

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 2 月 4 日 (04.02.2021)

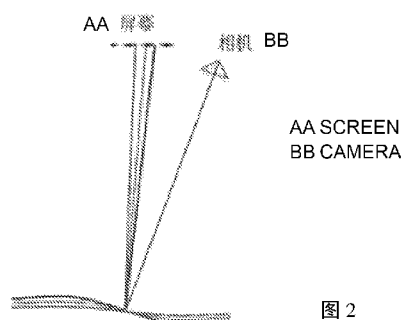


(10) 国际公布号
WO 2021/017828 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01H 9/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/102064
- (22) 国际申请日: 2020 年 7 月 15 日 (15.07.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910685221.X 2019年7月27日 (27.07.2019) CN
- (71) 申请人: 复旦大学 (FUDAN UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国上海市杨浦区邯郸路 220 号,
Shanghai 200433 (CN)。
- (72) 发明人: 张祥朝 (ZHANG, Xiangchao); 中国上海
市杨浦区淞沪路 2205 号复旦大学先进材料
- 楼 405 室, Shanghai 200438 (CN)。 牛振岐 (NIU,
Zhenqi); 中国上海市杨浦区淞沪路 2205 号复旦
大学先进材料楼 405 室, Shanghai 200438 (CN)。
王飞利 (WANG, Feili); 中国上海市杨浦区淞沪
路 2205 号复旦大学先进材料楼 405 室, Shanghai
200438 (CN)。 王伟 (WANG, Wei); 中国上海市
杨浦区淞沪路 2205 号复旦大学先进材料楼 405
室, Shanghai 200438 (CN)。 徐敏 (XU, Min); 中
国上海市杨浦区淞沪路 2205 号复旦大学先进
材料楼 405 室, Shanghai 200438 (CN)。
- (74) 代理人: 北京纪凯知识产权代理有限公司 (JEEKAI
& PARTNERS); 中国北京市丰台区广安路 9 号国
投财富广场 5 号楼 15A 层, Beijing 100055 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,

(54) **Title:** HIGH-PRECISION METHOD FOR MEASURING HIGH-FREQUENCY STANDING WAVE AMPLITUDE DISTRIBUTION

(54) 发明名称: 一种高频驻波振幅分布的高精度测量方法



(57) **Abstract:** Disclosed is a method for measuring high-frequency resonant standing wave amplitude distribution of a smooth-surface element, the method comprising: constructing a deflection measurement system, placing a camera and a projection screen symmetrically on the left and on the right relative to an element to be measured; displaying round spot patterns by means of projection and using the camera to measure fuzzy characteristic spots formed by reflection of an high-frequency vibration element; recognizing the borders of the characteristic spots by using difference operators, and obtaining a deflection distance of the round spots by means of fitting; on the basis of system geometric parameters obtained by means of calibration, calculating the amount of deflection of the normal of each part of a measured surface; and finally, reconstructing integrals to obtain a standing wave amplitude distribution. The system is simple in terms of structure, has a high sensitivity and a high capability of resisting disturbance, can measure the standing wave amplitude distribution of a local area of an element, and has substantial significance on the analysis of a vibration mechanism and property of the element, and on ensuring the resonance oscillation performance of the element.

(57) **摘要:** 一种光滑表面元件高频谐振驻波振幅分布的测量方法, 包括: 构建偏折测量系统, 将相机和投影屏幕相对于被测元件左右对称放置; 投影显示圆斑图样, 用相机测量高频振动元件反射形成的模糊特征斑; 采用差分算子识别特征斑的边界, 拟合得到圆斑偏斜距离; 基于标定获得的系统几何参数, 计算被测表面各部分的法向偏转量; 最后重构积分得到驻波振幅分布, 系统结构简单, 灵敏度高, 抗干扰能力强, 可以测量元件局部区域的驻波振幅分布, 对于元件振动机理与特性分析、元件谐振性能保障有重要意义。

BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

一种高频驻波振幅分布的高精度测量方法

技术领域

本发明属于光学工程技术领域，具体为一种测量高频驻波振幅分布的方法。

背景技术

半球谐振陀螺等元件通过激励产生的谐振驻波实现性能，因此其振动特性的测量是进行机理分析、提升元件性能的重要保障。传统上通常将被测元件上镀金属膜，所形成的电极与信号探测器构成电容，于是振动测量可以通过探测电容特性的变化来实现[1]。但是这种方法得到的是电极处的平均距离变化，无法得到振幅的空间分布。随后研究者提出基于全息干涉的时间平均法[2]，可以在多个振动周期内采用全息干板记录叠加的干涉条纹，通过光学再现得到谐振子的平均振幅。但是该方法需要全息干板记录与定影，操作复杂，而且难以数字化。为此研究者提出数字全息干涉测量方法，采用 CCD 记录干涉图像，再利用菲涅尔衍射重构得到振幅分布[3]。但是较大的振幅会导致干涉条纹过密，无法正确解析振幅；同时，CCD 像素远远大于全息干板的显像颗粒，导致记录分辨率严重下降，影响了振幅测量的精度。因此，光滑表面元件驻波振型的高精度测量方法，是当前面临的重要难题。

发明内容

本发明的目的在于提供一种光滑表面元件驻波振幅分布的高精度测量方法，以便于分析振型与振动特性。

本发明提供的光滑表面元件驻波振幅分布的高精度测量方法，是基于偏折技术的，具体步骤如下：

- (1) 搭建偏折测量光路，投影屏幕和相机相对于被测元件左右对称放置；
- (2) 在屏幕上显示二值化圆斑图样，经过振动元件反射后在相机成像；
- (3) 采用 Sobel 微分算子对图像进行处理，并采用二值化识别图像中特征斑的边界[4]，

以灰度 $w(u, v)$ 为权重计算斑点中心：

$$(u_0, v_0) = \frac{\sum w(i, j) \cdot (u(i, j), v(i, j))}{\sum w(i, j)} \quad (1)$$

- (4) 对特征斑中所有点坐标构造正规矩阵：

$$M = \sum w(i, j) \delta(i, j)^T \delta(i, j),$$

其中， $\delta(i, j) = (u(i, j) - u_0, v(i, j) - v_0)$ ，表示特征斑中每个像素的坐标偏差， (u_0, v_0) 表示

整个特征斑的重心坐标, $(u(i, j), v(i, j))$ 表示特征斑中任意像素的坐标;

(5) 对步骤(4)中的正规矩阵 M 进行特征值分解, 其中最大特征值对应的特征向量即为特征斑的延伸方向 [5]; 从特征斑重心画出一条垂直于延伸方向的直线, 特征斑沿该直线方向的宽度即为原始圆斑直径 d ;

(6) 从特征斑重心沿其延伸方向画一条直线, 与特征斑边界的两个交点记为 A 、 B ; 线段 AB 长度与圆斑直径 d 之差的一半即为该点极限振幅引起的成像偏差;

(7) 利用偏折标定的几何参数, 便可得到振动引起的测量点法向偏摆范围, 将其 x, y 方向的分量分别写作 s_x, s_y , 并将 z 向分量归一化;

(8) 采用 modal 法进行积分重构, 得到全区域振幅分布 z [6], 也即解偏微分方程, 使得目标函数最小:

$$E(z) = \|zD_x - s_x\|^2 + \|D_y z - s_y\|^2 \quad (2)$$

其中, D_x, D_y 分别表示沿 x, y 方向的微分矩阵, 和法向偏摆的 x, y 方向分量进行逼近优化, 就可以解得 z 。

由于此方程的解不唯一, 求解后将振幅分布整体偏移, 使得驻点振幅为零。

本发明的系统结构简单, 灵敏度高, 抗干扰能力强, 可以测量元件局部区域的驻波振幅分布, 对于元件振动机理与特性分析、元件谐振性能保障有重要意义。

参考文献

- [1] 万泉. 微型半球谐振陀螺检测与控制系统研究, 苏州大学硕士学位论文, 2018
- [2] 樊尚春. 轴对称壳谐振陀螺, 国防工业出版社, 2013
- [3] A Asundi, VR Singh. Time-averaged in-line digital holography interferometry for vibration analysis. Applied Optics 2006;45(11):2391-2395
- [4] L Li, X Zhang, H Xiao and M Xu. Segmentation of non-stochastic surfaces based on non-subsampled contourlet transform and mathematical morphologies. Measurement 2016;79:137-146
- [5] GH Golub and CF van Loan. Matrix Computations. 4 Edition. The John Hopkins University Press, 2013
- [6] I Mochi and KA Goldberg. Modal wavefront reconstruction from its gradient. Applied Optics 2015; **54**: 3780 - 3785.。

附图说明

图 1 为偏折测量振幅示意图。

图 2 为偏折测量模糊斑形成原理图。

图 3 为屏幕显示的二值化图样。

图 4 为拍摄得到的模糊斑图像。

图 5 为模糊斑的识别轮廓。

图 6 为模糊斑的延伸方向及偏摆距离计算。

图 7 为法向的 x 方向偏摆范围。

图 8 为法向的 y 方向偏摆范围。

图 9 为实际解得的驻波振幅分布。

具体实施方式

下面通过实施例结合附图进一步说明本发明。

实施例 1：本实施例中被测元件为口径 70mm 的平面，从下表面进行振动激励，频率为 4500Hz。相机焦距为 55mm，单个像素的尺寸为 $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ 。屏幕采用 ipad mini，二者的中心点和激励点连线的夹角都是 45° ，屏幕中心到元件激励点的距离为 172mm，相机光心到激励点的距离为 240mm，如图 1 所示。被测元件驻波引起局部法向变化，因此反射光学随之发生偏摆，对应图像就会形成模糊斑，如图 2 所示。在屏幕上显示圆斑图样，如图 3 所示。相机曝光时间设为 0.05 秒，所采集的图像如图 4 所示。采用本发明中的方法，利用 Sobel 算子识别特征斑边界；为了清晰起见，我们在图 5 中只画出左上角一个特征斑的识别边界。将轮廓内的所有像素的正规矩阵进行特征值分解，最大特征值对应的特征向量即为图 6 所示的 AB 方向。得到圆斑的偏摆距离之后，结合相机、屏幕、元件直径的相对距离，可以得到元件法向的偏摆范围，将其 z 分量归一化，得到横向分量 (s_x, s_y) ，分别如图 7、图 8 所示。利用 modal 法经过重构拟合后得到的振幅分布如图 9 所示。因此本发明中的方法可以准确得到测量区域的振幅分布。

权利要求书

1. 一种高频驻波振幅分布精密测量方法，基于偏折技术的，其特征在于，具体步骤如下：

(1) 搭建偏折测量光路，投影屏幕和相机相对于被测元件左右对称放置；

(2) 在屏幕上显示二值化圆斑图样，经过振动元件反射后在相机成像；

(3) 采用 Sobel 微分算子对图像进行差分计算，对算子进行二值化处理，识别所采集图像中特征斑的边界，以灰度 $w(u,v)$ 为权重计算斑点中心：

$$(u_0, v_0) = \frac{\sum w(i,j) \cdot (u(i,j), v(i,j))}{\sum w(i,j)} \quad (1)$$

(4) 对特征斑中所有点坐标构造正规矩阵：

$$\mathbf{M} = \sum w(i,j) \delta(i,j)^T \delta(i,j),$$

其中， $\delta(i,j) = (u(i,j) - u_0, v(i,j) - v_0)$ 表示特征斑中每个像素的坐标偏差， (u_0, v_0) 表示整个特征斑的重心坐标， $(u(i,j), v(i,j))$ 表示特征斑中任意像素的坐标；

(5) 对步骤 (4) 中的正规矩阵 $\mathbf{M}$ 进行特征值分解，其中最大特征值对应的特征向量即为特征斑的延伸方向；从特征斑重心画出一条垂直于延伸方向的直线，特征斑沿该直线方向的宽度即为原始圆斑直径 d ；

(6) 从特征斑重心沿其延伸方向画一条直线，与特征斑边界的两个交点记为 A、B；线段 AB 长度与圆斑直径 d 之差的一半即为该点极限振幅引起的成像偏差；

(7) 利用偏折标定的几何参数便可得到振动引起的测量点法向偏摆范围，将其 x, y 方向的分量分别写作 s_x, s_y ，并将 z 向分量归一化；

(8) 采用 modal 法进行积分重构得到全区域振幅分布 z ，也即解偏微分方程，使得目标函数最小：

$$E(z) = \|zD_x - s_x\|^2 + \|D_y z - s_y\|^2 \quad (2)$$

其中， D_x, D_y 分别表示沿 x, y 方向的微分矩阵，和法向偏摆的 x, y 方向分量进行逼近优化，解得 z ；求解后振幅分布整体偏移，使得驻点振幅为零。

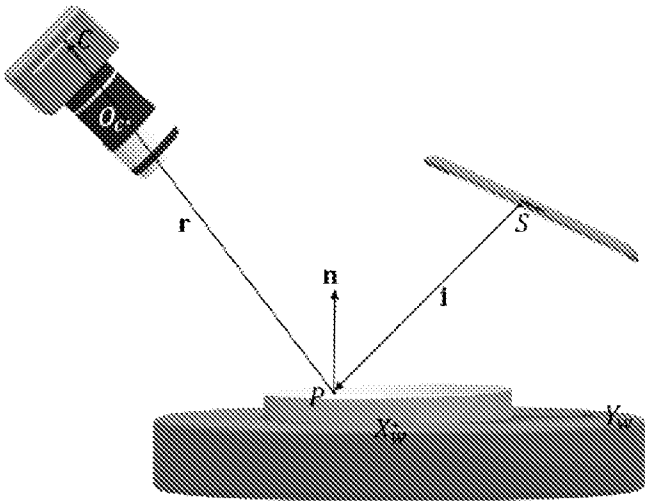


图 1

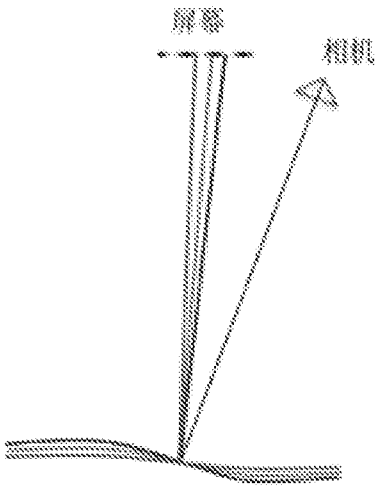


图 2

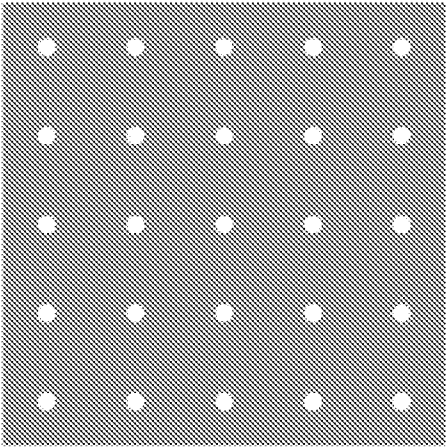


图 3

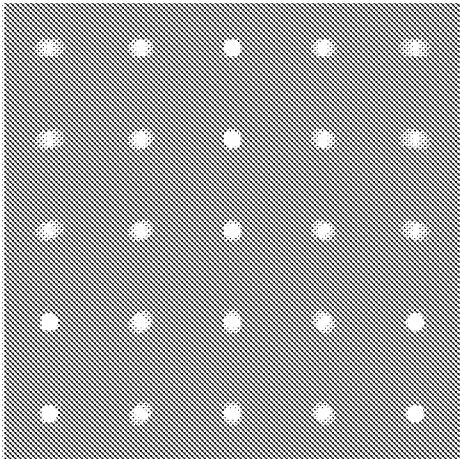


图 4

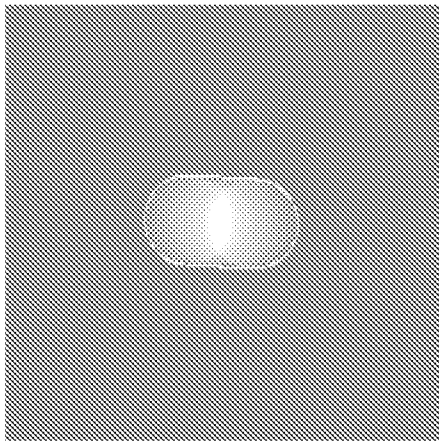


图 5

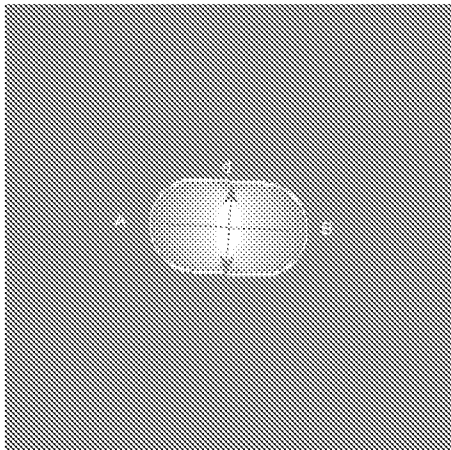


图 6

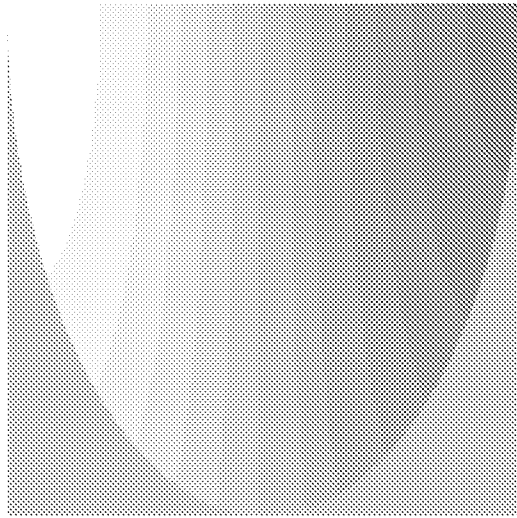


图 7

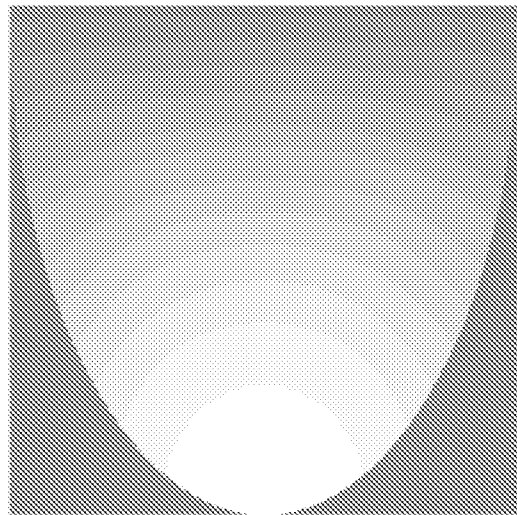


图 8

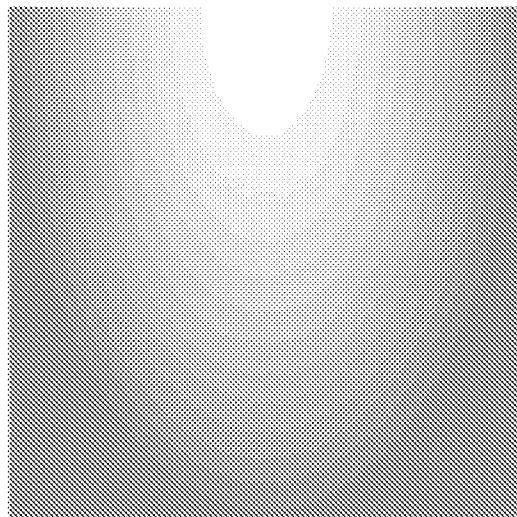


图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/102064

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01H 9/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01H, G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, CNPAT, WPI, EPODOC: 复旦大学, 张祥朝, 牛振岐, 王飞利, 王伟, 徐敏, 驻波, 振动, 振幅, 振型, 反射, 成像, 投影, 斑, 光斑, 光点, 特征斑, 二值化, 矩阵, 差分, standing w wave, vibrat+, librat+, oscillat+, amplitude, reflect+, imaging, project +, light, luminous, spot, character, binar+, matrix, difference

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 110501063 A (FUDAN UNIVERSITY) 26 November 2019 (2019-11-26) claim 1, description paragraphs [0004]-[0037], figures 1-9	1,
A	CN 107300413 A (TIANJIN UNIVERSITY) 27 October 2017 (2017-10-27) description, paragraphs [0021]-[0031], and figures 1-3	1,
A	CN 103438980 A (BEIHANG UNIVERSITY) 11 December 2013 (2013-12-11) entire document	1,
A	CN 106768280 A (BEIHANG UNIVERSITY) 31 May 2017 (2017-05-31) entire document	1,
A	CN 104776907 A (HANGZHOU DIANZI UNIVERSITY) 15 July 2015 (2015-07-15) entire document	1,
A	CN 105043524 A (HANGZHOU DIANZI UNIVERSITY) 11 November 2015 (2015-11-11) entire document	1,
A	CN 102679902 A (TIANJIN UNIVERSITY) 19 September 2012 (2012-09-19) entire document	1,



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

24 September 2020

Date of mailing of the international search report

19 October 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/102064**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 103424175 A (CHENGDU XINGJUNENG TECHNOLOGY CO., LTD.) 04 December 2013 (2013-12-04) entire document	1,
A	CN 107560709 A (VIVO COMMUNICATION TECHNOLOGY CO., LTD.) 09 January 2018 (2018-01-09) entire document	1,
A	WO 2018134932 A1 (FUJITSU LIMITED) 26 July 2018 (2018-07-26) entire document	1,
A	JP 2017003397 A (UNIVERSITY NIIGATA) 05 January 2017 (2017-01-05) entire document	1,

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/102064

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	110501063	A	26 November 2019	None			
CN	107300413	A	27 October 2017	None			
CN	103438980	A	11 December 2013	CN	103438980	B	15 July 2015
CN	106768280	A	31 May 2017	CN	106768280	B	14 April 2020
CN	104776907	A	15 July 2015	None			
CN	105043524	A	11 November 2015	CN	105043524	B	02 November 2018
CN	102679902	A	19 September 2012	CN	102679902	B	20 August 2014
CN	103424175	A	04 December 2013	None			
CN	107560709	A	09 January 2018	CN	107560709	B	18 October 2019
WO	2018134932	A1	26 July 2018	JP	WO2018134932	A1	08 August 2019
JP	2017003397	A	05 January 2017	JP	6555712	B2	07 August 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/102064

A. 主题的分类

G01H 9/00 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

G01H, G01B

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

CNKI, CNPAT, WPI, EPDOC: 复旦大学, 张祥朝, 牛振岐, 王飞利, 王伟, 徐敏, 驻波, 振动, 振幅, 振型, 反射, 成像, 投影, 斑, 光斑, 光点, 特征斑, 二值化, 矩阵, 差分, standing wave, vibrat+, librat+, oscillat+, amplitude, reflect+, imaging, project+, light, luminous, spot, character, binar+, matrix, difference

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 110501063 A (复旦大学) 2019年 11月 26日 (2019 - 11 - 26) 权利要求1、说明书第[0004]-[0037]段、附图1-9	1
A	CN 107300413 A (天津大学) 2017年 10月 27日 (2017 - 10 - 27) 说明书第[0021]-[0031]段、附图1-3	1
A	CN 103438980 A (北京航空航天大学) 2013年 12月 11日 (2013 - 12 - 11) 全文	1
A	CN 106768280 A (北京航空航天大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文	1
A	CN 104776907 A (杭州电子科技大学) 2015年 7月 15日 (2015 - 07 - 15) 全文	1
A	CN 105043524 A (杭州电子科技大学) 2015年 11月 11日 (2015 - 11 - 11) 全文	1
A	CN 102679902 A (天津大学) 2012年 9月 19日 (2012 - 09 - 19) 全文	1

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2020年 9月 24日

国际检索报告邮寄日期

2020年 10月 19日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

王宁

电话号码 86-(10)-53962609

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 103424175 A (成都星聚能科技有限公司) 2013年 12月 4日 (2013 - 12 - 04) 全文	1
A	CN 107560709 A (维沃移动通信有限公司) 2018年 1月 9日 (2018 - 01 - 09) 全文	1
A	W0 2018134932 A1 (FUJITSU LTD.) 2018年 7月 26日 (2018 - 07 - 26) 全文	1
A	JP 2017003397 A (UNIVERSITY NIIGATA) 2017年 1月 5日 (2017 - 01 - 05) 全文	1

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/102064

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	110501063	A	2019年 11月 26日	无	
CN	107300413	A	2017年 10月 27日	无	
CN	103438980	A	2013年 12月 11日	CN 103438980	B 2015年 7月 15日
CN	106768280	A	2017年 5月 31日	CN 106768280	B 2020年 4月 14日
CN	104776907	A	2015年 7月 15日	无	
CN	105043524	A	2015年 11月 11日	CN 105043524	B 2018年 11月 2日
CN	102679902	A	2012年 9月 19日	CN 102679902	B 2014年 8月 20日
CN	103424175	A	2013年 12月 4日	无	
CN	107560709	A	2018年 1月 9日	CN 107560709	B 2019年 10月 18日
WO	2018134932	A1	2018年 7月 26日	JP W02018134932	A1 2019年 8月 8日
JP	2017003397	A	2017年 1月 5日	JP 6555712	B2 2019年 8月 7日