W 波段 FMCW 体制 ISAR 系统成像及试验验证

张 慧[1,3]，王 辉[2]，潘嘉祺[3]，王 群[3]，孔令振[3]，滑 伟[3]

（1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191；2. 上海航天技术研究院 毫米波遥感技术重点实验室，上海 201109；3. 上海航天技术研究院 毫米波遥感技术重点实验室，北京 100081）

摘 要：毫米波雷达具有高分辨率、小型化、轻型化等特点，是现代雷达应用的一个重要发展方向。随着 W 波段元器件的突破，W 波段逆合成孔径雷达（ISAR）系统的研究引起了世界发达国家的重视。W 波段 ISAR 图像分辨率高，目标散射细节更丰富，可提高目标分类、识别精度，在军民领域均有很大的应用价值。介绍了一种 W 波段调频连续波（FMCW）体制 ISAR 系统，探讨了该体制 ISAR 系统性能并介绍了 W 波段 FMCW ISAR 成像处理算法。该系统发射信号中心频率为 94 GHz，带宽为 5 GHz。利用该系统开展了 ISAR 转台试验，并利用 RD 算法得到了 ISAR 系统初步成像结果。

关键词：W 波段；逆合成孔径雷达；调频连续波；成像

中图分类号：TN 958.94 **文献标志码**：A **DOI**：10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.06.005

Research on W-Band FMCW ISAR System Imaging and Outfield Experiment

ZHANG Hui[1,3], WANG Hui[2], PAN Jiaqi[3], WANG Qun[3], KONG Lingzhen[3], HUA Wei[3]

(1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China; 2. Key Laboratory of Millimeter Wave Remote Sensing Technology, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China; 3. Key Laboratory of Millimeter Wave Remote Sensing Technology, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Millimeter wave radar is featured by high resolution, miniaturization and lightweight. It is an important development direction of modern radar applications. With the breakthrough of W-band components, the research of W-band inverse synthetic aperture radar (ISAR) system has been a hot spot. W-band ISAR images have high resolution and rich scattering details, which can improve the accuracy of target classification and recognition. Thus, it has great application value in military and civilian fields. This paper introduces a W-band frequency modulated continuous wave (FMCW) radar system operating at 94 GHz and with a bandwidth of 5 GHz. The performance of this system is discussed for ISAR applications, and FMCW mode ISAR imaging procedures are introduced. The ISAR turntable test is carried out by using the system, and the preliminary imaging results of the ISAR system are obtained by using the RD algorithm.

Keywords: W-band; inverse synthetic aperture radar(ISAR); frequency modulated continuous wave(FMCW); imaging

0 引言

毫米波因波长短，获得的图像分辨率高、电磁散射特性细节丰富等特点而成为现代雷达发展的重要趋势[1]。近几年来，随着 W 波段，尤其是 94 GHz 元器件的发展，W 波段逆合成孔径雷达（ISAR）系统的研究逐渐引起各国的重视。与低波段雷达相比，利用 W 波段雷达获得的高分辨率 ISAR 图像对目标进行分类、识别，可大幅提高目标分类、识别，的

收稿日期：2018-09-23；**修回日期**：2018-10-08

作者简介：张 慧（1987—），女，博士，主要研究方向为 SAR/ISAR 信号处理、干涉 SAR 信号处理与定标。

准确性。此外，要获得与低波段雷达相同的分辨率，W 波段 ISAR 系统所需的成像观测时间更短，易于获得同一目标的 ISAR 图像序列，而利用 ISAR 序列图像进行目标分类、识别同样可提高分类、识别的准确性。因此，W 波段 ISAR 系统具有重要的应用价值，可用于空中/太空目标的分类和识别，弹道导弹防御中真假弹头、碎片和诱饵的识别，海面目标的分类和识别等[2-5]。

随着 W 波段高功率发射器件和准光馈电网络等技术的发展，国外已有 W 波段 ISAR 系统的应用先例。现有的 W 波段 ISAR 系统主要包括美国的 HUSIR 系统[6]和 WARLOC 系统[2]，以及德国的 COBRA 系统[7]。其中：HUSIR 系统主要用于对太空目标（如卫星等）进行成像和监视；WARLOC 是一个岸基系统，主要用于对低空目标和掠海目标进行监视；COBRA 系统是一个可工作在 35，94，220 GHz 的雷达系统，在 W 波段已获得了高精度的目标图像。目前，国内鲜有关于 W 波段 ISAR 系统的相关报道。本文介绍了一种 W 波段雷达系统，并进行了 ISAR 试验。论文安排如下：第 1 节介绍了该 W 波段雷达系统及其性能指标，第 2 节对 W 波段 FMCW ISAR 回波进行了建模和成像处理，第 3 节介绍了 ISAR 试验及其实测数据处理结果，第 4 节对全文内容进行了总结。

1　W 波段 FMCW ISAR 系统

1.1　系统组成和参数

本文提出的 W 波段 FMCW 雷达系统主要由电源、频综、天线、发射/接收通道、数字接收机等组成。系统工作原理如图 1 所示。首先，频综产生中心频率为 11.75 GHz 的 X 波段线性调频信号，该信号经过倍频、放大后获得中心频率为 94 GHz、带宽为 5 GHz的 W 波段 FMCW 信号。然后，该 W 波段信号分为 2 路：一路通过发射天线辐射到外部空间，由目标反射的回波通过接收天线接收；另一路通过本振增益模块后，与接收天线接收的目标回波进行混频，从而完成去斜处理，得到差拍信号。差拍信号的频率与距离成正比，因此在距离向通过简单的傅里叶变换（FFT），即可获得目标的距离信息。最后，经过对下变频之后的中频信号进行正交解调，可得到 2 路正交的 I 路信号和 Q 路信号，通过数字接收机完成对 I/Q 这 2 路信号的采集和存储，并最终传输到电脑。

图 2 为本文介绍的 W 波段雷达系统的实物图。图 2(a)展示了整个雷达系统的各个模块，包括电源模块、频综模块、射频前端、模拟中频接收机和数字中频接收机；图 2(b)具体展示了射频前端的组成部分，包括辅助电源、发射天线、接收天线、倍频放大模块、混频模块等。

该系统的主要参数见表 1。由表可见，该系统的发射功率为 1 W，天线增益为 23 dB，系统损耗为 6 dB。

1.2　ISAR 性能指标论证

本小节讨论了该雷达系统用于 ISAR 时的系统性能指标，包括最大作用距离、分辨率等。

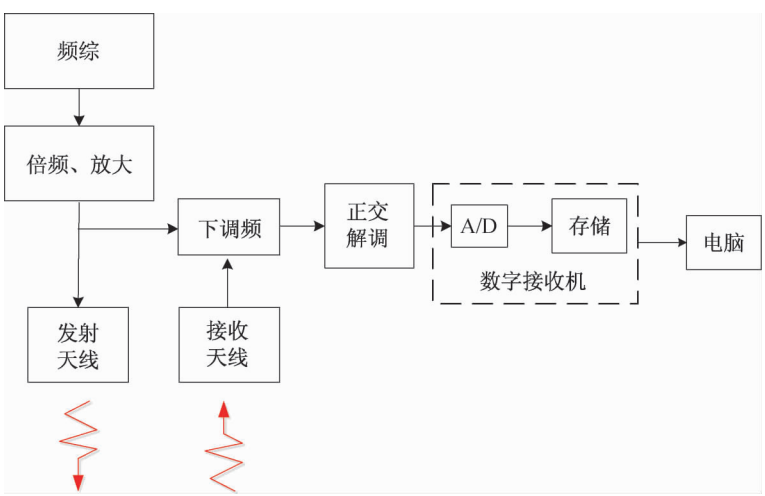


图 1　W 波段雷达工作原理图

Fig. 1　Schematic diagram of W-band radar system

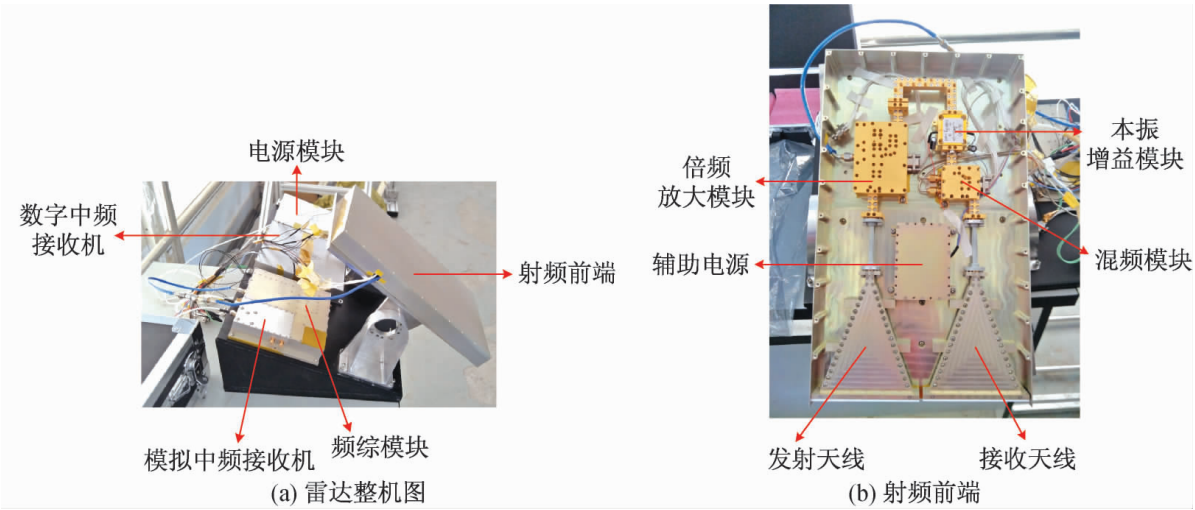


图 2 W 波段雷达系统实物图

Fig. 2 Photos of W-band radar system

表 1 W 波段 ISAR 系统参数

Tab. 1 Parameters of W-band radar system

参数	数值	参数	数值
中心频率/GHz	94	天线方位宽度/(°)	22
带宽/GHz	5	天线俯仰宽度/(°)	3.18
波形	锯齿波	发射功率/W	1
波形持续时间/ms	1	发射天线增益/dB	23
占空比/%	100	接收天线增益/dB	23
脉冲重复频率/Hz	1 000	噪声系数/dB	7
采样频率/MHz	5	系统损耗/dB	6

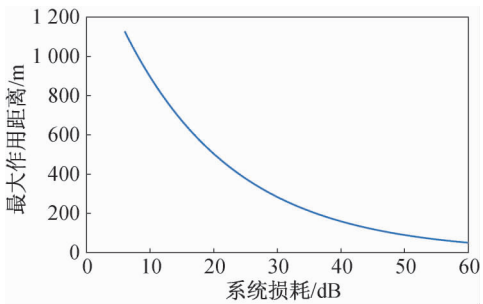


图 3 不同系统损耗下的最大作用距离

Fig. 3 Maximum operating ranges corresponding to different system losses

1.2.1 最大作用距离

根据 ISAR 系统的雷达方程,ISAR 系统的最大作用距离可表示为

$$R^4 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma T_r}{(4\pi)^3 L_s k T_0 F_n R_{SN}} \tag{1}$$

式中:P_t 为发射机的峰值发射功率;G_t 为发射天线增益;G_r 为接收天线增益;λ 为波长;L_s 为系统损耗;T_r 为脉冲持续时间;k 为波尔兹曼常数,$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K;T_0 为接收机系统的噪声温度;F_n 为噪声系数;R_{SN} 为脉冲压缩后的信噪比。

在表 1 所示的系统参数下,不同系统损耗对应的最大作用距离如图 3 所示。

由图可见:当系统损耗为 58.7 dB(如对海观测)时,最大作用距离为 54.27 m;当系统损耗为 16.3 dB(如对空观测)时,最大作用距离为 623 m。

1.2.2 分辨率

1) 距离向分辨率

与 SAR 相同,ISAR 系统的距离向分辨率同发射脉冲的宽度有关[8],两者之间的关系为

$$\rho_r = \frac{k_r c}{2B_r} \tag{2}$$

式中:B_r 为发射信号带宽;c 为电磁波传播速度;k_r 为距离向展开系数。不同带宽对应的距离向分辨率如图 4 所示。

对于该系统 5 GHz 带宽而言,距离向分辨率可达 0.03 m。当距离向展开系数为 1.47 时,距离向分辨率为 0.044 m,系统的分辨率为 cm 量级。

2) 方位向分辨率

为获得更好的成像效果,需要方位向分辨率与距离向分辨率相匹配。对 ISAR 而言,方位向分辨率与目标相对雷达的转角有关,两者之间的关系为

$$\rho_a = \frac{k_a \lambda}{2\Delta\theta} \tag{3}$$

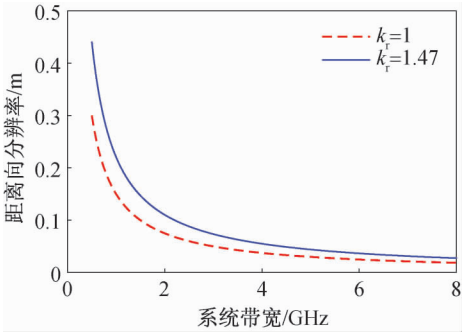


图 4　不同系统带宽对应的距离向分辨率

Fig. 4　Range resolution corresponding to different bandwidths

式中：λ 为信号波长；$\Delta\theta$ 为目标转角；k_a 为方位向展开系数。

不同方位向分辨率对目标在相干积累时间内转角的要求如图 5 所示。

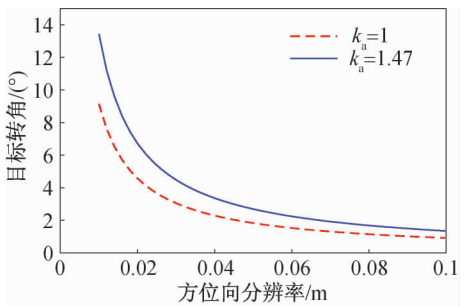


图 5　不同方位向分辨率对目标转角的要求

Fig. 5　Azimuth resolution corresponding to different target rotation angles

由图可见，要获得更高的方位向分辨率，需要的目标相对雷达的转角越大。对于该系统，在不考虑方位向展宽系数时，为达到 0.03 m 的方位向分辨率要求，目标在相干积累时间内的转角需大于 3.05°；要获得 0.044 m 的方位向分辨率，目标在相干积累时间内的转角需大于 2.1°。

2　W 波段 FMCW ISAR 回波建模和成像处理

2.1　信号模型和去斜处理

一个扫频周期内的线性调频信号形式为[9]

$$s(t)=\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_r}\right)\exp\{\mathrm{j}2\pi f_c t\}\exp\{\mathrm{j}\pi K_r t^2\} \quad (5)$$

式中：j 为虚数单位；f_c 为信号中心频率；K_r 为调频斜率，$K_r=B_r/T_r$。

对于 FMCW 信号，由于其持续发射和接收的特性，在一个扫频周期内，目标和雷达之间的距离不断变化。此时，脉冲雷达中“停—走—停”的假设不再适用[10-11]，目标相对雷达的距离与快时间相关。接收的二维发射信号为

$$s_t(t_a,t_r)=\mathrm{rect}\left(\frac{t_r}{T_r}\right)\cdot\exp\{\mathrm{j}2\pi f_c(t_a+t_r)\}\cdot\exp\{\mathrm{j}\pi K_r(t_r)^2\} \quad (6)$$

式中：t_r 为快时间；t_a 为慢时间。

接收信号形式为

$$s_r(t_a,t_r)=A\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{t_r-\tau}{T_r}\right)\cdot\exp\{\mathrm{j}2\pi f_c(t_a+t_r-\tau)\}\cdot\exp\{\mathrm{j}\pi K_r(t_r-\tau)^2\} \quad (7)$$

式中：τ 为目标到雷达的双程时间延迟。目标到雷达的距离记为 $R_k(t')$，$t'=t_a+t_r$，则 $\tau=2R_k(t')/c$。

对于 FMCW 信号，一般采用去调频处理，即利用参考位置点目标的回波与实际目标回波进行混频，从而使目标和雷达之间的相对距离可通过差拍频率进行测量。

假设参考距离为 R_{ref}，则经过去斜处理后得到的差拍信号为

$$\begin{aligned}s_r(t_a,t_r)=&A\cdot\mathrm{rect}\left(t_r-\frac{2R_k(t')}{c}\right)\cdot\\&\exp\left\{-\mathrm{j}\frac{4\pi}{\lambda}(R_k(t')-R_{ref})\right\}\cdot\\&\exp\left\{-\mathrm{j}\frac{4\pi K_r}{c}\left(t_r-\frac{2R_{ref}}{c}\right)(R_k(t')-R_{ref})\right\}\cdot\\&\exp\left\{-\mathrm{j}\frac{4\pi K_r}{c^2}(R_k(t')-R_{ref})^2\right\}\end{aligned} \quad (8)$$

式中：第一个相位项为方位向相位历程；第二个相位项为距离维差拍相位；第三个相位项为残余视频相位(RVP)项，当其小于 $\pi/4$ 时，可忽略。本文中介绍的 W 波段小型化 ISAR，采用发射信号作为参考信号，即参考距离选择为 0。

2.2　ISAR 成像

在 ISAR 成像中，首先需对平动运动分量进行补偿，将任意运动目标的 ISAR 成像转化为对转台目标的成像。平动补偿包括包络补偿和相位补偿，包络补偿可通过互相关法、距离中心法、最小熵法等方法实现，相位补偿可通过最小方差法、多普勒中心法、最小熵法等方法实现。

由于 94 GHz 中心频率对应的波长为 3 mm，对

于 W 波段 ISAR 系统，散射点的运动在观测时间内更容易产生越距离单元徙动(MTRC)现象，影响成像质量。另外，当目标尺寸较大时，在目标转动过程中也可能出现多普勒走动的问题。因此，需对 W 波段 ISAR 系统进行二维徙动补偿。

W 波段 ISAR 成像的基本流程如图 6 所示。具体算法流程如下：回波信号与参考信号进行复相乘，完成解线调频处理；对得到的差拍信号进行距离向 FFT 处理，实现距离压缩；然后进行包络对齐和相位补偿，完成平动补偿，将目标的 ISAR 成像转换为对转台目标的 ISAR 成像；最后通过 Keystone 变换完成距离向 MTRC 补偿，通过方位向 FFT 完成二维压缩，得到距离-多普勒域的 ISAR 图像。

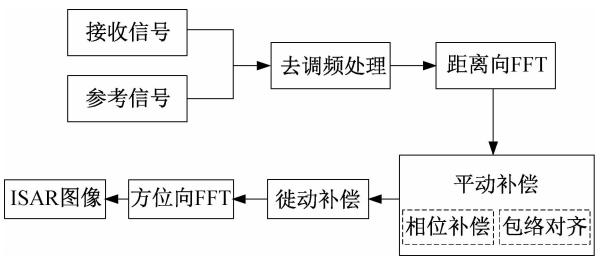


图 6 FMCW ISAR 成像算法流程图

Fig. 6 Block diagram of FMCW ISAR imaging

ISAR 点目标仿真结果如图 7 所示。利用表 1 中的参数仿真了 7 个点目标，图 7(a)为平动补偿后的结果，图 7(b)为方位压缩后的成像结果。由图可见：目标得到了良好的聚焦。

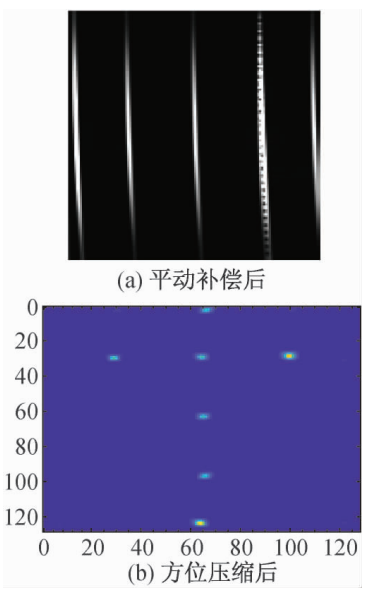


图 7 ISAR 点目标仿真结果

Fig. 7 ISAR simulation results

3 W 波段 ISAR 外场试验设计和实测数据处理

为简便起见，利用该雷达系统进行转台试验，将目标放置在转动平台上。成像试验现场如图 8 所示。



图 8 ISAR 试验现场

Fig. 8 ISAR test site

在本次试验中，雷达与转台均被放置在具有一定高度的平面上，雷达波束水平指向转台目标。转台旋转角度和速度由方位分辨率决定。根据前面的分析，转台旋转角度需达到 3.05°，因此当转台转速为 1 (°)/s 时，积累时间需超过 3.05 s。另外，雷达与转台之间的距离需小于雷达的最大作用距离，且为了满足远场条件，需大于天线远近场边界条件，即

$$R \geqslant R_{\min} = \frac{2L^2}{\lambda} \tag{10}$$

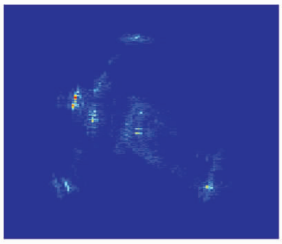
式中：$R_{\min}$ 为雷达天线远近场的边界条件；L 为天线最大尺寸。按照表 1 中的参数，天线远近场的边界为 4.3 m。试验中，雷达与目标的距离约为 10 m。

在上述试验条件下，分别对飞机模型、人体模型进行 ISAR 试验，并利用 RD 成像算法进行粗成像处理。现场数据处理结果如图 9 所示。

图 9(a)为人体模型的光学图像，图 9(b)为其对应的 ISAR 粗处理图像，从 ISAR 图像中，可分辨出人体模型的头、躯干和四肢。图 9(c)为泡沫飞机模型的光学图像，图 9(d)为其对应的 ISAR 图像。由目前得到的 ISAR 粗处理结果可见，虽然目标的主要轮廓可被识别，但图像聚焦效果有待进一步提高。



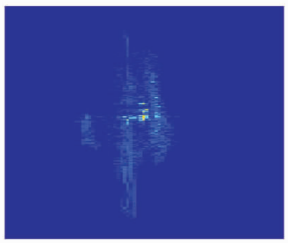
(a) 人体模型



(b)人体模型的ISAR图像



(c) 飞机模型



(d) 飞机模型的ISAR图像

图 9　不同目标的光学图像和 ISAR 图像

Fig. 9　Optical images and ISAR images of different targets

4　结束语

本文介绍了一种小型化 W 波段 FMCW 体制雷达系统，该系统可用于 SAR 和 ISAR。在 ISAR 应用中，该系统具有分辨率高和成像快速的特点。本文利用该雷达系统设计并完成了 ISAR 转台试验，获得了试验模型的 ISAR 初步成像结果。后续将对实测数据进行进一步的聚焦处理和质量提升，以获得聚焦效果更好的 W 波段 ISAR 图像，为目标分类、识别提供依据。

参考文献

[1] 向敬成，张明友. 毫米波雷达及其应用[M]. 北京：国防工业出版社，2005：43-44.

[2] LINDE G J，NGO M T，DANLY B G，et al. WARLOC：a high-power coherent 94 GHz radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems，2008，44(3)：1102-1117.

[3] ZHANG Z Z. A tale bout inverse synthetic aperture radar (ISAR)[J]. Journal of China Academy of Electronics & Information，2006，1(5)：391-404.

[4] MACDONALD M E. Measured thermal dynamics of the haystack radome and HUSIR antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation，2013，61(5)：2441-2448.

[5] 陈筠力，李威. 国外 SAR 卫星最新进展与趋势展望[J]. 上海航天，2016，33(6)：1-19.

[6] CZERWINSKI M G，USOFF J M. Haystack ultrawideband satellite imaging radar[J]. Lincoln Laboratory Journal，2014，21(1)：28-44.

[7] ESSEN H，BIEGEL G，SOMMER R，et. al. High resolution tower-turntable ISAR with the millimeter wave radar COBRA(35/94/220 GHz)[C]//European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR). 2008：1-4.

[8] CHEN V C，MARTORELLA M. Inverse synthetic aperture radar imaging-principles，algorithms and applications[M]. Herts，UK：SciTech Publishing，2014：15-16.

[9] GIUSTI E，MARTORELLA M. Range Doppler and image autofocusing for FMCW inverse synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems，2011，47(4)：2807-2823.

[10] TURIN F，PASTINA D，LOMBARDO P. ISAR imaging of ground targets with an X-band FMCW radar system for airport surveillance[C]//International Radar Symposium (IRS). 2014：1-5.

[11] JING L H.，ZHANG C L，GAO F. ISAR imaging simulation based on LFM signal[J]. Information Technology，2010，10：182-184.

（本文编辑：李栋飏）