

文章编号: 2095-4980(2018)01-0090-06

面向人体安检的毫米波转台成像实验

郑岱阳, 解金豹, 张 磊, 笕 敏, 尹治平

(合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 提出 2 种基于前视和斜下视圆周扫描的毫米波人体安检方案, 该方案采用 1 对收发分置天线沿圆周扫描, 利用矢量网络分析仪、喇叭天线和高精确度转台搭建了毫米波成像实验平台。为了验证 2 种方案及相应的波数域算法的有效性, 通过毫米波转台实验对多个目标反演成像, 并得到了良好的实验结果。实验结果表明, 本文提出的 2 种毫米波人体安检方案都具有一定的可行性。

关键词: 人体安检; 毫米波成像; 波数域算法; 转台; 圆周合成孔径雷达

中图分类号: TN953⁺.6

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0090

Millimeter wave imaging experiments for personnel surveillance

ZHENG Daiyang, XIE Jinbao, ZHANG Lei, DA Min, YIN Zhiping

(Institute of Opto-Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: Two millimeter wave imaging schemes based on front-view mode and oblique-view mode are presented. A pair of sending and receiving antennas are utilized to scan target along the circumference. The millimeter wave imaging experimental platform is composed of vector network analyzer, horn antenna and high precision turntable. In order to validate the effectiveness of the two schemes and the corresponding wave-number domain algorithms, a series of objectives inversion imaging based on experimental platform are accomplished, and good experimental results are obtained. The feasibility of two kinds of millimeter-wave personnel surveillance is proved by the experiment results.

Keywords: personnel surveillance; millimeter wave imaging; wave-number domain algorithm; rotating platform; circular Synthetic Aperture Radar

近年来, 面对日益猖獗的恐怖袭击事件, 机场等公共场所对人体安检仪的需求与日俱增。毫米波不仅能够提供合适的分辨力, 而且可以穿透人体衣物, 是人体安检的理想频段^[1-3]。目前, 世界上主流的毫米波人体安检系统分为 3 大类。第 1 类是密集线阵机械扫描成像系统^[4], 其中美国 L-3 通信公司的 Provision 人体扫描仪最具代表性, 其成像结果较为优异, 但是需要较多天线与微波通道, 导致造价成本较高; 第 2 类是多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 线阵机械扫描成像系统, 荷兰人 ZHUGE Xiaodong 和德国人 Frank 在不同频段下做了一系列实验, 得到了较好的成像结果^[5-6], 尽管采用 MIMO 技术可在一定程度上减少天线和微波通道数量, 但其成本仍然较高; 第 3 类是 MIMO 面阵电子扫描成像系统^[7-8], 成像速度快, 德国 R&S 公司研制的人体安检门在 20 ms 内即可成像, 有较好的成像效果, 由于面阵电子扫描需要的相位天线与微波通道比一维线阵更多, 造成设备成本也随之变高。

为了降低系统成本, 国内外学者尝试将圆周合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 成像原理应用于安检成像, SAR 成像只需要 1 对收发天线和 1 对收发通道, 成本大大降低, 而且圆周扫描可以对目标周身进行扫描, 得到全面的目标数据, 从而有较好的成像结果。德国人 Dallinger 首次提出一种圆周扫描柱面成像方案及 $\omega-k$ 算法^[9]。Sebastian 基于该机制成功研发了一款毫米波人体安检仪^[10], 但由于带宽较窄, 半径过小, 目标高度较高, 仰角过大, 造成分辨力下降, 成像效果一般, 文中实验结果仅能看出在人体上有异物, 但很难分辨出异物种类。林赞等人提出一种用于圆周 SAR 平面成像的距离徙动算法^[11], 该算法主要针对远距离 SAR 成像应用, 因此文中对金属小球的转台成像实验是为了验证 SAR 成像, 频段较低, 带宽较窄, 而且转动半径相对成像区域尺寸较大,

收稿日期: 2016-10-14; 修回日期: 2016-12-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (6141140)

高度也较高,对安检成像场景的验证不足。

本文提出了 2 种毫米波人体安检方案:第 1 种是前视圆周扫描平面成像方案,第 2 种是斜下视圆周扫描柱面成像方案。2 种方案采用比文献[10]、文献[12]更大的带宽,增加了高度分辨力,改善了成像分辨力,采用相比于文献[13]更小的转动半径和天线高度,验证了安检条件下的成像过程。本文利用矢量网络分析仪、高精度度转台、喇叭天线和电脑搭建了实验系统,进行符合近场毫米波安检成像的实际应用情况的原理验证,通过转台实验获取金属剪刀、仿真手枪和绑在人体模型金属剪刀、刀的散射数据,并通过成像算法得到最终的反演图像,结果显示其成像效果较好。

1 毫米波人体安检方案

本文提出 2 种毫米波人体安检方案。

第 1 种是前视圆周扫描平面成像方案(图 1),天线在受检人员前方对人体进行全方位扫描,并通过文献[8]中的距离徙动算法反演成像。由于圆周 SAR 超出聚焦区域后分辨力很低,故只能获得人体局部的逐高度三维图像。此种方案的优点是利用圆周 SAR 成像的平面高分辨力对人体进行平面扫描,由于毫米波可以穿透衣物的遮盖进行成像,此种方案可以对衣物遮盖的异物进行清晰成像从而方便安检人员对异物进行精确识别。

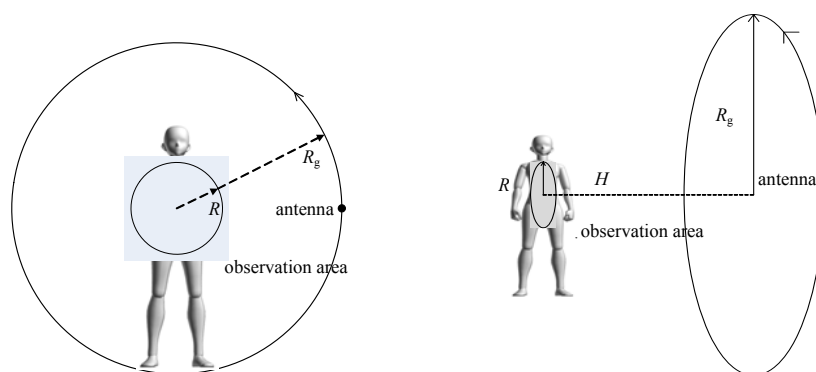


Fig.1 Front-view circular scanning
图 1 前视圆周扫描

第 2 种是斜下视圆周扫描柱面成像方案(图 2),天线在受检人员上方对人体做全方位扫描,并通过文献[9]中的 $\omega-k$ 算法反演成像。因为高度分辨力由天线波束俯仰角和带宽决定,故需要很高的带宽来获得高分辨图像,由于天线扫描的圆形轨迹垂直于人体,所以扫描半径较第 1 种方案可以更小,此种方案的优点是安检设备的体积可以更小且结构简单,可以使安检人员对异物进行有效识别。

这 2 种方案有别于文献[3-8]所提出的扫描结构,在成像分辨力和系统成本之间取得了较好的平衡,所以具有较好的实用价值。

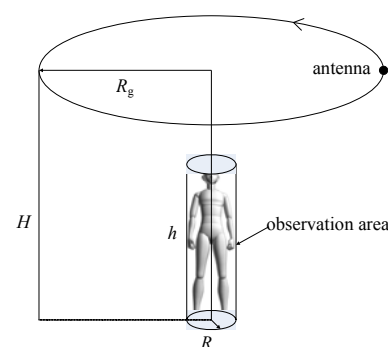


Fig.2 Oblique-view circular scanning
图 2 斜下视圆周扫描

2 成像算法

本节分别对 2 种圆周扫描成像算法作简单介绍,不对公式做详细解释。

前视圆周 SAR 平面成像中,雷达平台沿着平行于人体的一个半径为 R_g 的圆形轨迹移动,雷达扫描角 $\theta \in [0, 2\pi]$,轨迹中心为 $(0, 0, H)$,且雷达视线方向始终指向半径为 R 的人体的躯干部位,对人体进行斜视扫描。

距离徙动算法^[8]流程如下。

雷达的坐标为:

$$(X, Y, H) = (R_g \cos \theta, R_g \sin \theta, H) \quad (1)$$

假设人体上一个目标点为 (x_p, y_p, z_p) ,反射强度为 σ_p ,则 p 点的回波信号可表示为:

$$s(\theta, k) = \sigma_p \exp\{j\phi(\theta, k)\} \quad (2)$$

式中: $\phi(\theta, k) = -2kR_p(\theta)$;波数 $k = 2\pi f/c$, f 表示瞬时频率, c 表示光速。

转换到极坐标并进行相位补偿, 得出目标点的数据函数为:

$$S_p(\rho, \phi) = \iint_{k, \theta} s(\theta, k) W(\rho, \phi, k) \exp(-j\phi_1) \exp(j\phi_2) \equiv \exp(j\phi_3) \quad (3)$$

通过插值算法将 $S_p(\rho, \phi)$ 转换到直角坐标系下的 $S_p(k_x, k_y)$ 并进行二维逆傅里叶变换, 即可得到场景中给定高度 z_p 处的二维聚焦图像 $f(x, y)$ 。在不同高度下进行二维成像, 即可获得最终的三维反演图像 $f(x, y, z)$ 。

斜下视圆周 SAR 柱面成像几何关系图中, 雷达平台沿着垂直于人体的一个半径为 R_g 的圆形轨迹移动, 雷达扫描角 $\theta \in [0, 2\pi]$, 轨迹中心为 $(0, 0, H)$, 该雷达平台沿一个圆形路径移动, 其波束始终聚焦于现场半径 R 和高度集中在 h 的人体上, 其极坐标可表示为 (R_g, θ, H) , 人体表面有一目标点 (R_g, ϕ, z) 。

$\omega-k$ 算法^[9]流程如下。

单个点回波信号的表达式为:

$$s(\theta, k) = \exp\left\{-j2k\sqrt{\nu + \gamma(\theta - \phi)^2}\right\} \quad (4)$$

式中: $\nu = (R_g - R)^2 + (H - z)^2$; $\gamma = R_g R$ 。

在慢时间 θ 域作傅里叶变换, 得到角频域数据, 由驻定相位法求得驻定点并带入, 在距离方向作一维插值得:

$$s(k_\theta, k_r) = \exp\{-jk_r r_0\} \cdot \exp\{-jk_\theta \phi\} \quad (5)$$

并对 $s(k_\theta, k_r)$ 作二维逆傅里叶变换, 即可得到目标的位置信息 $f(r_0, z)$ 。

$$f(\theta, r_0) = FT_{k_\theta, k_r}^{-1}\{S(k_\theta, k_r)\} \quad (6)$$

最后通过下式投影到高度方向, 并将 θ 乘以圆柱半径 r 获得二维图像 $f(r\theta, z)$ 。

$$z = \frac{r_0}{H / \sqrt{\nu_0}} \quad (7)$$

式中 r_0 为目标在 $\sqrt{\nu_0}$ 方向的投影值。

3 毫米波转台成像实验

如图 3 所示, 本文采用矢量网络分析仪、喇叭天线和高精度转台搭建实验平台。在实验过程中, 采用目标转动、天线不动的毫米波转台成像实验方案, 并使用电脑控制数据采集和转台转动同步进行。为了避免环境干扰对实验结果造成影响, 在转台周围铺满吸波材料并采用背景对消的方式采集回波数据, 模仿本文所提出的 2 种成像方案可能的实现环境进行原理性验证, 其中, 一对收发分置的天线近似为收发同源的雷达, 目标和带有目标的人体模型在转台上转动, 该实验获得的数据与目标静止, 雷达天线围绕目标圆周扫描得到的回波数据等效。

对目标的平面成像模拟前视圆周扫描平面成像, 天线在受检人员前方对人体进行全方位扫描。对人体模型的斜下视圆周扫描柱面成像模拟天线在受检人员上方对人体做全方位扫描。用于采集转台数据的是一个频率步进雷达系统, 目标放置在转台的中间, 雷达为固定位置, 表 1 和表 2 分别为毫米波转台平面和柱面成像实验参数。

由文献[14-15]可知, 在其他参数相同的条件下, 工作带宽越大, 则高度维分辨力越高, 工作频率越高, 则水平分辨力越高; 在其他参数相同的条件下, 高度维分辨力会随着目标与雷达间垂直距离的增大而降低, 并根据表 1 和表 2 的实验参数求出相应分辨力进行对比, 得表 3 和表 4。

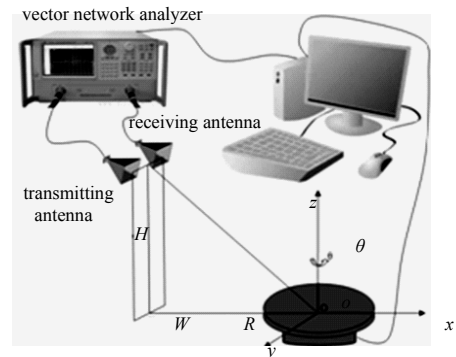


Fig.3 Schematic of millimeter wave imaging experiments
图 3 毫米波转台成像实验示意图

表 1 转台三维成像实验参数

Table1 Three-dimensional imaging experiment parameters			
parameter	value	parameter	value
start freq	28 GHz	stop freq	38 GHz
bandwidth	10 GHz	frequency sampling points(N)	256
transmitted power	0 dBm	antenna beamwidth	18°
vertical range(H)	0.7 m	horizontal range(R)	0.876 m
antenna separation(W)	0.04 m	angle range	0°-360°
angular sampling points(M)	720	angular velocity	0.690°/s

表 2 转台柱面成像实验参数

Table2 Cylinder scanning experiment parameters			
parameter	value	parameter	value
start freq	30 GHz	stop freq	40 GHz
bandwidth	10 GHz	frequency sampling points(N)	256
transmitted power	0 dBm	antenna beamwidth	18°
vertical range(H)	1.21 m	horizontal range(R)	1.027 m
antenna separation(W)	0.05 m	angle range	0°-180°
angular sampling points(M)	900	angular velocity	0.276°/s

通过表 3 对比一些同类实验分辨力可看出本文实验具有更高的水平分辨力和较高的高度分辨力。

通过表 4 对比一些同类实验的分辨力可看出本文实验具有更高的水平分辨力和高度分辨力。

图 4、图 5 分别为实验目标和目标的成像结果。通过目标与成像结果的对比可以看出成像结果具有较好的还原性和成像分辨力。

对比文献[12-13]中的同类实验，可以看出文献[12-13]中仅以高亮区显示目标，并不能识别目标及其具体细节，而本文中的实验具有较好的成像结果，可以清晰分辨出目标及其细节。

但是该方案受限于圆周 SAR 对高度维分辨力不足，所以在实际安检应用中对人体侧面的分辨力不足。综合该方案的实验结果和优势，其对局部区域安检的应用较为可靠。

图 6、图 7 分别为实验目标和目标的成像结果。其中，成像结果中用椭圆线框标记实验目标的位置，对比成像结果和目标可以看出成像还原度一般，但是可以分辨出目标的形状和大体轮廓；成像结果中用矩形线框标记的为人体模型肩部，尽管人体模型由塑料组成，但在转动过程中凸起的肩部也有一定的反射强度，所以成像结果中肩部呈现高亮区，但并不影响对目标的识别。

对比文献[10]中的同类实验结果，可以看出本文中实验结果对目标的分辨能力更好。文献[10]中人体所携带的枪、钱包、钥匙等，仅能通过成像的波峰强度做出区别并识别目标位置，并不能识别目标的形状、轮廓和细节；而本文实验中，从成像结果中可以较容易地分辨出原目标的形状、轮廓以及位置。

但是该方案受限于圆周 SAR 对距离维分辨力的不足，所以在实际安检应用中对人体高度方向的分辨力不足。在本文实验中，通过增大带宽、工作频率，提高了高度方向的分辨力，使之具有更好的成像效果，对目标的分辨更加容易。该方案可以应用在全方位扫描的安检系统中。

表 3 转台三维成像分辨力比较

Table3 Comparison of three-dimensional imaging resolution			
parameters	front-view scanning	literature[12]	literature[13]
azimuth resolution	0.009 5 m	0.03 m	0.01 m
range resolution	0.009 5 m	0.036 m	0.01 m
height resolution	0.084 m	0.038 m	0.13 m

表 4 转台柱面成像分辨力比较表

Table4 Comparison of cylindrical imaging resolution		
parameters	oblique-view scanning	literature[10]
azimuth resolution	0.007 8 m	0.03 m
range resolution	0.007 8 m	0.03 m
height resolution	0.1 m	0.16 m

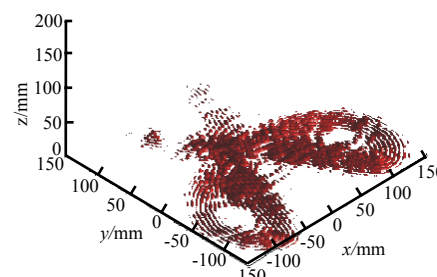


Fig.4 Metal scissors and its three dimensional imaging based on front-view mode

图 4 前视扫描中金属剪刀及其三维成像结果

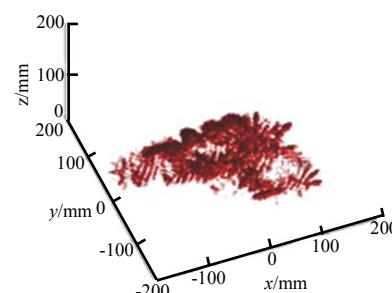


Fig.5 Metal imitated pistol and its three-dimensional imaging based on front-view mode

图 5 前视扫描中金属仿真手枪和金属仿真手枪三维成像结果

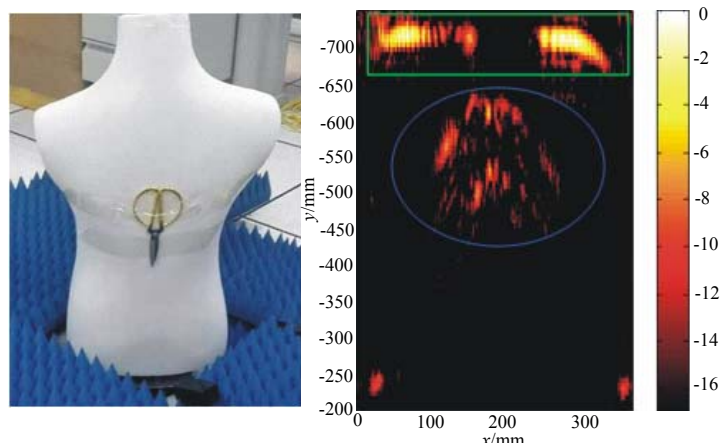


Fig.6 Metal scissors on the body model and cylinder scanning three-dimensional imaging based on oblique-view mode

图 6 斜下视扫描中绑在人体模型身上的金属剪刀和柱面成像结果

4 结论

本文提出 2 种基于圆周扫描和圆周 SAR 波数域算法的毫米波人体安检方案。利用矢量网络分析仪、喇叭天线和高精确度转台搭建了毫米波成像实验平台,模拟 2 种方案的实施环境进行原理性验证。通过毫米波转台实验获得金属剪刀、仿真手枪平面散射信息和绑在人体模型金属剪刀、刀的三维散射信息,并把反演图像同原目标对比,对比结果显示 2 种方案均有较好的成像分辨力和可识别性。结合其在实际使用中的低成本特性,2 种毫米波人体安检方案均有一定可行性和自身优势。

参考文献:

- [1] 成彬彬,李慧萍,安健飞,等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):845–848. (CHENG Binbin,LI Huiping,AN Jianfei,et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):845–848.)
- [2] 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):189–197. (LIANG Meiyan, DENG Chao,ZHANG Cunlin. THz radar imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,11(2):189–197.)
- [3] 张野,邓彬,秦玉亮,等. 近程目标太赫兹全息成像算法及仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2016,14(4):513–519. (ZHANG Ye,DENG Bin,QIN Yuliang,et al. Terahertz holographic imaging algorithm and simulation for short-distance target[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):513–519.)
- [4] MCMAKIN D L,SHEEN D M,HALL T E,et al. Cylindrical holographic radar camera[C]// Enabling Technologies for Law Enforcement and Security. Richland,WA,USA:International Society for Optics and Photonics, 1998:79–88.
- [5] ZHUGE X,YAROVY A G. A sparse aperture MIMO-SAR-based UWB imaging system for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011,49(1):509–518.
- [6] GUMBMANN F,SCHMIDT L. Millimeter-wave imaging with optimized sparse periodic array for short-range applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011,49(10):3629–3638.
- [7] ZHUGE X,YAROVY A G. Three-dimensional near-field MIMO array imaging using range migration techniques[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012,21(6):3026–3033.
- [8] AHMED S S,SCHIESSL A,GUMBMANN F,et al. Advanced microwave imaging[J]. IEEE Microwave Magazine, 2012,13(13):26–43.
- [9] DALLINGER A,SCHELKSHORN S, DETLEFSEN J. Efficient ω - k -algorithm for circular SAR and cylindrical reconstruction areas[J]. Advances in Radio Science, 2006,4(5):85–91.
- [10] HANTSCHER S,LANG S,HAGELEN M,et al. 94 GHz person scanner with circular aperture as part of a new sensor concept on airports[C]// Radar Symposium (IRS),2010 11th International. Vilnius,Lithuania:IEEE, 2010:1–4.
- [11] LIN Y,HONG W,TAN W,et al. Extension of range migration algorithm to squint circular SAR imaging[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2011,8(4):651–655.
- [12] HONG W,HONG W,WANG Y P,et al. Tomographic SAR and circular SAR experiments in anechoic chamber[C]// European Conference on Synthetic Aperture Radar. Germany:EUSAR, 2008:1–4.
- [13] TAN Weixian,WANG Yanping ,WEN Hong,et al. Circular SAR experiment for human body imaging[C]// Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Huangshan,China:[s.n.], 2007:90–93.
- [14] PINHEIRO M,PRATS P,SCHEIBER R,et al. Tomographic 3D reconstruction from airborne circular SAR[C]// IGARSS in Proc.. [S.l.]:IEEE:2009:III 21–III 24.
- [15] ISHIMARU A,CHAN T K,KUGA Y. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1998,36(5):1524–1530.

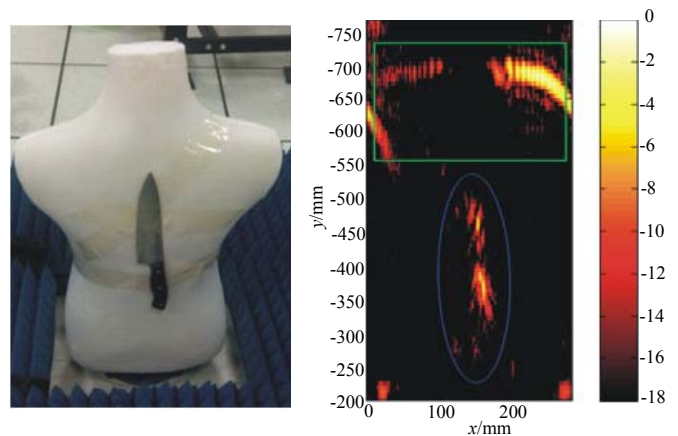


Fig.7 Knife on the body model and cylinder scanning three-dimensional imaging based on oblique-view mode
图 7 斜下视扫描中绑在人体模型身上的金属剪刀和柱面成像结果

作者简介：



郑岱阳(1991-), 男, 北京市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达成像.email: zhengokok1@163.com.

解金豹(1992-), 男, 河南省信阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达与微波成像.

张 磊(1993-), 男, 安徽省阜阳市人, 主要研究方向为雷达与微波成像.

笪 敏(1991-), 男, 安徽省淮北市人, 硕士, 主要研究方向为雷达与微波成像.

尹治平(1980-), 男, 湖南省常宁市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为雷达与微波成像.

(上接第 89 页)

- [3] 张守信. 外弹道测量与卫星轨道测量基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1992. (ZHANG Shouxin. The base of outside ballistic and satellite orbit measurement[M]. Beijing,China:National Defense Industry Press, 1992.)
- [4] 刘利生,吴斌,孙刚,等. 外弹道测量精度分析与评定[M]. 北京:国防工业出版社, 2000. (LIU Lisheng,WU Bin,SUN Gang,et al. Accuracy analysis and evaluation for exterior ballistic measurement[M]. Beijing,China:National Defense Industry Press, 2000.)
- [5] 韩路杰,崔少辉. 利用导引头信息测量脱靶量的方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014,36(4):734-739. (HAN Lujie,CUI Shaohui. Method of miss distance measurement using data of seeker[J]. System Engineering and Electronics, 2014,36(4):734-739.)
- [6] 李晓燕,王兴涛,李迎春. 扰动引力对洲际弹道导弹被动段的影响分析[J]. 测绘科学技术学报, 2010,27(2):109-111. (LI Xiaoyan,WANG Xingtao,LI Yingchun. Effects of disturbing gravitation passive trajectory of intercontinental ballistic missile[J]. Journal of Geometrics Science and Technology, 2010,27(2):109-111.)
- [7] 于古胜,李连登,翟丽丽. 航天器实时落点计算误差修正方法[J]. 舰船电子工程, 2010,30(3):143-144. (YU Gusheng, LI Liandeng,ZHAI Lili. Error correction method for real time estimating aero craft fall point[J]. Ship Electronic Engineering, 2010,30(3):143-144.)
- [8] LU Zhengliang. Ballistic missile interception from UCAV[D]. California,USA:Naval Postgraduate School, 2011:12.)

作者简介：

潘 昶(1974-), 女, 辽宁省锦州市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事指挥安全与控制工作.email: panchang_2006@163.com.