

引用格式:刘祖鹏. 基于线性调频变标原理的 SPECAN 成像算法[J]. 电光与控制, 2017, 24(11): 95-99. LIU Z P. A SPECAN imaging algorithm based on chirp scaling principle[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(11): 95-99.

基于线性调频变标原理的 SPECAN 成像算法

刘祖鹏

(河南工学院电子通信工程系, 河南 新乡 453000)

摘要: 在擦地角较大的前斜合成孔径雷达(SAR)模式下, 距离走动会随斜距明显变化。传统 SPECAN 成像算法只以中心斜距为参考进行了走动校正, 使得测绘带距离边缘仍会有残余的距离走动, 最终导致目标的散焦。为了解决该问题, 提出了一种基于线性调频变标原理的 SPECAN 成像算法。该算法首先在二维时域乘以 Chirp Scaling 因子, 去掉了距离走动的距离空变性, 然后使用传统 SPECAN 成像算法完成图像的二维聚焦。仿真结果验证了所提算法的正确性和有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 距离走动; 距离空变性; 线性调频变标; SPECAN 成像算法

中图分类号: TN244 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.11.020

A SPECAN Imaging Algorithm Based on Chirp Scaling Principle

LIU Zu-peng

(Department of Electronics and Communication Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxing 453000, China)

Abstract: When Synthetic Aperture Radar (SAR) works in the squinted mode in the case of a large grazing angle, the Range Walk changes greatly with the slant range. The traditional SPECAN imaging algorithm corrects the Range Walk only referring to the centered slant range, there are residual Range Walks on the range edge of the swath, which finally leads to target defocus. In order to solve this problem, a modified SPECAN imaging algorithm based on Chirp Scaling Principle is proposed. Firstly, it is multiplied by Chirp Scaling factor in the two-dimension time domain to eliminate the range variations of the Range Walk. Then, it employs the traditional SPECAN imaging algorithm to accomplish the two-dimension focus of the image. Numeric simulation results confirm the validity of the proposed algorithm.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Range Walk; range variation; chirp scaling principle; SPECAN imaging algorithm

0 引言

合成孔径雷达(SAR)^[1]作为一种主动探测工具, 具有全天候、全天时和远距离作用的特点, 可以大大提高雷达的信息获取能力, 在军事和民用方面发挥着非常重要的作用。在某些应用场合, 相比方位向高的分辨率, 人们往往更关心的是宽测绘带的获取。一种有效的方法为基于子孔径处理思想的 SPECAN 成像算法^[2-3], 相比 RD^[4-5], CS^[6-8]等算法, 该算法具有更高的算法效率, 所需内存较少, 适于中低分辨率下宽测绘

带图像的实时处理。

传统 SPECAN 成像算法对于目标距离徙动的分析, 仅考虑线性分量, 在成像区域擦地角较大的前斜模式下, 对于长距离向的测绘带场景, 其距离走动分量往往具有随距离空变的特性。基于测绘带中心的距离走动对整个场景进行统一的走动校正, 在距离向测绘带边缘往往存在比较大的距离走动残余量, 若不加以补偿, 会导致最终的成像结果中在距离边缘处出现比较严重的散焦情况。

基于线性调频变标(Chirp Scaling)原理^[9], 本文提出了一种改进的 SPECAN 成像算法, 用于解决在大擦地角前斜模式下, 距离走动随距离空变的问题。其主要思想是通过 Chirp Scaling 操作, 校正不同距离门上的信号距离走动增量, 使所有信号具有一致的距离走动分量;

收稿日期: 2017-02-06

修回日期: 2017-02-17

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(17B510001)

作者简介: 刘祖鹏(1980—), 男, 河南封丘人, 硕士, 讲师, 研究方向为智能算法、电子通信技术。

然后利用 SPECAN 成像算法,完成场景的最终成像。

1 信号模型

前斜 SAR 成像几何模型如图 1 所示, X 轴定义为垂直于航线的方向, Y 轴定义为载机航向, Z 轴定义为高度方向。假设载机速度为 V , 高度为 H 。 θ 表示前斜角, 为载机速度与波束视线的夹角; φ 表示方位角, 即载机速度在地面投影与波束视线在地面投影的夹角; β 表示擦地角, 为波束视线与地面的夹角; R_s 为波束中心照射目标时的瞬时斜距。

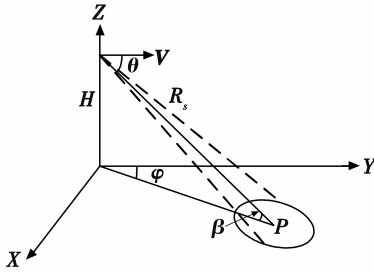


图1 前斜 SAR 成像几何模型

Fig.1 Geometrical model of forward SAR image

根据给定的前斜 SAR 几何模型可以得到前斜 SAR 的回波模型, 即

$$(t_a, t_r; R_s) = \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_s}\right) \text{rect}\left(\frac{t_r - \frac{2R(t_a; R_s)}{c}}{T_p}\right) \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left(t_r - \frac{2R(t_a; R_s)}{c}\right)^2\right\} \exp\left\{-j4\pi \frac{R(t_a; R_s)}{\lambda}\right\} \quad (1)$$

式中: t_a, t_r 分别表示方位向慢时间和距离向快时间; T_s 代表合成孔径时间; T_p, K_r 分别为 Chirp 信号的脉冲宽度和调频斜率; c 为光速; λ 为波长; $R(t_a; R_s)$ 表示信号的瞬时斜距, 即

$$R(t_a; R_s) = \sqrt{R_s^2 + V^2 t_a^2 - 2R_s V t_a \cos \theta} \quad (2)$$

对 $R(t_a; R_s)$ 进行泰勒级数展开, 并保留到 t_a 的二次项, 结果为

$$R(t_a; R_s) \approx R_s - V \cos \theta \cdot t_a + (V^2 \sin^2 \theta) / 2R_s \cdot t_a^2 = R_s - V \cos \alpha \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_s}\right)^2} \cdot t_a + \frac{V^2 \sin^2 \theta}{2R_s} \cdot t_a^2 \quad (3)$$

在大擦地角情况下, 距离走动系数会随斜距变化, 这里将其近似为斜距的一次函数

$$V \cos \theta = V \cos \alpha \sqrt{1 - (H/R_s)^2} \approx V \cos \alpha \cdot \left[\sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{\text{sref}}}\right)^2} + \frac{R_{\text{sref}}^3}{\sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_{\text{sref}}}\right)^2}} (R_s - R_{\text{sref}}) \right] \quad (4)$$

式中, R_{sref} 表示场景中心的参考斜距。

$$\text{令 } w_0 = V \cos \alpha \sqrt{1 - (H/R_{\text{sref}})^2}, w_1 = V \cos \alpha (H^2 /$$

$R_{\text{sref}}^3) / \sqrt{1 - (H/R_{\text{sref}})^2}$, 则式(4)变为

$$V \cos \theta = w_0 + w_1 (R_s - R_{\text{sref}}) \quad (5)$$

距离走动系数展开式中包含 $w_1 (R_s - R_{\text{sref}})$ 这一项, 表现了距离走动系数随斜距的变化。

2 基于线性调频变标原理的 SPECAN 成像算法

基于线性调频变标原理的改进 SPECAN 成像算法的具体流程如图 2 所示, 其过程为:

1) 对于回波数据, 在二维时域与 CS 因子相乘, 补偿测绘带距离向两端目标的距离走动量相对于场景中心走动量的差量, 使得所有距离门的距离走动量均校正为场景中心目标的距离走动值, 从而消除了走动量随距离的空变性;

2) 做距离向傅里叶变换, 与距离向匹配函数相乘完成距离向脉冲压缩, 并对距离走动量进行校正;

3) 做距离向傅里叶逆变换, 将信号变换到二维时域, 与方位向去斜函数相乘完成方位聚焦, 并将信号变换到距离多普勒域;

4) 通过几何校正操作, 将斜距图像映射为地距图像, 得到最终的成像结果。

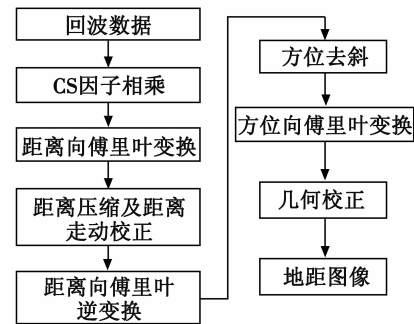


图2 算法流程图

Fig.2 Flow chart of the algorithm

2.1 窗 CS 因子相乘

在二维时域构造 CS 因子为

$$H_{\text{cs}}(t_a, t_r) = \exp\left(-j\pi w_1 t_a K_r \left(t_r - \frac{2R(t_a; R_{\text{sref}})}{c}\right)^2\right) \quad (6)$$

与回波信号相乘, 得到

$$s_1(t_a, t_r; R_s) = s_0(t_a, t_r; R_s) H_{\text{cs}}(t_a, t_r) = \text{rect}(t_a/T_s) \cdot \text{rect}\left(\frac{t_r - \frac{2R(t_a; R_s)}{c}}{T_p}\right) \exp\left(-j4\pi \frac{R(t_a; R_s)}{\lambda}\right) \cdot \exp\left\{j\pi \left[(1 - w_1 t_a) K_r \left(t_r - \frac{2}{c} (R_s - w_0 t_a)\right)^2 - \frac{4}{c^2} \cdot K_r w_1 t_a (1 - w_1 t_a) (R_s - R_{\text{sref}})^2 \right]\right\} \quad (7)$$

由式(7)可知, 经过与 CS 因子相乘, 回波信号中

距离走动项随距离的空变性已被消除,在后续的距离走动补偿中可以对不同的距离门进行统一补偿。这一步操作对距离调频率引入了一个方位调制,所以在对不同方位处的信号进行距离向脉冲压缩时需要构造相应的距离调频率匹配函数,而且在指数项中还出现了一个附加的相位,需要在方位去斜操作时进行补偿。

2.2 距离脉压和距离走动校正

利用驻定相位原理,对式(7)的结果进行距离向傅里叶变换,得到式(8),即

$$S_1(t_a, f_r; R_s) = \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_s}\right) \text{rect}\left(\frac{f_r}{(1-w_1 t_a) K_r T_p}\right) \cdot \exp\left(-j4\pi \frac{R(t_a; R_s)}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{f_r^2}{(1-w_1 t_a) K_r}\right) \cdot \exp\left(-j4\pi \frac{R_s - w_0 t_a f_r}{c}\right) \exp\left(-j\pi \frac{4}{c^2} K_r w_1 \cdot t_a (1-w_1 t_a) (R_s - R_{\text{sref}})^2\right) \quad (8)$$

构造距离向匹配函数及去距离走动函数为

$$H_r(t_a, f_r; R_{\text{sref}}) = \exp\left(j \frac{f_r^2}{(1-w_1 t_a) K_r}\right) \cdot \exp\left(-j4\pi \frac{V \cos \theta_{\text{sref}} t_a f_r}{c}\right) = \exp\left(j \frac{f_r^2}{(1-w_1 t_a) K_r}\right) \cdot \exp\left(-j4\pi \frac{w_0 t_a f_r}{c}\right) \quad (9)$$

式(8)和式(9)相乘,并做距离向傅里叶逆变换,得到距离脉压及距离走动校正后的二维时域结果为

$$s_2(t_a, t_r; R_s) = \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_s}\right) \exp\left(-j4\pi \frac{R(t_a; R_s)}{\lambda}\right) \cdot (1-w_1 t_a) K_r T_p \text{sinc}\left(\pi(1-w_1 t_a) K_r T_p \left(t_r - \frac{2R_s}{c}\right)\right) \cdot \exp\left[-j\pi \frac{4}{c^2} K_r w_1 t_a (1-w_1 t_a) (R_s - R_{\text{sref}})^2\right] \quad (10)$$

通过距离脉压及距离走动校正操作,距离向 Chirp 信号被脉压为 sinc 信号,信号带宽为 $(1-w_1 t_a) K_r T_p$, 对于不同距离的目标有相应的距离时延 $\frac{2R_s}{c}$ 。

2.3 方位脉压

构造方位去斜及相位校正函数为

$$H_a(t_a; R_s) = \exp\left(j\pi \cdot \frac{2V^2 \sin^2 \theta}{\lambda R_s} t_a^2\right) \cdot \exp\left[j\pi \cdot \frac{4}{c^2} K_r w_1 t_a (1-w_1 t_a) (R_s - R_{\text{sref}})^2\right] \quad (11)$$

与距离脉压后的信号相乘,并做方位向傅里叶变换,得到最后的距离多普勒域结果为

$$S_3(f_a, t_r; R_s) = \exp\left(-j4\pi \frac{R_s}{\lambda}\right) \left\{ \exp\left[j\pi K_r T_p \left(t_r - \frac{2R_s}{c}\right)\right] \cdot \right.$$

$$\left. T_s \text{sinc}\left\{\pi \frac{T_s}{2} \left[2\left(f_a - \frac{2V \cos \theta}{\lambda}\right) + w_1 K_r T_p \left(t_r - \frac{2R_s}{c}\right)\right]\right\} - \exp\left(-j\pi K_r T_p \left(t_r - \frac{2R_s}{c}\right)\right) \cdot T_s \text{sinc}\left\{\pi \frac{T_s}{2} \left[2\left(f_a - \frac{2V \cos \theta}{\lambda}\right) - w_1 K_r T_p \left(t_r - \frac{2R_s}{c}\right)\right]\right\} \right\} / j2\pi \left(t_r - \frac{2R_s}{c}\right) \quad (12)$$

由于 $w_1 K_r T_p \left(t_r - \frac{2R_s}{c}\right)$ 项很小,所以式(12)可以化简为

$$S_3(f_a, t_r; R_s) = \exp\left(-j4\pi \frac{R_s}{\lambda}\right) \times K_r T_p \cdot \text{sinc}\left(\pi K_r T_p \left(t_r - \frac{2R_s}{c}\right)\right) \times T_s \text{sinc}\left(\pi T_s \left(f_a - \frac{2V \cos \theta}{\lambda}\right)\right) = A_0 \exp\left[-j4\pi \frac{R_s}{\lambda}\right] \times \text{sinc}\left(\pi K_r T_p \left(t_r - \frac{2R_s}{c}\right)\right) \times \text{sinc}\left(\pi T_s \left(f_a - \frac{2V \cos \theta}{\lambda}\right)\right) \quad (13)$$

式中: $A_0 = K_r T_p T_s$, 表示最终成像结果的幅值; $2V \cos \theta / \lambda$ 表示目标的多普勒中心。

从式(13)可以看出,经过改进 SPECAN 成像算法的处理,回波信号最终变为二维 sinc 信号,其中,距离时移 $2R_s/c$, 方位频移 $2V \cos \theta / \lambda$ 确定了目标的位置。

3 仿真实验

用 Matlab 进行点目标仿真实验,仿真参数设置如表 1 所示。分别在距离向测绘带的近端、中心及远端布置 3 个点目标(见图 3),用传统 SPECAN 成像算法及改进的 SPECAN 成像算法对其进行成像,对比成像结果。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
平台高度/km	5	平台飞行速度/(m · s ⁻¹)	100
参考斜距/km	7	脉冲重复频率/Hz	1000
场景中心方位角/(°)	10	距离向测绘带宽度/km	1

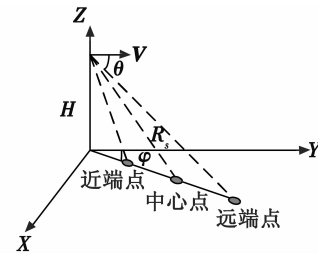


图 3 目标位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of target location

图 4 给出的是两种算法在距离走动校正后 3 个点

目标的距离徙动曲线。可以看出,对于传统 SPECAN 成像算法,场景近端及远端的点目标还存有距离走动残余,而基于改进的 SPECAN 成像算法,场景近端及远端点目标的徙动曲线均较直,不存在走动残余量。

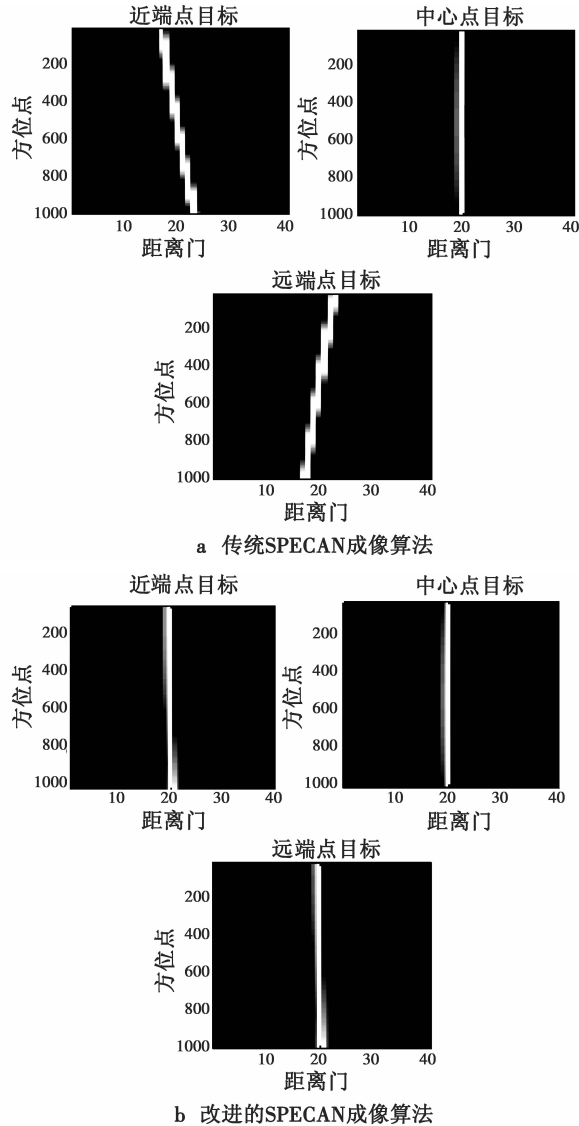


图4 距离走动校正后的距离徙动曲线
Fig.4 Distance travel curve after distance migration correction

图5给出的是方位去斜后两种算法的二维聚焦结果。由于走动残余量的影响,在传统 SPECAN 成像算法下,场景近端与远端点目标均出现了比较严重的散焦现象,而对于改进的 SPECAN 成像算法,场景近、远端两点的聚焦效果良好。

通过点目标的仿真结果,验证了本文提出的改进 SPECAN 成像算法的有效性,在大擦地角的前斜模式下,对于场景距离边缘的点目标也能达到比较好的聚焦效果。

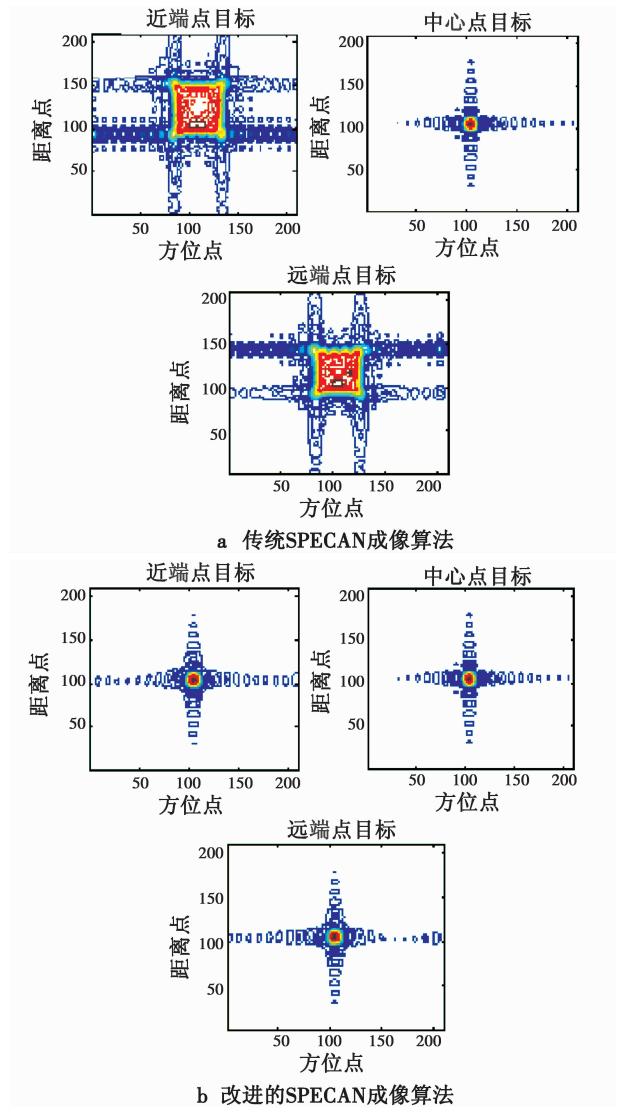


图5 方位去斜后二维聚焦结果
Fig.5 Two-dimensional focusing results

4 总结

基于 Chirp Scaling 原理,本文提出了一种改进的 SPECAN 成像算法,用于解决在大擦地角前斜模式下,距离走动随距离空变的问题。仿真实验结果表明,本文算法对于点目标有较好的聚焦效果。

参考文献

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达——原理、系统分析与应用 [M]. 北京:科学出版社,1989.
- [2] CUMMING L G, WONG F H. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 洪文,胡东辉,译. 北京:电子工业出版社,2007.
- [3] 李学仕,梁毅,李蓓蕾,等. 基于 SPECAN 处理的斜视 SAR 实时成像算法及其 FPGA 实现 [J]. 系统工程与电子技术,2011,33(12):2168-2172.

- [4] 林翊青, 李景文. 大距离徙动情况下距离多普勒(R-D)算法与后向投影(BP)算法的比较[J]. 雷达科学与技术, 2004, 2(6): 349-354.
- [5] 李文静, 陈红卫. 改进 R-D 算法的 ISAR 成像仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(6): 114-118, 121.
- [6] 刘光炎, 黄顺吉. 非线性 CS 算法的前斜视 SAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1308-1315.
- [7] 吴勇, 宋红军, 彭靳. 基于时域去走动的 SAR 大斜视 CS 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 593-598.
- [8] BU H X, TAO R, BAI X, et al. A novel SAR imaging algorithm based on compressed sensing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(5): 1003-1007.
- [9] PAPOULIS A. Systems and transforms with applications in optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.

(上接第 77 页)

- [4] 周鑫, 彭荣鲲, 袁锁中, 等. 舰载机着舰纵向甲板运动预估及补偿技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(5): 599-604.
- [5] 杨一栋, 甄子洋, 邱述斌, 等. 无人机着舰制导与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [6] 吴森堂. 飞行控制系统[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [7] 王秋晰. 随机微分方程最优控制理论的若干问题[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
- [8] 王科俊. 海洋运动体控制原理(船舶与海洋工程系列)[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
- [9] 张永花. 舰载机着舰过程甲板运动建模及补偿技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [10] CHUA C S. Generic UAV modeling to obtain its aerodynamic and control derivatives[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008.
- [11] HALLBERG E, KOMLOSY J, RIVERS T, et al. Development and applications of a rapid flight test prototyping system for unmanned air vehicles[C]//The 18th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, IEEE, 1999: 2601-2610.

(上接第 87 页)

- [6] 王建宏, 王道波. 飞机颤振模态参数的偏差补偿辅助变量辨识[J]. 电光与控制, 2011, 18(12): 71-74.
- [7] YUEN K V, KATAFYGIOTIS L S. BAYSIAN modal updating using complete input and incomplete response noisy measurements [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(3): 340-350.
- [8] ERSOY K, ATASOY M, GENÇ C. Modal updating of tail of a military helicopter[J]. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 2016(9): 133-144.
- [9] 魏锦辉, 任伟新, 万华平. 基于模态柔度的有限元模型修正方法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(13): 107-111.
- [10] 李伟明, 洪嘉振. 基于频响函数的模型修正方法[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(10): 1455-1459.
- [11] 杨启志, 郭林强, 宋俊朋, 等. 车辆并联多维减振座椅的模态分析[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(9): 1432-1438.
- [12] 李克雷, 谢振宇. 基于 ANSYS 的磁悬浮转子的模态分析[J]. 机电工程, 2008, 25(1): 1-3.
- [13] BUFFE F, ROY N, COGAN S. Modal identification and model updating of pleiades[J]. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 2011(1): 131-143.
- [14] 董威利. 月球探测器软着陆动力学分析及动态子结构技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

(上接第 90 页)

- 尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [8] 林秉雄. SIFT 特征匹配标准与匹配方式的改进与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [9] 刘佳, 傅卫平, 王雯, 等. 基于改进 SIFT 算法的图像匹配[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1107-1112.
- [10] OLESEN S M, LYDER S, KRAFT D, et al. Real-time extraction of surface patches with associated uncertainties by means of Kinect cameras [J]. Journal of Real-time Image Processing, 2015, 10(1): 105-118.
- [11] NASRI S, BEHRAD A, RAZZAZI F. Spatio-temporal 3D surface matching for hand gesture recognition using ICP algorithm [J]. Signal, Image and Video Processing, 2015, 9(5): 1205-1220.

(上接第 94 页)

- [2] 邱平. 海上最佳搜寻区域与搜寻方法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
- [3] 小记. 北斗手持型用户机——一个人[单兵]掌控的北斗用户产品[J]. 卫星与网络, 2007(12): 54-55.
- [4] 刘凯燕. 对海上落水人员漂流轨迹的预测研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(23): 1-3, 6.
- [5] 中华人民共和国海事局. 国际航空和海上搜寻救助手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.