

文章编号 1004-924X(2009)07-1615-06

天文导航中的星敏感器技术

李葆华, 刘国良, 刘睿, 王常虹

(哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 由于星敏感器仅仅工作在全天球的识别模式下远不能满足当前飞行器任务的需要, 提出了当星敏感器有足够的先验信息情况下, 可在星跟踪模式或者预测星像模式下工作, 来提高星敏感器的数据更新率, 降低由全天球识别带来误匹配的可能性。本文提出了一种新的星跟踪算法来克服飞行器在大角速度飞行情况下传统星跟踪算法处理时间过长等不足; 为了消除由于系统噪声带来的误差, 还提出了星图滤波和星像滤波的方法。实验结果表明, 当飞行器在 $2.25^\circ/\text{s}$ 的角速度下飞行时, 星敏感器能在 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 的范围内从星图中正确提取星像, 星图经去噪后, 星敏感器输出精度提高了近 $5''$, 从而使星敏感器可在飞行器高动态飞行情况下实现高精度、高更新率的姿态输出。文中描述的所有方法已在 2007 年和 2008 年进行了地面观星测试, 并于 2009 年即将应用于某些卫星的姿态控制系统中。

关键词: 天文导航; 星敏感器; 星跟踪算法; 星像预测

中图分类号: V448.222 **文献标识码:** A

Key techniques of star sensors for celestial navigation

LI Bao-hua, LIU Guo-liang, LIU Rui, WANG Chang-hong

(*Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: Star sensors may work in star tracking cases and predictive centroiding algorithm cases when it has sufficient attitude knowledge, which not only can increase the update rates of star sensors, but also can improve recognition performance. A novel star tracking algorithm for a star sensor with a large angle manoeuvre is presented to avoid disadvantages of classic star tracking algorithms. In order to decrease noise errors of the star sensor, the filtering algorithms for star images and star locations are presented. The experimental results show that the star locations are obtained in the threshold scan window $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ in the star image and the attitude accuracy of the star sensor is improved by $5''$ in the star image filtered by C-L wavelet, when the spacecrafts are rolled with a angle velocity of $2.25^\circ/\text{s}$. These algorithms are tested at night sky experiments in 2007 and in 2008 and will be used in the attitude control system of a satellite in 2009.

Key words: celestial navigation; star sensor; star tracking algorithm; predictive star centroiding algorithm

收稿日期: 2008-06-23; 修订日期: 2008-08-22.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2005AA745060); 十一五共性技术课题 (No. 51320050301)
哈尔滨工业大学博士后基金资助项目

1 引言

星敏感器主要用于恒星定位。在恒星定位过程中,星敏感器可将瞬间视场中的若干恒星成像于光电探测器,通过处理已有图像,得出飞行器在空间惯性坐标的瞬间姿态误差,完成飞行器在空间惯性坐标系的姿态测量^[1-2]。

随着飞行器导航与制导技术的发展以及飞行器任务不断变更,对星敏感器的性能要求越来越高,这主要体现在需要提供更高的姿态精度、更高的更新率以及更高的动态性能。因此,星敏感器仅仅在全天球识别模式^[3-9]或各种改进的全天球识别算法下工作无法满足飞行器任务的需求^[10-11]。这些算法虽然从某种程度上提高了姿态更新率,但是由于全天球星图识别前必须从整幅星图中提取星像坐标,提取星像坐标占了整个全天球星图识别模式的绝大部分时间,而且随着像平面的面阵增大,每次提取星像坐标过程的时间还要增加。在新一代星敏感器向宽视场、大面阵的像平面方向发展的趋势下,完全用全天球星图识别算法来提高星敏感器的姿态更新率必然受到限制。为此,本文提出了一种新的星跟踪算法,即,当有足够的信息时,星敏感器工作在星跟踪模式;当星敏感器视场内已知恒星较少时,星敏感器工作在预测星像模式;当飞行器以大角速度飞行时,星敏感器工作在预测星跟踪模式。

2 星跟踪算法

对于任何一幅星敏感器采集的星图,背景占用了绝大部分星图信息。如果完全工作在全天球识别模式(“太空迷失”模式,lost-in-space。即采用先扫描整幅星图来提取星像坐标,然后采用全天球识别,最后计算出飞行器姿态信息),那么在提取星像坐标过程中扫描星图背景会花费大量时间,而且随着像平面的面阵增大,每次提取星像坐标过程的时间会更多。而且宽视场、大面阵的像平面是新一代星敏感器的发展趋势,如果星敏感器完全工作在全天球识别模式,很难进一步提高星敏感器的数据更新率。

全天球识别成功后,星敏感器必然有适当的先验信息,所以星敏感器以后可以不必连续工作在全天球识别模式,而是充分利用这些先验信息,比如利用这些信息可以在星图的适当区域内提取星像坐标,以避免在很多星图背景处判断是否存在星像的过程,从而在星像坐标提取过程中进一步节省了时间,提高了星敏感器数据更新率。也就是说,充分利用先验信息,能弥补全天球识别模式的不足,进一步提高星敏感器的总体性能。星跟踪模式试验结果如图 1^[12](图中视场内恒星的数目从 12 颗减少到 6 颗,星敏感器在星跟踪模式下工作。图中标注星跟踪模式)。

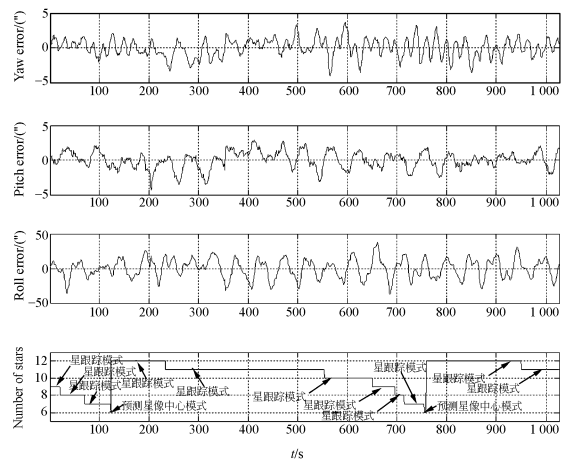


图 1 外场观星姿态输出试验结果

Fig. 1 Test results of night sky experiment

3 星跟踪模式中未知恒星星像中心预测算法

由于飞行器的运动引起星敏感器测量姿态的变化,因此已识别的恒星不可能始终在星敏感器视场内,从而视场内已知恒星逐渐减少;而且测量姿态的变化还会导致星敏感器视场内进入未知恒星,从而视场内未知恒星逐渐增加。如果星敏感器始终处于星跟踪模式,那么随着飞行器的运动,星敏感器视场内的先验信息将越来越少。如果在星敏感器视场内的先验信息较少的情况下不对视场内未知恒星进行识别和验证,仅仅利用这些先验信息不足以再次进入跟踪模式,星敏感器不得

不进入全天空识别模式。

当星敏感器视场内已知恒星较少时,可以采用星跟踪算法来提取视场内已知恒星星像坐标,并计算当前帧的姿态信息。然后,可根据这些已知恒星信息从主星表中搜索视场内识别、验证这些未知恒星。利用该时刻先验信息和新信息即可再次进入星跟踪模式。这样避免了由于星敏感器视场内先验信息不足而进入全天空识别模式^[13-14],星跟踪模式中星像中心预测算法结果如图 1(图中视场内恒星的数目从 6 颗增加到 12 颗的模式,就是星敏感器工作在星像中心预测模式。图中标注了预测星像中心模式)。

4 星敏感器大角速度星跟踪算法

飞行器的应用任务常要求控制飞行器在大范围内进行快速姿态机动调整,即短时间内从现在姿态转向另一个预定的目标姿态。传统的星跟踪算法提取下一帧恒星星像坐标时,扫描星图在以上一帧的坐标为中心的星图局部范围内。当飞行器大角速度机动时,为了使星敏感器尽量能工作在星跟踪模式下,一般尽可能地选取较大的扫描星图区域。如果增大扫描星图区域,那么在提取星像坐标过程中增加了扫描星图像元的数量,从而降低了数据更新率;同时由于增大了扫描星图区域,增加了区域内包含其它星像部分像元或全部像元的可能。因此要多次采用星对角距比较来选取正确的星像坐标,这样在选取正确的星像坐标时增加了误匹配的可能,同时增加了处理器的计算量,降低了数据更新率。因此,星敏感器大角速度机动时,有必要研究具有传统优点(高实时性、高精度以及高可靠性等)的星跟踪算法。大角速度机动下星跟踪算法的过程是:首先,根据上帧预测的理想星像坐标来提取星图中相应的实际星像坐标;其次,采用提取的星像坐标计算当前帧的姿态;再次,根据当前帧的姿态和上帧的姿态来预测下帧的姿态;最后,采用预测的姿态预测当前帧视场内所有已知恒星在下帧的理想坐标。其结果如表 1~4(表 1 和表 2 是飞行器在 0.95°/s 角速度下的运行结果;表 3 和表 4 是飞行器在

2.25°/s 角速度下的运行结果;由于篇幅有限,文中只列出单帧的试验结果)。从表 2 和表 4 看出,采用以 $t_0 + \Delta t$ 时刻星像为中心,不能正确提取 $t_0 + 2\Delta t$ 时刻的星像坐标,而采用本算法后,可在 10 pixel×10 pixel 的范围内正确提取 $t_0 + 2\Delta t$ 时刻的星像。

表 1 飞行器在 0.95°/s 时预测的姿态四元数

Tab.1 Predictive quaternion of star sensor with 0.95°/s at time $t_1 + \Delta t$

四元数($q=q_0 \times i + q_1 \times j + q_2 \times k + q_3$)	
t_1 时刻输出	(-0.346 983 134 7, 0.861 876 010 9,
姿态	-0.356 333 077 0, -0.098 991 133 3)
$t_1 + \Delta t$ 时刻	(-0.354 039 460 4, 0.859 045 922 8,
输出姿态	-0.357 087 880 4, -0.095 835 015 2)
$t_1 + 2\Delta t$ 时刻	(-0.361 071 614 8, 0.856 157 186 3,
预测姿态	-0.357 818 304 7, -0.092 672 354 5)
$t_1 + 2\Delta t$ 时刻	(-0.360 897 988 1, 0.856 160 521 5,
实际姿态	-0.357 910 424 5, -0.092 961 743 5)

表 2 星敏感器某帧的预测星像坐标

Tab.2 Predictive star locations in star image with 0.95°/s at time $t_1 + \Delta t$ pixels

$t_1 + \Delta t$ 时刻星像坐标(x,y)	$t_1 + 2\Delta t$ 时刻预测星像坐标(x,y)	$t_1 + 2\Delta t$ 时刻实际星像坐标(x,y)
(503, 235, 235, 880)	(476, 670, 257, 318)	(480, 813, 252, 017)
(490, 709, 384, 017)	(463, 396, 399, 097)	(469, 373, 400, 301)
(482, 841, 227, 724)	(456, 549, 249, 385)	(460, 348, 244, 054)
(494, 896, 354, 509)	(467, 477, 370, 804)	(473, 317, 370, 569)
(46, 595, 348, 423)	(24, 346, 361, 163)	(24, 933, 367, 639)
(225, 671, 473, 243)	(200, 087, 482, 409)	(204, 832, 491, 301)
(253, 386, 343, 171)	(229, 031, 358, 116)	(231, 711, 361, 007)

表 3 飞行器在 2.25°/s 时预测的姿态四元数

Tab.3 Predictive quaternion of star sensor with 2.25°/s at time $t_1 + \Delta t$

四元数($q=q_0 \times i + q_1 \times j + q_2 \times k + q_3$)	
t_1 时刻输出	(-0.424 513 220 8, 0.826 667 845 2,
姿态	-0.363 393 873 0, -0.065 983 951 1)
$t_1 + \Delta t$ 时刻	(-0.440 430 253 7, 0.818 190 276 6,
输出姿态	-0.364 842 027 4, -0.058 961 018 9)
$t_1 + 2\Delta t$ 时刻	(-0.456 181 490 4, 0.809 404 698 1,
预测姿态	-0.366 152 837 3, -0.051 915 889 10)
$t_1 + 2\Delta t$ 时刻	(-0.457 248 389 7, 0.808 919 727 8,
实际姿态	-0.365 964 412 7, -0.051 408 078 5)

表 4 星敏传感器某帧的预测星像坐标(单位:像素)

Tab. 4 Predictive star locations in star image with $2.25^\circ/\text{s}$

at time $t_1 + \Delta t$			pixels
$t_1 + \Delta t$ 时刻	$t_1 + 2\Delta t$ 时刻预测	$t_1 + 2\Delta t$ 时刻实际	
星像坐标 (x, y)	星像坐标 (x, y)	星像坐标 (x, y)	
(511, 185, 214, 421)	(453, 189, 256, 533)	(452, 993, 256, 740)	
(530, 526, 478, 353)	(494, 269, 208, 900)	(494, 368, 211, 963)	
(591, 886, 350, 477)	(536, 395, 390, 908)	(533, 220, 386, 706)	
(86, 001, 216, 747)	(28, 109, 265, 984)	(33, 080, 259, 263)	
(513, 089, 362, 820)	(457, 843, 404, 777)	(455, 418, 398, 858)	
(516, 825, 310, 486)	(460, 615, 352, 352)	(458, 832, 353, 559)	

5 提高星敏传感器输出姿态精度

星图预处理是进行星像提取的前提,它主要包括去噪声处理、图像畸变的分析与校正和星像的位置确定,在星敏传感器数据处理中占有重要地位。由于星敏传感器的系统噪声、随机噪声和镜头变形等,从星敏传感器敏感头得到的图像是被各种噪声污染及畸变的二维灰度图像,要进行星像质心的精确提取,必须对此图像进行预处理,去除各种噪声干扰和传感器畸变所带来的失真对星体初步定为:

噪声:产生噪声的因素主要有,在拍摄过程中的星空背景噪声,分子噪声,还有星图从采集电路到图像传感器输出也夹杂着大量噪声,这主要是电子噪声。噪声的特点是:一般不具有联系,是孤立的,单个像元存在,且在整个星图中随机分布,灰度的大小在灰度的平均值上下波动,并且噪声随温度的升高而增加。

信号:所谓的信号是相对于噪声而言的,就是星图中的星像。星像一般扩散在几个像元上,具有连续性,在这几个连续像元区域内,光斑能量分布呈近似高斯分布,区域中间是信号的峰值。

小波分析作为一种时域分析工具,在图像去噪声领域中得到了广泛的应用,图 2 采用 CL 多小波变换为例说明实现过程。虽然软件上实现了小波变换的滤波,但是对于嵌入式系统来讲,如果纯粹采用软件来实现对星图滤波花费时间长,所以在实际应用中,为了减少滤波时间,常考虑采用硬件描述语言来实现星图滤波。图 3 是星敏传感器未对星图输出的三轴姿态,图 4 是星敏传感器先对星图进行去噪处理后,从星图中提取星像坐标,

再进行星图识别(星跟踪模式)后输出的三轴姿态。从图中可以看出,星敏传感器经星图去噪处理后,输出三轴姿态精度能明显提高(图 3 和图 4 中从上到下分别为:俯仰角、滚动角和偏航角,单位为度,横坐标单位为秒)。利用图 3 和图 4 的数据实验结果表明,星图经去噪后,星敏传感器输出精度提高了近 $5''$ 。

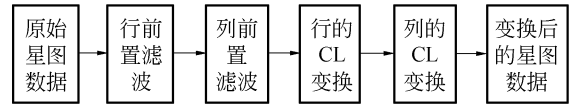


图 2 星图的 CL 多小波变换过程

Fig. 2 Process of CL wavelet transform for star image

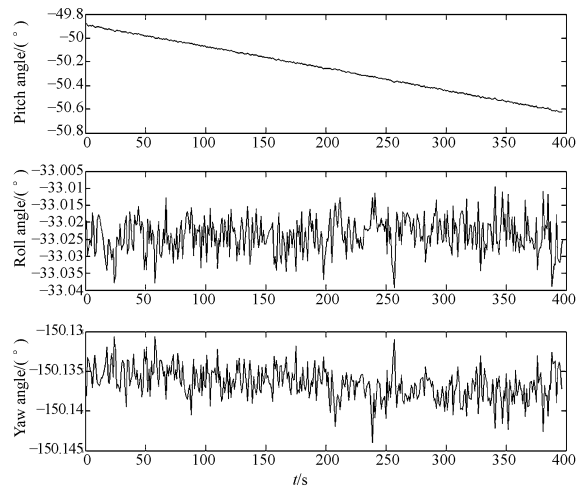


图 3 未对星图滤波计算的三轴姿态

Fig. 3 Attitude information from star sensor without CL wavelet transform for star image

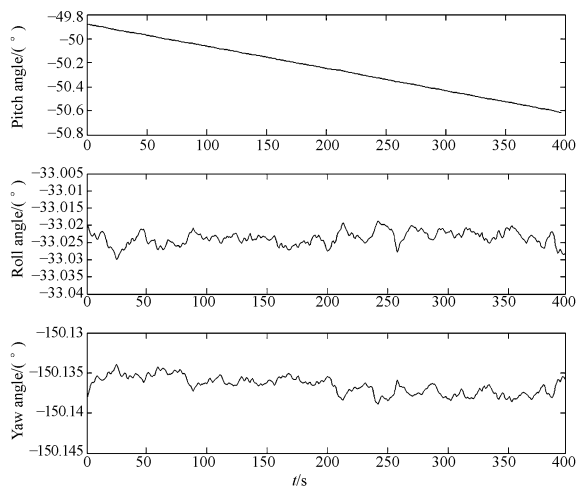


图 4 对星图滤波后计算的三轴姿态

Fig. 4 Attitude information from star sensor with CL wavelet transform for star image

5 结 论

由于测量的实时性对控制系统的品质有很大的影响,因此要求星敏传感器尽快给出高精度的目标测量信息。在星敏传感器有足够的先验信息情况下,星敏传感器工作在星跟踪模式或者预测星像模式,这些算法不但提高了星敏传感器的数据更新率,而且降低了由于全天球识别带来误匹配的可能性。为了克服由于飞行器大角速度情况下传统星跟踪算法耗时长等不足,文中提出了一种新的星

跟踪算法,利用该算法当飞行器在 $2.25^\circ/\text{s}$ 的角速度下,星敏传感器能在 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 的范围内从星图中正确提取星像;为了消除由于系统噪声带来的误差,提出了星图滤波和星像滤波的方法。结果表明,星敏传感器输出精度提高了近 $5''$,从而使飞行器在高动态情况下,星敏传感器输出了高精度、高更新率的姿态。文中描述的所有方法已经在2007年和2008年进行了地面观星测试,并于2009年即将应用于某些卫星的姿态控制系统中,部分算法已经2005年搭载于某卫星进行了在轨试验。

参考文献:

- [1] 余成武,郝慧,卢欣. 基于APS星敏传感器与光纤陀螺的星光制导[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(9): 593-596.
YU CH W, HAO H, LU X. Stellar guidance based on APS star sensor and fiber-optic gyrol[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(9): 593-596. (in Chinese)
- [2] 金振山,申功勋. 适合于机动弹道导弹的星光—惯性组合制导系统研究[J]. 航空学报, 2005, 26(2): 168-172.
JIN Z S, SHEN G X. Study on stellar-Inertial Integrated guidance system for mobile ballistic missile [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(2): 168-172. (in Chinese)
- [3] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [4] LIEBE C C. Star trackers for attitude determination [J]. *IEEE AES Systems Magazine*, 1995, 31(6): 10-16.
- [5] XIE J F, JIANG W SH. The analysis of the error sources affecting the accuracy of attitude determined by star sensor [J]. *SPIE*, 2007, 6752: 675249-1-675249-8.
- [6] 刘朝山,刘光斌. 星光制导中的凸多边形星图识别算法[J]. 光学精密工程, 2005, 13(1): 88-94.
LIU ZH SH, LIU G B. A convex polygon star pattern identification algorithm for celestial guidance [J]. *Opt. Precision Eng*, 2005, 13(1): 88-94. (in Chinese)
- [7] MORTARI D. Search-Less Algorithm for Star pattern recognition[J]. *The Journal of the Astronauti-*
cal Sciences, 1997, 45(2): 179-194.
- [8] SCHOLL M S. Star field identification algorithm—performance verification using simulated star field [J]. *SPIE*, 1993, 2019: 275-290.
- [9] 李葆华,张迎春,李化义,等. 用KMP算法进行星敏传感器星图识别的方法[J]. 光电工程, 2004, 31(1): 9-11.
LI B H, ZHANG Y CH, LI H Y, *et al.*. Star map recognition method of star sensor using KMP algorithm [J]. *Opto-electronic engineering*, 2004, 31(1): 9-11. (in Chinese)
- [10] 李立宏,林涛,宁永臣,等. 一种改进的全天自主三角形星图识别算法[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 372-374.
LI L H, LIN T, NING Y CH, *et al.*. Improved all-sky autonomous triangle star-field identification algorithm [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(4): 372-374. (in Chinese)
- [11] LEE H J, OH C S, BANG H CH. Modified grid algorithm for star pattern identification by using star trackers [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003: 385-391.
- [12] LI B H, ZHANG Y CH, LI H Y, *et al.*. A star tracking algorithm suitable for star sensor [C]. *The 6th Asia-Pacific Conference Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics, Harbin, P. R. China: APCOM2006*, 2006.
- [13] 李葆华,王长虹,张迎春. 适用于星敏传感器的局部星像提取方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1427-1431.
LI B H, WANG CH H, ZHANG Y CH. Obtaining method for star locations in local region of star image for star sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1427-1431. (in Chinese)

- [14] 李葆华, 李化义, 王长虹, 等. 一种适用于星敏感器预测未知恒星星像质心算法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 191-195.

LI B H, LI H Y, WANG CH H, *et al.*. A pre-

dictive centroiding algorithm of unmatchend stars for star sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 191-195. (in Chinese)

作者简介:



李葆华(1977—)男, 博士, 讲师, 主要研究方向为图像处理、模式识别、嵌入式控制、星模拟技术等。E-mail: libao-hua@hit.edu.cn

刘国良(1969—)男, 博士后, 副教授, 主要研究方向为智能机器人、信息融合技术和组合导航理论等。Email: liu88@hit.edu.cn

刘睿(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事地磁导航、组合导航技术等方面的研究。E-mail: liu_rui_2002@sohu.com

王常虹(1961—), 男, 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能控制、鲁棒控制理论等方面的研究。E-mail: cwang@hit.edu.cn

●下期预告

分布反馈式光纤激光器的动态特性

谭波^{1,2}, 黄俊斌¹, 何琳², 顾宏灿¹, 李日忠¹

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033;

2. 海军工程大学 振动与噪声研究所, 湖北 武汉 430033)

为了探明分布反馈式(DFB)光纤激光器用于水声探测时所测得的声压灵敏度高于静压条件下计算所得的声压灵敏度, 且动态响应曲线不平坦的原因及其机理, 对DFB光纤激光器的动态特性进行了研究。对两端固定并分别置于空气和水介质中的DFB光纤激光器的振动模态进行了数值仿真分析; 设计加工了实验夹具, 分别对其进行了实验研究。实验测得数据表明, 两端固定的裸纤在发生振动时的第一阶固有频率与其夹持长度有关, 且随着该长度的增大, 固有频率降低; 当夹持长度分别为50、55和60 mm时, 在空气和水介质中DFB光纤激光器振动的第一阶固有频率分别约为250、200、125 Hz以及200、160、120 Hz, 实测数据与仿真分析吻合。可见当DFB光纤激光器受外界激励发生振动时, 引起了激光器输出信号幅值的波动, 导致其声压灵敏度出现起伏, 第一阶固有频率对其具有很大的影响。