



DOI: 10.12086/oe.2020.190190

一种新型贝塞尔光束器件的设计方法

代成伟^{1,2}, 闫超^{1,2}, 曾庆玉^{1,2}, 李雄^{1,2},
郭迎辉^{1,2}, 蒲明博^{1,2}, 王长涛^{1,2}, 罗先刚^{1,2*}

¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

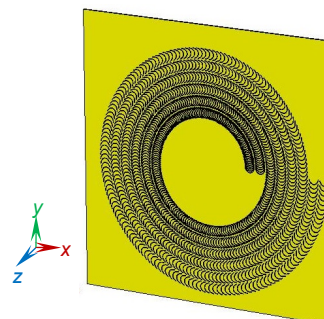
摘要: 悬链线型亚波长结构可以实现连续的相位调控。但是, 普通悬链线孔径两端较窄, 不易于加工。另外, 以往直接在仿真软件 CST 中建立复杂模型较为困难, 仿真过程较为繁琐。本文提出了用等宽悬链线狭缝替代普通悬链线狭缝, 并设计了用于产生贝塞尔光束的等宽悬链线超表面, 为二维光电器件的设计提供了新思路。在建模仿真过程中使用 Matlab 调用 CST 进行联合仿真, 直接在 Matlab 中完成所有建模、仿真、修改参数等操作。该方法可以用于设计复杂结构, 同时结合 Matlab 数值优化能力得到更理想的仿真效果。

关键词: 超表面; 悬链线; 贝塞尔光束; CST; Matlab

中图分类号: TB34; O441.4

文献标志码: A

引用格式: 代成伟, 闫超, 曾庆玉, 等. 一种新型贝塞尔光束器件的设计方法[J]. 光电工程, 2020, 47(6): 190190



A method of designing new Bessel beam generator

Dai Chengwei^{1,2}, Yan Chao^{1,2}, Zeng Qingyu^{1,2}, Li Xiong^{1,2}, Guo Yinghui^{1,2}, Pu Mingbo^{1,2},
Wang Changtao^{1,2}, Luo Xiangang^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Catenary nanostructures enable continuous phase control. However, the ordinary catenary nanostructure has narrow width at both ends and is not easy to be fabricated. On the other side, it was difficult to build complex model directly in simulation software CST, and the simulation process was complicated in the past. The equal-width catenary slit is proposed to replace the normal catenary slit. And the equal-width catenary-type metasurface has been designed to generate Bessel beam, which provides a new idea for the design of two-dimensional optical devices. In the process of modeling and simulation, CST is combined with Matlab for co-simulation, and all operations, such as modeling, simulations, and parameter modification, are completed directly in Matlab. This method can be used to design complex structures, and more ideal simulation results can be obtained combined with the numerical optimization ability of Matlab.

收稿日期: 2019-04-18; 收到修改稿日期: 2019-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61138002, 61622508)

作者简介: 代成伟(1992-), 男, 硕士, 主要从事微纳光学研究。E-mail: chengwdai@163.com

通信作者: 罗先刚(1970-), 男, 博士, 研究员, 主要从事微纳光学、微细加工等的研究。E-mail: lxxg@ioe.ac.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

Keywords: metasurfaces; catenary; Bessel beam; CST; Matlab

Citation: Dai C W, Yan C, Zeng Q Y, et al. A method of designing new Bessel beam generator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(6): 190190

1 引言

衍射是波普遍具有的性质。因为衍射效应的存在,所以即便不考虑成像系统的误差也不可能完全分辨极小物点。1987年,Durnin等^[1]提出存在径向光强分布满足贝塞尔函数的无衍射光束,即贝塞尔光束。贝塞尔光束是亥姆霍兹方程的精确解,传播距离只影响其相位分布,而不影响横截面光强,是无衍射光束。贝塞尔光束的性质使得其可以用于超分辨成像、光子操作、微纳加工等领域。其等相面呈圆锥形,所以只要赋予平面波圆锥形的等相面即可产生贝塞尔光束。早期的研究中采用轴锥透镜来实现,除了轴锥透镜还可以用空间光调制器或者亚波长圆环^[2]来产生锥形等相位面。但是传统方法面临着光学系统复杂、透镜加工困难等问题。近年来超材料和超表面的提出,为产生贝塞尔光束提供了新的思路。

超材料^[3]是一种将特定形状的结构按照一定规律排列而成的三维材料。根据单元结构形状以及排列规律的不同可以得到不同的等效电磁特性(例如介电常数、磁导率)。使用超材料,人们实现了负折射^[4-6]、电磁隐身^[7-9]等传统材料难以实现的功能。但是超材料存在三维加工和金属损耗等问题,影响了其进一步的应用研究。超表面^[10-13]是由亚波长结构单元排列而成的超薄二维材料。超表面器件具有轻薄、低损耗、易集成等优点,并且可以在亚波长范围实现对振幅、相位的任意调控。作为超表面器件的一种,几何相位型超表面具有设计简单、相位容差大、无材料色散、工作波段宽等优势^[14]。当圆偏振光入射到几何相位超表面,与结构相互作用后的透射光除了含有与入射光相同偏振态的分量外,还包含与入射光偏振态正交的光束,即交叉极化光束。交叉极化光相对入射光的相位突变与结构的指向角呈2倍关系^[14]。

通常几何相位超表面采用离散结构来实现,离散结构的旋转角与几何相位有着一一对应关系。应用几何相位超表面可以设计涡旋光束产生器件^[15]、全息器件^[6]、贝塞尔光束产生器件^[16]等有着复杂相位分布的二维光学器件。但这些器件将相位进行离散化,离散的相位会使得器件的性能降低,导致较窄的低频工作

带宽等。2015年,中国科学院光电技术研究所罗先刚课题组提出了悬链线型超表面,可以实现连续的相位调控^[13,17-19]。悬链线型超表面由金属膜上刻蚀出的悬链线型狭缝构成,狭缝由悬链线向下垂直平移,并将两端连接而成。由悬链线数学表达式可知,悬链线狭缝产生的几何相位与位置成正比,即可以产生线性的几何相位。因此,应用悬链线狭缝超表面,可以设计用于聚焦以及用于产生贝塞尔光束的光学器件^[18]。正如上文介绍的,悬链线狭缝由悬链线垂直平移构成,所以狭缝的两端将十分狭窄,不利于加工。本文提出用等宽悬链线狭缝构成的几何相位超表面来产生贝塞尔光束,相对于传统悬链线狭缝,等宽悬链线狭缝更易于加工。

在超表面的设计以及仿真中,通常用电磁仿真软件 CST 进行建模仿真和分析结果,并将数据保存,然后用 Matlab 绘制图形,分析效果。在设计 V 型天线、矩形孔径,以及悬链线狭缝等超表面结构时,可以直接在 CST 中进行建模。但是对于法向等宽悬链线以及其他不规则形状的结构时,CST 建模较为复杂。另一方面,在涉及到需要对亚波长单元阵列的排列方式进行优化时,则需要多次在 CST 里重复建模,然后在 Matlab 里分析数据、优化结构,这将影响工作效率。在以往的研究中,有文章提出 Matlab 与 CST 联合仿真,但是因为软件版本、工作目的不同、以及 CST 繁多的底层命令而难以复现并应用到自己的工作之中。

本文在设计等宽悬链线及其阵列构成的超表面时,采用 Matlab 调用 CST Microwave Studio 进行建模,仿真。得到了可产生贝塞尔光束的等宽悬链线型器件。联合仿真的方法可用于设计更加复杂的结构,并结合 Matlab 中的优化算法实现一体化电磁结构仿真设计。

2 结构设计

2.1 等宽悬链线

两端固定的链在重力作用下形成的曲线是一种悬链线。1670年,约翰·雅可比、惠更斯等人研究了悬链线的数学性质。其表达式为

$$y = \frac{A}{\pi} \ln \left(\sec \left(\frac{\pi x}{A} \right) \right), \quad (1)$$

其中 Δ 表示悬链线的水平跨度。由式可知, y 在 $x=0.5\Delta$ 处为无穷大。所以在设计结构时, 将 x 的取值范围限制在区间 $(-0.5\Delta+dx, 0.5\Delta-dx)$ 内。在悬链线型超表面中, 因为其切向角与位置 x 成正比, 从而可以实现线性的、连续的相位调控。如图 1(a)所示, 普通悬链线型孔径超表面, 使用两条垂直平移的悬链线围成狭缝。这使得狭缝两端变窄, 不利于加工。使用等宽悬链线可以很好地解决这个问题。等宽悬链线设计方法如下: 在区间 $(-0.5\Delta+dx, 0.5\Delta-dx)$ 内, 绘制 N 个悬链线上的点。对于其中一个点的坐标 (x_n, y_n) , 其切角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}\right), \quad (2)$$

则与其法向垂直距离为 w 的点的坐标 (x'_n, y'_n) 为

$$\begin{cases} x'_n = x_n - w \cdot \cos\theta \\ y'_n = y_n + w \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (3)$$

绘制出的等宽悬链线如图 1 (b)所示。

2.2 基于等宽悬链线阵列的贝塞尔光束产生器

贝塞尔光束是亥姆霍兹方程的精确解, 其表达式

可以写作^[20]

$$E(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \exp[i(k_z z - \omega t)] \cdot \int_0^{2\pi} \exp[ik_r(x \cos\varphi + y \sin\varphi)] d\varphi, \quad (4)$$

式中: ω 是光的角频率, k_r 是横向波矢量分量, k_z 是波矢的纵向分量。由式(4)可知, 传播距离 z 只影响贝塞尔光束的相位项, 横截面光强在不同距离处保持不变, 即为无衍射光束。上式的积分项表明, 贝塞尔光束可以看作许多平面波的叠加, 具有干涉场的性质。并且各平面子波与 z 轴有相同的夹角, 即等相面为圆锥形。这就是平面波附加圆锥形相位可以得到贝塞尔光束的原因。

垂直于传播方向的贝塞尔光束电场分布表达式:

$$E(r, \varphi) = J_l \exp(ik_r r + il\varphi + k_z z), \quad (5)$$

式中: J_l 表示第 l 阶贝塞尔方程, φ 表示横截面的方向角。上式中指数项决定了贝塞尔光束的相位分布, 对于零阶($l=0$)贝塞尔光束, 其相位分布如图 2(a)所示。将悬链线结构按照一定规则排列, 实现图 2(a)中所示

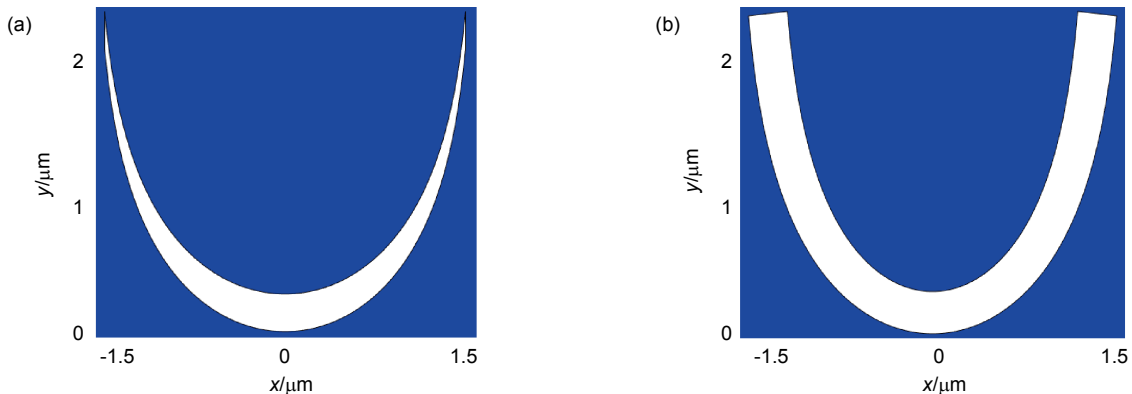


图 1 悬链线狭缝结构示意图。(a) 普通悬链线狭缝; (b) 等宽悬链线狭缝
Fig. 1 Diagrams of catenary slits. (a) Ordinary catenary slit; (b) Equal-width catenary slit

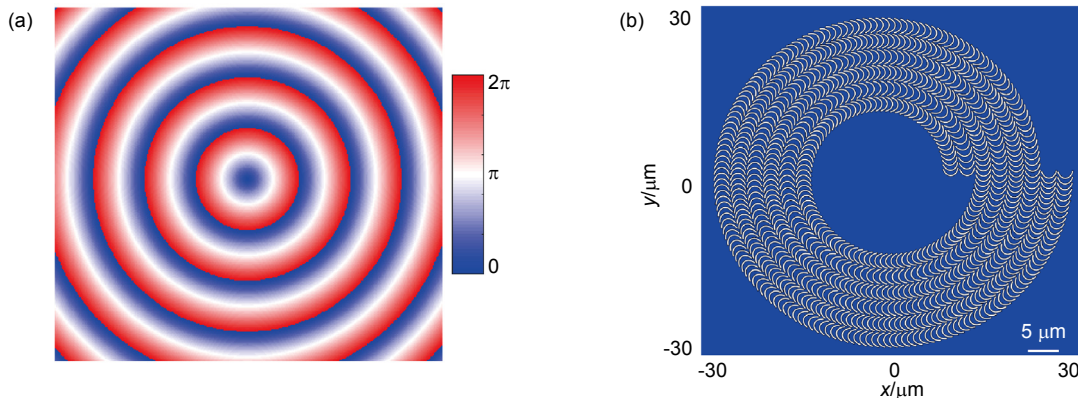


图 2 等宽悬链线阵列结构。(a) 零阶贝塞尔光束相位分布图; (b) 等宽悬链线零阶贝塞尔光束产生器件
Fig. 2 Equal-width catenary array structure. (a) Phase distribution of zero-order Bessel beam generator; (b) Zero-order Bessel beam generator constructed by equal-width catenary arrays

相位便能得到贝塞尔光束产生器件。由式(1)可得圆偏振光入射时，悬链线结构对出射交叉极化光的梯度相位调控为

$$\Phi = -2\sigma \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right) = -2\sigma \frac{\pi}{\Lambda} x, \quad (6)$$

其中 $\sigma=1$ 表示入射圆偏振光为右旋, $\sigma=-1$ 表示入射圆偏振光为左旋。 $\arctan(dy/dx)$ 表示悬链线切线和 x 轴的夹角。将悬链线按极坐标排列,可以实现贝塞尔光束半径方向和切向的相位延迟。悬链线端点轨迹为^[18]

$$r = \frac{(l-2)\varphi + (2m+1)\pi}{k_r}, \quad (7)$$

其中 m 为正整数。使用上式,得到如图 2 (b)所示的可以产生零阶贝塞尔光束的等宽悬链线阵列。图中结构由 800 个等宽悬链线阵列构成,每个悬链线跨度为 $2 \mu\text{m}$ 。在设计结构时,先将方向角等分,然后将等宽悬链线按径向排列,即每一圈有相同数量的等宽悬链线结构,因此设计出的结构中内圈等宽悬链线较密,外圈较为稀疏。

3 Matlab 与 CST 联合仿真的具体方法

对于图 1(a)中所示的普通悬链线结构,在 CST 中建模时可以先在根据式(1)绘制悬链线曲线,然后将曲线向下平移,并将两条曲线两端连接形成悬链线狭缝。

对于图 1(b)中所示的等宽悬链线狭缝,其一条边由式(1)所示的曲线方程描述,可以在 CST 中直接建模;但是另一条边由式(3)所示的一系列坐标表示,需要使用 CST 中的多边形建模工具,逐次输入坐标进行建模,工作量较大。如果可以将坐标直接写入 CST,便能快速地建立仿真模型,本节介绍使用 Matlab 调用 CST 进行建模,并完成设置参数、仿真等任务。

CST 建模仿真有两种方式,一种是使用交互界面直接建模仿真,另一种是通过脚本语言 Visual Basic for Applications (VBA) 操作。使用交互界面进行的所有操作,均会在 CST 的历史命令里写入相应的 VBA 语句。所以,只要使用 Matlab 将 VBA 命令语句写入 CST 历史命令就可以实现建模仿真等一系列操作。Matlab 调用 CST 建模仿真流程如图 3 所示。首先用 Matlab 获得 CST 句柄,使得通过 Matlab 便可以控制 CST 软件。在得到 CST 句柄后,进行新建文件、保存文件、建模、设置参数以及进行仿真等操作。

Matlab 调用 CST 建模仿真的部分语句如表 1。使用 Matlab 内置 `actxserver` 函数可以返回 CST 对象。CST 对象包含 `FileNew`(创建新文件), `NewMWS`(新建微波仿真), `Quit`(退出 CST)等方法。用 Matlab 中 ' `invoke` ' 函数可以调用 CST 对象的上述方法。另外, ' `invoke` ' 函数还可以将 VBA 语句写入 CST,从而完成建模仿真等步骤,如表 1 最后一行语句所示。

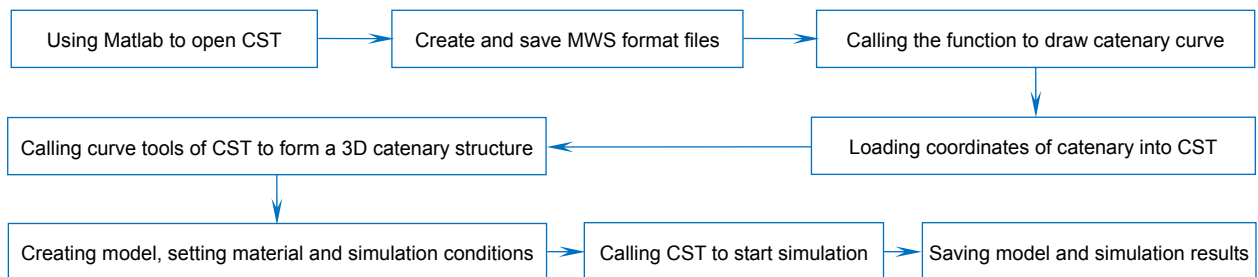


图 3 Matlab 调用 CST 仿真流程图
Fig. 3 Flowchart of CST simulation called by Matlab

表 1 Matlab 和 CST 联合仿真的基本语句
Table 1 Basic codes of Matlab and CST co-simulation

Function	Code
Calling CST	<code>cst=actxserver('CSTStuio.application')</code>
Creating new MWS file	<code>mws=cst.invoke('NewMWS');</code>
Saving MWS file	<code>mws.invoke('saveas','Bessl.cst');</code>
Writing VBA code to CST	<code>mws.invoke('AddToHistory',VBA);</code>

4 仿真过程及结果

采用 Matlab 与 CST 联合进行建模仿真。首先在 Matlab 中将 ‘CSTStudio.application’ 作为参数传入 ‘axtserver’ 函数, 返回 CST 的 COM 服务器。使用 ‘invoke’ 方法新建微波仿真文件, 建立仿真模型, 以及设置仿真参数。通过 Matlab 调用 CST, 在金膜上建立图 2(b)所示的等宽悬链线阵列孔径, 金膜厚度为 120 nm, 尺寸为 $75\ \mu\text{m}\times 75\ \mu\text{m}$, 得到的结构如图 4 所示。结构中内圈等宽悬链线分布较密, 外圈分布较疏,

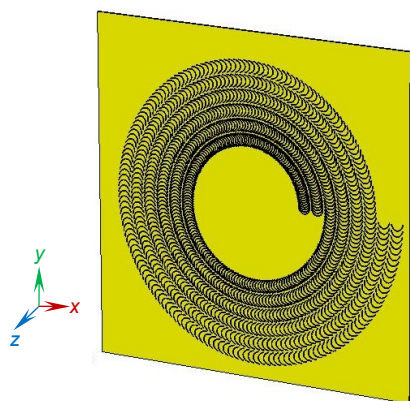


图 4 CST 中的等宽悬链线阵列

Fig. 4 Equal-width catenary arrays in CST

是将方向角等分后径向排列悬链线的结果。悬链线孔径阵列在半径方向的周期为 $p=2\ \mu\text{m}$, 半径方向的波矢为 $k_r=2\pi/p$ 。背景材料设置为 ‘normal’, 边界条件为 ‘open’, 使用 CST 中的时域求解器进行求解, 所用的入射光波长为 $\lambda=632.8\ \text{nm}$ 。

图 5 是 $y=0$ 时, $x-z$ 平面光强分布图。从仿真结果可以看到明暗交替的条纹, 并且中心为亮条纹, 符合零阶贝塞尔光束的光强分布特点。图 6 表示距离结构一定距离处, $x-y$ 平面的光强分布和相位分布图。其中图 6(a)到 6(d)表示与结构一定距离处的相位分布, 由

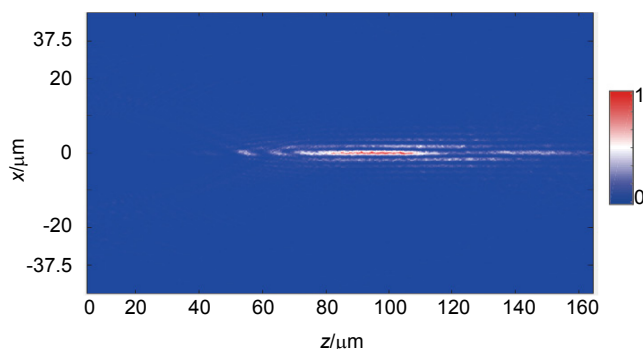


图 5 CST 仿真得到的 $x-z$ 平面 Bessel 光束光强分布

Fig. 5 Intensity distribution of Bessel beam on $x-z$ plane obtained by CST

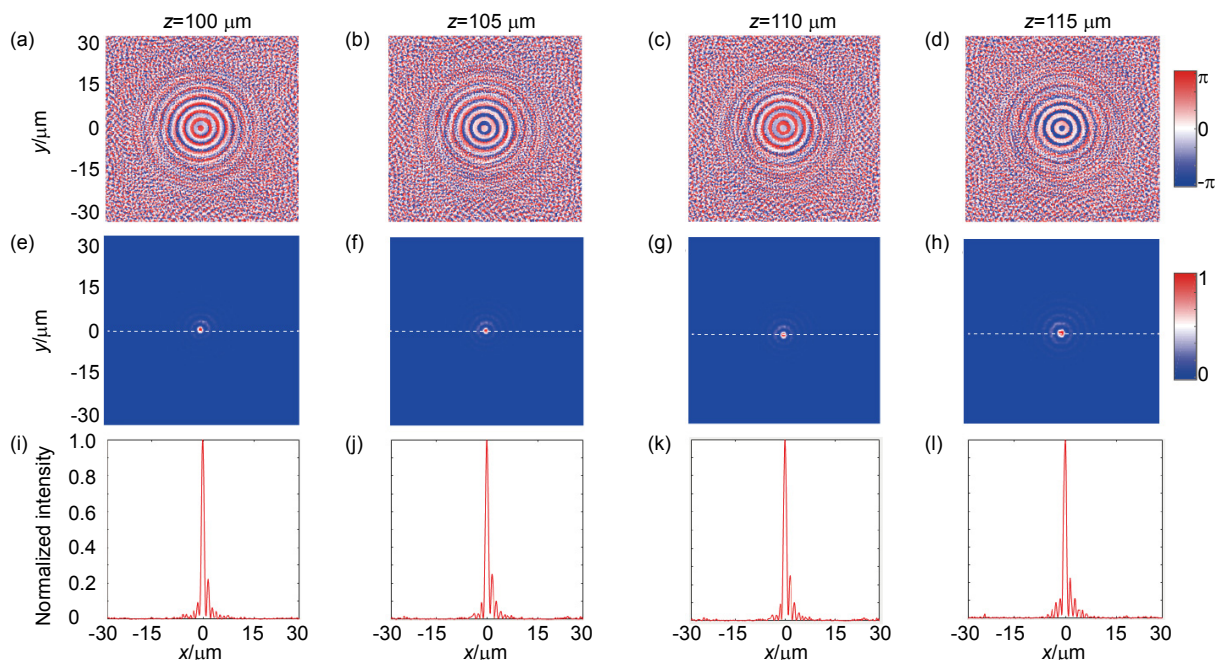


图 6 $x-y$ 平面贝塞尔光束光强和相位分布。(a)~(d) 距离结构一定距离处, $x-y$ 平面贝塞尔光束相位分布; (e)~(h) 与相位对应的光强分布图; (i)~(l) 图(e)~(h)虚线所示的光强截线图

Fig. 6 Intensity and phase distributions of Bessel beam on $x-y$ plane. (a)~(d) Represent the phase distributions on $x-y$ plane at certain distances from the structure; (e)~(h) Denote the intensity distributions corresponding to the phase distributions (a)~(d), respectively; (i)~(l) are the cross views of the intensity shown by the dashed lines in figures (e)~(h), respectively

图中可以看到相位分布随着衍射距离不断变化,图 6(d)右侧是相位分布的色条。图 6(e)到 6(h)表示与相位分布图相对应光强分布,图中可以看到光强分布为明暗交替的圆环,并且圆环中心为亮斑,与图 5 所示结果一致。图 6(i)到 6(l)为图 6(e)到 6(h)中白色虚线位置处的光强接线图,表明在一定距离处,随着衍射距离的增加光强保持不变。从仿真结果可以看到,约在 95 μm 至 130 μm 处有强烈的光强分布,为无衍射贝塞尔光束区域,即在该区域内 x - y 平面光场相位随着距离发生变化,而光强基本保持不变。

5 结论

本文介绍了 Matlab 调用 CST Microwave Studio 完成联合仿真的具体方法,以及需要使用的核心函数。通过 Matlab 强大的矩阵处理与数值建模能力,调用 CST 建立了等宽悬链线狭缝。介绍了设计等宽悬链线的方法,并给出了等宽悬链线狭缝可以产生的几何相位分布。按照产生贝塞尔光束所需的相位梯度,用等宽悬链线阵列设计了超表面贝塞尔光束产生器件,并得到了零阶贝塞尔光束。除了零阶贝塞尔光束,应用等宽悬链线作为几何相位超表面同样的单元结构,还可以设计器件来产生高阶贝塞尔光束、涡旋光束以及聚焦透镜等。联合仿真的方法可以用于设计复杂的结构,也可以结合 Matlab 强大的数值优化能力,实现一体化结构设计与优化。另外,也可以用同样的思路实现 Matlab 与 HFSS、FEKO 等常用的电磁软件的联合仿真。

参考文献

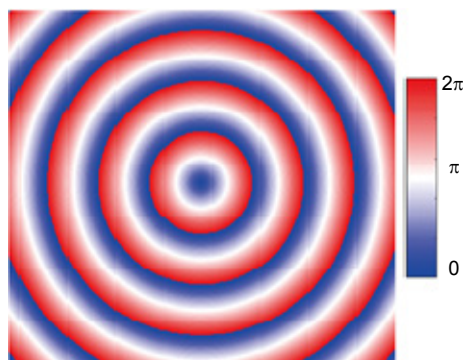
- [1] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, **4**(4): 651–654.
- [2] Moreno I, Davis J A, Sánchez-López M M, et al. Nondiffracting Bessel beams with polarization state that varies with propagation distance[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(23): 5451–5454.
- [3] Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuño F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light[J]. *Nature Photonics*, 2015, **9**(12): 796–808.
- [4] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, **334**(6054): 333–337.
- [5] Pu M B, Zhao Z Y, Wang Y Q, et al. Spatially and spectrally engineered spin-orbit interaction for achromatic virtual shaping[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9822.
- [6] Li X, Chen L W, Li Y, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Science Advances*, 2016, **2**(11): e1601102.
- [7] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977–980.
- [8] Zhang J, Mei Z L, Zhang W R, et al. An ultrathin directional carpet cloak based on generalized Snell's law[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(15): 151115.
- [9] Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1777–1780.
- [10] Ma X L, Pu M B, Li X, et al. All-metallic wide-angle metasurfaces for multifunctional polarization manipulation[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019, **2**(3): 180023.
- [11] Nemati A, Wang Q, Hong M H, et al. Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, **1**(5): 180009.
- [12] Rahmani M, Leo G, Brener I, et al. Nonlinear frequency conversion in optical nanoantennas and metasurfaces: materials evolution and fabrication[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, **1**(10): 180021.
- [13] Luo X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(9): 594201.
- [14] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(3): 255–275.
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 255–275.
- [15] Jin J J, Luo J, Zhang X H, et al. Generation and detection of orbital angular momentum via metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 24286.
- [16] Gao H, Pu M B, Li X, et al. Super-resolution imaging with a Bessel lens realized by a geometric metasurface[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(12): 13933–13943.
- [17] Luo X G, Pu M B, Li X, et al. Broadband spin Hall effect of light in single nanoapertures[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, **6**(6): e16276.
- [18] Li X, Pu M B, Zhao Z Y, et al. Catenary nanostructures as compact Bessel beam generators[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 20524.
- [19] Pu M B, Li X, Ma X L, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, **1**(9): e1500396.
- [20] Hasman E, Kleiner V, Biener G, et al. Polarization dependent focusing lens by use of quantized Pancharatnam-Berry phase diffractive optics[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(3): 328–330.

A method of designing new Bessel beam generator

Dai Chengwei^{1,2}, Yan Chao^{1,2}, Zeng Qingyu^{1,2}, Li Xiong^{1,2}, Guo Yinghui^{1,2},
Pu Mingbo^{1,2}, Wang Changtao^{1,2}, Luo Xiangang^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering,
Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Phase distribution of zero-order Bessel beam generator

Overview: The metasurface is an ultra-thin two-dimensional material arranged by metal or dielectric subwavelength structures. Phase-modulated metasurface is an important branch of metasurfaces, which mainly includes propagation, geometric, and circuit-type phase metasurfaces. The phase modulation of incident circular polarization can be realized in geometric phase metasurfaces by using the spatially varying subwavelength structure. Usually, the geometric phase metasurface is realized by discrete structures whose rotation angle has a correspondence with the geometric phase. However, discrete elements can only generate discrete phase distributions. Catenary is a kind of mechanical curves. The geometric phase metasurfaces composed of catenary structures can realize continuous geometric phase. The catenary metasurface is composed of catenary slits etched on the metal film. The slit is translated down by a catenary and the two ends are connected. Similar to discrete metasurfaces, catenary slits can be considered as a patchwork of discrete elements. The tangent angle of the catenary corresponds to the rotation angle of the coordinate system of the discrete element. As described above, catenary slit is composed of vertical-translated catenary, so both ends of the slit will be very narrow, which is not conducive to experimental processing. Therefore, it is necessary to design equal-width catenary metasurfaces. On the other hand, in the design and simulation of the metasurfaces, CST is usually used for modeling and simulations. When designing V-shaped antennas, rectangular apertures, and other subwavelength structures such as normal catenary slits, the modeling process can be performed directly in CST. However, it is more complex for equal-width catenary slits and other irregularly shaped structures. On the other hand, when it comes to the need to optimize the arrangement of subwavelength element array, it is necessary to repeatedly model in CST, but to analyze data and optimize the structure in Matlab, which will affect the work efficiency. In previous studies, researchers have proposed co-simulation with Matlab and CST. Because of the software version, the purpose of the work, and the CST's numerous underlying commands, however, it is difficult to reproduce. In this paper, when designing the catenary metasurfaces, Matlab R2016b is used to call CST Microwave Studio version 2016 for modeling and simulations. A two-dimensional Bessel beam generator composed of an array of equal-width catenary slits is obtained. This article also tells the details of the co-simulation, so that researchers can better apply it to their own work.

Citation: Dai C W, Yan C, Zeng Q Y, *et al.* A method of designing new Bessel beam generator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(6): 190190

Supported by National Natural Science Foundation of China (61138002, 61622508)

* E-mail: lxg@ioe.ac.cn