

文章编号: 2095-4980(2024)06-0617-10

## 一种基于太赫兹成像的复杂地形自适应定高方法

吴强<sup>a,b</sup>, 邓佩佩<sup>a,b</sup>, 陈仁爱<sup>a,b</sup>, 张强辉<sup>\*a,b</sup>, 安健飞<sup>a,b</sup>, 黄昆<sup>a,b</sup>, 周人<sup>a,b</sup>, 成彬彬<sup>a,b</sup>

(中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 针对现有近感探测器难以适应复杂地形情况下的精确定高问题, 提出一种基于成像的图像域自适应对地高度估计方法。该方法将多普勒锐化成像原理应用到前下视场景, 利用太赫兹频段分辨率高、孔径合成长度短的优势, 采用太赫兹前下视成像实现地形感知, 将传统近感探测器的一维距离测量扩展为二维成像测量, 实现对运动轨迹前方地形地貌的精确感知。在获得地面目标图像后, 利用地面图像特征, 采用图像域特征拟合方法实现对地高度估计。对前下视多普勒锐化成像的参数设计和成像算法进行了理论分析和仿真验证, 开发了一套工作于 220 GHz 频段的太赫兹近感探测系统, 并开展了无人机挂载试验。试验表明, 该方法能有效感知地表目标环境, 排除角反、树木等其他目标对地面高度测量的干扰, 测高精确度达 0.5 m, 证明了该基于太赫兹成像的对地高度估计方法的可行性, 为基于图像域特征提升近感探测器对复杂地形适应能力和感知能力奠定了工作基础。

**关键词:** 近感探测器; 前下视成像; 地形感知; 太赫兹雷达; 多普勒锐化

中图分类号: TN98

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024091

## An adaptive height measuring method in complex terrain based on terahertz imaging

WU Qiang<sup>a,b</sup>, DENG Peipei<sup>a,b</sup>, CHEN Ren'ai<sup>a,b</sup>, ZHANG Qianghui<sup>\*a,b</sup>, AN Jianfei<sup>a,b</sup>, HUANG Kun<sup>a,b</sup>, ZHOU Ren<sup>a,b</sup>, CHENG Binbin<sup>a,b</sup>

(a.Microsystem & Terahertz Research Center, Chengdu Sichuan 610200, China;

b.Institute of Electronics Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** In response to the issue of precise altitude measurement in complex terrains where existing proximity sensors struggle to adapt, a novel imaging-based adaptive ground altitude estimation method in the image domain is proposed. This method applies the principle of Doppler sharpening imaging to the forward-looking view scene, taking advantage of the high resolution in the terahertz frequency band and the short synthetic aperture length. It utilizes terahertz forward-looking imaging for terrain perception, transforming the one-dimensional distance measurement of traditional proximity sensors into two-dimensional imaging measurement, thus achieving precise perception of the terrain and topography directly below the motion trajectory. After obtaining the ground target image, the altitude estimation is realized by fitting image domain features using the characteristics of the ground image. Theoretical analysis and simulation verification were conducted on the parameter design and imaging algorithm of the forward-looking Doppler sharpening imaging. A terahertz proximity detection system operating at 220 GHz frequency band was developed and unmanned aerial vehicle-mounted tests were carried out. The tests show that this method can effectively perceive the ground environment, eliminate interference from corner reflectors, trees, and other targets on ground altitude measurement, and achieve an altitude measurement accuracy of 0.5 m. This demonstrates the feasibility of the terahertz imaging-based ground altitude estimation method and lays a foundation for improving the adaptability and perception capability of proximity sensors to complex terrains based on image domain features.

收稿日期: 2024-02-06; 修回日期: 2024-04-15

\*通信作者: 张强辉 email:zhangqianghui\_mtrc@caep.cn

**Keywords:** proximity detector; forward-looking imaging; terrain sensing; terahertz radar; Doppler beam sharpening

近感探测器用于感知目标与环境信息，被誉为精确打击装备的“眼睛”。在对地近感探测器中，无线电近感探测器因体积小，定距精确度高，适宜全天候工作，得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。现有的无线电定高探测器通常采用宽波束天线，仅在地面垂直方向存在有用信号，通过测量地面和载体之间的距离获取高度信息，这种方式的定高精度易受地面反射特性差异、落角及落速的影响<sup>[4-6]</sup>，且抗环境干扰能力差。当落点附近地形和环境较复杂，如地面有树木或山丘，或存在干扰物等，可能导致近感探测器测量误差增大甚至失效<sup>[7-8]</sup>。国内外学者对提高近感探测器定高精度和抗环境干扰能力进行了探索。Varal 等<sup>[5]</sup>在连续波体制下，提出了差分测量的高度估计方法。该方法不依赖于地面反射特性，在两反射平面为非平坦地面情况下仍能正常工作，但局限于较近距离才能保证精确度。基于多信息联合判决思想，文献[9-10]提出了调频体制下新的自适应检测准则，联合距离信息和多普勒信息，提高定高精度和抗干扰能力。但已有工作均假设回波主要来自地面反射，未考虑复杂目标环境下的适应能力。

无线电调频近感探测器向高载频、超宽带方向发展，目前，毫米波定高探测器技术已逐渐成熟<sup>[1]</sup>。随着太赫兹片上雷达芯片的发展，低成本、小型化的太赫兹近感探测器研制成为可能<sup>[3]</sup>。已有的毫米波近感探测只聚焦于目标距离信息的分析提取<sup>[1]</sup>，而太赫兹频段分辨率高，多普勒敏感，在近感探测的前下视观测几何下，利用短合成孔径能够实现高帧率成像，因此具有近程成像探测能力<sup>[11]</sup>，目前尚未见到利用合成孔径成像进行近感探测的相关研究工作。除基于无线电进行探测和测高外，文献[12]研究了基于光学成像的定位问题，在距地高度小于 100 m 时，定位相对误差小于 5%，为测高定位开辟了新的思路，但由于光学图像没有距离信息，需借助目标先验尺寸信息进行几何解算。无线电雷达可以直接获取目标距离信息，利用无线电雷达成像，可以结合雷达测距和图像域处理的优势，提升定位方法复杂环境下的适应能力。目前在公开文献中尚未见到基于无线电前下视成像的图像域定高方法研究。

在太赫兹频段进行合成孔径成像，达到相同分辨率所需的孔径长度更短，成像实时性高。利用该优势，本文提出一种基于太赫兹前下视多普勒锐化成像的近感探测器地形感知方法，并基于成像结果进行自适应地面高度估计。由于采用多普勒锐化成像，成像算法复杂度不高。所提方法将传统近感探测器的一维距离测量变为二维成像感知，充分利用回波信息，提供了识别干扰目标的潜力，有望提高近感探测器在复杂地形条件下的定高适应能力。

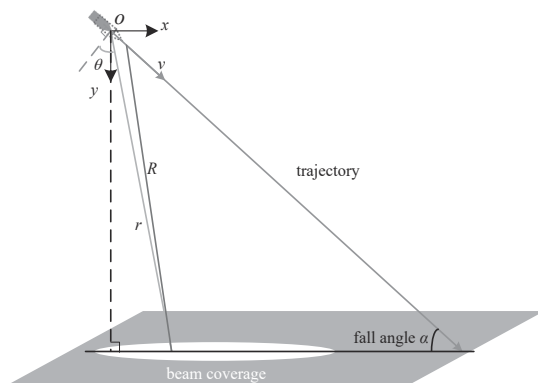


Fig.1 Imaging scene  
图 1 成像示意图

## 1 理论模型

如图 1 所示，近感探测器随搭载平台以一定的落角落向地面。假设波束覆盖探测器正下方和前下方，在成像场景中构建笛卡尔坐标系  $xoy$ ，其中坐标原点  $o$  设置在近感探测器初始位置， $x$  轴为水平方向， $y$  轴竖直向下。利用距离和多普勒信息成像的理论模型，在该场景下实现对地面目标信息感知。

### 1.1 成像模型

假设初始 0 时刻，目标与飞行方向法平面夹角为  $\theta$ ，雷达与目标距离为  $r$ ，雷达平台速度为  $v$ ，则  $t$  时刻目标与雷达的距离为：

$$R(t) = \sqrt{r^2 + (vt)^2 - 2rvt \sin \theta} \quad (1)$$

短孔径条件下， $r \gg vt$ ， $R$  可近似为：

$$R(t) \approx r - vt \sin \theta + \frac{v^2 t^2 \cos^2 \theta}{2r} \quad (2)$$

由此可知单个目标的多普勒历程为线性调频，为简化信号处理，在短孔径条件下进一步忽略式(2)中的高阶项，则

$$R(t) \approx r - vt \sin \theta \tag{3}$$

为保证上述近似的合理性，式(2)中忽略的距离高阶项导致的电磁波相移误差需不超过  $\pi/2$ 。考虑双程的电磁回波传播路径，若电磁波波长为  $\lambda$ ，式(3)成立的条件为：

$$\frac{v^2 t^2 \cos^2 \theta}{r} \leq \frac{\lambda}{4} \tag{4}$$

雷达发射线性调频脉冲，脉冲波形为<sup>[13]</sup>：

$$S_i(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi(f_c t + \frac{1}{2} K t^2)} \tag{5}$$

式中： $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数； $T$ 为脉冲宽度； $f_c$ 为雷达中心频率； $K$ 为线性调频斜率。雷达以脉冲重复周期(Pulse Repetition Time, PRT)发射相干脉冲，设脉冲重复周期为  $T_{PR}$ ，则发射时刻  $t_m = m \times T_{PR} (m=0,1,2,\dots)$ 。对于单一点目标，接收信号为发射信号的延迟。

$$S_r(t) = S_i\left(t - \frac{2R}{c}\right) \tag{6}$$

经混频去斜，忽略剩余视频相位(Residual Video Phase, RVP)，雷达基带信号为：

$$S_{IF}(t, t_m) = e^{-j2\pi K t \frac{2R(t_m)}{c} - j2\pi f_c \frac{2R(t_m)}{c}} \approx e^{-j2\pi \frac{2r}{\lambda} t - j2\pi K \frac{2r}{c} t + j2\pi \frac{2v \sin \theta}{\lambda} t_m} \tag{7}$$

式中： $\lambda = c/f_c$ 为中心频率对应的波长， $c$ 为光速； $t_m$ 为慢时间，对应不同脉冲； $t$ 为快时间，对应一个脉冲内采样时间。式(7)的推导利用了所考虑时间内目标距离徙动不超过距离分辨单元的条件。由式(7)可得，若定义  $f = K 2r/c$ ， $f_d = 2v \sin \theta/\lambda$ ，则  $f$ 、 $f_d$  分别和快时间、慢时间构成了傅里叶变换对， $f$ 、 $f_d$  域被称为距离、多普勒域。目标的多普勒与目标的方位有关，通过将回波信号变换到距离多普勒域，可获得目标的距离和方位信息。距离多普勒域的变换，可采用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法实现。

该成像模型，本质上是将多普勒锐化成像<sup>[14]</sup>应用到前下视成像场景。前下视二维成像时，由于飞行方向两侧对称目标具有相同的多普勒历程，距离也相同，成像存在左右模糊问题<sup>[15-17]</sup>。图2为对地成像时，大地位置与距离多普勒域的对应关系。在等距离线上的目标将出现在成像结果中距离维同一位置，同理在等多普勒线上的目标也将出现在多普勒维同一位置，因此，具有相同多普勒和距离的目标将重叠在一起。对地成像场景下，左右对称目标将在距离多普勒域重叠。一般而言，雷达正下方区域目标距离雷达最近，正下方目标将出现在成像的边界上，其包络正好能反映雷达正下方照射区域的地形信息，后面将在仿真中验证这一点。为避免前进方向上左、右可能的较高目标的干扰，雷达左、右方向需采用波束较窄的天线。

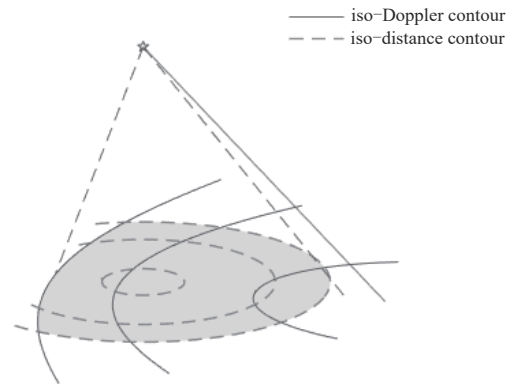


Fig.2 Map between land position and range-Doppler domain  
图2 大地目标位置与距离多普勒域的对应关系

### 1.2 成像参数设计

短孔径近似下的回波信号模型表明，成像可简单通过将回波信号变换到距离多普勒域实现，所采用的近似成立条件构成了对系统参数设计的约束。设一次成像采用  $M$  个脉冲，由式(4)可知，信号模型成立需满足

$$\frac{L^2 \cos^2 \theta}{r} \leq \frac{\lambda}{4} \tag{8}$$

即

$$L \leq \frac{\sqrt{\lambda r}}{2 \cos \theta} \tag{9}$$

式中  $L = MvT_{PR}$  为一次成像所采用的合成孔径长度(雷达飞行路径长度)。

式(7)假设了目标距离徙动不超过距离分辨单元，从而避免了距离徙动校正，简化了信号处理，这要求

$$L \sin \theta \leq \rho_r \quad (10)$$

式中  $\rho_r$  为成像距离分辨力。 $\rho_r$  与发射的线性调频信号带宽  $B$  有关<sup>[13]</sup>:

$$\rho_r = c/2B \quad (11)$$

式(9)~(10)构成了对合成孔径长度的限制,也限制了一次成像最多能采用的脉冲数  $M$ 。

方位角度  $\theta$  的分辨力  $\delta_\theta$  与多普勒频率  $f_d$  的分辨力  $\delta_{f_d}$  有关,由式(7)所示傅里叶变换关系,  $\delta_{f_d}$  反比于一次成像相干积累时间:

$$\delta_{f_d} = \frac{\delta_\theta 2v \cos \theta}{\lambda} = \frac{1}{L/v} \quad (12)$$

于是有

$$\delta_\theta = \frac{\lambda}{2L \cos \theta} \quad (13)$$

由式(9)和式(13)可知,方位角度分辨力  $\delta_\theta \geq \sqrt{\lambda/r}$ ,该成像方式可达到的最好方位分辨力与系统工作波长的平方根成正比。因此,工作在高频段,一方面能提高成像分辨力上限,另一方面在达到相同分辨力情况下所需的合成孔径长度更短,成像帧率更高,成像效果更不易受平台速度变化的影响。假设落角为  $45^\circ$ ,在距离地面 100 m 时,考虑雷达正下方目标,若采用 220 GHz 频段,由式(9)可得,合成孔径长度最长为 0.26 m,方位分辨力最好为  $\delta_\theta = \sqrt{\lambda/r} = 0.37$  m;若采用 30 GHz 频段,则合成孔径长度最长为 0.71 m,方位分辨力最好为 1.00 m,因此该方法更适合在高频段应用。在合成孔径长度一定的情况下,成像分辨力随  $\theta$  增大而恶化,在运动轨迹正前方 ( $\theta = \pi/2$ ) 处将失去分辨能力。

根据采样定理,快时间采样率  $f_s$  和慢时间采样率  $f_{PR}$  (其为  $T_{PR}$  的倒数),需分别大于信号中频带宽及目标多普勒带宽。目标的多普勒带宽与天线波束宽度  $\theta_{bw}$ 、波束中心与运动方向偏角  $\beta$  有关,考虑  $\beta > \theta_{bw}/2$  的情形,如图 3 所示,目标方位  $\theta$  的取值范围为  $[\pi/2 - (\beta + \theta_{bw}/2), \pi/2 - (\beta - \theta_{bw}/2)]$ ,故采样要求为:

$$\begin{cases} f_s \geq K 2R_{\max}/c \\ f_{PR} \geq \max(f_d) - \min(f_d) = 2v [\cos(\beta - \theta_{bw}/2) - \cos(\beta + \theta_{bw}/2)]/\lambda \end{cases} \quad (14)$$

式中  $R_{\max}$  为测量目标距离最大值。

系统参数设计约束和分辨力为:

$$\begin{cases} L = MvT_{PR} \\ L \leq \frac{\sqrt{\lambda r}}{2 \cos \theta} \\ L \sin \theta \leq c/2B \end{cases}; \begin{cases} f_s \geq K 2R_{\max}/c \\ f_{PR} \geq \frac{2v}{\lambda} [\cos(\beta - \theta_{bw}/2) - \cos(\beta + \theta_{bw}/2)] \end{cases}; \begin{cases} \delta_\theta = \frac{\lambda}{2L \cos \theta} \\ \rho_r = c/2B \end{cases} \quad (15)$$

### 1.3 成像处理分析

通过以上分析可知,回波数据通过二维 FFT 处理即可成像,得到距离多普勒图像。为使成像结果更加直观实用,还需进行几何校正。

如图 1 所示,在竖直平面内,  $x$ 、 $y$  分别表示雷达距离目标高度及雷达与目标水平距离,将距离多普勒域成像结果转换到  $xoy$  坐标系,更有助于直观获得地形起伏信息。由几何关系可知:

$$\begin{cases} x = r \sin(\theta - \alpha) \\ y = r \cos(\theta - \alpha) \end{cases} \quad (16)$$

多普勒域到  $\theta$  域的转变,需知道平台运动速度  $v$ ,最终转换到  $xoy$  坐标系还需要落角  $\alpha$  信息。在具备一定目标先验信息的条件下,有可能依据回波数据对平台速度和落角进行估计,从而不依赖其他运动传感器。在实验数

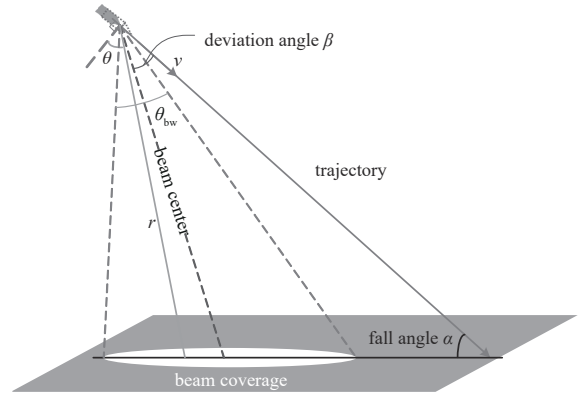


Fig.3 Illustration of beam illumination  
图 3 波束照射示意图



据处理小节中，将根据距离多普勒成像处理结果拟合地面轮廓，完成对这些参数的估计。

## 2 成像仿真

仿真参数见表 1，仿真场景如图 4 所示，图中以地面为  $XY$  平面，波束中心与地面交点为原点建立  $xyz$  坐标系，仿真地面由理想点目标密集排列构成，其中包含  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  4 个凸起点，用来模拟地面起伏。

天线波束中心与运动方向在竖直平面内，夹角为  $35^\circ$ ；天线波束在竖直平面内宽度为  $60^\circ$ ，在竖直平面两侧方向为  $20^\circ$ ； $B$ 、 $C$  分布在竖直平面两侧。图 5 为成像结果，从距离多普勒图像(图 5(a))可以看到，平直地面在距离多普勒图像中为一条向下弯曲的曲线。这是因为在多普勒频率越大的方位(越靠近运动方向)，地面目标距离雷达越远。 $B$ 、 $C$  由于在距离和多普勒维度上无法区分，重叠在一起，即左右模糊，与理论预期一致，这本质上是对三维目标进行二维成像的限制。虽然存在模糊现象，距离多普勒图像仍能很好地反映地面起伏信息。利用式(16)将成像坐标进行转换，完成几何校正，结果如图 5(b)所示，图像横纵坐标代表了目标在水平方向和竖直方向与雷达的距离，能直观体现地表的高度起伏。由式(13)可知，方位靠近运动方向的目标多普勒梯度小，角度分辨将变差，体现在图像中右侧目标出现一定程度的展宽。

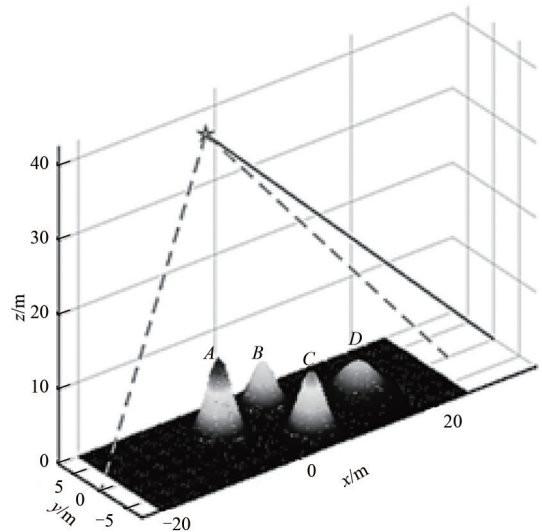


Fig.4 Simulation scene  
图4 仿真场景

表 1 仿真参数  
Table1 Simulation parameters

center frequency/ GHz	band width/ MHz	pulse width / $\mu$ s	PRF /kHz	beam width (azimuth $\times$ pitch)/ $(^\circ)$	$\beta$ / $(^\circ)$	height $H$ /m	fall angle $\alpha$ / $(^\circ)$	velocity / $(m \cdot s^{-1})$	number of pulse
220	300	2	400	$20 \times 60$	35	$30\sqrt{2}$	45	500	128

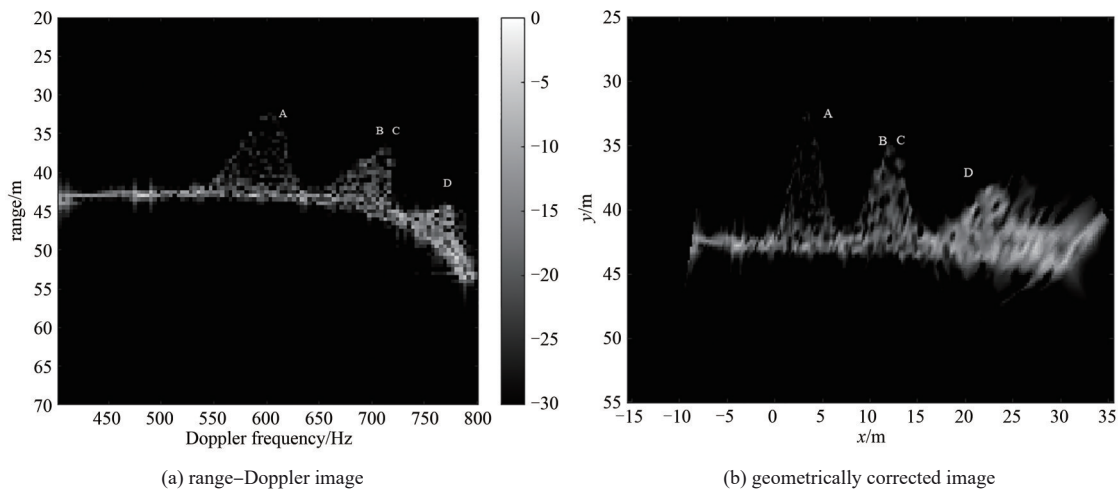


Fig.5 Simulation imaging results  
图5 仿真成像结果

为分析成像分辨力，采用单个理想点目标进行仿真，仿真参数与表 1 一致。目标位于波束中心处，目标视线方向与地面夹角为  $75^\circ$ ；天线距地高度为  $H=30\sqrt{2}$  m(天线与落点距离为 60 m)。由式(15)可得，成像算法适用的最长孔径长度  $L$  为 0.21 m，即最多采用约 171 个脉冲进行合成孔径成像，此时无需考虑方位二次调频和距离徙动，达到此算法下的极限分辨力，成像仿真结果如图 6 所示。依据式(15)计算可得，仿真场景下，距离和方位理论极限分辨力分别为 0.5 m、0.24 m，仿真结果与理论计算结果一致。

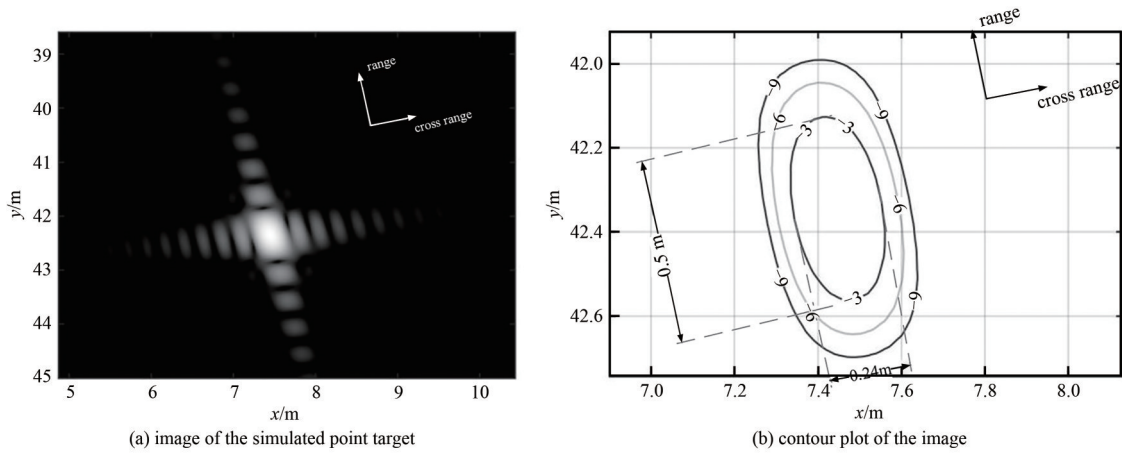


Fig.6 Resolution simulation of ideal point target  
图6 点目标分辨率仿真

### 3 实验

#### 3.1 实验系统简介

实验系统框架如图 7 所示，整个系统分为机载端和地面端两部分，功能上分为基带、频率源、中频滤波放大、射频前端、天线、遥控、上位机和电源等模块。如图 8 所示，频率源主要由直接数字合成器(Direct Digital Synthesis, DDS)、锁相介质振荡器(Phase Locked Dielectric Resonator Oscillator, PDRO)、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)、倍频混频放大链等组成。图 9 展示了射频前端结构，射频前端由倍频器、功率放大器、耦合器、混频器和波导等模块组成。实验系统的主要参数如表 2 所示，发射信号体制为调频连续波(Frequency-Modulated Continuous-Wave, FMCW)。

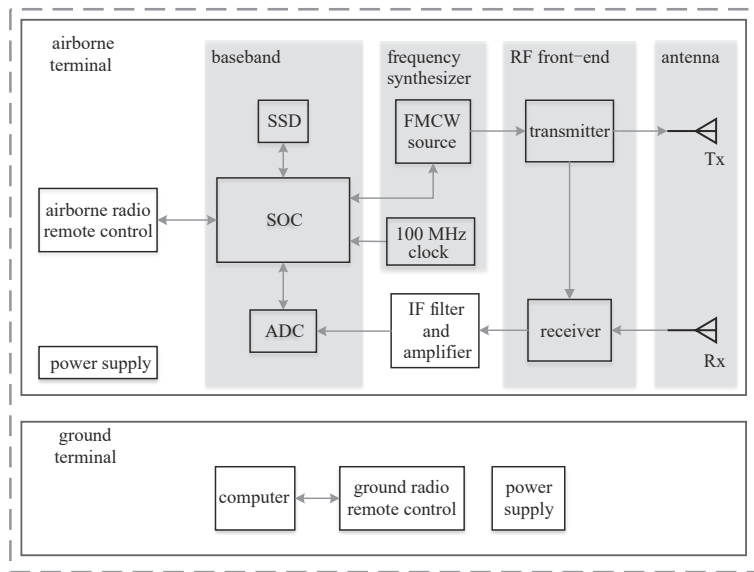


Fig.7 Diagram of the experimental system  
图7 实验系统总体框图

表2 实验系统工作参数

Table2 Parameters of the experimental system

center frequency/GHz	band width/GHz	pulse width/ $\mu$ s	PRF/kHz	beam width/ $^{\circ}$	platform height/m	platform velocity/( $m \cdot s^{-1}$ )
216	3	80	5	$2 \times 20$	30	5

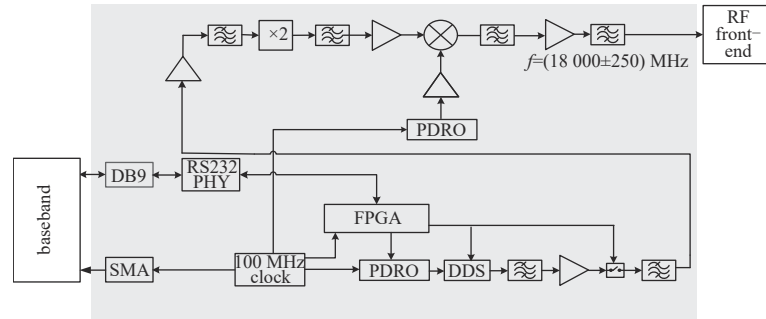


Fig.8 Diagram of the frequency source and its connections  
图 8 频率源框图与对外连接关系示意图

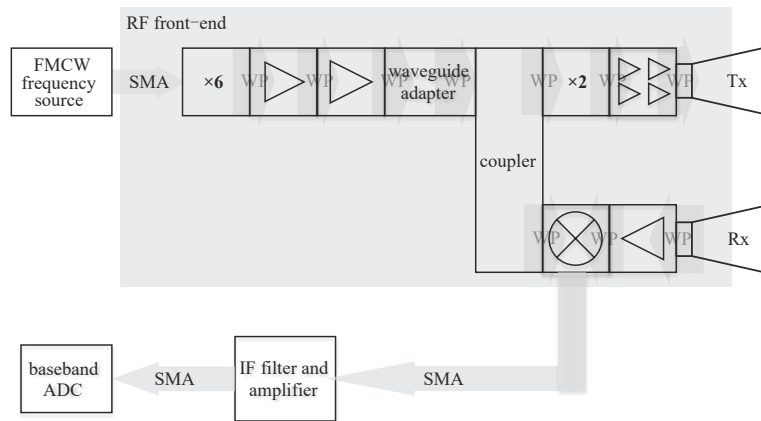


Fig.9 Diagram of the RF front-end and its connections  
图 9 射频前端模块框图与对外连接关系示意图

### 3.2 实验场景

实验过程中，雷达试验系统搭载在多旋翼无人机上进行挂飞，如图 10 所示。实验场景如图 11 所示。挂飞过程中，无人机近似在  $x$  轴正上方水平飞行，实验系统连续发射信号约 12 s，雷达波束扫过飞行航线前下方的角反射器和树木等目标。实验系统采集了共计 60 000 个回波脉冲的数据。

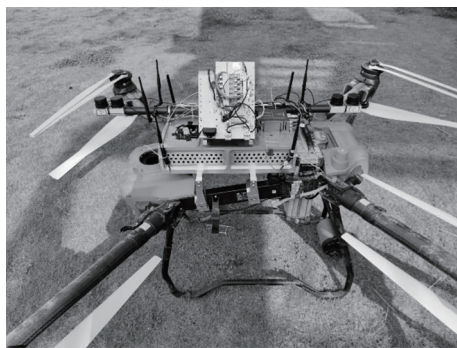


Fig.10 Photograph of the experimental system mounted on a drone  
图 10 实验系统装机照片

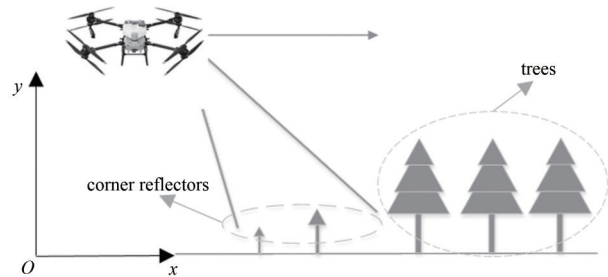


Fig.11 Illustration of the experiment scene  
图 11 实验场景设置示意图

### 3.3 实验数据处理与分析

实验数据处理主要分为 3 部分，分别为距离多普勒成像、参数估计、几何校正。

#### 3.3.1 距离多普勒成像

根据采集时刻先后顺序，将回波数据分割成多个长度为 64 个回波脉冲的相干处理数据帧，对每个相干处理数据帧分别进行成像，可获得目标的多帧连续图像。具体地，将相干处理数据帧的 64 个回波脉冲数据排列成二维回波数据矩阵，距离多普勒图像可通过直接对回波数据矩阵进行二维 FFT 获得。实际应用中，由于前下视回

波的多普勒频率中心不在零频,可能存在多普勒中心模糊现象,造成成像结果图像的多普勒维不连续,可采用估计方法对多普勒中心频率进行估计。实验中,将成像多普勒频率范围调整到 $[800,5\ 800]$ Hz,避免图像的不连续,成像结果如图 12 所示。对雷达前下方角反目标成像结果的分析表明,雷达方位角分辨力为 $0.68^\circ$ ,与式(13)计算的理论值 $0.61^\circ$ 接近。由于无人机实际飞行过程中受不规则气流和飞控精确度限制等因素影响,飞行不可能达到理想的匀速直线状态,导致处理过程中回波脉冲间并非理想相干叠加,雷达角分辨力相对理论值有一定的恶化,该角度分辨力对应到 35 m 距离下的空间分辨力为 0.4 m。

### 3.3.2 参数估计

与理论仿真一致,实验中水平地面在距离多普勒图像中为一条连续向下弯曲的曲线,如图 12 所示。从距离多普勒图像获取地形信息并不直观,需进行几何校正。将距离多普勒图像转换到  $xoy$  坐标系,需要落角和速度信息,这在实际应用中并不一定总能获得。本文实验结果的图像中能够清晰辨认出地面,坐标变换后地面将是高度恒定的水平线,速度落角的估计过程就是将地面的距离多普勒图像映射为水平线,即式(16)形式的变换。设雷达高度为  $h$ ,在一帧图像的短时间内,可认为是个常量,则由式(16)可得:

$$r = \frac{h}{\cos(\theta - \alpha)} = \frac{h}{\cos\left(\arcsin\frac{f_d \lambda}{2v} - \alpha\right)} \quad (17)$$

因此,地表的距离多普勒图像形成的曲线由雷达高度  $h$ 、速度  $v$  和落角  $\alpha$  3 个参数确定,通过拟合成像结果中的曲线,可获得这些参数的估计并完成坐标变换。如图 13 所示,将图像二值化,并与式(17)确定的图像掩码进行相关操作,得到相关值并作为目标函数,以  $(h, v, \alpha)$  为参数进行优化,实现对地表曲线的拟合。拟合估计得到的高度、速度与落角参数与机载 GPS 测量值对比如表 3 所示。基于该图像域地面图像拟合方法,能有效排除角反射器、树木等其他目标的干扰,得到的地面高度估计值与 GPS 测量值误差小于 1 m。

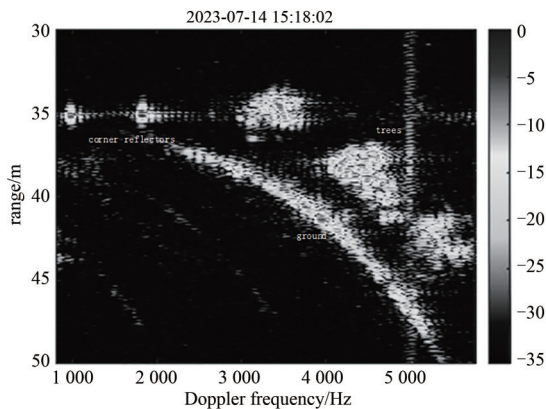


Fig.12 Range-Doppler image  
图 12 距离多普勒图像

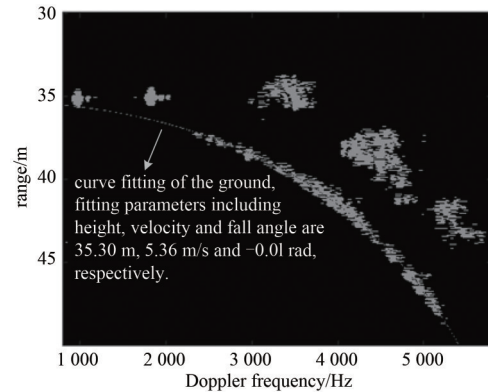


Fig.13 Binarized image with ground curve fitting  
图 13 二值化图像及地表曲线拟合

表 3 所提方法的估计结果与 GPS 测量结果对比

Table3 Comparison between estimations of proposed method and GPS measurements

	height/m	velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	fall angle/(°)
estimated by proposed method	35.3	5.36	-0.57
measured by GPS	35.8	5.67	-0.02

### 3.3.3 几何校正

基于上述参数估计结果和理论分析,可将距离多普勒域的成像结果插值变换到  $xoy$  坐标系,得到几何校正后的图像,如图 14 所示。

### 3.3.4 抗环境干扰能力分析

为验证本文所提方法的特点,与传统测距方法进行了比较。相同实验场景中,所分析数据对应的时刻早于图 12 对应时刻,此时无人机尚未飞至角反射器上方,无人机飞行高度保持约 36 m。传统测高方法所依赖的单脉冲一维距离

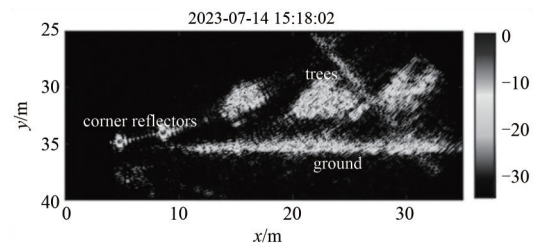


Fig.14 Geometrically corrected image  
图 14 几何校正后图像



像及本文方法的二维成像结果如图15所示。传统测高方法依靠距离像来获得距离信息，在一维距离像中，分别对应两个角反射器，在距离38.1m和39.1m处呈现明显的频谱峰，干扰了对地距离的估计，仅从一维距离像上难以找到有效识别和排除角反射器等非地面目标的方法。扩展到二维成像后，地面在距离多普勒域图像中呈一条连续的曲线，具有明显的图像特征，使排除干扰目标的影响变得可能。此外，依靠在图像域对地面特征曲线的拟合，在实验中即使波束未垂直照射地面，在假设地面无明显起伏的情况下，通过外推零多普勒时的地面距离，仍能完成对距地高度的估计。

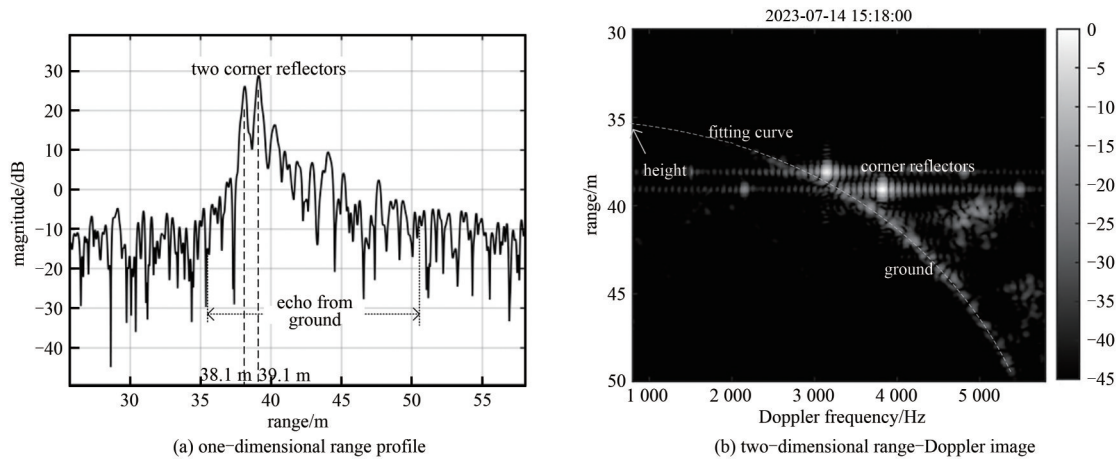


Fig.15 One-dimensional range profile and two-dimensional range-Doppler image

图15 一维距离像与二维距离多普勒像

#### 4 结论

本文通过理论建模、仿真和实验，说明了将太赫兹前下视成像用于近感探测器地形感知的可行性。该方法结合太赫兹成像优势，成像处理简单，适用于近感探测器对地面信息的实时获取。基于实验成像结果，提出了在图像域估计地面高度的方法，该方法能有效排除角反射器、树木等其他目标对地面高度测量的干扰，得到的地面高度估计值与GPS测量值误差小于1 m。这是无线电近感探测器扩展到二维成像测量地面高度的首次尝试。仿真和实验结果表明，该方法可有效感知地表目标情况，为后续基于图像处理进一步提高近感探测器对复杂地形的适应能力奠定工作基础。该方法所采用的成像算法简单，计算复杂度不高，可实现实时成像。目前高度的估计通过对地面特征曲线的拟合获得，要求地面曲线特征清晰，对于更复杂目标环境，其适应性依赖于图像域特征识别算法，计算量将增大，计算资源需求和鲁棒性有待进一步研究。如何在图像域开展目标识别，更有效利用图像信息，是下一步研究的重点。此外，此工作未考虑载体平台自转对成像的影响，还需要在后续工作中进一步评估。

#### 参考文献：

- [1] 岛新煜,高敏. 毫米波近炸引信发展现状及关键技术[J]. 飞航导弹, 2018(5):86-90. (DAO Xinyu,GAO Min. Development status and key technologies of millimeter wave fuze[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(5):86-90.) doi:10.16338/j.issn.1009-1319.20170329.
- [2] 侯武斌. 双波段复合毫米波引信探测器的设计与验证[J]. 现代导航, 2022,13(6):447-452. (HOU Wubin. Design and verification of dual-band compound millimeter wave fuze detector[J]. Modern Navigation, 2022,13(6):447-452.) doi:10.3969/j.issn.1674-7976.2022.06.012.
- [3] 刘杰,安健飞,成彬彬,等. 用于末端识别的D波段主动近感探测器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(5):757-760, 765. (LIU Jie,AN Jianfei,CHENG Binbin,et al. D-band detector for active terminal-sensitive projectile[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(5):757-760,765.) doi:10.11805/TKYDA2019446.
- [4] 程呈,高敏,周晓东,等. 基于毫米波探测器的炸高可选择近炸引信的炸高解算方法[J]. 北京理工大学学报, 2018,38(8):808-813. (CHENG Cheng,GAO Min,ZHOU Xiaodong,et al. A burst height calculation method based on millimeter detector for optional burst height fuze[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018,38(8):808-813.) doi:10.15918/j.tb1001-0645.2018.08.007.
- [5] VURAL A, SENG O, DEMIR S, et al. Height estimation for ballistic platforms using differential measurements[J]. IEEE

- Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013,49(4):2657–2665. doi:10.1177/1548512918771761.
- [6] CHENG Cheng,GAO Min,ZHOU Xiaodong,et al. Research on the burst height measurement method based on the missile-borne millimeter wave detector[J]. Journal of Defense Modeling and Simulation, 2019,16(2):137–144. doi:10.1177/1548512918771761.
- [7] 岛新煜,高敏,李超旺. 复杂地形条件下近炸引信回波信号分析[J]. 现代防御技术, 2019,47(1):176–182. (DAO Xinyu,GAO Min,LI Chaowang. Analysis of proximity fuze echo signal under the condition of complex terrain[J]. Modern Defense Technology, 2019,47(1):176–182.) doi:10.3969/j.issn.1009–086x.2019.01.26.
- [8] 戴逸俊,方辉,宋玉彬. 调频连续波高度表在复杂地形下使用的可能性[J]. 制导与引信, 2007(3):4–9,33. (DAI Yijun,FANG Hui,SONG Yubin. Possibility of using continuous wave frequency modulation altimeter in complex terrain[J]. Guidance & Fuze, 2007(3):4–9,33.) doi:10.3969/j.issn.1671–0576.2007.03.001.
- [9] 王辉辉,付学斌,张珂. 毫米波近炸引信数字化信号处理器[J]. 探测与控制学报, 2014(5):34–37,42. (WANG Huihui,FU Xuebin,ZHANG Ke. Digital signal processing of millimeter wave fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2014(5):34–37,42.)
- [10] 梁远,黄岩,张玉波,等. 基于多谐波联合识别的调频引信定距方法[J]. 探测与控制学报, 2022,44(3):22–26. (LIANG Yuan, HUANG Yan,ZHANG Yubo,et al. FM fuze ranging method based on multiple harmonics associated recognition[J]. Journal of Detection & Control, 2022,44(3):22–26.)
- [11] 王宏强,罗成高,邓彬. 太赫兹雷达前沿探测成像技术[J]. 遥测遥控, 2021,42(4):1–17. (WANG Hongqiang,LUO Chenggao, DENG Bin. Frontier detection and imaging technology of terahertz radar[J]. Telemetry and Remote Control, 2021,42(4):1–17.)
- [12] 何小坤,湛德荣,宫久路,等. 智能弹药成像引信对地面车辆定位的算法研究[J]. 兵工学报, 2014,35(10):1549–1555. (HE Xiaokun, CHEN Derong, GONG Jiulu, et al. Research on the position algorithm for smart munition imaging fuze[J]. Acta Armamentarii, 2014,35(10):1549–1555.) doi:10.3969/j.issn.1000–1093.2014.10.005.
- [13] LAN G C,FEANK W H. 合成孔径雷达成像:算法与实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2012. (LAN G C, FRANK W H. Digital signal processing of synthetic aperture radar data:algorithms and implementation[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2012.)
- [14] SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. New York,NY,USA:McGraw–Hill, 2008.
- [15] YUAN S,FIORANELLI F,YAROVY A. An adaptive threshold-based unambiguous robust Doppler beam sharpening algorithm for forward-looking MIMO Radar[C]// 2023 the 20th European Radar Conference(EuRAD). Berlin,Germany:[s.n.], 2023:65–68. doi:10.23919/EuRAD58043.2023.10288626.
- [16] 卢景月,张磊,王冠勇. 前视多通道合成孔径雷达解模糊成像方法[J]. 电子与信息学报, 2018,40(12):2820–2825. (LU Jingyue, ZHANG Lei, WANG Guanyong. Ambiguity resolving and imaging algorithm for multi-channel forward-looking synthetic aperture radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018,40(12):2820–2825.) doi:10.11999/JEIT180177.
- [17] 王鑫硕,卢景月,孟智超,等. 前视多通道 SAR 成像及阵列姿态误差补偿[J]. 雷达学报, 2023,12(6):1155–1165. (WANG Xinsuo,LU Jingyue,MENG Zhichao,et al. Forward-looking multi-channel synthetic aperture radar imaging and array attitude error compensation[J]. Journal of Radars, 2023,12(6):1155–1165.) doi:10.12000/JR23073.

#### 作者简介:

吴 强(1991–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为雷达信号处理. email:wuqiang\_mtrc@caep.cn.

安健飞(1979–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为雷达系统设计与信号处理.

邓佩佩(1990–), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为雷达信号处理.

黄 昆(1987–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹固态功率合成及射频链路模组研究.

陈仁爱(1992–), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为雷达信号处理.

周 人(1990–), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹天线.

张强辉(1990–), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为雷达系统设计与信号处理.

成彬彬(1980–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹雷达.