

文章编号: 2095-4980(2015)04-0550-06

太赫兹合成孔径雷达的运动补偿

邓楚强, 李崇谊, 刘振华, 王霞, 江涛

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

摘要: 太赫兹波是电磁波由毫米波向更高频的自然延拓, 该频段展现出诸多与传统频段微波迥异的物理特性, 使得太赫兹雷达在成像分辨率、成像帧率等性能指标上有望取得突破性的进展。目前, 太赫兹合成孔径雷达(SAR)的研究引起了国内外军事界和学术界的极大关注。经分析, 太赫兹 SAR 与传统 SAR 在多方面存在不同, 其中最为重要, 也最为关键的区别是运动补偿的处理。虽然运动补偿是所有频段 SAR 需要谨慎处理的关键技术, 但太赫兹 SAR 的运动补偿显得尤为关键——由于太赫兹波长极短, 对常规微波频段 SAR 影响几乎可以忽略的雷达平台高频微小振动对太赫兹 SAR 的影响必须得到精细的处理。首先简要介绍常规 SAR 的运动补偿处理, 然后分析不同类型的运动补偿误差对太赫兹 SAR 成像的影响, 重点分析了高频振动误差的影响, 并借鉴振动目标成像的思路, 提出振动平台太赫兹 SAR 的运动补偿解决方案, 最后通过数值实验验证了本文所提出的振动补偿方法。

关键词: 太赫兹 SAR; 雷达; 运动补偿; 高频振动

中图分类号: TN958

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201504.0550

Motion compensation of the terahertz Synthetic Aperture Radar

DENG Chuqiang, LI Chongyi, LIU Zhenhua, WANG Xia, JIANG Tao
(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: Terahertz wave is the natural extension of the electromagnetic wave from the millimeter-wave to the higher band. Extraordinary physical properties are exhibited in this band, which makes the breakthrough advance of the resolution and the image frame of terahertz Synthetic Aperture Radar(SAR) possible. Much attention has been attracted to the research of the terahertz SAR. There are many differences between the terahertz SAR and the traditional SAR, one of the most important difference is the treatment on the motion compensation. Because of the wavelength of the Terahertz SAR is much shorter than that of traditional microwave, the compensation of the tiny vibration of the platform which can be ignored at the traditional SAR should be treated precisely. The motion compensation method of the traditional SAR is reviewed briefly. The impacts of all kinds of motion error are included, and the impact of the high frequency vibration is analyzed in detail. A motion compensation method is proposed according to the imaging method of the vibration targets. The numerical tests validate the proposed method.

Key words: terahertz SAR; radar; motion compensation; vibration

太赫兹波特指频率为 0.1THz~10THz 的电磁波, 介于红外与毫米波之间, 是由宏观电子学到微观光子学过渡的频段, 被称为目前人类还没有完全认知的最后一个频段。太赫兹波有诸多优越的物理特性, 如高载频、大带宽、非极性材料穿透性、大气传输特性、光谱分辨特性等, 在众多领域有广阔的应用前景, 雷达成像是其中很重要的一个领域^[1-5]。太赫兹雷达成像的性能优势基于太赫兹波的物理特性: 首先, 太赫兹波波长足够短, 更易实现极宽带信号和极窄波束天线, 可用合适的孔径实现较高分辨力的精细成像; 其次, 太赫兹雷达实现目标的合成孔径及逆合成孔径成像所需观测时间很短, 更易实现高帧率成像; 此外, 太赫兹波载频高, 对于目标的微动更为敏感, 可以通过微多普勒研究分析快速获得目标微动参数, 若用于目标的检测、分类与识别, 有望实现含旋转部件(如导弹弹头、直升机旋翼等)目标的高分辨力 ISAR 成像, 为雷达目标探测和识别提供了新途径;

最后，太赫兹波避开了传统隐身材料的吸波频段，可以穿透布料、陶瓷等非极性材料，实现透视目标成像。由于篇幅的限制，在成像体制上，本文重点研究 SAR；在雷达平台上，本文重点讨论机载平台；在具体的研究问题上，本文针对太赫兹 SAR 的运动补偿展开论述。

众所周知，合成孔径雷达利用“脉冲压缩”技术获得距离向高分辨力，利用“合成孔径”原理获得方位向高分辨力。理想机载 SAR 模型和各种成像算法的提出都是以载机匀速直线飞行状态为前提建立的，故运动是 SAR 成像的基础，运动补偿是获得方位向高分辨力的关键^[6-8]。

SAR 的运动补偿主要有 2 种方式，一是基于仪表测量的运动补偿技术，二是利用信号处理技术对回波数据分析的运动补偿方法。2 种补偿方式并非孤立，可以联合使用，通常的做法是基于测量仪表的运动补偿用于减小或抑制平台不稳所引起的高频运动误差分量，而基于数据的运动补偿用于对付基于测量仪表的运动补偿后的低频剩余误差分量。目前，随着 SAR 的应用日益广泛，很多安装了 SAR 系统平台并不具备运动补偿的测量仪表，这使得基于数据分析的运动补偿更加具有重要的意义，本文的讨论重点针对基于回波数据的运动补偿。

1 运动误差分类

机载合成孔径雷达对地面目标成像，其运动误差可以分为转动误差和平动误差。转动误差源于载机平台姿态的不稳定性，导致波束指向产生误差。但转动误差对成像影响不大，原因在于波束指向误差主要影响回波信号的幅度调制，成像对此不太敏感；另一方面，现有的天线稳定平台能够足够精确地隔离随机扰动并且控制波束指向，故本文后续的分析中不考虑转动误差。平动误差对应于雷达平台偏离匀速直线运动的平移运动误差，是一个三维矢量，在后续的分析中分别考虑该误差在航线方向、俯仰方向和偏航方向分量的影响。各个方向的运动误差均可用一组简谐振动的组合表示，各谐振分量可以用幅度、初相和振动频率(f_v)描述。SAR 的合成孔径时间记为 T_s ，下面引入参数 F ，令 $F = f_v T_s$ ，下面将 F 小于等于 1 的谐振分量记为低频运动误差，其余记为高频运动误差。

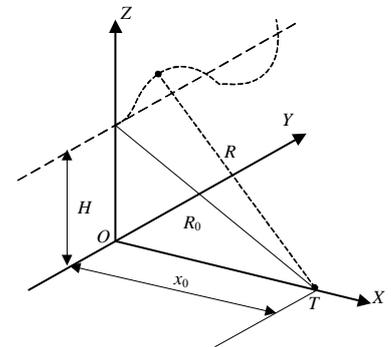


Fig.1 Diagram of the motion error of the airborne SAR
图 1 机载 SAR 运动误差示意图

在具体分析各项运动误差之前，先建立机载 SAR 的运动误差模型，如图 1 所示。假设场景为一个平面且在 XOY 平面内， T 为场景中一点，其坐标为 $(x_0, 0, 0)$ 。天线相位中心的理想航线在 XOZ 平面内且与 Y 轴平行，高度为 H 。平台天线相位中心沿理想航线以恒速 v 运动。 P 为实际航线上的任意一点， $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 为实际飞行情况相对理想飞行情况的偏离，它们都是时间 t 的函数。 P 和 T 之间的距离为 R 。目标 T 距理想航线的最短距离为 R_0 。

2 低频运动误差的影响

载机平台运动误差周期一般为几十秒，在 THz 频段属于低频运动误差。下面分析平台仅在航线方向有周期性运动误差时的模型：

$$\Delta y(t) = A \sin(2\pi f_y t) \tag{1}$$

式中： A 为误差幅度， f_y 为运动频率， t 为方位时间。由图 1 可知，平台在航线方向的位置为：

$$y(t) = vt + \Delta y(t) \tag{2}$$

目标在切航线方向的位置为：

$$x_0 = \sqrt{R_0^2 - H^2} \tag{3}$$

由此可得 P 的坐标为 $(0, y(t), H)$ ，目标 T 的坐标 $(x_0, 0, 0)$ ， P 到 T 的距离为：

$$R(t) = \sqrt{y(t)^2 + x_0^2 + H^2} \tag{4}$$

将式(2)、式(3)代入式(4)得：

$$R(t) = \sqrt{v^2 t^2 + 2vt\Delta y(t) + \Delta y(t)^2 + R_0^2} \approx R_0 + \frac{v^2 t^2}{2R_0} + \frac{vt\Delta y(t)}{R_0} \tag{5}$$

P 到 T 的距离误差为：

$$\Delta R(t) = \frac{vt\Delta y(t)}{R_0} \tag{6}$$

将式(1)代入式(6)，可得：

$$\Delta R(t) = \frac{vt}{R_0} \text{Asin}(2\pi f_y t) \tag{7}$$

由此导致的多普勒相位误差为：

$$\Delta\Phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t) \Delta\Phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t) \tag{8}$$

则回波信号的瞬时多普勒频率为：

$$f_d(t) = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \left[\frac{v^2 t}{R_0} + \frac{v\Delta y(t)}{R_0} + \frac{vt}{R_0} \frac{d(\Delta y(t))}{dt} \right] = -\frac{2}{\lambda} \left[\frac{v^2 t}{R_0} + \frac{v}{R_0} \text{Asin}(2\pi f_y t) + \frac{vt}{R_0} 2\pi f_y \text{Acos}(2\pi f_y t) \right] \tag{9}$$

由式(5)可得回波信号的瞬时多普勒调频率为：

$$K(t) = -\frac{2}{\lambda} \frac{d^2 R(t)}{dt^2} = -\frac{2}{\lambda} \left[\frac{v^2}{R_0} + \frac{v}{R_0} 4\pi f_y \text{Acos}(2\pi f_y t) - \frac{vt}{R_0} (2\pi f_y)^2 \text{Asin}(2\pi f_y t) \right] \tag{10}$$

由式(5)、式(8)~式(10)可知，沿航线方向的周期运动误差会引起多普勒相位误差，从而使天线接收到的回波信号产生相位误差。同时，由于载体平台的周期性前向运动发生变化，偏离匀速运动状态，使得沿航线方向上，雷达发射或接收脉冲的空间位置的分布不是等间隔的，导致回波数据的空域采样间隔不恒定，引起 SAR 图像的几何形变。选取相位误差的限制条件为：

$$|\Delta\Phi(t)| \leq \frac{\pi}{4} \tag{11}$$

将式(9)代入到式(11)中得到周期性运动误差幅度的限制条件：

$$|A| \leq \frac{\lambda R_0}{8v |t \sin(2\pi f_y t)|} \tag{12}$$

式中： λ 为波长； θ 为天线方位波束宽度； L_s 为合成孔径长度。于是有： $\theta = \lambda/D$ ， $L_s = 2R_0 \tan(\theta/2)$ ， $L_s = vT_s$ 。

将上述关系式代入式(12)，可得：

$$|A| \leq \frac{DL_s}{8v |t \sin(2\pi f_y t)|} \quad (|A| \leq \frac{D}{8 |\sin(2\pi f_y T_s)|}) \tag{13}$$

由式(13)可知，低频运动误差对应的 F 较小。相同分辨率情况下，太赫兹 SAR 的合成孔径时间更短，故太赫兹 SAR 对航线方向的周期性运动误差幅度的要求低。

采用同样的分析方法可知，俯仰方向运动误差的幅度限制条件为：

$$|A| \leq \frac{vDT_s}{8H |\sin(2\pi f_z T_s)|} = \frac{vD}{16\pi H f_z |\text{sinc}(2\pi f_z T_s)|} \tag{14}$$

由式(14)可知，对于低频运动误差， F 较小，太赫兹频段与 X 频段的 $\text{sinc}(2\pi f_z T_s)$ 取值相当，对运动误差幅度的要求相当。

偏航方向运动误差的幅度限制条件为：

$$|A| \leq \frac{vD}{16\pi \sqrt{R_0^2 - H^2} f_x |\text{sinc}(2\pi f_x T_s)|} \tag{15}$$

与俯仰方向的误差分析一样，太赫兹频段与 X 频段对偏航方向的运动误差幅度要求相当。

3 高频运动误差的影响

传统的 SAR 对高频误差并不需要做特别的处理，其原因在于高频运动误差各个振动分量的幅度远远小于其波长(以直升机的振动为例，幅度为亚毫米量级)，高频分量的影响可以忽略。而在太赫兹频段，电磁波的波长已经达到亚毫米量级，高频振动的幅度与雷达波长可比拟，故必须研究高频运动误差的影响。

图 2 给出 SAR 的平台振动成像几何模型。平台振动情况下对地面一静止点目标 P 的成像几何模型，飞机沿

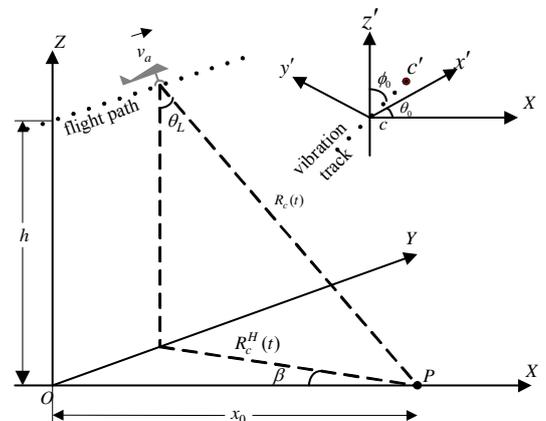


Fig.2 Geometry model of the SAR on vibrating platform
图 2 SAR 平台振动成像几何模型

OY 轴飞行，速度是 v_a ，飞行高度是 h 。点 c' 表示受到振动影响下的瞬时相位中心，点 c 表示不存在振动情况下相位中心的位置，通过对坐标系 $XYZO$ 绕 Z 轴逆时针旋转 θ_0 得到坐标系 $x'y'z'$ ，相位中心在 $x'z'$ 坐标平面内的 cc' 线段上以点 c 为中心做简谐振动，线段 cc' 与 cz' 轴的夹角为 ϕ_0 。用于表征高频运动误差的简谐振动分量可表示为

$$r(t) = A_m \sin \Phi \tag{16}$$

$$\Phi = 2\pi f_m t + \varphi_m \tag{17}$$

式中： A_m 为振幅； f_m 为振动频率； φ_m 为振动初相； t 为方位时刻。根据图 2 的几何模型和公式(17)，采用正侧视模型推导出斜距公式：

$$R(t) = \sqrt{(r(t)\cos\theta_0\sin\phi_0 - x_0)^2 + (r(t)\sin\theta_0\sin\phi_0 + v_a t)^2 + (r(t)\cos\phi_0 + h)^2} \tag{18}$$

由此可得：

$$R(t) \approx R_c(t) + Cr(t) \tag{19}$$

式中 C 为常数，由几何参数可以直接算出。 $R_c(t) = \sqrt{R_0^2 + v_a^2 t^2}$ 是无振动情况下的天线相位中心 c 至点目标 p 的瞬时斜距值， R_0 是近距。令 $A = CA_m$ ，表示等效振动幅值，则式(18)写为：

$$R(t) \approx R_c(t) + A \sin \Phi \tag{20}$$

由式(20)可知平台的高频振动在斜距上产生了正弦调制，相位误差为：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} A \sin \Phi \tag{21}$$

将式(11)代入式(21)，可得高频振动的幅度限制条件

$$|A| \leq \frac{\lambda}{8 \sin \Phi} \tag{22}$$

由式(22)可知，高频振动时，THz 频段相比传统的 X 频段对振动幅度要求更加苛刻，一旦振动幅度超出限制条件，将会对成像质量产生影响。

4 太赫兹 SAR 高频振动的补偿方法

由式(20)可知，当平台存在振动分量时，信号多普勒频率可以表示为：

$$f_d(t) = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} \approx -\frac{2v_a^2}{\lambda R_0} t - \frac{2}{\lambda} A \omega_m \cos(\omega_m t + \varphi_m) \tag{23}$$

多普勒频率分为 2 个部分，一部分相当于振动中心静止状态下的线性多普勒频率，另一部分是由振动引起的正弦调制多普勒频率。

如图 3 所示，振动所引起的正弦调制导致采用传统成像方法处理时，地面上的静止点目标在图像上表现为方位向上的一系列点目标。

SAR 在高频振动下的成像问题与 SAR 对目标的成像有相似之处，都需要通过抑制成对回波实现清晰成像。因此，在研究太赫兹 SAR 的高频振动补偿时，本文借鉴文献[9]提出的振动目标成像处理流程，如图 4 所示。

下面通过仿真实验验证处理方法的有效性，仿真场景如图 5 所示。系统参数如表 1 所示，仿真结果如图 6 所示。左图为未经振动补偿的成像结果，由前面的分析可知，平台振动的影响导致方位向成对回波的出现，方位向 3 个点目标在 SAR 的图像中表现为沿方位向分布的一系列离散点；右图给出基于 KTA 成像算法及成对回波抑制算法处理后的成像结果，显然，本文提出的方法可以有效地补偿平台振动的影响。

5 结论

太赫兹 SAR 在军事上有重要的应用前景，本文针对太赫兹 SAR 中的运动补偿问题开展研究，分析了不同类型的运动补偿误差对太赫兹 SAR 的影响。研究表明，太赫兹 SAR 对低频运动误差补偿的精确度要求并不比传统的微波 SAR 的要求更高，但高频运动误差对太赫兹 SAR 的影响非常大，即太赫兹 SAR 运动补偿的重点和难点在于高频振动的补偿方法。本文借鉴振动目标成像方法提出了一种太赫兹 SAR 高频振动的补偿方法，并通过仿真验证了该方法的有效性。

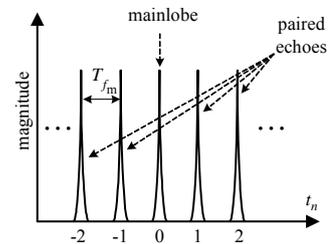


Fig.3 Position of the mainlobe and paired echo
图 3 成对回波与主像位置关系

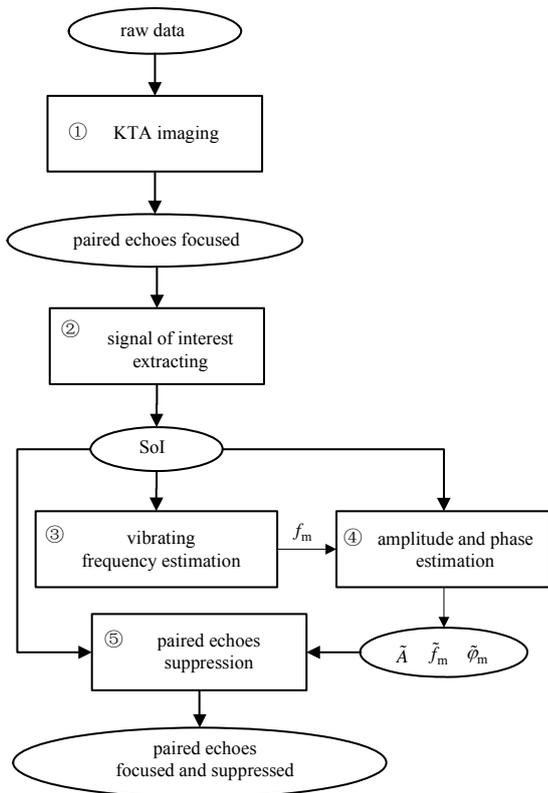


Fig.4 Flow chart of the focusing and the suppression of the paired echoes
图 4 成对回波聚焦与抑制流程图

表 1 太赫兹 SAR 系统仿真参数
Table 1 Parameters of the simulated THz SAR

carrier frequency	220 GHz
azimuth resolution	0.06 m
range resolution	0.08 m
slant range	2 000 m
velocity of the radar	30 m/s
pulse width	166 μ s
bandwidth of the pulse	1.5 GHz
PRF	6 000 Hz

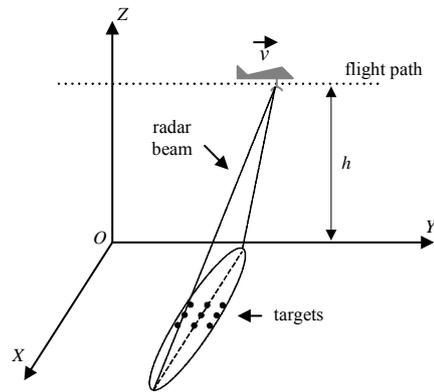


Fig.5 Diagram of the simulated scene
图 5 仿真场景示意图

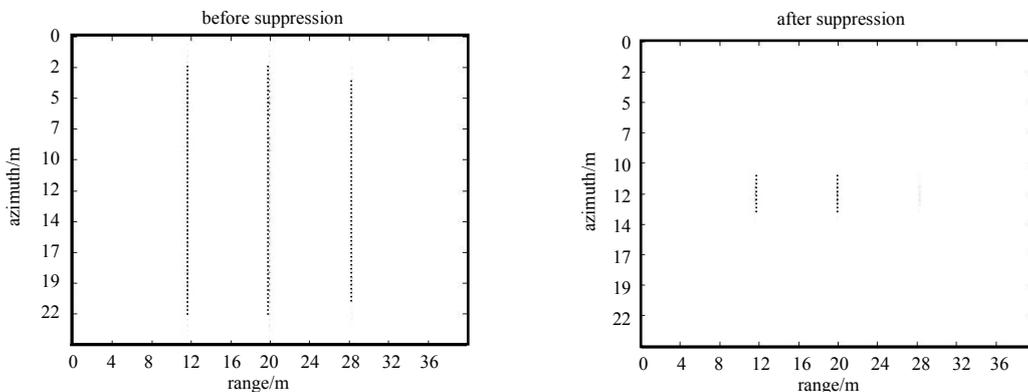


Fig.6 Comparison of the images before and after suppression
图 6 抑制前后成像结果对比

参考文献:

[1] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5):483-484. (LIU Shenggang, ZHONG Renbin. The new development of the THz technology and applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology, 2009,38(5):483-484.)

[2] Cooper K B,Dengler R J,Chattopadhyay G,et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008,18(1):64-66.

[3] 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. (CAI Yingwu, YANG Chen,ZENG Genghua,et al. Experimental research on imaging technology for high resolution terahertz radar system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(1):7-9.)

- [4] GU Shengming, LI Chao, GAO Xiang, et al. Terahertz aperture synthesized imaging with fan-beam scanning for personnel screening [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(12):3877–3885.
- [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 Binbin, JIANG Ge, CHEN 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] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. (BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. The Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [7] 邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像[J]. 电子学报, 2001, 29(12A):1824–1828. (XING Mengdao, BAO Zheng. Motion parameter estimation SAR imaging[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A):1824–1828.)
- [8] Zaugg EC, Long D G. Full motion compensation for LFM–CW synthetic aperture radar[C]// Proc. Int. Geosci. Rem. Sen. Symp. Barcelona, Spain: IEEE, 2007:5198–5201.
- [9] ZHANG Yuan, SUN Jinping, LEI Peng, et al. SAR-based paired echo focusing and suppression of vibrating targets[J]. IEEE T. Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(12):7593–7605.

作者简介:



邓楚强(1983–), 男, 湖南省新宁县人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达成像、目标特性. email: chqdeng@foxmail.com.

李崇谊(1980–), 男, 黑龙江省七台河市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为雷达成像与目标识别.

刘振华(1964–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达成像技术.

王震(1979–), 女, 山东省烟台市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 SAR 成像、抗干扰及图像处理技术.

江涛(1982–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达系统、新体制雷达.

上接第 535 页

- [8] 雷文强, 蒋艺, 胡林林, 等. 0.14 THz 折叠波导行波管的设计与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(3):334–338. (LEI Wenqiang, JIANG Yi, HU Linlin, et al. Design and experiment for 0.14 THz folded waveguide traveling wave tubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(3):334–338.)

作者简介:



雷文强(1972–), 男, 重庆市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为真空电子学和太赫兹技术. email: leton@163.com.

蒋艺(1983–), 男, 成都市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为大功率太赫兹器件的设计.

胡林林(1983–), 男, 湖北省荆州市人, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波器件、大功率太赫兹电真空器件及信号测量.

马国武(1981–), 男, 四川省凉山州人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为高功率微波器件、大功率毫米波器件.

陈洪斌(1971–), 男, 重庆市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为毫米波与太赫兹器件.