW 信号的中心频率, f_r 为基带频率, $f = f_c + f_r$, $f_r \in (-B/2, B/2)$, B 表示信号带宽。

在 SAR 成像期间, 会出现一些散射点的能量从一个距离单元进入到邻近的距离单元, 称为越距离单元徙动。当距离徙动小于 1/4 个距离分辨单元, 可忽略其对成像质量的影响, 由于 THz 波的波长短, 距离徙动小^[12], 理想回波经距离压缩后的信号:

$$S_1(R, x) = A \sigma_n \text{sinc} \left[\frac{2B}{c} (R - R_0) \right] \exp(-j \frac{4\pi R_n}{\lambda}) \quad (6)$$

式中: A 表示距离压缩后的幅度, $R = \frac{c}{2} t$ 表示快时间域对应的距离, R_0 表示理想最短斜距, R_n 表示理想的斜距。基于 2.1 节平台非理想情况下的几何模型, 经导航数据进行粗补偿后的实际回波数据, 看作已完成距离徙动校正, 则含

有运动误差的 THz-SAR 回波经距离压缩后的信号:

$$S_2(R, x) = A \sigma_n \text{sinc} \left[\frac{2B}{c} (R - R_0) \right] \exp(-j \frac{4\pi R_r(t_a)}{\lambda}) \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 含有运动误差的瞬时斜距 R_r 直接反映在回波中, 回波数据的相位对于载机的运动误差非常敏感, 为满足成像质量, 运动误差补偿通常需要提供比雷达工作波长小一个数量级的运动误差信息。由于 THz 波的波长短, 对于工作在太赫兹波段的 ViSAR 系统来说, 需要亚毫米级精度的惯性测量单元, 惯性测量单元还不能达到这样的测量精度。不同方向和振动频率的运动误差对成像结果的影响在文献[13]已有详细描述。目前对 SAR 运动补偿方案大部分是利用运动传感器满足距离向要求的精度, 通过从回波中提取方位向的相位误差进行回波校正。忽略天线方向图加权因子和距离压缩的幅度, 慢时间域转化为方位位置, 含有运动误差的距离压缩后回波信号为:

$$S(R, x) = \text{sinc} \left[\frac{2B}{c} (R - R_0) \right] \exp(-j \frac{4\pi R_r(x)}{\lambda}) \quad (8)$$

式中: R_r 是式包含运动误差的瞬时斜距。

2.3 运动误差对回波频谱的分析

为更好的理解运动误差与成像质量关系, 有必要说明运动误差对回波信号频谱的影响。首先根据驻定相位原理, 对式在方位向作傅里叶变换, 得到距离压缩后理想频谱的表达式为:

$$G(R, k_x) = \text{sinc} \left[\frac{2B}{c} (R - R_0) \right] \exp(-j \sqrt{4k_c^2 - k_x^2} R_0 - j k_x x_n) \quad (9)$$

式中: $k_c = \frac{2\pi f_c}{c}$ 为载波波数, $k_x = \frac{2\pi f_a}{v}$ 为方位向波数。

对于单个点目标来说, 在 SAR 成像过程中, 只有在其经历的合成孔径时间内的平台运动状态会影响目标聚焦质量。考虑太赫兹波频率高, 瞬时斜视角小, 式中满足 $\cos\beta \approx 1$ 的近似, 即忽略方位误差的空变性, 则接收回波的瞬时斜距表达式为 $R_r(x) = R_n + \Delta r(x, R_0)$ 。根据傅里叶变换, 平动误差 $\Delta r(x, R_0)$ 呈正弦变化具有普遍意义。假设合成孔径长度为 L_{sar} , 运动误差频率为 ξ_c (波数域), $\epsilon(R_0)$ 表示 R_0 处正弦平动误差的幅度, 可用式的正弦函数进行描述:

$$\Delta r(x, R_0) = \epsilon(R_0) \sin(\xi_c x) \quad (10)$$

经过推导, 存在正弦平动误差的回波频谱^[14]:

$$G_{err}(R, k_x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} C'_m j^{|m|-m} J_{|m|}(A) \cdot G(R, k_x - m\xi_c) \quad (11)$$

式中: $C'_0 = 2, C'_m = 1 (m \neq 0)$, $J_m(A)$ 为第 m 阶第一类贝塞尔函数, $A = 2k_x \epsilon(R_0)$ 。由式可知, 平动误差满足正弦规律变化时, 回波频谱为理想频谱(真实目标对应的频谱, 即为主谱 $J_0(A)$)与重叠次谱($J_{|m|}(A)$, ($m \neq 0$))的叠加, 结合贝塞尔函数的性质, 对图像造成的影响: 1) 主谱由于加权会被削弱, 可能出现主谱幅度小于次谱幅度的情况;

2) 由于匹配滤波函数与重叠次谱的匹配, 沿方位向出现成对回波; 可能会造成真实目标旁瓣很高, 使得图像分辨率下降以及虚假目标的存在, 从而影响成像的聚焦质量。

SAR 是利用回波多普勒相位实现相干处理的成像系统, 回波相位对合成孔径雷达是至关重要的。雷达载机的运动状况之所以对成像关系如此密切, 根本原因是它将直接影响回波多普勒信号的幅度和相位, 使其压缩波形产生畸变。特别是针对 THz-SAR, 从式的回波信号可以看出, 由于 THz 波长短, 雷达天线的微小运动偏差将会引起接收回波的较大相位误差, 从而导致图像聚焦质量明显下降。对式的频谱分析可知, $A = 2k_c \epsilon(R_0)$ 决定不可忽略的重叠次谱个数, A 越大, 不可忽略的重叠次谱个数越多^[14]。与微波 SAR 相比, 相同的误差幅度对 THz-SAR 图像聚焦质量影响更大, 为了得到高质量 THz-SAR 图像, 对回波数据进行相位补偿, 消除相位误差是必要的。

3 成像算法

在 SAR 技术中, 为了消除平台运动对成像的影响, 需要对雷达数据进行运动补偿和自聚焦操作。时域相位补偿方法能够灵活的结合基于距离压缩数据的回波进行运动补偿。目前, SAR 成像算法种类繁多, 最常规的有从波方程严格推导出的 wk 算法和存在一定近似 CS 和 RD 算法。由于 wk 算法未经过任何近似, 成像精度高, 但受 Stolt 插值的影响, 运算量大。CS 算法利用线性调频信号的性质, 通过相位函数相乘实现距离徙动校正, 避免了插值操作, 提高成像效率, 但若发射信号不是线性调频信号, 则会使算法变得复杂, 使其效率受到损失。RD 算法是忽略距离向和方位向的二维耦合, 将其分解为两个一维信号进行处理, 同时兼顾精度、通用性及处理效率的高精度算法。THz-SAR 的工作波长短, 距离徙动小与时域相位补偿方法结合方便等优点, 选用 RD 算法对信号进行处理。

基本的 RD 算法步骤是通过匹配滤波进行距离向压缩, 在距离多普勒域实现距离徙动校正, 之后进行方位向压缩, 实现图像高分辨成像。经距离压缩和距离徙动校正后的信号 $S_1(R, x)$ 由式给出。对方位向压缩的实现, 考虑算法效率, 一般在频域处理, 将式的理想频谱与参考函数 H_{ref} 相乘, 作方位向 IFFT, 实现方位向聚焦。理想匹配滤波函数表达式:

$$H_{ref} = \exp(j \sqrt{4k_c^2 - k_x^2} R_m) \quad (12)$$

式中: R_m 随着距离变化, 以实现动态聚焦。上述处理过程是基于雷达平台运动轨迹为匀速直线运动假设, 获得高分辨率成像的过程。对于实际雷达平台运动, 受气流和载机自身的影响, 运动轨迹不满足这一假设, 实际的接收回波表达式, 基于建立的正弦误差模型, 存在运动误差的回波频谱表达式, 存在运动偏差的信号与方位参考函数将不匹配, 成像质量下降, 运动误差的幅值体现在压缩之后信号的重叠次谱的个数, 影响目标的积分旁瓣, 运动误差的频率体现信

号的重叠次谱相对主谱的方位偏移量。

本文提出一种针对具有特显点的目标场景用于回波相位误差估计和校正的方法。通过惯性测量单元输出的姿态信息完成由运动误差引起的距离徙动的校正, 结合天线方向图和粗聚焦图像中特显点的最大幅值估计最优位置并构建理想回波, 利用实际回波和理想回波数据提取由平台运动误差引起回波的相位误差并进行补偿。该方法可以直接完成运动误差的估计和补偿, 不需要进行迭代, 从而减少了运算量, 对于宽测绘带场景, 运动误差在距离向的空变性不能忽略, 可以通过在距离向进行分块处理即可。

本文提出的基于回波数据的运动补偿算法, 具体步骤如下:

1) 对回波信号进行距离压缩, 使得接收目标回波的能量聚焦到一个距离单元内, 求得目标与雷达的理想最短斜距 R_0 ;

2) 在方位向通过匹配滤波实现方位向压缩, 得到具有一定散焦的图像; 式(7)为信号的理想频谱, 为了实现方位向压缩, 将理想频谱与匹配滤波函数式相乘, 沿方位向作 IFFT。

3) 对平动误差进行估计和补偿。误差估计的方法是利用初步聚焦图像提取特显点所在的距离位置 R_0 , 构建点目标经距离压缩后的理想回波, 将实际回波与理想回波的共轭信号作处理, 处理后的信号相位即为由于运动误差引起的相位误差。由式(6)可得, 点目标 P 的实际相位 $\varphi_r(x)$ 和理想相位 $\phi_{ideal}(x)$ 的表达式分别为:

$$\begin{cases} \varphi_r(x) = -\frac{4\pi f_c R_r}{c} = \phi_{ideal} + \frac{4\pi f_c}{c} \Delta r(x, R_0) \\ \phi_{ideal}(x) = -\frac{4\pi f_c R_n}{c} \end{cases} \quad (13)$$

利用 $R_n = \sqrt{(x-x_n)^2 + R_0^2}$ 及得到的 R_0 , 可构建理想的回波相位。平动误差引起的相位误差为 $\Delta\phi(x) = \varphi_r(x) - \phi_{ideal}$, 将距离压缩后其他距离单元的回波数据与 $\exp(-j\Delta\phi(x))$ 相乘, 则可消除平动误差带来的相位误差。忽略运动误差在距离向的空变性, 将估计相位误差补偿到距离压缩后的回波中, 消除相位误差对成像的影响, 补偿后的回波信号, 等效于理想的回波信号。

4) 在距离多普勒域重复步骤 2), 实现二维高分辨率成像。

4 成像实验

基于本文提出的运动补偿算法, 设计并搭建系统的带宽 10 GHz, 中心频率 0.3 THz 的 THz-SAR 进行成像实验, 实验场景框图如图 2 所示。

4.1 实验场景的设计

受限于太赫兹发射器件功率水平(mw 量级), 为了提高接收信号的功率, 实验中采用正视条带成像模式, 考虑正视会带来距离向模糊的问题, 为避免模糊, 将目标放置在具

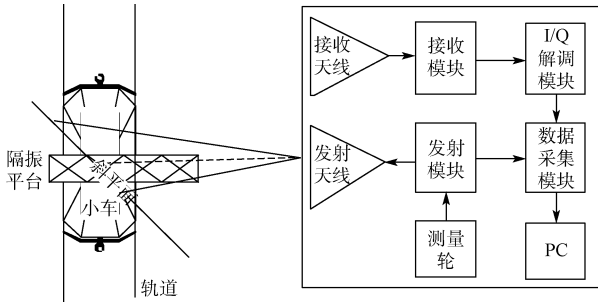


图2 太赫兹雷达实验场景框图

有一定倾斜角度的斜平面。为验证雷达的二维高分辨成像能力,设置了图3的3个角反射器目标进行成像实验。

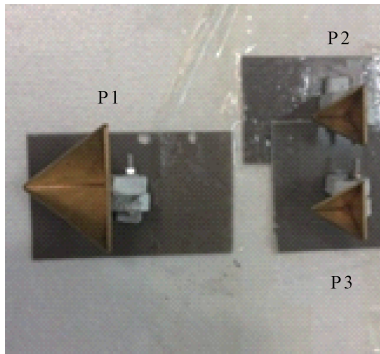


图3 目标摆放位置

0.3 THz 雷达成像实验场景如图4所示,条带合成孔径雷达的工作模式要求其相对目标做匀速直线运动并以一定的重复频率发射脉冲,使得采集信号在空间上实现等间隔采样,为后续的成像处理提供方便。考虑到非等间隔采样将影响回波相位,导致回波多普勒信号畸变,在SAR系统中常利用地速跟踪方式实时调整脉冲重复频率达到等间隔采样目的,在实验中,通过实时采集车速并生成发射触发信号,以控制THz-SAR的脉冲重复频率。从而保证了空间采样的等间隔。



图4 轨道与小车的实物

4.2 实验系统

THz-SAR距离向高分辨率的实现,要求宽频带的发射

信号,传统信号很难实现,同时对后续设备(特别是中放和A/D变换)要求很高。为了简化设备,实验平台采用了倍频方式,在提高发射信号频率的同时对信号带宽进行拓展。系统采用发射和接收步进频调制连续波信号和1对双模喇叭传输高斯波束的天线,信号中心频率为0.3 THz,步进阶数是800个,带宽为10 GHz,喇叭天线口径为1.3 cm。雷达系统的具体实验参数如表1所示。

表1 0.3THz 雷达实验参数表

参数	中心频率	信号带宽	频率间隔	发射功率	脉冲重复间隔
数值	0.3 THz	10 GHz	12.5 MHz	0.5 mw	1.3 mm

THz 雷达收发电路的系统框图如图5所示。基带处产生2路SFCW信号分别用来发射THz信号的射频信号(RF)和作为本振(LO)的信号,每路信号通过功率分器分成2路,1路信号在M1处经过下混频得到固定频率为50 MHz的信号,该信号经过18倍频后,产生用来作参考中频(IF)的信号。另1路RF信号进入频率展宽模块进行18倍频带展宽,作为发射信号。另1路LO信号经过18倍频,产生作为接收信号的LO信号。目标反射波在M2处经过下混频得到待测IF信号,再通过与相干的参考IF信号进行IQ相干解调的得到基带回波信号,最后被采样并传输到计算机进行处理。

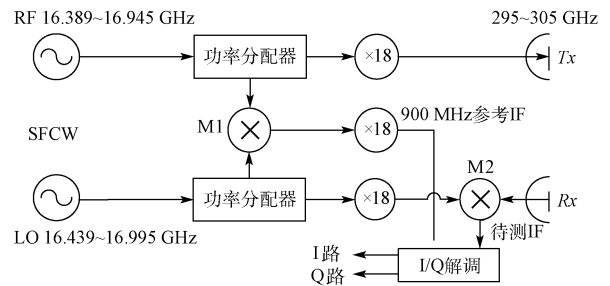


图5 0.3THz 成像雷达系统框图

4.3 实验结果

对所设目标的回波数据分别利用基本RD和本文所提的算法进行成像。图6给出目标场景未进行相位补偿的成像结果。图6(a)代表回波原始数据,横坐标表示信号的频点,纵坐标表示方位位置,图6(b)为解线频调后距离压缩后的结果,横坐标为距离位置,纵坐标表示方位位置,验证了前面分析时将距离徙动忽略的合理性。图6(c)是利用基本RD算法的成像结果,图6(d)为轮廓图,从图中可以看出受运动误差的影响,造成目标旁瓣过高,图像质量下降,3个角反射器无法分辨。图6(e)和(f)为P1和P2、P3的方位剖面图,从图中可以看出,目标的方位向旁瓣过高,导致

目标 P2 和 P3 不能分辨。图 7 采用本文提出相位补偿算法对目标场景的成像结果,与图 6 相比较,成像效果有明显的改善。图 7(b)中清晰地分辨出目标 P2 和 P3,3 个角反射器相对位置与实际图 4 中的位置很接近。为定量分析经过运动补偿后的成像质量,分别对 P1、P2 和 P3 在方位剖面图和距离剖面图进行插值,并计算出衡量图像质量参数值如表 2 所示。表 2 中,距离向分辨率为 1.69 cm,比理想分辨率(1.5 cm)略差,这是由于为了综合考虑旁瓣的性能,在距离向进行加窗处理的结果。方位分辨率约 4.5 mm,接近理论分辨率 3.82 mm。

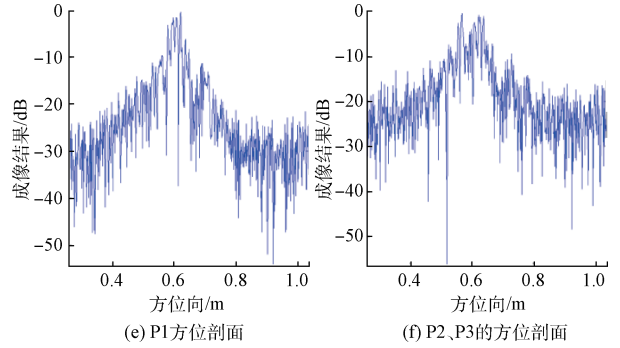


图 6 未进行相位补偿的目标成像结果

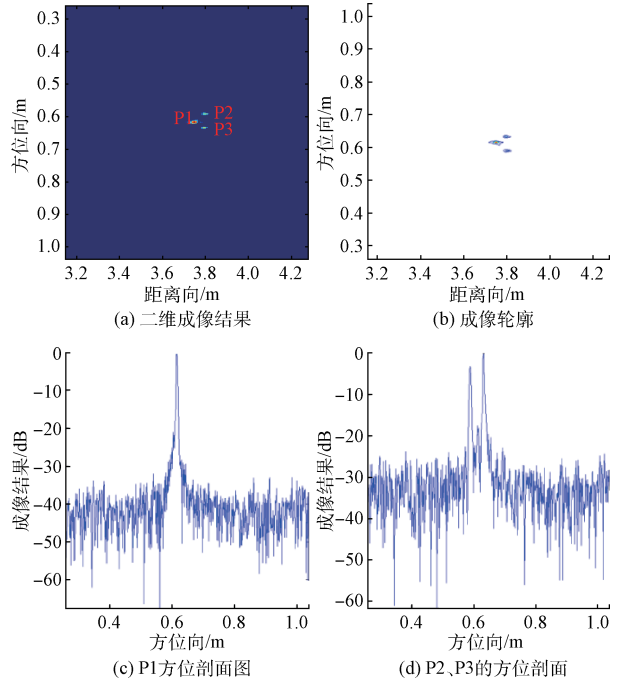
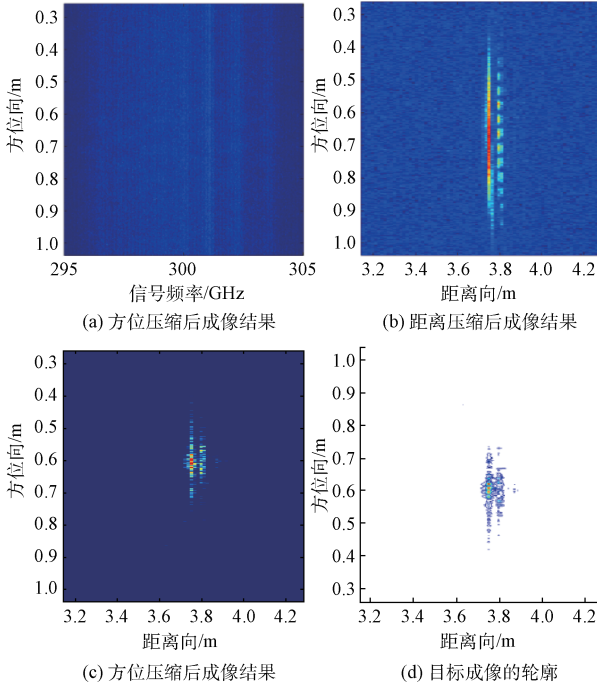


图 7 相位补偿后目标成像结果

表 2 点目标性能分析

点目标	分辨率/cm	方位向		距离向		
		PSLR/dB	ISLR/dB	分辨率/cm	PSLR/dB	ISLR/dB
P1	0.41	-17.071 5	-15.051 7	1.69	-13.724 3	-10.731 5
P2	0.41	-20.788 6	-15.520 9	1.69	-14.209 1	-11.795 7
P3	0.47	-16.892 6	-12.604 4	1.69	-14.917 5	-12.383 5

5 结 论

本文详细分析了运动误差对 THz-SAR 成像的影响,提出一种基于回波数据的 THz-SAR 成像运动补偿算法。在利用惯性测量单元测量的运动参数补偿由运动误差引起的目标残余距离徙动的基础上,从粗聚焦的图像中提取相对孤立点目标的位置并构建理想回波,通过处理实际回波信号和理想回波信号,提取由平台运动误差引起的回波

相位误差并对回波相位进行补偿。为验证算法可行性,采用中心频率为 0.3 THz 的 SAR 系统进行了室内实验,获得典型性目标的方位向有效分辨率约为 4 mm。实验结果表明了本文所提运动补偿算法的正确性和有效性。

参考文献

[1] 赵国忠, 申彦春, 刘影. 太赫兹技术在军事和安全领域的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1097-1101.

- [2] 孔舒亚,吴彦鸿,俞道滨.一种新的 SAR 窄带干扰抑制方法[J].国外电子测量技术,2016,35(1):44-48.
- [3] 刘新华,万超,康琳,等.低噪声太赫兹 Microbolometer 读出电路[J].电子测量技术,2013,36(4):76-79.
- [4] PHILIPP M, GRAF U U, WAGNER-GENTNER A, et al. Compact 1.9 THz BWO local-oscillator for the great heterodyne receiver[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 51(1):54-59.
- [5] VENDIK I B, VENDIK O G, ODIT M A, et al. Tunable metamaterials for controlling THz radiation[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2012, 2(5):538-549.
- [6] GOYETTE T M, DICKINSON J C, WALDMAN J et al. A 1.56THz compact radar range for W-band imagery of scale-model tactical targets[C]. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2000:615-622.
- [7] DENGLER R J, COOPER K B, CHATTOPADHYAY G, et al. 600 GHz imaging radar with 2 cm range resolution[C]. IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, Honolulu, 2007: 1371-1374.
- [8] RECK T, SILES J, JUNG C, et al. Array technology for terahertz imaging passive and active millimeter-wave imaging XV [C]. Proceedings of SPIE, Baltimore, 2012.
- [9] 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.
- [10] 成彬彬,江舸,陈鹏,等.0.67THz 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.
- [11] GU SH M, LI CH, GAO X, et al. Three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz gaussian beam-theory and experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013,51(4):2241-2249.
- [12] 林华,无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J].信息与电子工程,2010,8(4):373-377.
- [13] 赵雨露,张群英,李超,等.视频合成孔径雷达运动误差分析及补偿方案研究[J].雷达学报,2015,4(2):230-239.
- [14] 安道祥.高分辨 SAR 成像处理研究[D].长沙:国防科学技术大学研究生院,2011:43-52.

作者简介

江兆凤(通讯作者),1992年出生,工程硕士,主要研究方向为太赫兹合成孔径雷达运动补偿及成像算法等。
E-mail:zhaofengj@yeah.net

张群英,1972年出生,研究员,博士生导师,主要研究方向为微波探测技术领域的新方法、新技术及新应用研究,微波成像信号处理与成像方法研究。

李超,1978年出生,副研究员,研究方向为太赫兹成像技术、电磁场理论与应用、人工电磁材料。

吴世有,1985年出生,研究方向为超宽带雷达目标检测、成像技术及软件开发等。

方广有,1963年出生,研究员,博士生导师,主要研究方向为超宽带电磁学理论及其应用、超宽带成像雷达技术以及微波成像新方法、新技术。