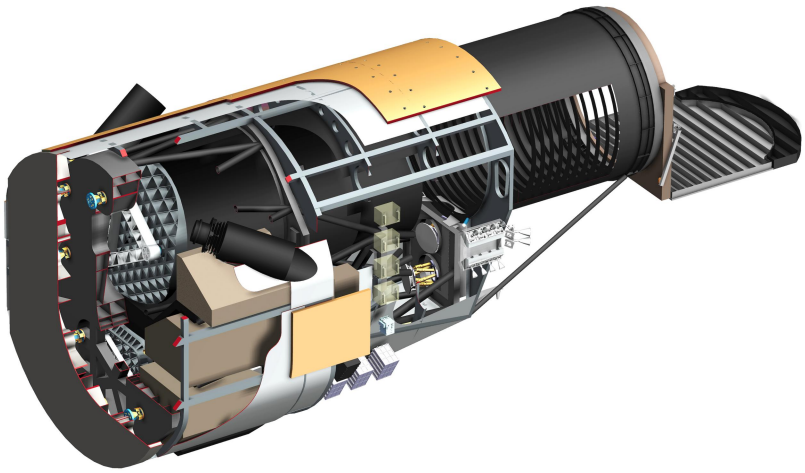
CSST 主巡天仿真数据
Cycle 6 数据产品说明



编写：

韦成亮，张鑫、刘德子、方越东、孟宪民、班章、罗煜、

田浩、李佳东、李晓波、李然、李楠、齐朝祥、李国亮

2023 年 04 月 30 日

目录

1 综述 1
1.1 简介 1
1.2 数据使用说明 3
1.2.1 获取数据 3
1.2.2 数据产品读取实例 5
2 仿真内容 11
2.1 输入星表 14
2.1.1 输入星系星表 15
2.1.2 输入类星体星表 16
2.1.3 输入恒星星表 17
2.2 点扩展函数仿真 22
2.2.1 工程仿真和 PSF 采样 22
2.2.2 像场畸变 29
2.2.3 PSF 插值 33
2.3 多色成像仿真 36
2.4 无缝光谱仿真 40
2.5 仪器效应 54
2.6 天体测量效应仿真 59
3 仿真结果 61

1 综述

1.1 简介

我国载人航天工程重大科学项目——多功能光学设施是一架 2 米口径的大型空间光学望远镜（以下简称 CSST），配备有大视场光学巡天模块、太赫兹模块、多通道成像仪、积分视场光谱仪和系外行星成像星冕仪等观测终端。多功能光学设施计划完成高空间分辨率、大天区面积的深度多色成像与无缝光谱巡天观测，并可选用多种仪器对遴选的天体进行精细观测研究，有望在暗物质、暗能量、星系形成与演化、系外行星探测等天文领域和基础物理领域的重大问题上取得突破。

为了保证 CSST 科学产出的及时性和可靠性，一套用于测试数据处理和科学工具的端到端观测仿真数据是必要的。就 CSST 而言，端到端仿真主要面向以下需求：

1）综合评估望远镜的整体性能；

2）为数据处理流水管线提供个性化的测试数据；

3）模拟弱引力透镜巡天观测，开展弱引力透镜系统误差分析；

4）为其他主要科学目标提供通用的仿真数据等；

5）为科学用户提供用户友好的的仿真软件，以便于一些特殊用户能够独立运行小型的个性化仿真等。

CSST 端到端仿真内容就流程见图 1.1-1，主要有：

1）模拟星表。包括实测深场观测星表、半解析星系形成模型星

表、引力透镜星表、类星体星表、银河系内恒星及太阳系小天体星表。星表包含 SED 信息，部分星表还包含发射线和吸收线；

2) 望远镜工程结构模拟。包括镜片加工、装调工艺、机械抖动和稳像效应、望远镜结构和镜面的热变形以及地面重力应力残余等模拟，最终给出在轨运行时的光学结构和理想设计的偏差估计；

3) 采用实验室点扩散函数场卷积目标源生成焦面多色光子分布；

4) 各终端模块光学仪器及探测器模拟。

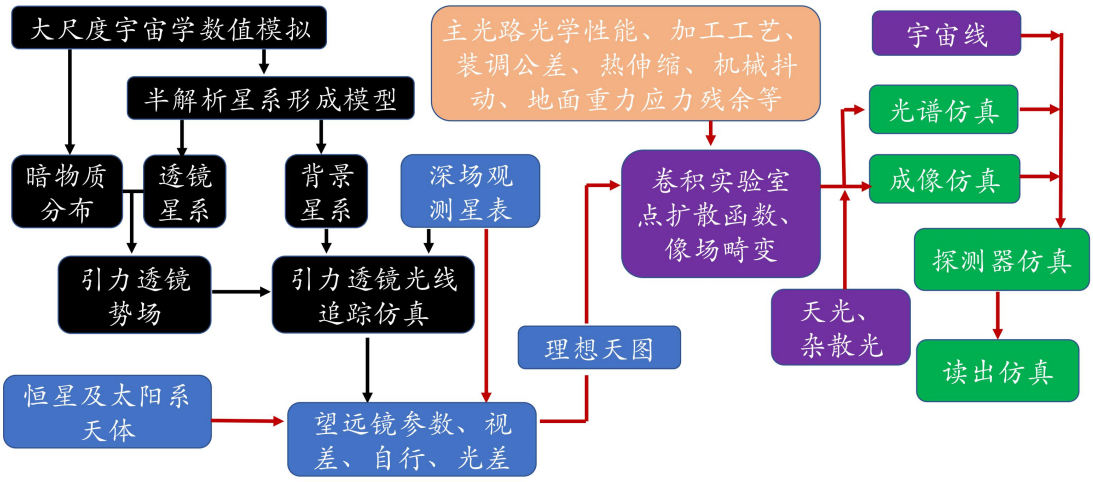


图 1.1-1 端到端仿真内容及流程图。

Cycle 6 的仿真数据产品中心位于 Ra = 244.9727 度、Dec = 39.8959 度、约 1.53 平方度的星系及恒星的模拟图像及无缝光谱的数据，包含 137 个连续覆盖的曝光指向。每次曝光产生 30 幅观测图像，分别为 u、g、r、i、z、Y、NUV 及无缝光谱图像，焦面分布见图 2.0-3。连续曝光之间有约 1 片 CCD 大小的平移，总覆盖天区面积约 2.65 平方度，中心 1.53 平方度区域内为完整巡天区域，对同一个目标，u、

g、r、i、z 都有两次曝光，NUV、Y、GU、GI、GV 都有四次曝光。此天区涵盖了河外星系及星系团、类星体、真实恒星、模拟恒星及星团等天体。物理效应包括了光线追踪数值模拟的弱透镜剪切、宇宙线、背景天光，仪器效应包括点扩散效应、暗电流、本底、平场、电子弥散效应、CCD 饱和溢出、失效像元/像列、增益、读出噪声等。可用于宇宙线扣除、流量及位置定标、弱透镜测量、密集星场分析、无缝光谱抽取等预研究工作。

与上一次数据发布相比，本轮模拟包含了更加准确的星系 SED、自洽的弱透镜剪切信号和更丰富的物理效应，相应的参数设置尽可能做到了与实际相符。作为第二版可用于科学分析的模拟数据，本轮模拟必然还存在一些局限性，甚至存在未知的错误。在此，仿真团队诚恳地希望天文界同仁积极参与数据测试、多批评指正，帮助我们优化下一轮仿真质量。

1.2 数据使用说明

1.2.1 获取数据

伴随仿真软件发布，Cycle 6 的仿真数据也一起发布。目前计划将数据产品分发到各个 CSST 科学中心托管，随后用户可以从自己最方便访问的科学中心数据服务器获取。考虑到目前数据分发尚未完成，想第一时间获取 Cycle 6 仿真数据的用户可联系国家天文台李楠（nan.li@nao.cas.cn）以邮寄硬盘的方式获得。Cycle 6 的数据大小约

1.5TB，用户需自行准备存储资源，想通过硬盘邮寄获取数据的用户需和李楠联系后邮寄足够容量的硬盘到国家天文台。Cycle 6 仿真数据的组织结构如下所述。

Cycle 6 的仿真数据共包含多色成像和无缝光谱两部分数据，数据文件包含对应~1.53 平方度内 137 个 pointing 仿真独立目录，具体文件对应如下：

a. 多色成像

pmlabs:/share/C6_photometry_20230225_HeaderMod/

数据文件【MSC_0000000～MSC_0000136】：

- 图像：

  CSST_MSC_MS_SCI_20240817060512_20240817060742_100000***_<chipID>_L0_1.fits
- 源表：MSC_100000***_chip_<chipID>_filt_<filtBand>.cat
- 宇宙线：

  CSST_MSC_MS_CRS_20240817060512_20240817060742_100000***_<chipID>_L0_1.fits
- 运行记录：MSC_100000***_chip_<chipID>_filt_<filtBand>.log

b. 无缝光谱

pmlabs:/share/C6_spectroscopic_20230225_HeaderMod/

数据文件【MSC_0000000～MSC_0000136】：

- 光谱：

CSST_MSC_MS_SCI_20240817060512_20240817060742_100000***_<chipID>_L0_1.fits

- 源表：MSC_100000***_chip_<chipID>_filt_<filtBand>.cat
- 宇宙线：

CSST_MSC_MS_CRS_20240817060512_20240817060742_100000***_<chipID>_L0_1.fits

- 运行记录：MSC_100000***_chip_<chipID>_filt_<filtBand>.log

需要注意的是，相对上一版仿真数据，Cycle 6 数据产品添加了基于光线追踪数值模拟的弱引力透镜剪切信号，没有再独立产生剪切关闭和天测关闭的两组参考数据。

1.2.2 数据产品读取实例

（1）用 ds9 展示一个指向的输出数据

ds9 -mosaic wcs + <30 个探测器的文件>

（2）头文件说明

头文件中包含了 Primary header 和 Extension header 两部分，Primary header 定义了共性的部分，Extension header 部分针对不同的滤光片不同 CCD 进行定义，头文件定义示例如下：

Primary Header：

SIMPLE = T / conforms to FITS standard

```
BITPIX  =                    8 / array data type
NAXIS   =                    0 / number of array dimensions
EXTEND  =                    T
NEXTEND =                    1
DATE    = '2027-07-13T22:24:17' / Date this file was written
FILENAME= 'CSST_MSC_MS_SCI_20270713222417_20270713222647_10160000066_01_L0_V01'
FILETYPE= 'SCIE      '       / observation type
TELESCOP= 'CSST      '       / telescope used to acquire data
INSTRUME= 'MSC       '       / instrument used to acquire data
RADECSYS= 'ICRS      '       / frame of reference of coordinates
EQUINOX =               2000.0 /
FITSCREA= 'C6'               / FITS create software version
COMMENT ===================================================================
COMMENT Object information
COMMENT ===================================================================
OBJECT  = '60000066'         / object name
TARGET  = '162019+394045'    / target name (hhmmss+ddmmss)
OBSID   = '10160000066'      / observation ID
OBJ_RA  =           245.078792 / R.A. of the object (degrees)
OBJ_DEC =            39.679069 / declination of the object (degrees)
COMMENT ===================================================================
COMMENT Telescope information
COMMENT ===================================================================
REFFRAME= 'CSSTGSC-1.0'      / guide star catalog version
DATE-OBS= '2027-07-13T22:24:17' / date of the observation (yyyy-mm-dd hh:mm:ss)
SATESWV = '0001'             / software version in the satellite
EXPSTART=           61599.93353 / exposure start time (MJD)
CABSTART=           61599.93353 / (MJD)
SUNANGL0=                 50.0 / angle between sun and optical axis at CABSTART
MOONANG0=                 30.0 / angle moon and opt axis at CABSTART at CABST
TEL_ALT0=                 20.0 / angle opt axis and the ground-piston at CABST
POS_ANG0=                 20.0 / angle bwt y axis and the North Pole at CABST
POSI0_X =           4854.9011 / the orbital position in X at CABSTART
POSI0_Y =            -1110.85 / the orbital position in Y at CABSTART
POSI0_Z =           4567.3288 / the orbital position in Z at CABSTART
VELO0_X =  1.969908919754744 / The orbital velocity in X at CABSTART
VELO0_Y =  7.424480514030165 / The orbital velocity in Y at CABSTART
VELO0_Z = -0.2871649019743927 / The orbital velocity in Z at CABSTART
EULER0_1=                  0.0 / Euler angle 1 at  CABSTART
EULER0_1=                  0.0 / Euler angle 2 at  CABSTART
EULER0_1=                  0.0 / Euler angle 3 at  CABSTART
RA_PNT0 =           245.078792 / RA of the pointing (degrees) at CABSTART
DEC_PNT0=            39.679069 / DEC of the pointing (degrees) at CABSTART
EXPEND  =           61599.93527 / exposure end time (MJD)
```

```
CABEND    =                61599.93527 / (MJD)
SUNANGL1=                     50.0 / angle between sun and optical axis at CABEND
MOONANG1=                     30.0 / angle btw moon and optical axis at CABEND
TEL_ALT1=                    20.0 / angle opt axis and the ground-piston at CAEND
POS_ANG1=                     20.0 / angle bwt y axis and the North Pole at CABEND
POSI1_X =                    0.0 / the orbital position in X at CABEND
POSI1_Y =                    0.0 / the orbital position in Y at CABEND
POSI1_Z =                    0.0 / the orbital position in Z at CABEND
VELO1_X =                     0.0 / The orbital velocity in X at CABEND
VELO1_Y =                     0.0 / The orbital velocity in Y at CABEND
VELO1_Z =                     0.0 / The orbital velocity in Z at CABEND
EULER1_1=                     0.0 / Euler angle 1 at    CABEND
EULER1_2=                     0.0 / Euler angle 2 at    CABEND
EULER1_3=                     0.0 / Euler angle 3 at    CABEND
RA_PNT1 =               245.078792 / RA of the pointing (degrees) at CABEND
DEC_PNT1=                 39.679069 / DEC of the pointing (degrees) at CABEND
EXPTIME =                    150.0 / exposure duration
EPOCH     =                  2000 / coordinate epoch
COMMENT Other information
COMMENT ================================================================
CHECKSUM= 'jfaAkZT2jfZ9jZZ9'     / HDU checksum updated 2023-04-06T19:44:58
DATASUM = '0               '     / data unit checksum updated 2023-04-06T19:44:58
END
```

Extension Header:

```
XTENSION= 'IMAGE     '           / Image extension
BITPIX    =                   16 / array data type
NAXIS     =                    2 / number of array dimensions
NAXIS1    =                 9216
NAXIS2    =                 9232
PCOUNT    =                    0 / number of parameters
GCOUNT    =                    1 / number of groups
BSCALE    =                    1
BZERO     =                32768
EXTNAME = 'raw       '
EXTVER    =                    1
BUNIT     = 'ADU         '       / physical unit of array values
COMMENT ================================================================
COMMENT Detector information
COMMENT ================================================================
DETECTOR= 'CCD'                  / detector name
```

```
DETTEMP1=                        173 / detector temperature at EXPSTART
DETTEMP2=                        173 / detector temperature at EXPEND
DETTEMP3=                        173 / detector temperature when readout is finished
DETSIZE = '9560x9264'             / detector size
DATASEC = '9216x9232'             / data size
PIXSCAL1=                      0.074 / pixel scale for axis 1
PIXSCAL2=                      0.074 / pixel scale for axis 2
PIXSIZE1=                         10 / pixel size    for axis 1
PIXSIZE2=                         10 / pixel size    for axis 1
COMMENT ================================================================
COMMENT CCD chip information
COMMENT ================================================================
CCDCHIP = '01          '          / CCD chip ID
CCDLABEL= 'GI-1        '          / CCD chip label
FILTER   = 'GI         '          / filter name
NCHAN    =                        16 / Number of readout channels
NCHAN1   =                         8 / Number of horizintal channels
NCHAN2   =                         2 / Number of vertical channels
PSCAN1   =                        27 / horizontal prescan width, per readout channel
PSCAN2   =                         8 / horizontal prescan width, per readout channel
OSCAN1   =                        16 / horizontal overscan width,per readout channel
OSCAN2   =                        16 / horizontal overscan width,per readout channel
COMMENT ================================================================
COMMENT WORLD COORDINATE SYSTEM AND RELATED PARAMETERS
COMMENT ================================================================
WCSAXES =                          2 / Number of World Coordinate System axes
CRPIX1   =      4600.552601654727 / x-coordinate of reference pixel
CRPIX2   =      4630.400982774001 / y-coordinate of reference pixel
CRVAL1   =       244.3493820322694 / first axis value at reference pixel
CRVAL2   =       39.32763496965589 / second axis value at reference pixel
CTYPE1   = 'RA---TAN'              / the coordinate type for the first axis
CTYPE2   = 'DEC--TAN'              / the coordinate type for the second axis
CD1_1    = -7.0095068415693E-06 / partial of first axis coordinate w.r.t. x
CD2_1    = -1.9321118214008E-05 / partial of first axis coordinate w.r.t. x
CD1_2    = 1.93209824700092E-05 / partial of second axis coordinate w.r.t. x
CD2_2    =   -7.010879642406E-06 / partial of second axis coordinate w.r.t. x
OTHERS   =                    '     /
COMMENT ================================================================
COMMENT Readout information
COMMENT ================================================================
GAIN1    =                      1.1 / CCD gain (channel 1)
GAIN2    =                      1.1 / CCD gain (channel 2)
GAIN3    =                      1.1 / CCD gain (channel 3)
GAIN4    =                      1.1 / CCD gain (channel 4)
```

```
GAIN5   =                    1.1 / CCD gain (channel 5)
GAIN6   =                    1.1 / CCD gain (channel 6)
GAIN7   =                    1.1 / CCD gain (channel 7)
GAIN8   =                    1.1 / CCD gain (channel 8)
GAIN9   =                    1.1 / CCD gain (channel 9)
GAIN10  =                    1.1 / CCD gain (channel 10)
GAIN11  =                    1.1 / CCD gain (channel 11)
GAIN12  =                    1.1 / CCD gain (channel 12)
GAIN13  =                    1.1 / CCD gain (channel 13)
GAIN14  =                    1.1 / CCD gain (channel 14)
GAIN15  =                    1.1 / CCD gain (channel 15)
GAIN16  =                    1.1 / CCD gain (channel 16)
RDNOIS1 =                    5.0 / read noise   (channel 1)
RDNOIS2 =                    5.0 / read noise   (channel 2)
RDNOIS3 =                    5.0 / read noise   (channel 3)
RDNOIS4 =                    5.0 / read noise   (channel 4)
RDNOIS5 =                    5.0 / read noise   (channel 5)
RDNOIS6 =                    5.0 / read noise   (channel 6)
RDNOIS7 =                    5.0 / read noise   (channel 7)
RDNOIS8 =                    5.0 / read noise   (channel 8)
RDNOIS9 =                    5.0 / read noise   (channel 9)
RDNOIS10=                    5.0 / read noise   (channel 10)
RDNOIS11=                    5.0 / read noise   (channel 11)
RDNOIS12=                    5.0 / read noise   (channel 12)
RDNOIS13=                    5.0 / read noise   (channel 13)
RDNOIS14=                    5.0 / read noise   (channel 14)
RDNOIS15=                    5.0 / read noise   (channel 15)
RDNOIS16=                    5.0 / read noise   (channel 16)
RDSPEED =                   10.0 / read speed (in MHz)
COMMENT ================================================================
COMMENT Shutter information
COMMENT ================================================================
SHUTSTAT=                      T / shutter status
SHTOPEN0=                    0.0 / shutter open time (begin)
SHTOPEN1=                    0.0 / shutter open time (end)
SHTCLOS0=                    0.0 / shutter close time (begin)
SHTCLOS1=                    0.0 / shutter close time (end)
COMMENT ================================================================
COMMENT LED information
COMMENT ================================================================
LEDSTAT1= '00000000000000000000000000000' / main LED status
LEDEXP1 =                    0.0 / main LED flash time (s)
LEDSTAT2= '00000000000000000000000000000' / backup LED status
LEDEXP2 =                    0.0 / backup LED flash time (s)
```

```
LEDTEMPA=                    173.0 / LED temperature (main LED in K)
LEDTEMPB=                    173.0 / LED temperature (backup LED in K)
COMMENT ====================================================================
COMMENT Other information
COMMENT ====================================================================
EQUINOX =                 2000.0
WCSDIM  =                    2.0
CHECKSUM= '2DFf5A9c2ACc2A9c'   / HDU checksum updated 2023-04-06T19:45:01
DATASUM = '3242480901'         / data unit checksum updated 2023-04-06T19:45:01
END
```

数据定义可以参考文档 KSC-00-JK-0001-02.01《CSST 科学数据处理系统输入数据和 0 级数据结构说明》。

（3）读出特定指向的特定探测器的输入星表

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from astropy.table import Table
pathCats = '/share/simulation_fits/CSSOSDataProductsSims/data/catalog_points_7degree2/'

# read pointing config
f = open(pathCats + 'pointing1.dat', 'r')
for _ in range(1):
    header = f.readline()
    line = 0
    pRA = []
    pDEC = []

for line in f:
    line = line.strip()
    columns = line.split()
    pRA.append(float(columns[0]))
    pDEC.append(float(columns[1]))
f.close()

pRA, pDEC = np.array(pRA), np.array(pDEC)
```

```
"""select field pointing"""

ipoint = 50
pointRa = float('{:8.4f}'.format(pRA[ipoint]))
pointDec = float('{:8.4f}'.format(pDEC[ipoint]))
```

```
# read catalogue - gals & stars
ngals = 0
nstars = 0

filenameDir = 'point_RA' + str(pointRa) + '_DE' + str(pointDec) + '/'
for i in range(1, 31):
    gals = Table.read(pathCats + filenameDir + 'galaxies_ccd' + '{:0=2}'.format(i) +
                      '_p_RA' + str(pointRa) + '_DE' + str(pointDec) +
                      '.hdf5')
    stars = Table.read(pathCats + filenameDir + 'stars_ccd' + '{:0=2}'.format(i) +
                      '_p_RA' + str(pointRa) + '_DE' + str(pointDec) +
                      '.hdf5')
    ngals = gals['galaxyID'].size
    nstars = stars['sourceID'].size
    print('ccd' + '{:0=2}'.format(i) + ':')
    print('gals:', ngals)
    print('stars:', nstars)

print(gals.columns)
```

2 仿真内容

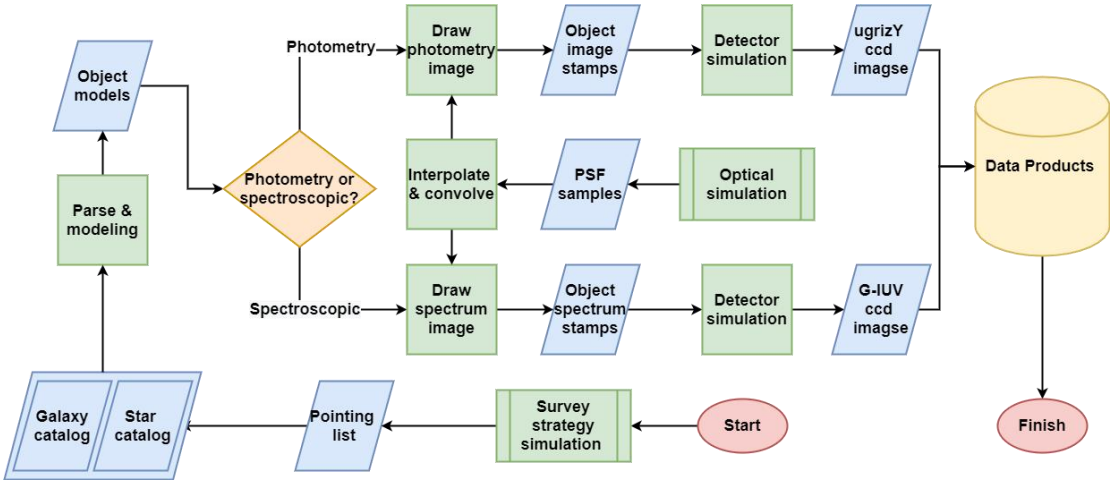


图 2.0-1 Cycle 6 仿真数据产品生成流程图。

本阶段仿真基于 Galsim 框架开展，大致流程如图 2.0-1 所示：

1) 首先根据选取的天区的信息，应用 CSST 巡天策略仿真模块得到 137 个指向（星表及指向覆盖天区如图 2.0-2 所示），每个指向生成一整个焦面（30 块探测器）的曝光图像；其中焦面坐标系定义、探测器的排布编号及对应的滤光片如图 2.0-3 所

示。引入天球坐标（RA, DEC）与焦面坐标（ximage, yimage）的映射关系，一次指向曝光收集的天球上的光子信息如图 2.0-4 所示，每次曝光的倾斜角度由巡天策略仿真模块给出。

2) 输入星表包含一个星系星表、一个恒星星表和一个类星体星表，文件格式均为 HDF5，存储结构基于 HEALPix 编号。对于每一个指向，读入视场范围中的所有目标源。基于目标源形态、亮度信息，并通过星系 SED 数据和恒星 SED 模板库匹配等方式，结合 CSST 各波段效率曲线，对目标源进行建模。

3) 独立于成像仿真框架，使用 Zemax/CODE V 软件进行整个焦面上的点扩散函数（PSF）仿真采样。在此基础上，通过插值得到每个目标源位置的 PSF 以及质心位置的变化(像场畸变)。结合以上数据及 2）中的目标源模型，得到每个目标的多色或光谱图像。

4) 使用探测器仿真模块模拟光电子收集过程，加入各类仪器效应，得到最终的仿真图像。仿真数据产品依据《CSST 主巡天 0 级图像数据结构接口设计说明》进行存储。

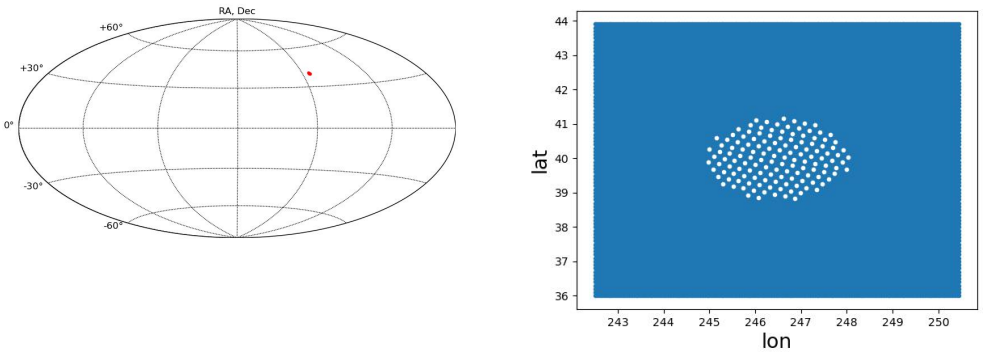


图 2.0-2 右图为曝光指向（白色）与输入恒星、河外星系星表覆盖区域（蓝色）。左图为其在赤道坐标系下的天区覆盖位置）。

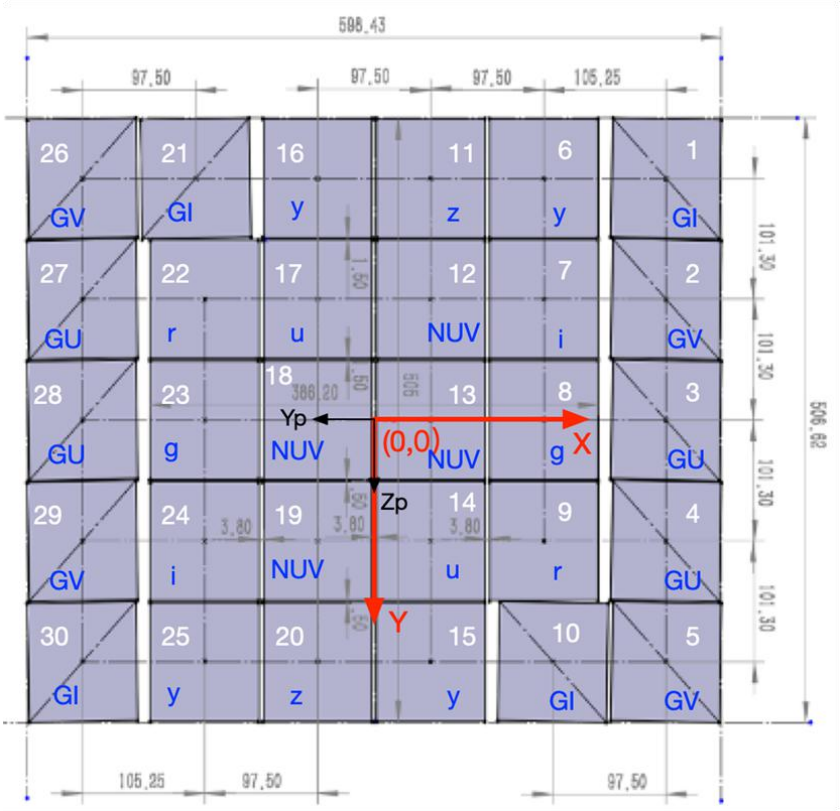


图 2.0-3 CSST 探测器焦面排布编号及各个探测器所对应的滤光片。

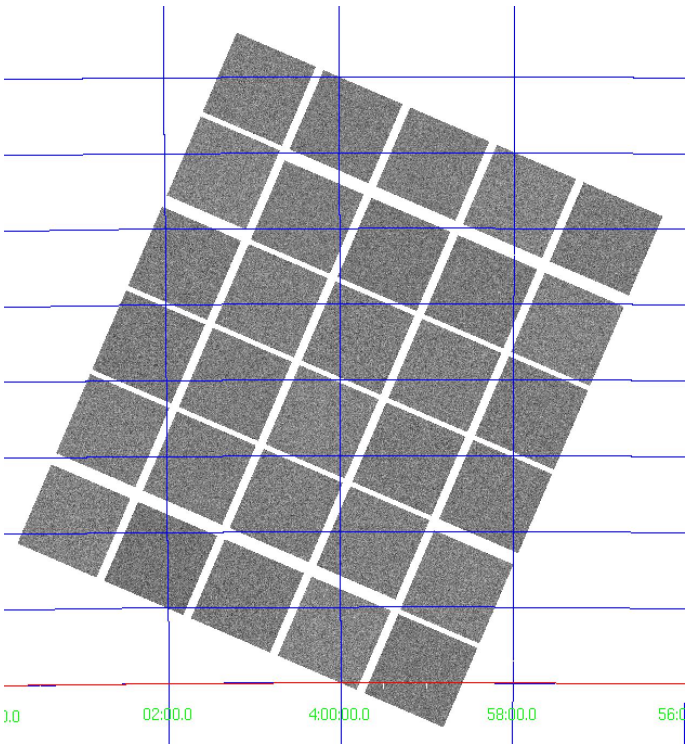


图 2.0-4 引入 WCS 与 Ra、Dec 映射关系后，探测器收集的天球上光子的视场的示意图。

2.1 输入星表

目前为了能够有效快速的进行仿真，减少程序中的 IO 和内存使用情况，输入星表均按照 HEALPix ID（HID）进行了存储。在 HDF5 格式的恒星星表数据文件中“catalog”(星系星表对应的是“galaxies”)下加入了 HID 用以读取可覆盖每个 chip 对应指向的天区,每个 HID 对应相等天区面积内的恒星/星系星表。HID 由 RA、Dec 进行计算得到，层数为 NSIDE=128。考虑到星系星表的数据量较大，星系的星表文件由多个 HDF5 文件组成，对星表文件的索引规则是利用 HEALPix 的分层索引特点，将相邻 HID 天区组成一个 bundle 文件，bundle 序号对应层数为 NSIDE=16 的 HEALPix ID。对于指定 HID 天区可以通

过移位操作快速定位其对应的 bundle 文件。

2.1.1 输入星系星表

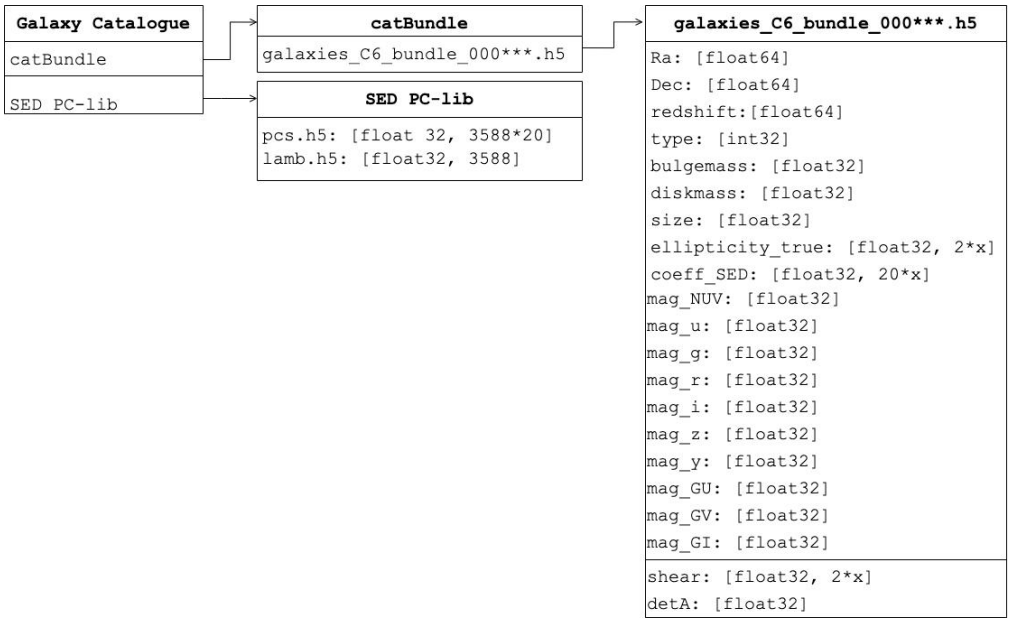


图 2.1-1 目前图像仿真流水线所输入星表的格式及包含信息。

星系星表采用 CSST-“九天”宇宙学模拟的弱引力透镜模拟星表，包含了星系的位置、形态、SED、CSST 宽波段星等和弱引力透镜剪切信号。基于 CSST-“九天”-弱引力透镜模拟星表为 Cycle 6 构建的输入星表的数据内容如图 2.1-1 所示，红移范围 z = [0.0, 2.0]，天区大小为～300 平方度，深度为星系最亮波段的视星等不大于 28 等。每个星系对应的 SED 由 Starduster 机器学习算法[1]根据星系的恒星形成历史得到。

[1] https://github.com/yqiuu/starduster

CSST-“九天”-弱引力透镜模拟星表的相关参考文献如下：

1. 星表文章：

https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.458..366L/abstract

https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...853...25W/abstract

https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022ApJ...930...66Q/abstract

2. 星表提纲：

https://docs.qq.com/doc/DQUxZY0ZFYVF5VXpJ

3. 数据连接：

pmlabs-server:

/share/simudata/CSSOSDataProductsSims/data/Catalog_C6_20221212/cat2CSSTSim_bundle/***.h5

4. 读取脚本：

```
import h5py
galaxyCatsTest = h5py.File("./galaxies_C6_bundle000347.h5", "r")
print(galaxyCatsTest.keys())
print(galaxyCatsTest["galaxies"].keys())
print(galaxyCatsTest["galaxies"]["23404"].keys())
  print(galaxyCatsTest["galaxies"]["23404"]["ra"])
```

2.1.2 输入类星体星表

C6 类星体星表采用 SIMQSO[2]程序产生 2 平方度天区、红移 <2 的类星体 SED，其红移、光度分布符合观测数据 Oguri & Marshall（2010）。类星体天球坐标由一个中心位于（RA=246.5, Dec=40,R=1.3）的圆形天区中随机采样生成。星表文件中的"igmlos"关键字用于索引相应的 SED（同时也作为类星体目标在输出星表（.cat 文件）中的 id）。

[2] https://github.com/imcgreer/simqso

1. 类星体星表参考文献如下：

https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021ascl.soft06008M/abstract

https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2010MNRAS.405.2579O/abstract

2. 类星体星表数据路径：

pmlabs-server:

/share/simudata/CSSOSDataProductsSims/data/Catalog_C6_20221212/

- 星表文件：AGN_C6_ross13_rand_pos_rmax-1.3.fits
- SED 文件：quickspeclib_ross13.fits
- SED 采样波长文件：wave_ross13.npy

2.1.3 输入恒星星表

C6 阶段恒星星表由模拟星表和 Gaia 的真实数据组成。每一个参数单独保存，因此读取时只能单独读取某一个参数。读取时参数路径为："/catalog/HHHHHH/feh"，其中 HHHHHH 为 HID，feh 为恒星的金属丰度，具体数据结构请见图 2.1-2。目前生成的恒星星表包含两

大类，由 FromTag 标签来区分。分别是 Galaxia 和 GDR3。

第一类是根据 CSST 的参数，利用 Galaxia 软件选取了特定天区 g 波段视星等亮于 35 等的恒星，天区范围为 242.5<RA<250.5，36<Dec<44。输出星表包含的信息有空间位置（RA, DEC, l, b，距离 Dist）、恒星参数（有效温度 Teff、表面重力 logg、金属丰度 feh）、星族成分（popid）和目前采用的光谱模型名称（model_tag）。这批恒星的 FromTag 为 Galaxia。这批恒星的视星等 ugriz 来源于模型，并通过已有的星等转换计算了对应的 Gaia 的三个星等 G, Bp, Rp。数据中未考虑消光。

第二类是从 Gaia DR3 中选取的同天区恒星。这些保留了 Gaia DR3 中提供的空间坐标和三个 Gaia 提供的星等，G，Bp，Rp。根据与 Galaxia 提供的恒星的 G，Bp，Rp 星等对比，对每颗 GaiaDR3 中的恒星 S_GDR3 从 Galaxia 中选取一个三个星等均一致的恒星 S_Gal，并将恒星 S_GAL 的参数及 ugriz 星等赋给 S_GDR3，以便匹配模型光谱。数据中未考虑消光。由于 GaiaDR3 恒星样本均亮于 G=21 等，因此用 GaiaDR3 中的恒星代替了 Galaxia 模拟星表中 G<21 等的恒星。这批样本用以进行位置定标与流量定标过程中的 pipeline 开发。

恒星星表中所有关键字的含义在表 2.1-1 中列出。

参数	符号	单位	备注
恒星 ID	sourceID		每颗星唯一的 ID
赤经、赤纬	RA, Dec	度	
空间位置	px,py,pz	kpc	相对于太阳
速度	vx,vy,vz	Km/s	相对于太阳
有效温度	teff	K	

金属丰度	feh	index	
表面重力	grav	index	
视星等	app_sdss_X app_gaia_X	mag	X 包含 u, g, r, i, z, G, Bp, Rp
消光	exbv_solar		模拟星表暂时未考虑消光
距离	Dist	Kpc	距离太阳
三角视差	parallax	mas	三角视差
自行	pmra, pmdec	mas/yr	ra, dec 方向自行
视向速度	RV	km/s	视向速度
数据来源	FromTag	bytes	包含 Galaxia, GDR2, ClusterS, ClusterBC/ClusterBR
适用模型	model_tag	bytes	包含 koester,phoe, MM, MC, atlas

表 2.1-1 恒星星表关键字含义。

每个恒星的 SED 根据恒星星表中包含的恒星参数，参考 YBC 恒星光谱模板库的使用条件，进行了网格匹配，为恒星星表中的每颗恒星匹配了模型光谱。由于每个模板库适用的温度、表面重力的范围不同，模板库中对应的波长分辨率各有侧重，因此保存原始的波长分辨率。为了仿真过程能够有效地进行，目前每颗星的 SED 可由恒星的有效温度（teff）、表面重力（logg）和金属丰度（feh）以及适应模板类型（model_tag）产生一组字符串，指向模板库中对应该组恒星参数的格点所对应的 SED。模板库保存为 HDF 文件格式，读取时结构路径为："/SED/YYY"，其中 YYY 为模板库中每组恒星参数对应的 SED。该星对应的模型中波长读取的结构路径为："/SED/wave/XXX"，其中 XXX 为该模型的名称符号，与恒星星表中的适用模型“model_tag”一致，目前仿真只采用了 phoe 模板库光谱。具体模板库文件数据结构请见

图 2.1-3。波长的单位为 A，流量的单位为 erg/s/cm^2/A。

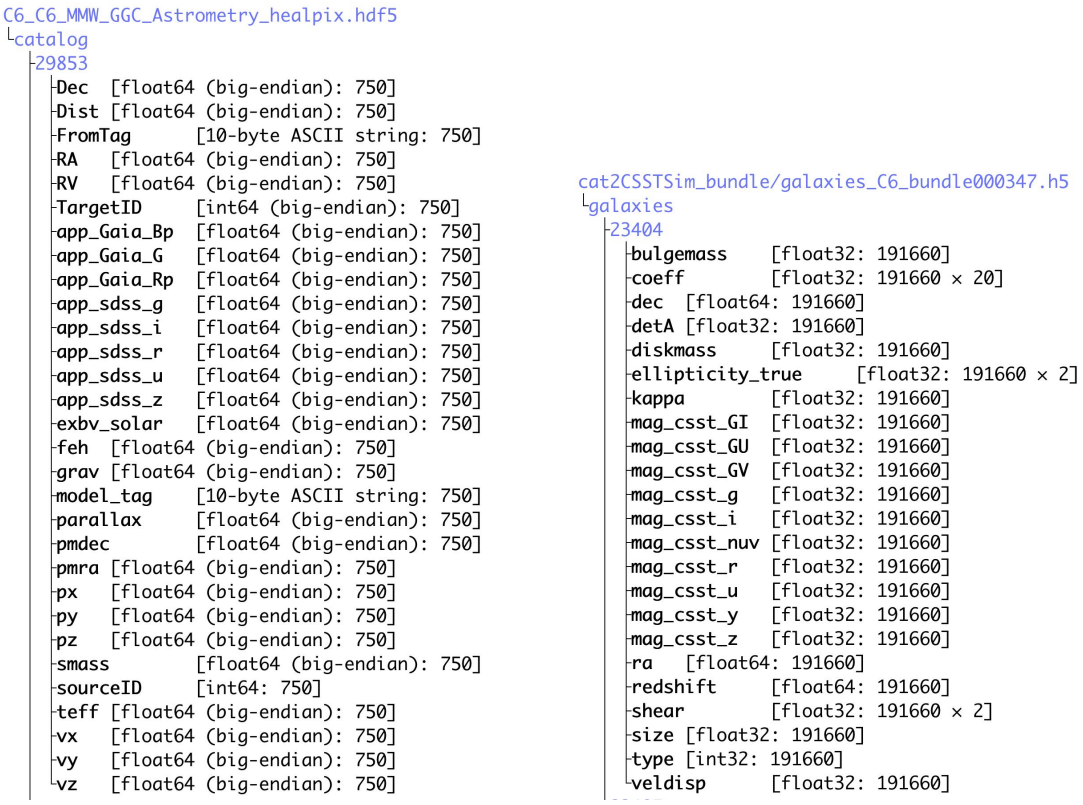


图 2.1-2 星表数据结构。左图为恒星星表，右图为星系星表。

范例一，恒星星表读取：

```
import h5py as  h5
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# open the data file of the catalog
fn = "MMW_Cluster_D20_healpix_21.hdf5"
F_data = h5.File(fn,'r')
# read the information and plot
RA = np.array(F_data["/catalog"]["154446"]["RA"]).reshape(1,-1)
Dec = np.array(F_data["/catalog"]["154446"]["Dec"]).reshape(1,-1)

fig = plt.figure(figsize=(6,4))
plt.plot(RA, Dec,'k.',alpha=0.2)
plt.show()
```

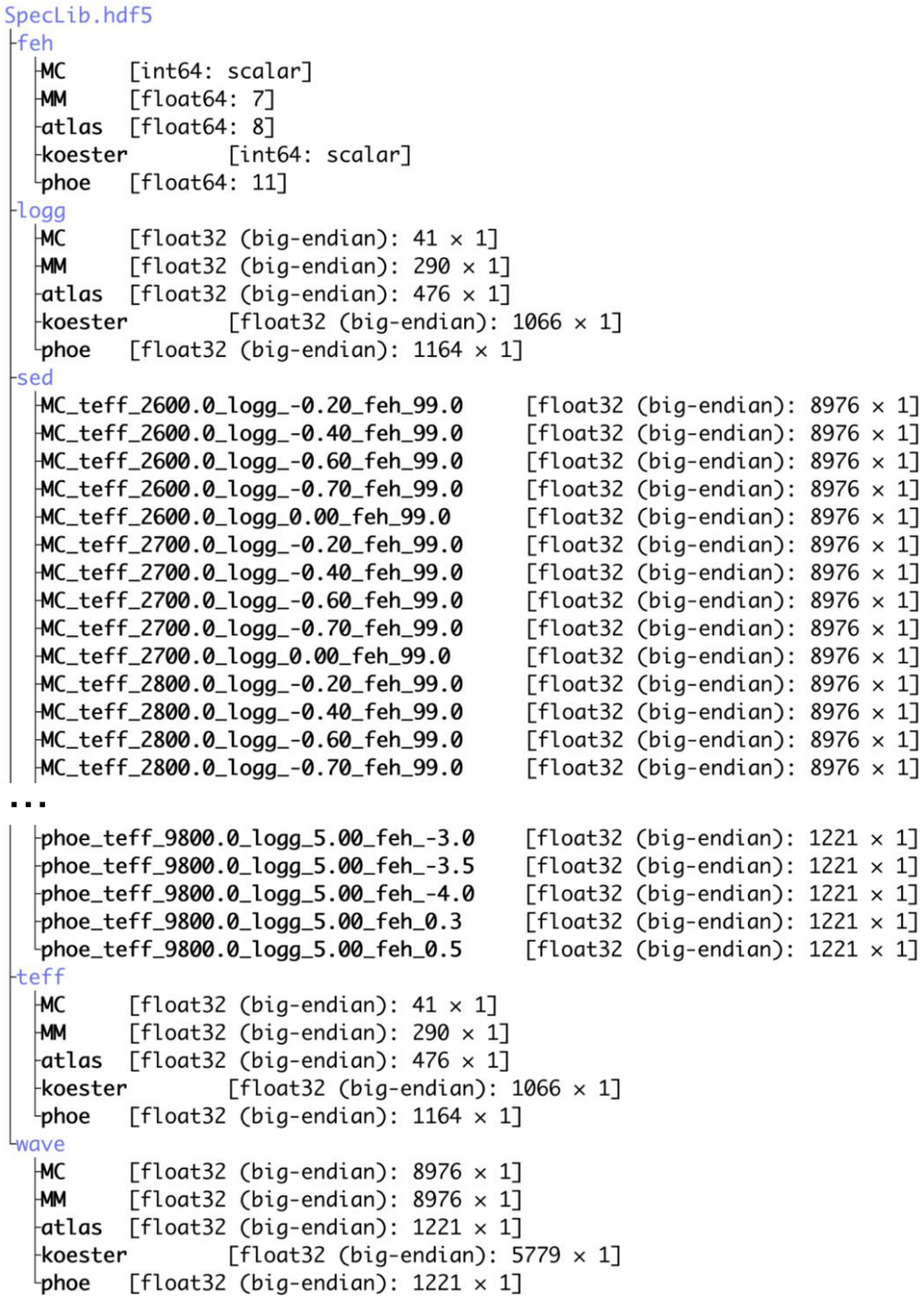


图 2.1-3 恒星光谱模板库数据文件结构。

范例二，由恒星参数生成对模板库中应该恒星的 SED 字符串

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
import h5py as h5
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
def tag_sed(h5file, model_tag, teff=5000, logg=2, feh=0):
```

```
    model_tag_str = model_tag.decode("utf-8").strip()
    teff_grid = np.unique(SpecLib["teff"][model_tag_str])
    logg_grid = np.unique(SpecLib["logg"][model_tag_str])
    feh_grid = np.unique(SpecLib["feh"][model_tag_str])
    close_teff = teff_grid[np.argmin(np.abs(teff_grid-teff))]
    close_logg = logg_grid[np.argmin(np.abs(logg_grid-logg))]
    if (model_tag_str=="koester") or (model_tag_str=="MC"):
        close_feh = 99
    else:
        close_feh = feh_grid[np.argmin(np.abs(feh_grid-feh))]

    path = model_tag_str+f"_teff_{close_teff:.1f}_logg_{close_logg:.2f}_feh_{close_feh:.1f}"
    wave = h5file["wave"][model_tag_str]
    flux = h5file["sed"][path]
    return path, wave, flux

# here is the example to generate the sed for one star
# first read the SED library
SpecLib = h5.File("SpecLib.hdf5",'r')
# generate the corresponding path in the SED library <path>, the wavelength <wave> and the flux
<flux>, assuming the FromTag of the star is b"atlas          " with teff 6430, logg 4.125 and feh -2
path, wave, flux = tag_sed(SpecLib, b"atlas          ", teff=6430,logg=4.125, feh=-2 )
print(path)
SpecLib.close()
```

2.2 点扩展函数仿真

2.2.1 工程仿真和 PSF 采样

在轨望远镜的 PSF 应在多项误差因素共同影响下计算得到。以光学设计模型为基础，依次在模型中加载镜面加工、装调、CCD 不平整度、1g 重力变化和热变形误差后计算得到静态 PSF 数据。在静态误差基础上加载微振动误差和精密稳像残差两项动态误差，计算得到最终动态 PSF 数据。如图 2.2.1-1 所示。具体误差模型如下：

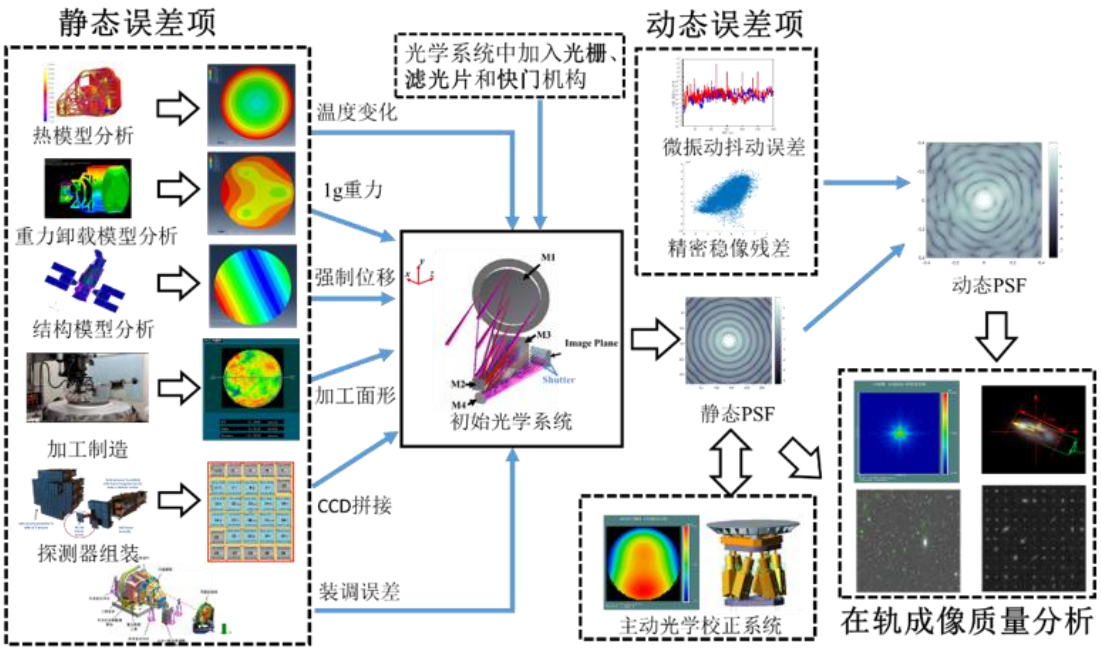


图 2.2.1-1 在轨望远镜集成模型示意图

1. 静态误差模型：

(1) 光学设计模型：

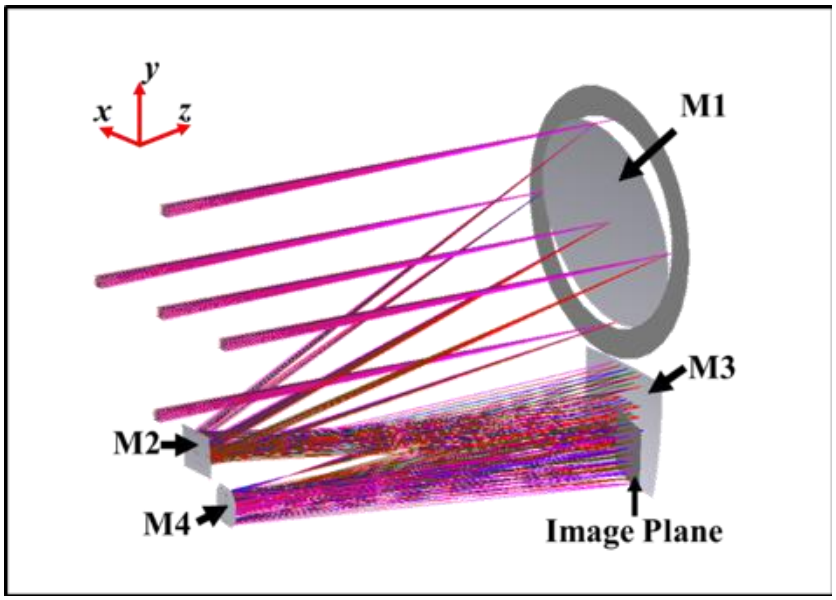


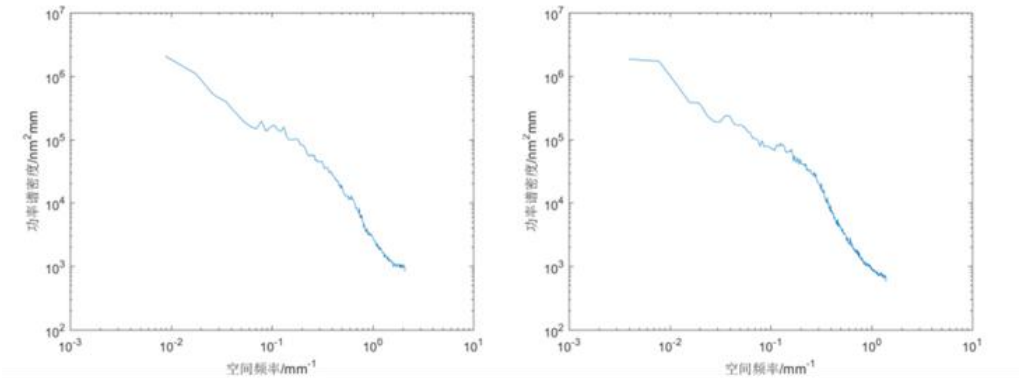
图 2.2.1-2 CSST 光学系统光路示意图

系统由四片反射镜 M1-M4 组成，其中，M1 和 M2 采用二次曲面，M3 采用自由曲面，M4 采用平面，F 数为 14，通光口径为 2m，M2-M4 镜面积分别约为 M1 的 1/20、2/5 和 1/20，有效视场为 1.1°×1°。图 2.2.1-2

所示为望远镜系统光路图，经过优化设计，系统全视场波像差平均值优于λ/30，全视场点扩散函数 80%能力集中度平均值小于 0.1"，达到衍射极限水平。

（2）镜面加工误差：

在加工完成前，可通过数值模拟的方式预估加工制作产生的镜面形貌变形参数。参照现有测试结果统计镜面加工误差频率成分函数分布特性，将形貌变形划分成低、中高频两段。采用 Zernike 多项式拟合低频成分，采用函数模拟器生成中高频成分，再将低频和中高频面形误差仿真数据融合。图 2.2.1-3 为主镜功率谱密度测试与仿真计算结果对比。



测试PSD　　仿真PSD

图 2.2.1-3 主镜功率谱密度测试与仿真结果对比

（3）装调误差：

将装调公差分配表内的误差量依次引入主镜和三镜六个自由度上，然后通过调整次镜和像面的偏心与倾斜量优化装调公差，最终引起的 RMS 退化量为 0.013 波长。

（4）CCD 不平整度误差：

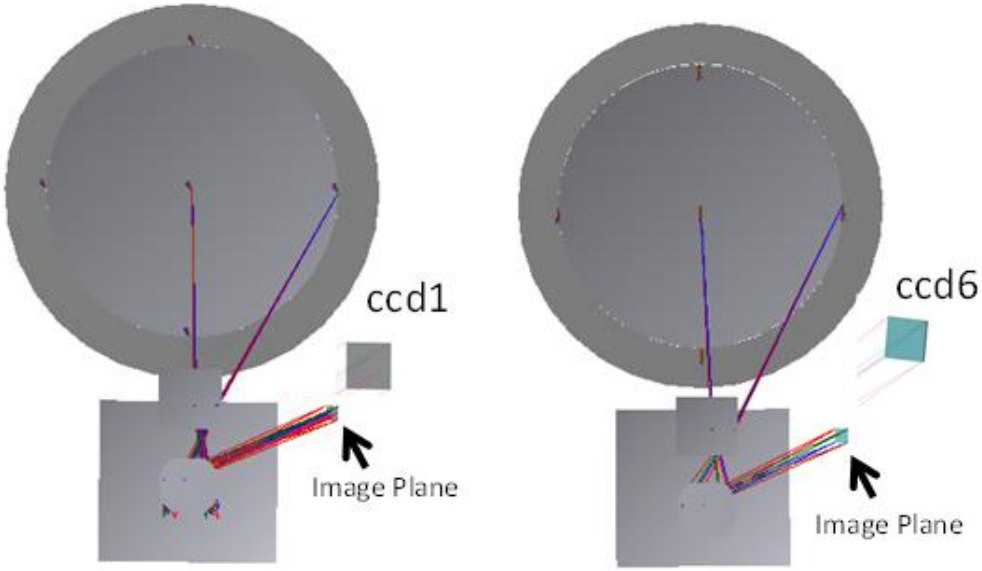


图 2.2.1-4 不同 CCD 探测器对应子系统示意图

按照探测器布局将光学设计系统划分 30 个子光学系统，每个子系统像面代表一片 CCD 探测器。在各子系统像面的光轴方向上引入小于等于 60μm 的 CCD 不平面度误差。图 2.2.1-4 所示为不同 CCD 探测器对应子系统示意图。其中多色成像系统在像面前设置滤光片结构，并将焦面后移 1.63mm，如图 2.2.1-5 所示。

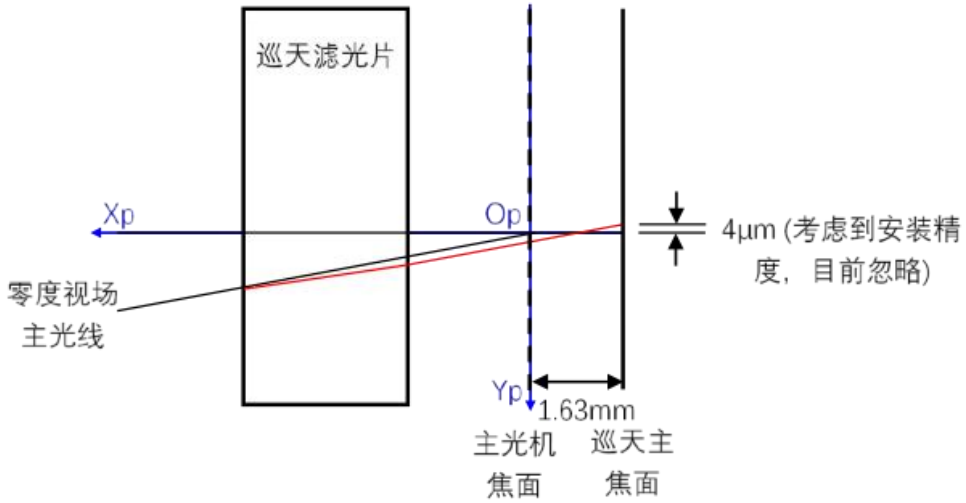


图 2.2.1-5 多色成像系统滤光片结构与焦面调整示意图

（5）重力变化误差：

CSST 入轨后重力场会发生 1g 变化，次镜和三合一镜安装于主桁架前端框上，主镜、三镜安装于主基板上，主桁架在重力场变化时会产生变形，均会对各镜面位置和面形产生影响。

6.热变形误差：

光学舱在轨工作时，外热流及光学舱内热源导致的光机结构变形会引起反射镜位置和面形变化，造成光学成像质量下降，在轨极端温度工况下，通过有限元仿真分析得到各反射镜刚体位移和面形变化。图 2.2.1-6 所示为各镜在重力、温度、加工和安装不平度误差下面形变化示意图。

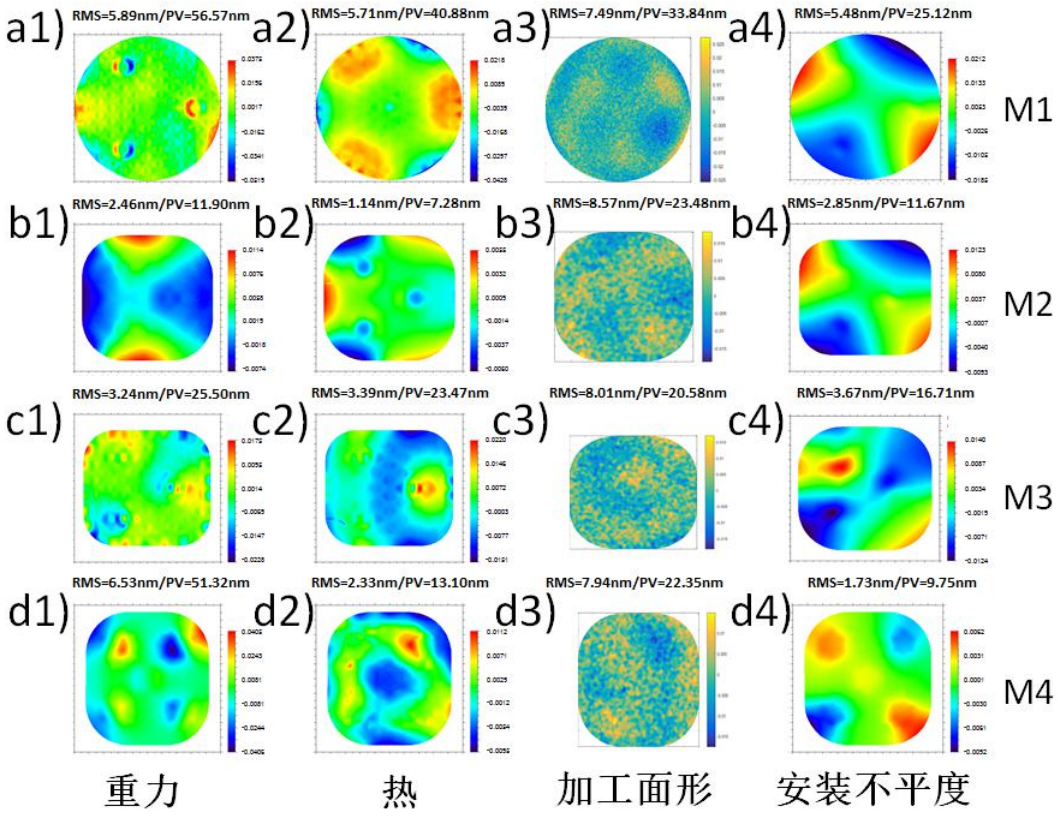


图 2.2.1-6 光学舱各镜面型变化与重力、温度、加工、安装等因素的关系

2. 动态误差模型：

CSST 需要在轨凝视观测 150-300s，动态误差主要有两个，微振动环境导致的光轴高频抖动误差和精密稳像残余的低频光轴晃动误差。

（1）微振动抖动误差：

微振动振源频率主要为线谱和随机谱组成，频率主要集中在 8~300Hz，微振动环境将导致反射镜产生高频的、微小位移的抖动，在此过程中反射镜面形变化可以忽略。X 轴和 Y 轴平动方向综合效果为 0.01″（统计 3σ）。

（2）精密稳像残差：

精密稳像控制环路在光学舱平台姿控、振动抑制和多功能光学设施振动抑制系统各自稳定工作的基础上，主要解决进一步补偿多功能光学设施的光轴扰动残差，使之满足 CSST 的天文观测要求， X 轴和 Y 轴平动方向综合结果为 0.05″（统计 3σ）。

设 CSST 凝视时间 300s，采样时间为 1ms 计算 M1-M4 以及后端焦面五个部分的刚体位移。将各镜及焦面各时刻下刚体位移加载至光学系统中，计算得到各时刻下采样点上的 PSF 图像、质心和主光线位置。在凝视时间内，质心位置变化量远小于主光线抖动量（统计 3σ）,全视场 PSF 形状变化可以忽略。将此前计算的各视场静态 PSF 沿各自主光线抖动轨迹二维插值叠加，获得采样点处的动态 PSF。

3. PSF 采样数据说明：

本轮仿真按照图 2.0-3 定义的坐标系统来产生各波段内的焦面 PSF

数据库。为了保证 PSF 的插值精度，在每片 CCD 视场内均匀采样了 30x30 个视场位置，具体分布如图 2.2.1-7 所示。同时，为了加入 PSF 的更详细的颜色信息，我们根据探测器的效率曲线对每片 CCD 的所在波段细分了四个子波段来实现 PSF 的亚波段采样。图 2.2.1-8 左展示了 CCD-1 上 4 个采样波段的选择，对应的 PSF 形态分布如图 2.2.1-8 右展示。最终点扩散函数仿真部分共产生了全视场内 27000 个位置上 108000 个 PSF 的形态分布。

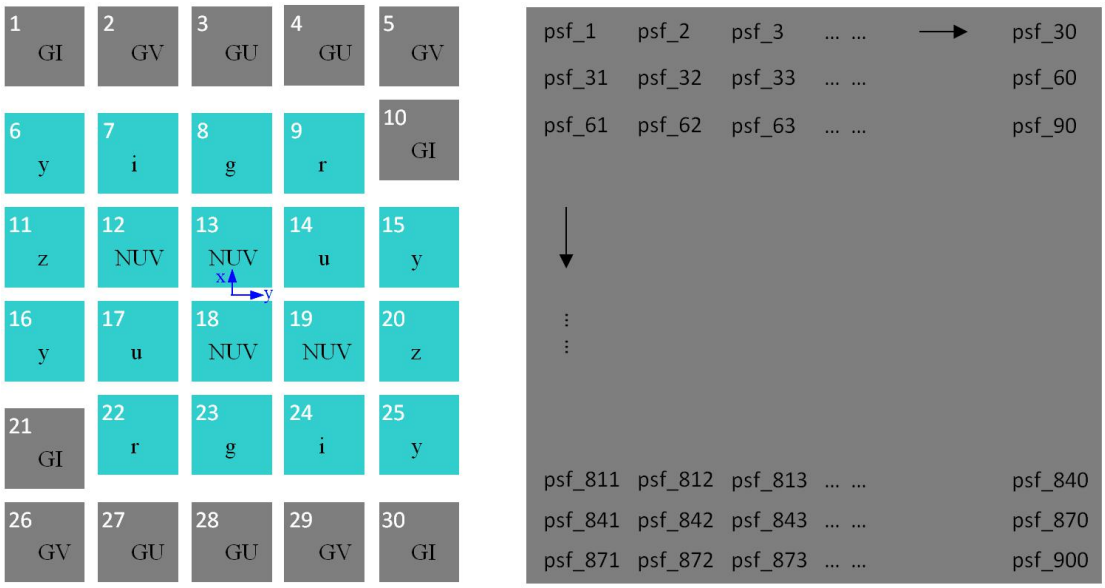


图 2.2.1-7 左：CSST 探测器焦面排布及波段分布；右：在单片 CCD 上 30x30 个 PSF 采样位置示例图。

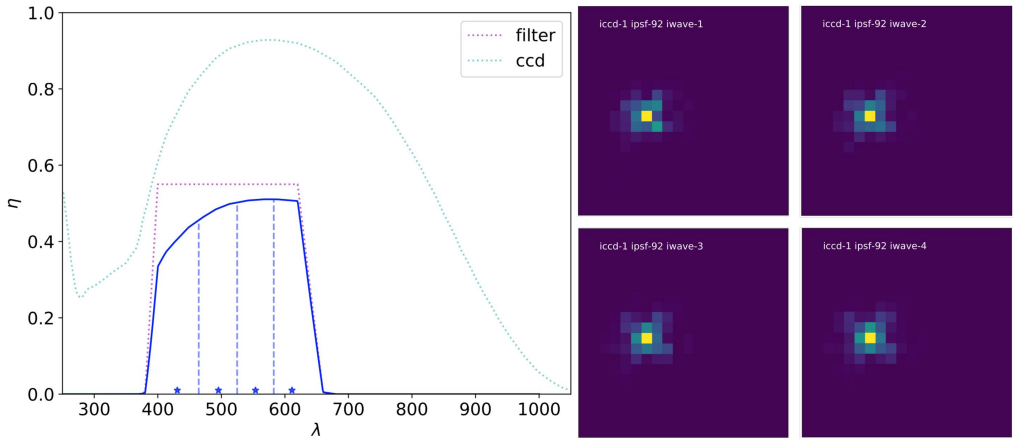


图 2.2.1-8 左：CCD-1 上多色 PSF 的采样波段示例图；右：在四个采样子波段内的 PSF 形态示例图。

2.2.2 像场畸变

像场畸变模型的构建同样基于实验室获得的点扩散函数模型。在没有像场畸变的情况下，天球坐标经过 WCS 投影映射到 UV 平面，进而得到天体对应的像元坐标 (x_0, y_0)；而在像场畸变存在的情况下，UV 平面到像元坐标之间的映射关系发生改变，导致天体对应的像元坐标为 (x, y)。为此，我们通过对 PSF 的质心位置进行二元四次样条插值构建 (x_0, y_0) 与 (x, y) 的映射关系。

我们首先利用 PSF 采样数据构建 UV 平面到像平面的差值映射函数 $(x, y) = (fx0(u,v), fy0(u,v))$。为此，我们先构建整个焦平面的差值函数，然后计算该差值函数在每片 CCD 上的残差，进而构建残差的差值函数。两个差值函数之和作为最终的差值结果。下图 2.2.2-1 和 2.2.2-2 为差值函数 $fx0$ 和 $fy0$ 所预言像平面坐标与输入数据相比较得到的残差分布。

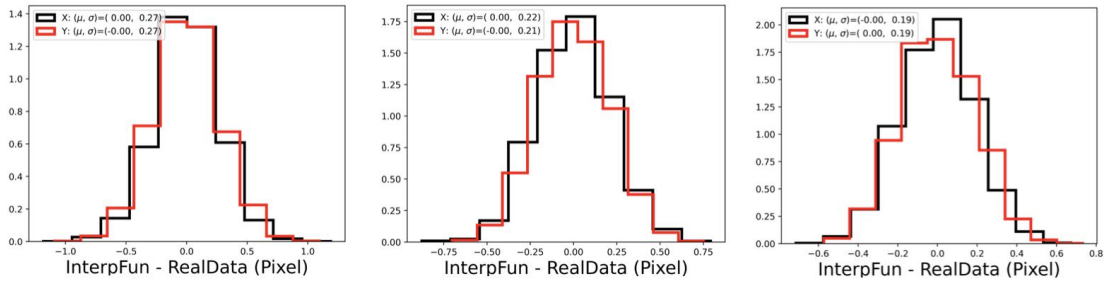


图 2.2.2-1：从左至右分别为差值多项式为三阶、四阶和五阶的残差直方图分布。

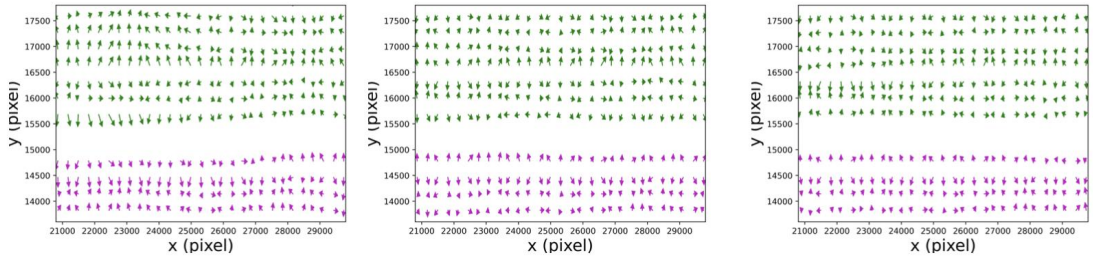


图 2.2.2-2: 从左至右分别为差值多项式为三阶、四阶和五阶的残差二维分布。

接下来，我们在天球坐标上构建一套等间隔、均匀的网格矩阵(RA_Grid, DEC_Grid)，并基于仿真 WCS 设置和 CCD 排布，计算该天球网格在纯 WCS 投影下的 UV 平面坐标 (u, v) 和像平面坐标 (x_0，y_0)。由此，我们可利用差值函数$fx0$和$fy0$得到包含像场畸变的像平面坐标 (x，y)。最终，通过构建 (x_0，y_0) 与 (x，y) 之间的差值函数，即得到像场畸变模型。为了提高图像模拟的效率，我们将该模型以字典形式存储，并保存为一个 PICKLE 文件，供主程序进行调用。图 2.2.2-3 左边为整个建模过程的示意图，右边为整个像平面的像场畸变模型。

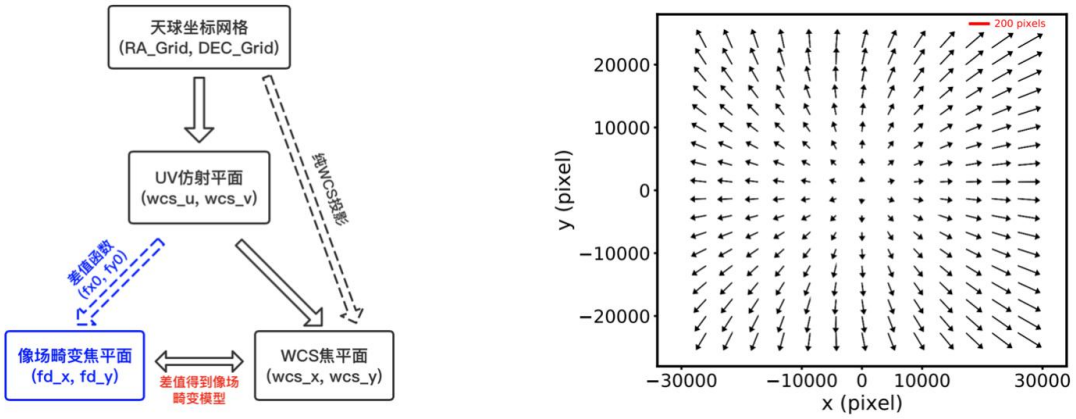


图 2.2.2-3：（左）像场畸变建模过程示意图；（右）整个像平面的像场畸变模型。

图 2.2.2-4 为像场畸变存在与否两种情况下的测试模拟图像，左图为没有考虑像场畸变时的模拟图像，右图中的模拟星像则为考虑像场畸变后的实际位置，红色圆圈表示天体直接经过 WCS 投影得到的理想像元坐标（x_0，y_0）。

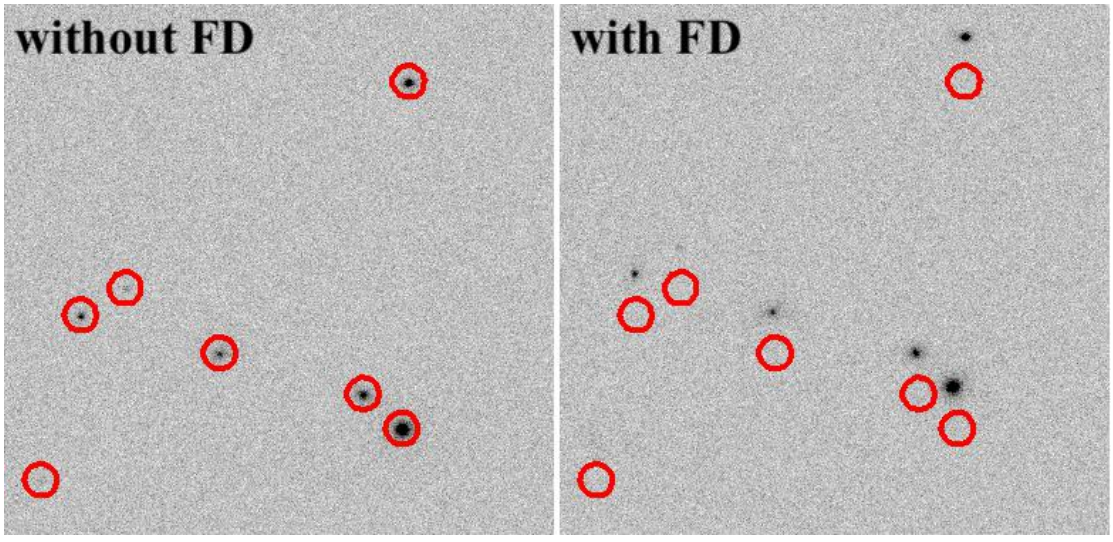


图 2.2.2-4 像场畸变存在与否两种情况下的模拟图像。

像场畸变不仅会影响天体的坐标，也会改变天体的形状（面亮度分布）。接下来，我们计算由像场畸变导致的星像的椭率变化，相关计算可参考文章 Zhang et al 2019。仅包含 WCS 的焦平面像素位置为(wcs_x, wcs_y)，包含像场畸变的位置为(fd_x, fd_y)，两者之间满足：

$$fd_x = f_x(wcs_x, wcs_y)$$
$$fd_y = f_y(wcs_x, wcs_y)$$

其中 f_x 和 f_y 为整体像场畸变模型的差值多项式。两者的形状畸变矩阵为

$$\begin{pmatrix} \mathrm{d}f_x \\ \mathrm{d}f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial_x f_x & \partial_y f_x \\ \partial_x f_y & \partial_y f_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathrm{d}x \\ \mathrm{d}y \end{pmatrix}$$

其中\partial{x}和\partial{y}表示对 x 和 y 的偏导数。该矩阵可以分解为如下形式：

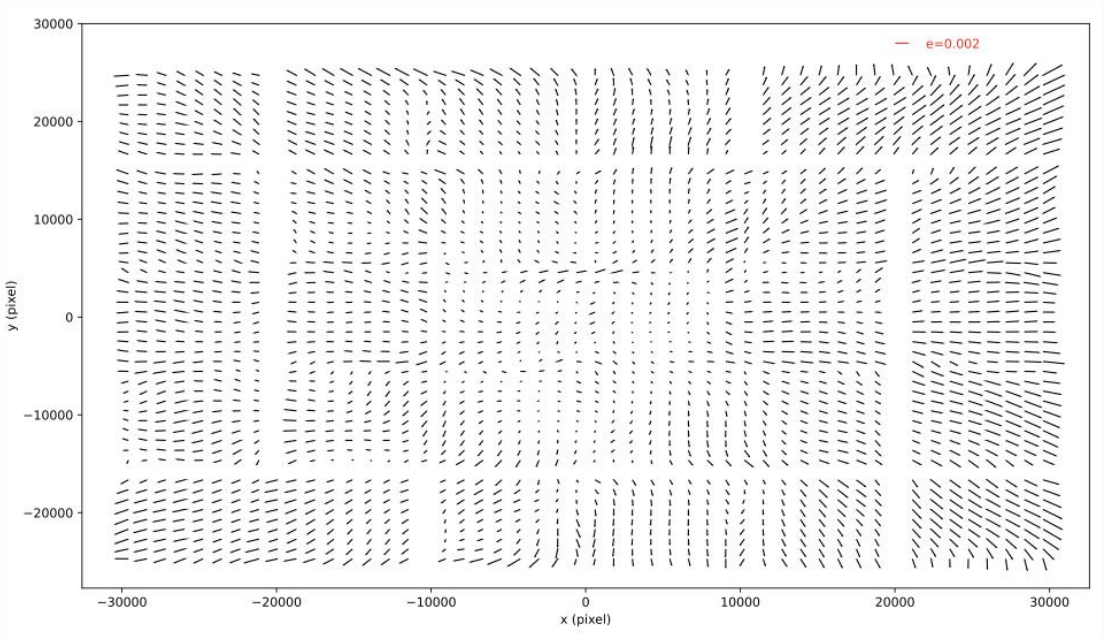
$$\begin{pmatrix} \partial_x f_x & \partial_y f_x \\ \partial_x f_y & \partial_y f_y \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} 1-g_1 & -g_2+\theta \\ -g_2-\theta & 1+g_1 \end{pmatrix}$$

其中 M 为全局的缩放因子，(g_1, g_2)为像场畸变导致的天体椭率变化，\theta 为旋转角。计算可得：

$$g_1 = +(\partial_y f_y - \partial_x f_x)/(\partial_y f_y + \partial_x f_x)$$
$$g_2 = -(\partial_x f_y + \partial_y f_x)/(\partial_y f_y + \partial_x f_x)$$

我们利用上述方程计算焦平面任意位置处像场畸变导致的椭率变化，下图为椭率在整个焦平面的分布。可见，对于焦平面边缘区域，

椭率变化明显，其值大于 0.2%（与宇宙剪切值相当）；中心区域椭率较小。需要注意的是，本版数据中尚未加入像场畸变对形状的改变，但功能已存在于仿真软件中，将在后续一个版本数据中更新。



2.2.3 PSF 插值

在 Cycle 6 图像仿真阶段，为了在模拟的科学图像中包含能够准确描述望远镜像质特性的点扩散函数，我们基于实验室点扩散函数场，采用合适的插值算法生成目标源位置处的点扩散函数，并将其与目标源卷积来生成焦面多色光子分布。在当前版本的图像仿真中，结合插值算法精度和速度的综合考虑，优先使用了经典的 IDW 插值方法来准确给出目标源位置处的点扩散函数。IDW 插值方法的主要思想是在一个连续变化的点扩散函数场中，任一位置处的点扩散函数可以由其周边相邻的 N 个点扩散函数采样来插值给出，对应的插值权重与目标源跟采样样本的距离成反比，即 $w_i = [1/D^{\zeta}(x_i, x_0)] / \sum_i^N [1/D^{\zeta}(x_i, x_0)]$。

其中 $D(x_i, x_0)$和$^{\zeta}$分别表示目标源与第 i 个相邻点扩散函数采样的距离和幂律参数。为了检验 IDW 算法对图像仿真精度的影响，我们利用 2.2.3-1 左图中 30x30 的实验室数据来插值 20x20 采样位置处的点扩散函数，并将插值后的点扩散函数分布与实验室采样做一对一的交叉检验。2.2.3-1 右图展示了基于上述插值算法的交叉检验结果，其中对应参数为$(^{\zeta}, N) = (2, 4)$。图中蓝色短棒表示实验室点扩散函数采样的椭率大小分布，红色则表示插值后的点扩散函数分布，结果显示插值得到的椭率分布与实验室采样整体保持一致。图 2.2.3-2 中分别展示了 CCD-1 视场内随机三个位置处的实验室点扩散函数（ORG）、对应位置的插值点扩散函数（IDW）以及两者的相对百分偏差，即(IDW - ORG)/ORG. 可以看到对图像像素的检查结果显示插值算法精度的相对误差在<5%以内。为了进一步量化点扩散函数插值方法的插值精度，图 2.2.3-3 比较了同一位置处插值点扩散函数分布与实验室点扩散函数的相对差异。左图是插值后点扩散函数椭率大小的相对偏差，统计结果表明插值对椭率测量的相对误差~5%以内。右图是点扩散函数尺度大小的相对差异 $dR=(R_{IDW}-R_{ORG})/R_{ORG}$，其中 $R=Q_{11} + Q_{22}$. 结果表明在测试天区插值点扩散函数椭率大小的分布与实验室样本在统计上基本一致，尺度大小的相对误差能保持在 dR<1%的精度范围内。

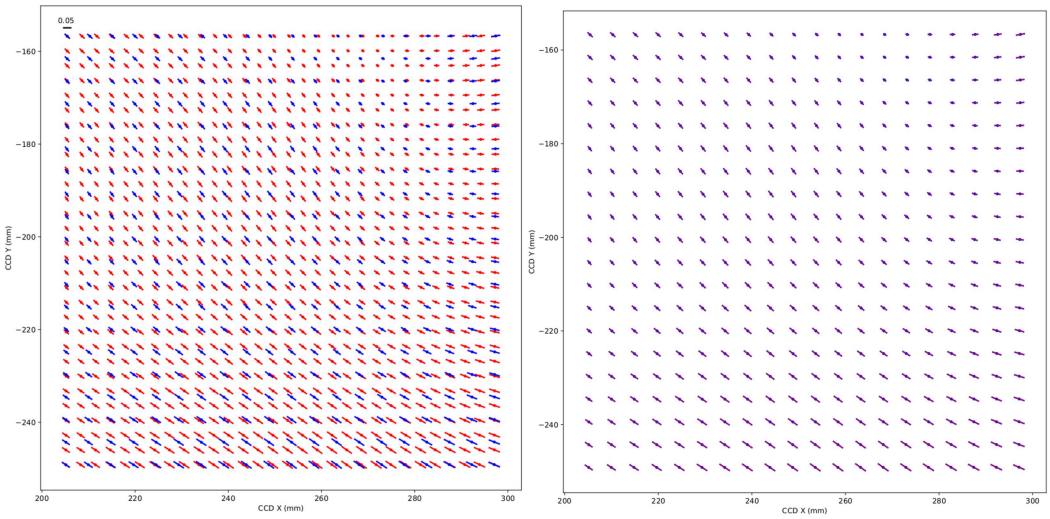


图 2.2.3-1 左图，CCD-1 视场内点扩散函数的椭率分布示例图，其中椭率由点扩散函数面亮度的二阶矩（Q_{ij}）定义为$の=(Q_{11} - Q_{22} + ヨ2Q_{12}) / (Q_{11} + Q_{22})$。右图，点扩散函数插值方法的交叉检验示例图。蓝色是实验室点扩散函数，红色是插值后点扩散函数。

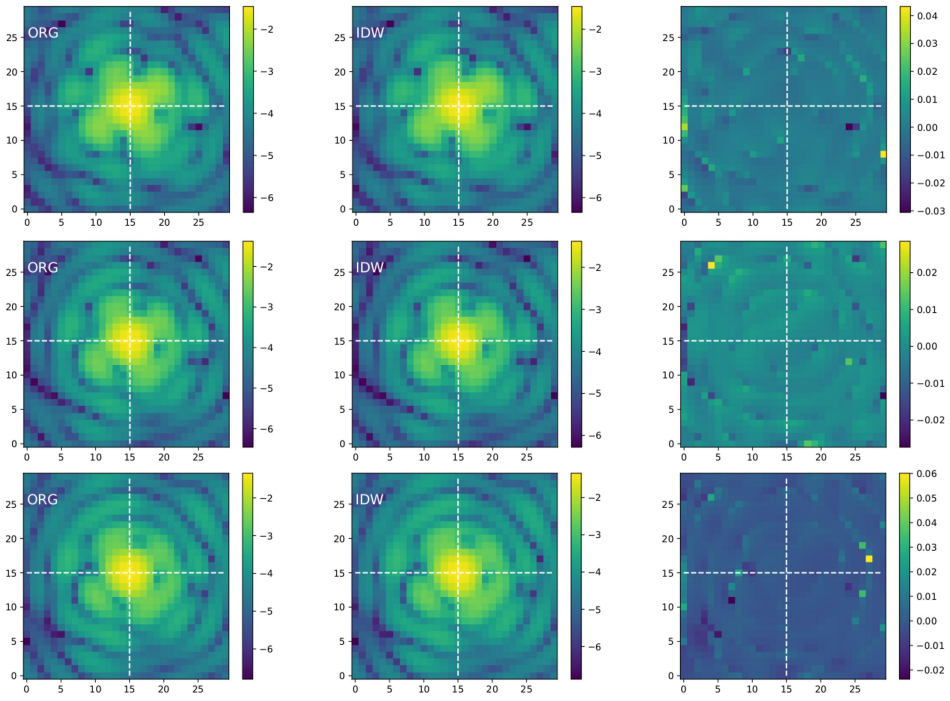


图 2.2.3-2 点扩散函数插值结果示例图。左，实验室点扩散函数采样。中，IDW 插值后点扩散函数分布。右，点扩散函数分布的相对百分误差。

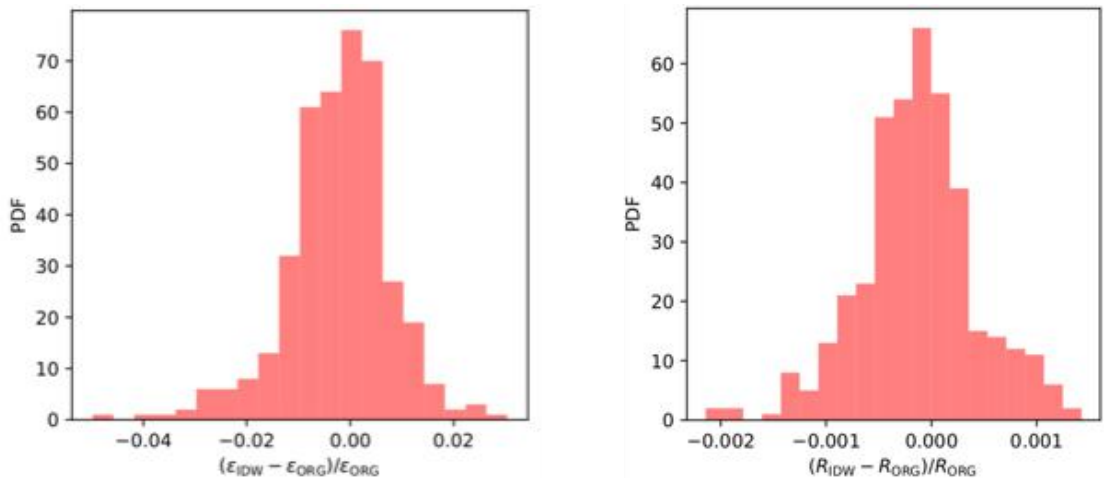


图 2.2.3-3 左图，插值后点扩散函数椭率大小的相对偏差。右图，点扩散函数大小的相对偏差。

2.3 多色成像仿真

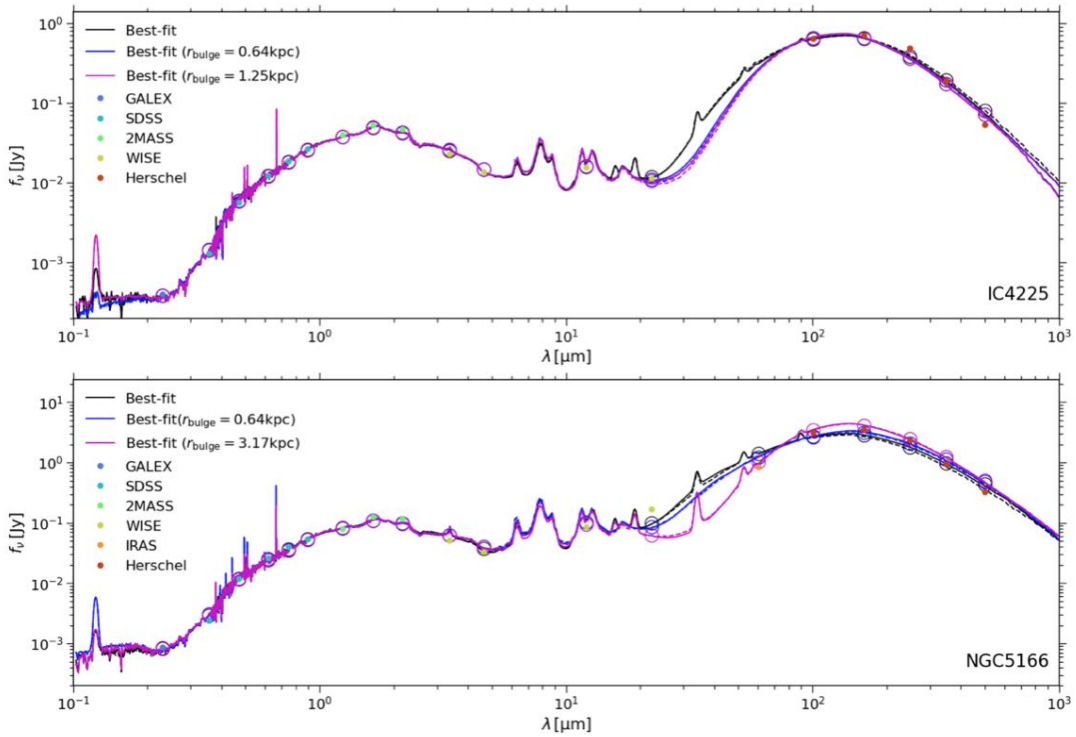


图 2.3-1 Starduster 模型产生的星系多波段 SED 示意图

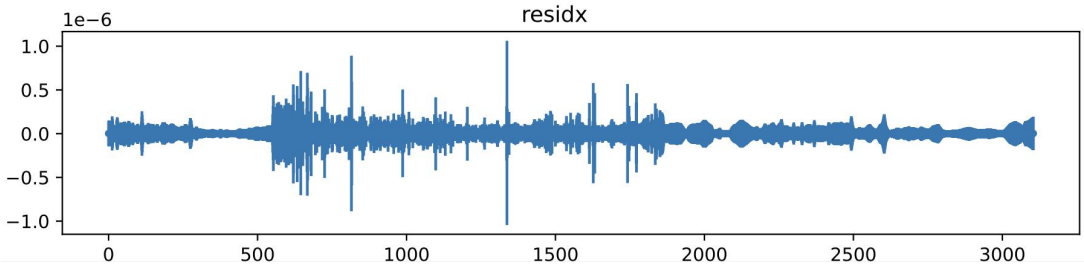


图 2.3-2 星系 SED 经 PCA 方法压缩前后的残差对比

利用 Galsim 产生上述输入星表中恒星和星系的面亮度分布，通过与仿真插值得到的 PSF 进行卷积，并添加由像场畸变导致的位置偏差以及各种不同的仪器效应等，得到多波段模拟测光图像。模拟过程简述如下：

（0）模拟中星系的光谱是根据半解析星表记录的每个星系的恒星形成历史，采用成熟的星族合成模型（FSPS）和 IMF 模型（Charbier），利用辐射转移和机器学习相结合的星系光谱模型 Starduster（Qiu & Kang 2022）快速产生星系的 rest frame SED。Starduster 模型可以较好的重现观测中的星系多波段 SED（UV 到射电）如图 2.3-1 所示。考虑到仿真软件对 SED 的光谱分辨率的需求，每个星系大约有 3588 个采样点(波长范围从 60nm-1100nm，0.29nm 间隔)，产生的星表数据量过大，Cycle 6 星表采用主成分分析的方法（PCA）对产生 SED 进行压缩，可以有效的将每个星系的数据点压缩至 20，且恢复后的 SED 统计上几乎与原始 SED 一致。图 2.3-2 展示了随机抽取红移 0 处约 10000 个星系比较恢复后的 SED 与原始输出的 SED 残差比较，结果显示两者的残差基

本在 10^（-6）量级。利用 CSST 的效率曲线，计算出 CSST 7 个滤光片的视星等。计算过程中考虑到红移效应、星系内禀消光以及星系际介质消光。对于恒星星表，以 SDSS g 波段视星等为参考，利用星表中信息所匹配出的 SED 计算 CSST 7 个滤光片的视星等。

（1）模拟中星系的面亮度分布包含两种成分：指数盘分布和 De Vaucouleurs 核球分布(其 Sersic 指数分别为 1 和 4)。各成分的半光半径、椭率以及核球亮度与星系总亮度的比值（核球比 B/T 由核球及盘的质量比计算得出）由输入星表提供。恒星面亮度分布为 Delta 函数。

（2）结合 WCS 投影以及像场畸变模型，确定目标源在焦面的位置。目前的模拟中，尚未分开考虑 4 个子波段中的像场畸变以及其对星系形状造成的影响。

（3）将星系和恒星的亮度分布与在目标源焦面位置插值所得的 4 个子波段内 PSF 卷积（在 2.2 中各 PSF 采样波段内，与目标源所在位置插值所得的 PSF 进行卷积），并根据 SED 及综合效率曲线加权叠加，最终获得卷积之后的图像。

（4）根据目标源星等及 SED，结合望远镜综合效率计算出各子波段内的光子数，利用 Galsim 的 photon shoot 方法在 CCD 网格上生成电子分布，调用电子弥散仿真模块后加入 2.5 节所述的各类仪器效应并读出。

模拟产生包含上述效应的各波段模拟图像、星表以及对应宇宙线图像。图像为 FITS 格式，星表为 ascii 格式。星表包含对应 CCD 中的星系和恒星的基本信息，每列说明如下：

obj_ID: 天体编号

ID_chip: CCD 编号

Filter: CCD 对应的滤光片

xImage: 像素 x 坐标

yImage: 像素 y 坐标

ra: 观测时刻赤经

dec: 观测时刻赤纬

ra_orig: 赤经（deg; J2000.0）

dec_orig: 赤纬 (deg; J2000.0)

z: 红移

mag: 该滤光片对应的视星等

obj_type: 0——星系；1——恒星；2——类星体

e1: 内禀椭率分量（星系）

e2: 内禀椭率分量（星系）

g1: 剪切分量

g2: 剪切分量

kappa: 透镜 convergence

pmra: 赤经方向自行（*cos(dec)）

pmdec: 赤纬方向自行

RV: 视向速度

parallax: 三角视差

model_tag: 恒星模板类型

teff: 有效温度

logg: 表面重力

feh: 金属丰度

bulgemass: 星系核球质量

diskmass: 星系盘质量

detA: 透镜放大率

2.4 无缝光谱仿真

无缝光谱模拟的基本原理如图 2.4-1 所示，光谱的特性利用 Trace 表示，按照 aXe configure 的定义分别用两个多项式描述光谱，一个多项式描述光谱的空间位置，即Δx 和Δy 之间的关系；另一个多项式是描述光谱的波长与空间位置的关系，即Δλ（波长）与ΔL（光谱空间长度）的关系。在目前模拟中的这两个多项式具采用一阶线性的多项式描述，位置的多项式与色散的轴有 0.5°的夹角，光谱的各级像位置关系如图 2.2-5 所示，具体参数可以参考程序中的配置文件。

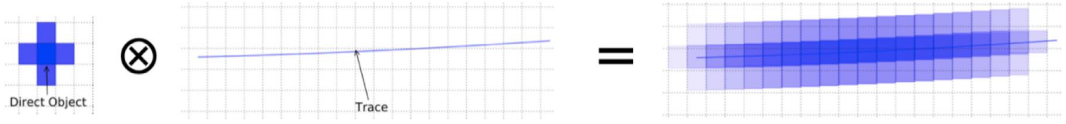


图 2.4-1 无缝光谱模拟示意图。

模拟的主要流程图 2.4-2 所示,在无缝光谱仿真模块中，输入的星

表与成像完全一样，在分光开始之前形成的不同位置光子的累积操作与成像部分一致，两个模块共用一个接口，无缝光谱仿真模块根据光谱的分光特性再对累积的光子进行分光处理。

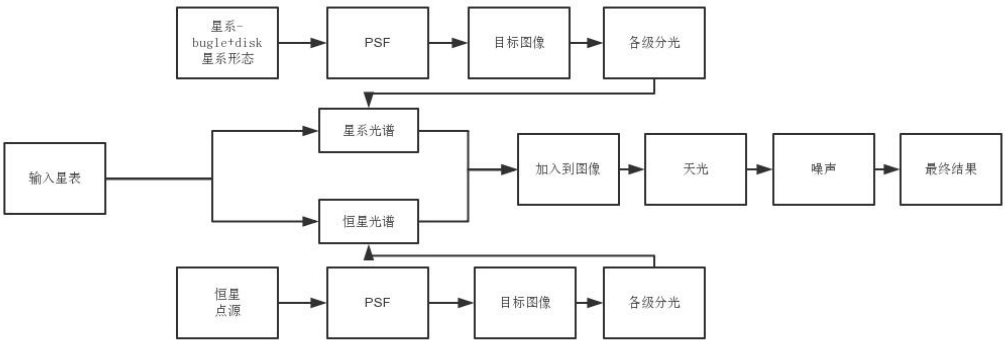


图 2.4-2 无缝光谱模拟流程图

无缝光谱的主要指标如表 2.4-1 所示，目前的仿真阶段对于光谱的模拟包含 0、+1 级次的工作级次光谱以及-2、-1 和+2 级次的非工作级次光谱，光谱的特性在《巡天模块无缝光谱组件成像质量仿真分析报告 20200619》的报告中的有所描述，报告中按照图 2.4-3 所示给出了光谱两个级次的示意图。

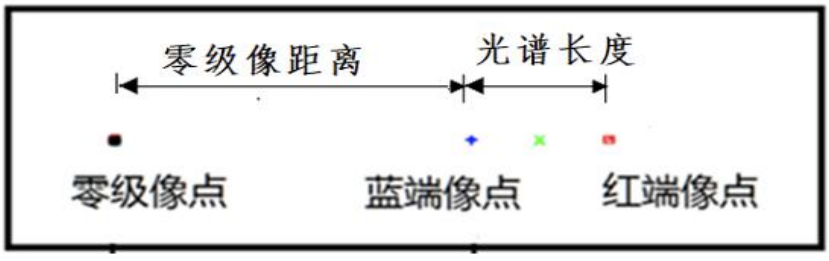
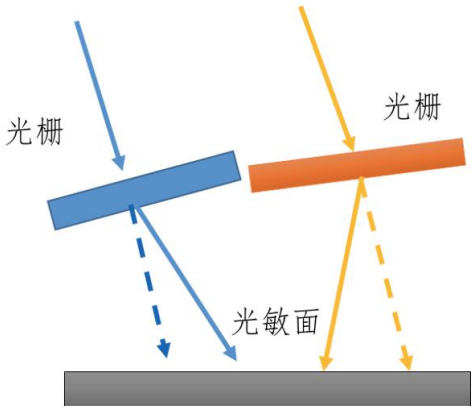


图 2.4-3 无缝光谱模拟零级、一级像位置关系。

波段	中心波长 (nm)	波段起 (nm)	波段止 (nm)	中心波长分辨率 R
GU	337	255	410	287
GV	525	400	640	232
GI	810	620	1000	207

表 2.4-1 无缝光谱波段划分及中心波长分辨率。

按照 HST 的 grism 的经验，各级光谱在焦面上的形态是位置相关的函数，这样需要在焦面上不同位置的光谱的轨迹。 CSST 无缝光谱设计中还有一些独特之处，由于 CSST 单块探测器的面积较大，一块探测器上覆盖一块光栅会影响成像像质，所以在设计上一块 CCD 上采用了两块光栅的设计，如图 2.4-4 所示。天光所姜海娇提供了一份光栅分光的光学仿真数据，数据中包含了-2，-1，0，1，2 等 5 个级次的数据，整个焦面总共有 12 块光谱区域，每个光谱区域又由两块光栅覆盖组成，所以整个光谱区域被分隔成 24 个光栅区域，如图 2.4-4 所示。在每一个光栅的光学仿真数据中提供了 12 个位置的分光数据，每个位置提供了-2，-1，0，1，2 等 5 个级次位置的数据，以及位置对应的波长数据，表 2.4-2 给出了一部分数据的示例，第一列提供的是波长，第一行提供的是视场位置（y,x）。 图 2.4-5 给出了整个焦面数据采样点的分布和选出了一块 GI 波段的一个探测器的数据采样点的分布，从图 2.4-5 右图可以看出，不同级次（除 0 级外）的分光轨迹看上去比较线性。



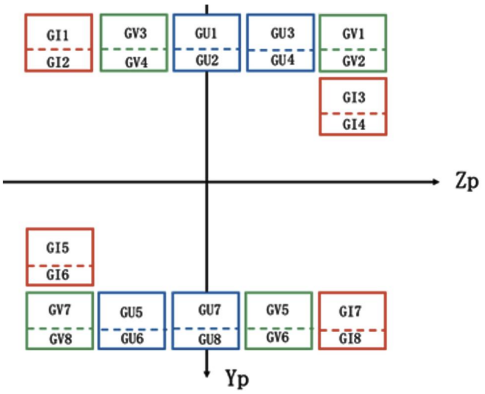


图 2.4-4 光栅在焦面上分布

波长(um)\ 位置（y,x）	0.3195	-0.62	0.3195	-0.565	0.3195	-0.51
0.62	-156.41	-77.873	-156.42	-104.47	-156.43	-131.09
0.63652	-156.41	-78.054	-156.42	-104.65	-156.43	-131.26
0.65304	-156.41	-78.235	-156.42	-104.83	-156.43	-131.43
0.66957	-156.41	-78.417	-156.42	-105	-156.43	-131.61
0.68609	-156.41	-78.598	-156.42	-105.18	-156.43	-131.78
0.70261	-156.41	-78.779	-156.42	-105.35	-156.43	-131.95
0.71913	-156.41	-78.96	-156.42	-105.53	-156.43	-132.12
0.73565	-156.41	-79.141	-156.42	-105.71	-156.43	-132.29
0.75217	-156.41	-79.322	-156.42	-105.88	-156.43	-132.46
0.7687	-156.41	-79.504	-156.42	-106.06	-156.43	-132.63
0.78522	-156.41	-79.685	-156.42	-106.24	-156.43	-132.8
0.80174	-156.41	-79.866	-156.42	-106.41	-156.43	-132.97
0.81826	-156.41	-80.047	-156.42	-106.59	-156.43	-133.14
0.83478	-156.41	-80.228	-156.42	-106.76	-156.43	-133.32
0.8513	-156.41	-80.41	-156.42	-106.94	-156.43	-133.49
0.86783	-156.41	-80.591	-156.42	-107.12	-156.43	-133.66
0.88435	-156.41	-80.772	-156.42	-107.29	-156.43	-133.83
0.90087	-156.41	-80.954	-156.42	-107.47	-156.43	-134
0.91739	-156.41	-81.135	-156.42	-107.65	-156.43	-134.17
0.93391	-156.41	-81.317	-156.42	-107.82	-156.43	-134.34
0.95043	-156.41	-81.498	-156.42	-108	-156.43	-134.52
0.96696	-156.41	-81.68	-156.42	-108.17	-156.43	-134.69
0.98348	-156.41	-81.861	-156.42	-108.35	-156.43	-134.86
1	-156.41	-82.043	-156.42	-108.53	-156.44	-135.03

表 2.4-2 光学仿真数据样例

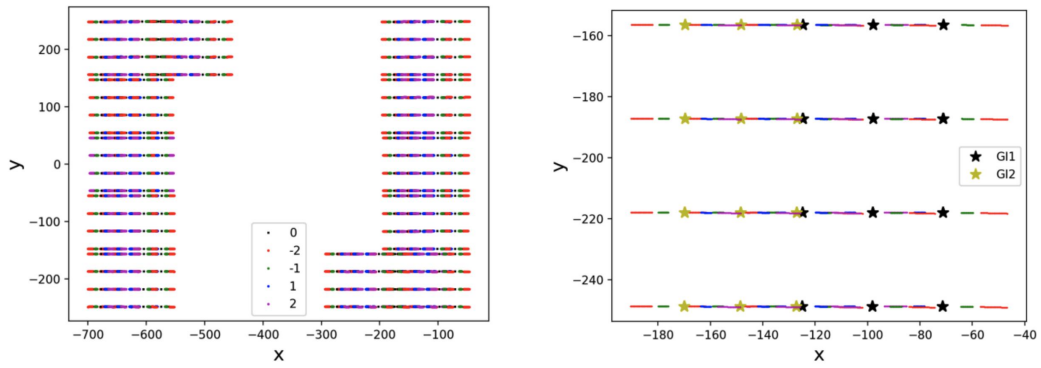


图 2.4-5 整个焦面数据采样点的分布（左）和一块探测器两块光栅采样点分布（右）。

从光学模拟的数据可以看出，各级光谱的轨迹看上去是比较线性的，对于单个位置光谱轨迹的拟合我们采用线性轨迹进行拟合，对于整个面采用二元二次多项式对于整个面的参数进行拟合，因此，光谱轨迹的数学描述如下：

$$dy = a_0 + a_1 \cdot dx$$

$$a_n(i,j) = b_{n,0} + b_{n,1} \cdot i + b_{n,2} \cdot j + b_{n,3} \cdot i^2 + b_{n,4} \cdot i \cdot j + b_{n,5} \cdot j^2$$

$$\begin{aligned} dy(i,j,dx) = {} & b_{0,0} + b_{0,1} \cdot i + b_{0,2} \cdot j + b_{0,3} \cdot i^2 + b_{0,4} \cdot i \cdot j + b_{0,5} \cdot j^2 \\ & + dx \ (b_{1,0} + b_{1,1} \cdot i + b_{1,2} \cdot j + b_{1,3} \cdot i^2 + b_{1,4} \cdot i \cdot j + b_{1,5} \cdot j^2) \end{aligned}$$

波长与位置的关系也是近似于线性变化，因此对于单个位置的波长与位置的关系也采用线性方程进行拟合，对于整个面采用二元二次多项式对于整个面的参数进行拟合，该关系采用如下方法进行描述：

$$\lambda = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot dp$$

$$\alpha_n(i,j) = \beta_{n,0} + \beta_{n,1} \cdot i + \beta_{n,2} \cdot j + \beta_{n,3} \cdot i^2 + \beta_{n,4} \cdot i \cdot j + \beta_{n,5} \cdot j^2$$

$$\lambda(i,j,dp) = \beta_{0,0} + \beta_{0,1}\cdot i + \beta_{0,2}\cdot j + \beta_{0,3}\cdot i^2 + \beta_{0,4}\cdot i\cdot j + \beta_{0,5}\cdot j^2 + dp\ (\beta_{1,0} + \beta_{1,1}\cdot i + \beta_{1,2}\cdot j + \beta_{1,3}\cdot i^2 + \beta_{1,4}\cdot i\cdot j + \beta_{1,5}\cdot j^2)$$

按照上述的方法分别对每一个位置当前级次的空间位置进行拟合，在对所有位置拟合得到的参数在整个光栅面内进行拟合，得到了基于空间位置的光谱轨迹的拟合方程；同样，对于波长和光谱位置的拟合，同样采用上述方法，首先进行局部点拟合，然后在整个光栅面内进行拟合。下面给出了拟合的结果。

图 2.4-6 至 2.4-8 给出了不同级次不同光栅光谱轨迹的拟合的结果，图中每个点代表一个采样位置，该位置不同级次的在波长范围内有 24 个采样点，24 个采样点包含（x,y,lambda)信息，拟合的结果与输入的结果相减，再进行统计得到每个采样位置光谱轨迹拟合的均值和 sigma，即为图中每个点的值。从图中可以看出利用整个光栅面的数据拟合出的结果和输入结果相差很小，每个采样位置的所有点的位置偏离均值基本都在 0 的附近，统计的误差也都在一个像元以内。

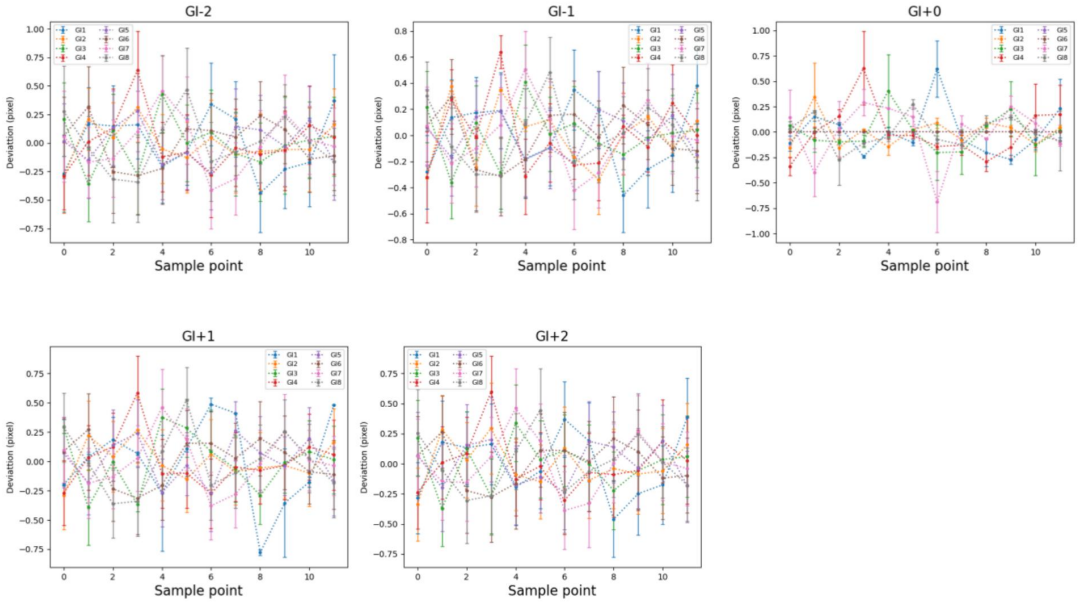


图 2.4-6 光栅 GI（-2,-1,0,+1,+2 级次）光谱轨迹拟合结果（拟合结果与输入数据对比）

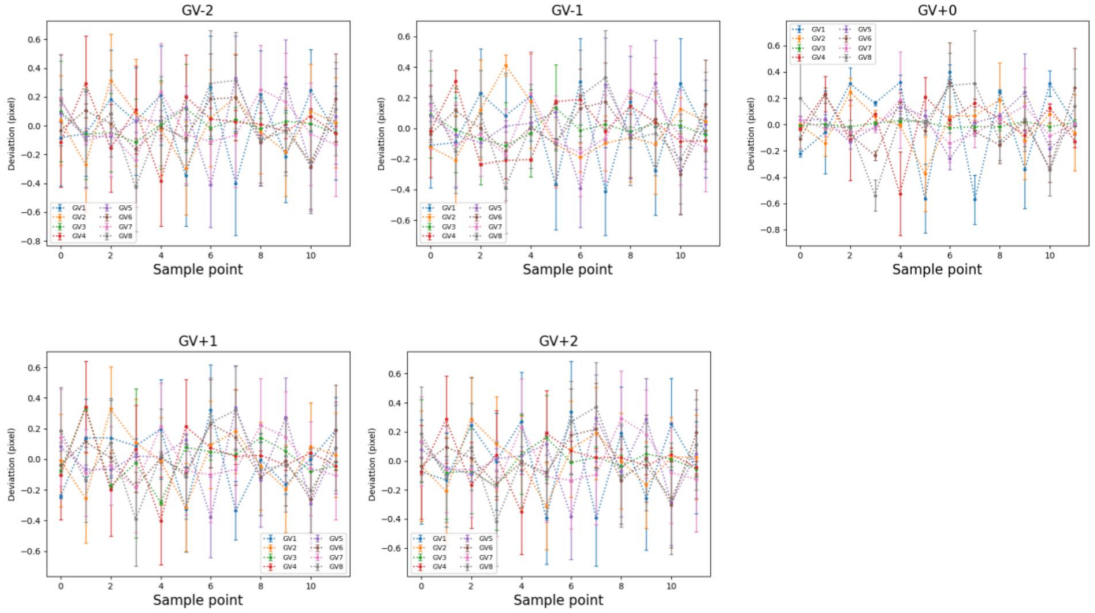


图 2.4-7 光栅 GV（-2,-1,0,+1,+2 级次）光谱轨迹拟合结果（拟合结果与输入数据对比）。

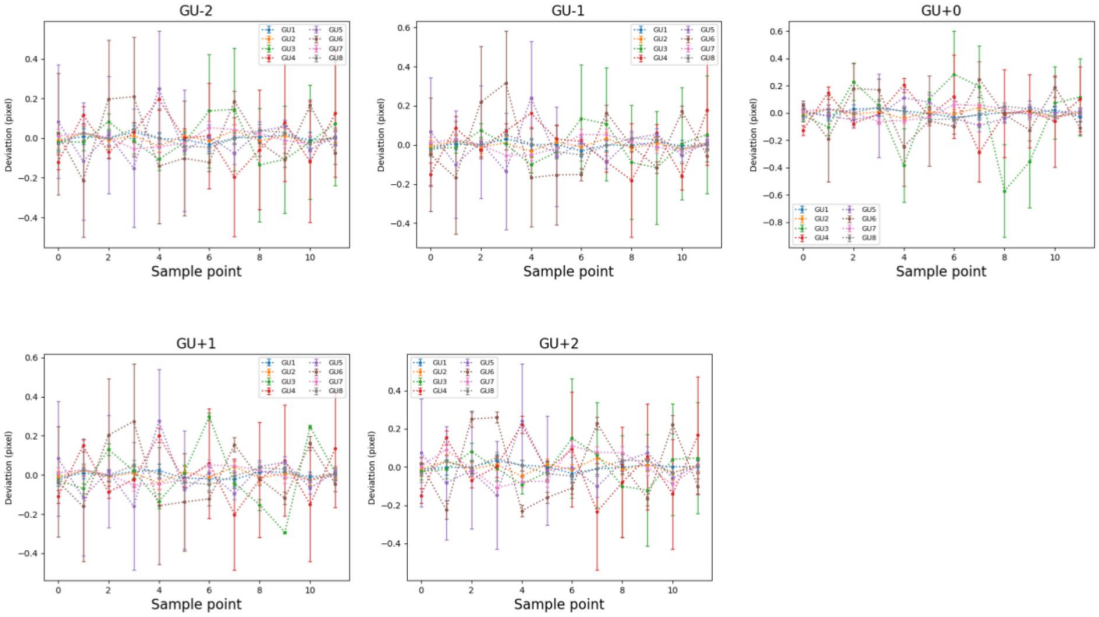


图 2.4-8 光栅 GU（-2,-1,0,+1,+2 级次）光谱轨迹拟合结果（拟合结果与输入数据对比）。

图 2.4-9 至 2.4-11 给出了波长和轨迹位置的拟合结果。同样是先对每个采样点进行拟合，然后对整个光栅面进行拟合，拟合中利用 sigma-clip 剔除掉了偏离比较大的点。从拟合结果可以看出，利用拟合参数计算的波长与输入的波长之差的均值均在 0 的附近，从误差上看，各个波长-2 级的拟合结果最大，在 20 埃以内，这个数值仍小于 -2 级光谱的分辨率（如果 PSF 不变的话，-2 级光谱约为 1 级光谱分辨率的一半，可分辨的最小单元超过 20 埃）。

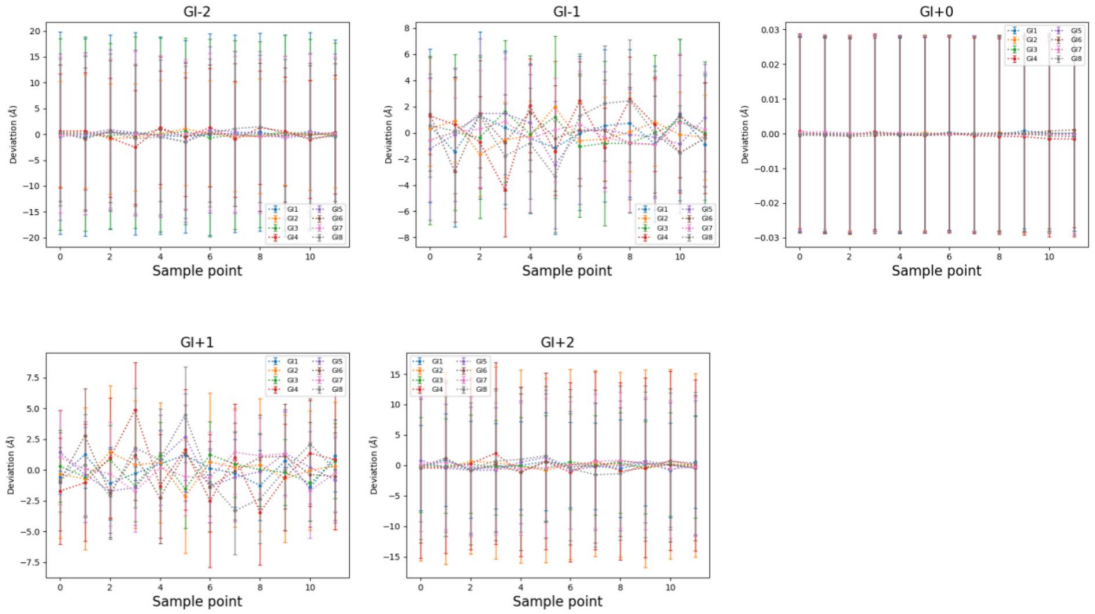


图 2.4-9 光栅 GI（-2,-1,0,+1,+2 级次）波长位置拟合结果（拟合结果与输入数据对比）。

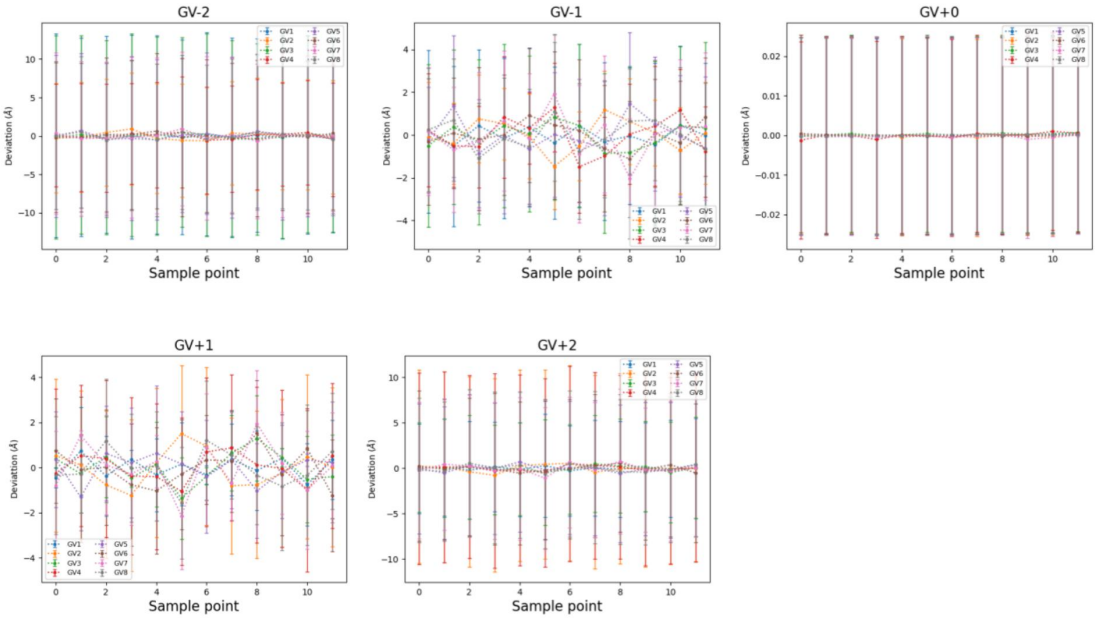


图 2.4-10 光栅 GV（-2,-1,0,+1,+2 级次）波长位置拟合结果（拟合结果与输入数据对比）。

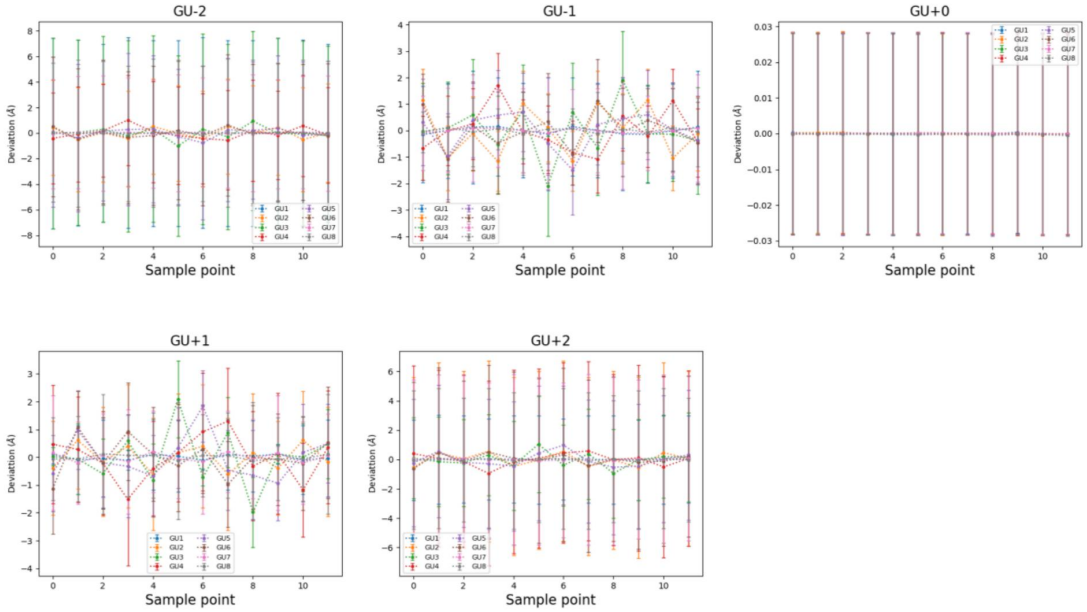


图 2.4-11 光栅 GU（-2,-1,0,+1,+2 级次）波长位置拟合结果（拟合结果与输入数据对比）。

图 2.4-12 是光栅 0 级和 1 级通光效率曲线（工作级次）。此外，图像中还加入了高级次（非工作级次）的光谱，分别为 2 级，-1 级和-2 级，由于缺乏高级像的数据，模拟中 1 级和-1 级，2 级和-2 级图像以 0 级为中心对称，并且 2 级和-2 级的长度是 1 级和-1 级的两倍，1 级与-1 级相同，图 2.4-13 给出了非工作级次整个系统的通光效率。2 级，-1 级和-2 级 PSF 的 80%能力集中度的半径分别为 0.545", 0.746" 和 2.161"。在巡天模块光谱成像区域设计中，同一块 CCD 包含两块光栅，两块光栅对向色散，这一部分仿真在本版模拟中并未加入。图 2.4-14 给出了各个光栅的 sensitivity 曲线，用于提取光谱是标定光谱的流量。

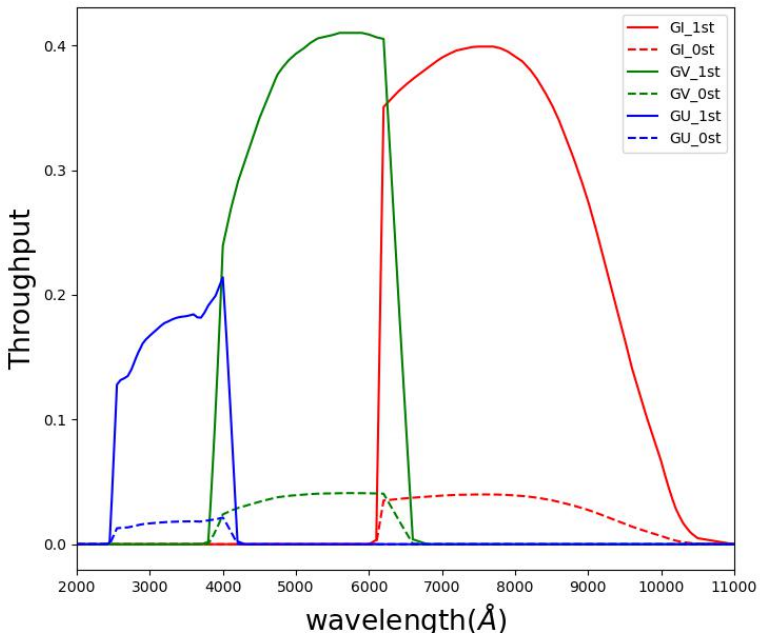


图 2.4-12 无缝光谱光栅 0 级和 1 级谱的通光效率。

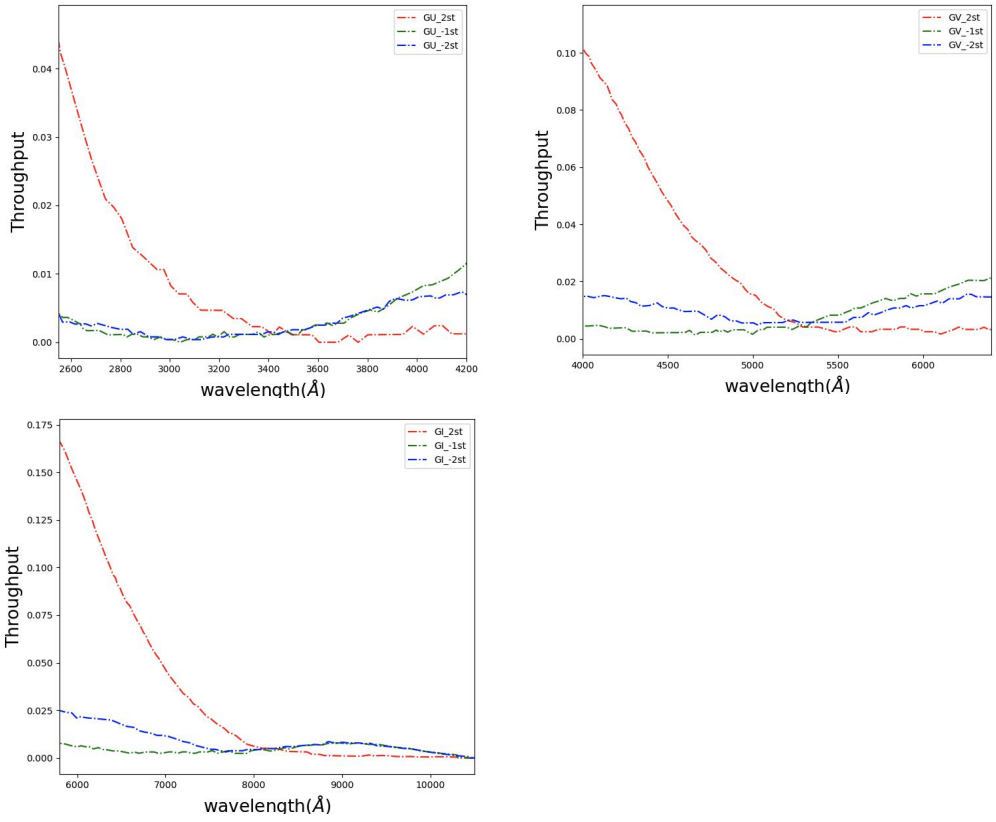


图 2.4-13 无缝光谱非工作级次效率。

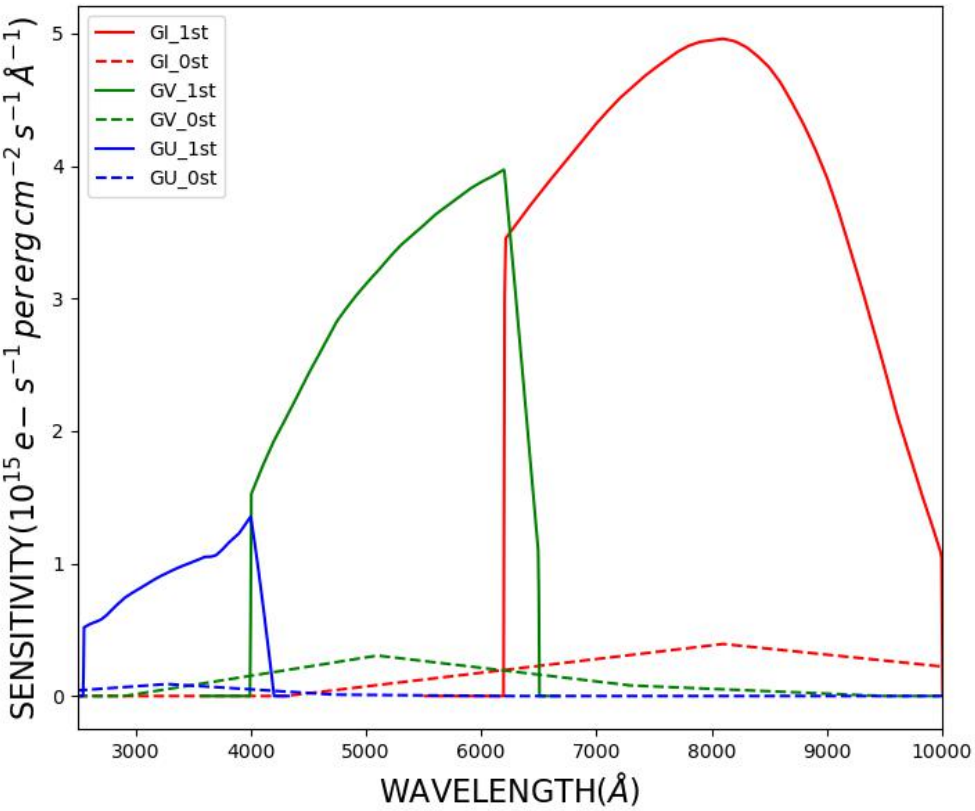


图 2.4-14 无缝光谱 0 级和 1 级 sensitivity 曲线。

CSST 无缝光谱在设计上一块 CCD 上采用了两块光栅的设计，如图 2.4-4 所示，一块 CCD 上方的光栅由两部分组成，对于探测器的分割位置在 2：3 的位置处。另外，设计中考虑到尽可能的保留一级光谱，减少一级光谱色散到探测器外侧，光栅的色散方向向探测器的中间色散。仿真中我们也对这种对向色散进行模拟，图 2.4-15 为相邻的三块探测器的无缝光谱仿真图像（依次为 GI、GV、GU 三个波段），由于所有的光向中间色散，所以对于天光比较强的 GI 和 GV 波段能够很明显的看到中间部分的背景水平会高于两侧。图 2.4-16 为对图像中光谱提取的结果，利用 aXe 软件进行提取。从结果上看，提取光谱均能够跟输入对应上。

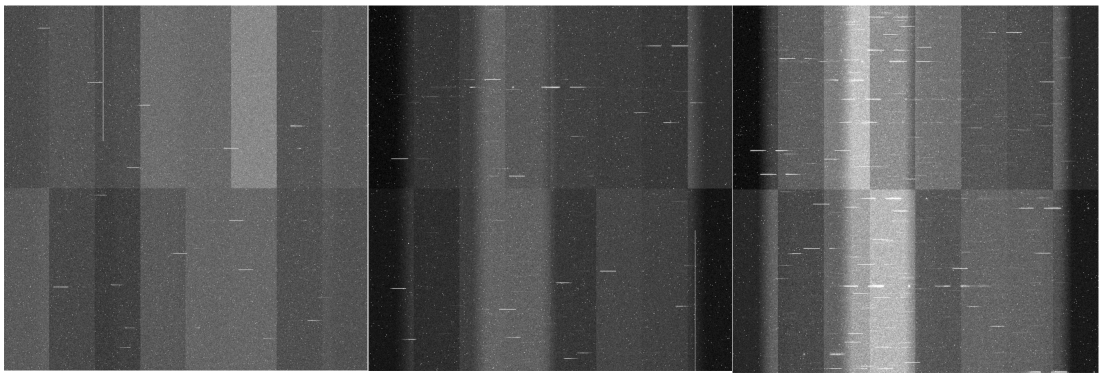


图 2.4-15 相邻探测器 GI、GV、GU 模拟图像。

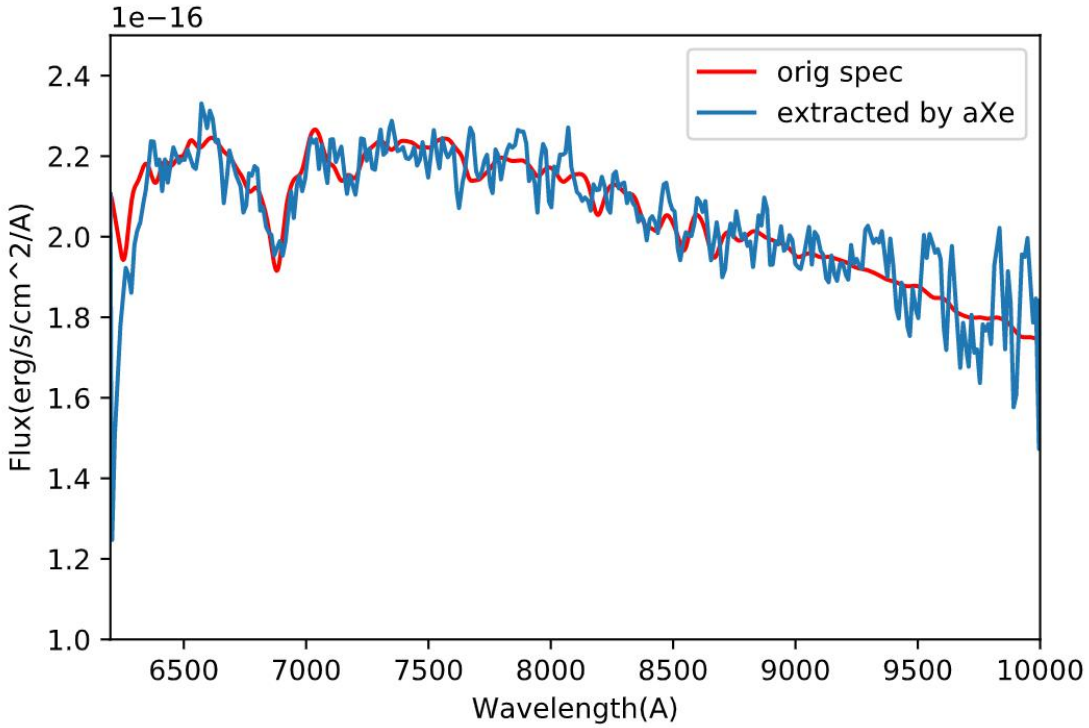


图 2.4-16 选出一颗 19 等的恒星利用 aXe 软件提取结果。

在光谱区域的结构设计中，每一块光谱区域的探测器均有沿着自身中心旋转的结构，在仿真中我们需要对这一结构进行仿真。焦面的结果如图 2.0-3 所示，从图中我们可以看到光谱区域的探测器并没有和成像区域的探测器平行排布，这里有个很小的转角，而这个转角并不是沿着整个焦面中心做一致的旋转，而是沿着探测器自身的中心旋

转，因此，我们定义两个坐标系，一个是全局坐标系，该坐标系是对整个焦面进行统一的制定，以焦面中心为（0，0）点，设施坐标 Yp 的反方向为 x 轴正向，如图 2.0-3 所示；另一个坐标是探测器的坐标系，以图中探测器左上点为图像（0，0）点，x 轴方向与焦面坐标系 x 轴方向一致。按照上述定义，需要将探测器局部坐标系坐标进行变换，变换成整个焦面的全局坐标系下的坐标，然后再对探测器内的点进行求解得到旋转后的 WCS，坐标变换如下所示：

$$\begin{pmatrix} x_{global} \\ y_{global} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{local} + x_{center} \\ y_{local} + y_{center} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}$$

在上式中，（xglobal，yglobal）表示全局坐标系下的坐标，（xlocal，ylocal）表示探测器局部坐标系上的坐标，（xcenter，ycenter）为探测器中心的位置，（Δx，Δy）表示探测器中心距焦面中心的偏离位置。图 2.4-17 给出了光谱区加入旋转后的整个焦面的位置图，从该图上可以看到光谱区的探测器均沿着自身的中心有一定的旋转角度。

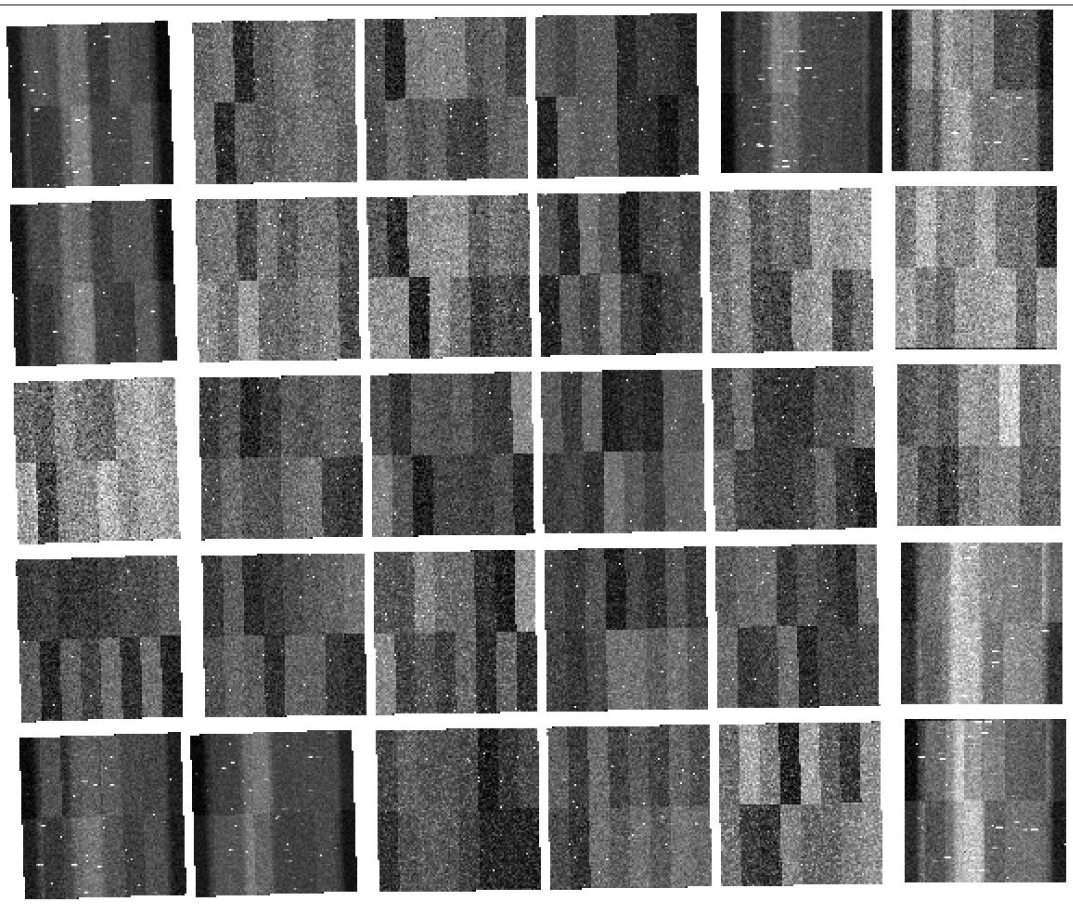


图 2.4-17 光谱区域加入旋转后整个焦面仿真的位置图。

2.5 仪器效应

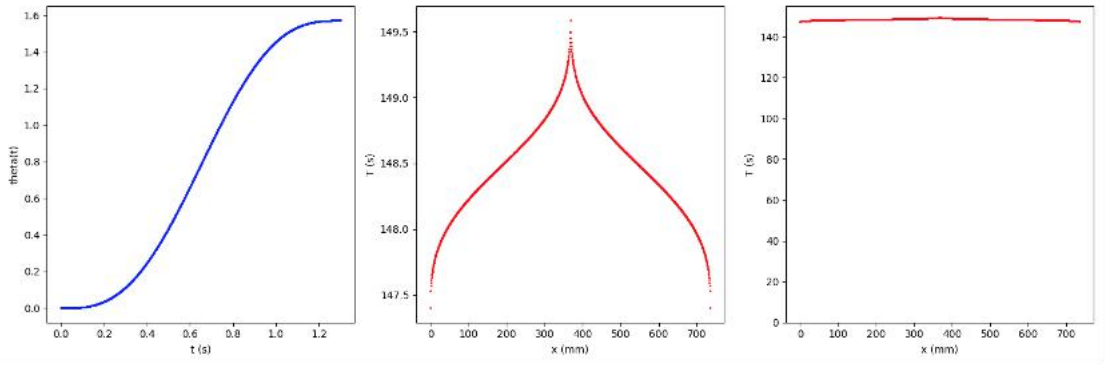


图 2.5-1 左：快门打开角度随时间的变化曲线；中：全焦面 735mm 跨度范围内，曝光 150 秒，打开、关闭各 1.3 秒情况下，快门效应曲线；右：快门效应曲线用全标度展示。

在生成畸变后的星图后（主程序中实现天光背景噪声），当前阶段加入的仪器效应按照顺序先后依次包括：

1. 主程序在计算目标源的光-电子数时，使用的系统透过率曲线已包含望远镜镜面效率、滤光片透过率以及三种 CCD290-99（紫外增强、主带、红外增强深耗尽）探测器的量子效率；

2. 平场渐晕模拟：建立全焦面平场渐晕结构的函数（二次多项式），并按探测器位置和区域生成平场渐晕权重图像，并应用到星图；渐晕结构函数中的各参数采用随机数方式产生，配置文件中指定随机数种子，以便重复产生同一渐晕图像，用于输出和检查；

3. 快门效应：定义 CSST 巡天模块的“快门效应”为：在焦面不同位置处，受快门开闭动作的影响造成的曝光时间的不均匀性。目前只在 150s 星图上模拟了快门效应，平场、暗场、本底图像上均没有模拟快门效应。模拟的快门开/闭时间各 1.3 秒，由于快门工作时角加速度随时间的变化为正/余弦曲线（见图 2.5-1：左），因此开/闭过程中造成的快门效应相同，单帧曝光图像的快门效应可以按 2.6 秒考虑。快门轴承间的距离为 735mm，分别位于无缝光谱 I、II 区域的外侧。假定焦面上平行于快门轴承方向上的各处曝光时间相同，因此快门效应在平行于轴承方向上没有变化，在垂直于轴承方向上各处的曝光时间不同，产生不均匀性（见图 2.5-1：中）。模拟中，按照中心极大值对快门效应（见图 2.5-1：右）做归一化后得到各处的权重函数，并依此调整各处光子数。

4. 宇宙线，宇宙线总像元数占比 0.00075，其中，有 95%的宇宙线长度在 0-20 个像元间随机分布，5%的宇宙线长度在 20-100 个像元间随机分布；能量的 log10 对数值服从 mean=3.3，σ= 0.6/2.355 的高斯分布；宇宙线轰击到探测器上会引起一定的电荷扩散从而使得宇宙线有一定的展宽，这里对宇宙线卷积σ=0.2 像元高斯轮廓；

5. PRNU：模拟归一化平场的像元间响应不均匀性（mean=1、σ= 0.01 的高斯分布）；可输出为平场 pixel-to-pixel 改正图像，目前不输出；每个 Chip 通过指定 seed+chipID 的随机种子，实现 Chip 间差异性；

6. Brighter-fatter 及电荷扩散效应：使用 Galsim 内置的 SiliconSensor 模块实现。其底层的实现原理为使用泊松方程求解器及蒙特卡洛方法对光电子在电场中的漂移过程进行模拟（参考 Poisson CCD 论文：Craig et al., 2019, arxiv:1911.09038），此轮仿真使用了 LSST 所选用的 ITL STA3800C CCD 探测器的实测参数作为 SiliconSensor 模块的输入，电荷扩散强度参数（df_strength）设置为 2.3；

7. 非线性（暂时未开）：可以对像元值进行非线性模拟，当前设非线性函数为 $f(x) = x - \beta \cdot x^2$，β=5E-7，接近满阱处的非线性度约 5%；

8. 加暗流：按 0.02 e-/s/pix、曝光时间 150 秒计算暗流值，Poisson 采样模拟每个像元暗流及其噪声，加到图像各像元值上；

9. 坏像列：在各暗场、各平场、各星图上模拟坏像列。坏列值设为：1.3*背景均值+50 (e^-)至 2*背景均值+150 (e^-)之间，使暗场、星图、平场图像上均有较明显的坏列，用于数据处理系统早期测试；坏列内部噪

声：2 倍背景噪声，高斯分布；数量：每个 e2v290 CCD 的上、下两个 section 各有 1~5 条；位置：0.05~0.95*总列数；长度：0.1~0.7*总行数；每个 Chip 通过指定 seed+chipID 的随机种子，实现坏列在 Chip 间的差异性；

10. 失效像元(defective pixel 或 bad pixel)：包含暗像元(dead pixel)和热点(hot pixel)，总像元数占比 5E-5；各自可单独设置是否添加；暗像元计数值为 0~<背景均值*70%>的均匀分布，加额外σ= 5 e- 的高斯随机；热像元取 Gamma 分布进行模拟，形状参数为 2 e-，尺度参数为 3750 e-；后续将依据芯片测试的暗流值分布曲线，模拟热像元。通过设置随机数种子固定失效像元所在位置；每个 Chip 通过指定 seed+chipID 的随机种子，实现 Chip 间差异性；

11. 加 16 路读出通道的本底，各路本底值服从 mean=500e-、峰谷值 PV=20e-的均匀分布；由随机数种子固定各路本底值；每个 Chip 通过指定 seed+chipID 的随机种子，实现 Chip 间差异性；

12. CCD 饱和、溢出：饱和像元值 65535；溢出方向沿列方向，中心两侧基本等长，靠近中心部分 ADU 值 65535，向外则 ADU 值减小，但均在 50000 以上（参考了其它项目 e2v 芯片的饱和溢出数据）；满阱 90000e-；

13. CTI 效应：参考 Anderson & Bedin (2010) 论文中实测的 CTI 效应的拖尾轮廓，设定新的拖尾长度，对单像元值按轮廓分配计数值，形成带拖尾的新图像。当前版本设 CTI 拖尾方向沿列方向，模块已实

现可设定拖尾沿行或列方向的功能。目前拖尾最大长度设为 10 像元，肉眼可见拖尾长度一般在 5 像元以内；拖尾所占能量比约 0.005（CCD 290-99 的 CTE 约为 99.9995%;CTI 拖尾现象主要的产生因素是像元内存在的电子陷阱，以及读出过程中的电子学）；

14. 读出噪声为高斯分布□=5e^-/pix，各读出通道相同（下一版实现 16 通道不同的读出噪声）；

15. 加 16 路读出通道的增益,各路增益值服从 mean=1.1、σ = 1% 的均匀分布；每个 Chip 通过指定 seed+chipID 的随机种子，实现 Chip 间差异性；

16. GalSim 数位化（四舍五入到整数）+ 16 位整数图像输出，格式为 FITS 文件；

17. 参考图像输出：模仿在轨定标的观测，每个 pointing 对应一次曝光。参考图像只在前 20 次曝光按要求 1：1：1（bias、dark、flat），自第 21 次开始，只按 1：1 产生成像和宇宙线。每一帧星图和参考图像都有不同的宇宙线，并且将宇宙线图像单独输出；模拟时，第一次指向不产生星图，只模拟参考图像，模拟每月执行一次的在轨定标。第二次指向开始为星图。

(1) 单帧整幅本底输出：16 通道增益+16 通道本底+高斯读出噪声+数位化+16 位输出；每个 Chip 通过指定 seed+chipID 的随机种子，实现 Chip 间本底、增益的差异性；

(2) 单帧整幅平场输出：16 通道增益+16 通道本底+高斯读出噪声+PRNU*渐晕+150 秒暗流+平场及泊松噪声+宇宙线+CTI+坏像列+失效像元+数位化+16 位输出；每个 Chip 通过指定 seed+chipID 的随机种子，实现 Chip 间本底、增益、坏列、坏像元的差异。注意：本次模拟暂时没有在平场图像中添加快门效应。

(3) 单帧整幅暗场输出：16 通道增益+16 通道本底+高斯读出噪声+300 秒暗流及泊松噪声+宇宙线+ CTI +坏像列+失效像元+数位化+16 位输出；每个 Chip 通过指定 seed+chipID 的随机种子，实现 Chip 间本底、增益、坏列、坏像元的差异性；

(4) 宇宙线图像：用于进行宇宙线提取、去除算法的参考和验证；每个参考图像都有独立的宇宙线图像，曝光时间与对应图像的曝光时间一致，本底图像模拟了 0.01 秒曝光时间的宇宙线。

2.6 天体测量效应仿真

CSST 中主要仿真了 4 项天体测量效应，提供的天测模块可实现从输入星表中的星表位置（默认是 ICRS 下的天体测量参数）到望远镜真实观测位置的转换。天测模块采用了 IAU 官方规范（IERS2021）的约定，所使用天测模型的精度达 10 微角秒水平，最终仿真精度与输入参数的精度直接相关。仿真的 4 项天体测量效应如下：

（1）天体自身相对太阳系质心的切向和视向运动--自行和视向运动引起的位置变化效应。计算这个效应需要有天体的自行参数和视向速度参数，对于河外天体其自行均可设置为 0，视向速度是相对太阳系质心的，输入已知实测或仿真值即可。

(2)CSST 运行轨道上望远镜质心处和太阳系质心处观测天体方向的差异--视差效应。计算这个效应需要输入望远镜的轨道参数、需要知道地球在太阳系中的轨道（程序中自动读取了 JPL 的 DE421 太阳系历表获取了地球的实时位置和速度参数），需要输入望远镜相对地心天球赤道坐标系的轨道参数，还需要知道待测天体的（周年）视差参数。对于河外天体，因为视差为 0，这个效应也将为 0。

（3）天体光线进入太阳系后在抵达望远镜质心过程中太阳系天体对光线方向的引力偏折—引力偏折效应。计算本效应需要输入天体的方向参数，软件模块将自动基于太阳系历表获取并计算出观测时刻的太阳系天体与待观测天体以及与望远镜三者之间的位置关系（方向和距离），并在相对论模型下计算此空间弯曲效应。

（4）由地球公转速度和 CSST 轨道速度综合引起的望远镜质心处天体方向变化--光行差效应。计算此效应需要输入天体的方向参数、需要知道地球在太阳系中的轨道（程序中自动读取了 JPL 的 DE421 太阳系历表获取了地球的实时位置和速度参

数）、需要输入望远镜相对地心天球赤道坐标系的轨道参数，模块会在相对论框架下（精度达到 1 微角秒）计算光行差效应。综上，天测模块在计算过程中需要观测时刻卫星的轨道参数（三个位置与三个速度分量）和恒星的运动信息（RAJ2000, DecJ2000，pmra*, pmdec, RV, parallax）。经过天测模块后目标位置变化最大可达 20 多个角秒。在进行仿真观测过程中，对于特定探测器所能观测到的目标源选取过程中所用到的巡天编排指向也会经过天测模块，以便更符合真实观测。在输出仿真文件中所给的指向是未经过天测模块的原始指向。在 cat 文件中所产生的坐标（ra, dec）是经过天测模块后曝光开始时刻目标源的坐标位置，而（ra_orig, dec_orig）是输入星表中 J2000 的位置。在处理星系位置时，自行、视向速度和三角视差均设置为 0，即只考虑光行差效应和太阳系天体的引力偏折。

3 仿真结果

CSST 仿真数据 Cycle 6 的结果为中心位于 Ra = 244.9727 度、Dec = 39.8959 度、天区面积 1.53 平方度的星系及恒星的模拟图像及无缝光谱的数据。包含 137 次连续指向及曝光（图 2.0-2），每次曝光产生 30 片探测器及其对应波段的观测图像（图 3.0-1，按照图 2.0-4 WCS 映射焦面排布的对应关系排列），分别为 u、g、r、i、z、Y、NUV 波段的多色成像图像（例如图 3.0-2，左图）及 GU、GV、GI 波段的图像（例如图 3.0-2，右图）。数据产品总数据量 1.5TB，涵盖恒星、河外星系、星系团和类星体等天体。物理效应包括光线追踪数值模拟

的弱透镜剪切、宇宙线、背景天光等。仪器效应包括点扩散效应、读出噪声、平场渐晕、快门效应、暗电流、CTI 效应、坏像列、失效像元、电子弥散效应、CCD 饱和溢出等。可初步用于宇宙线扣除、流量及位置定标、弱透镜测量、密集星场分析、无缝光谱抽取等预研究工作。Cycle 6 的数据获取和使用请参见 1.2 章中的介绍，对应的数据范例已开源发布在 Github 上：

https://github.com/jiadonglee/CSSTsim/blob/main/csstfits_quick_start_Cycle3.ipynb。

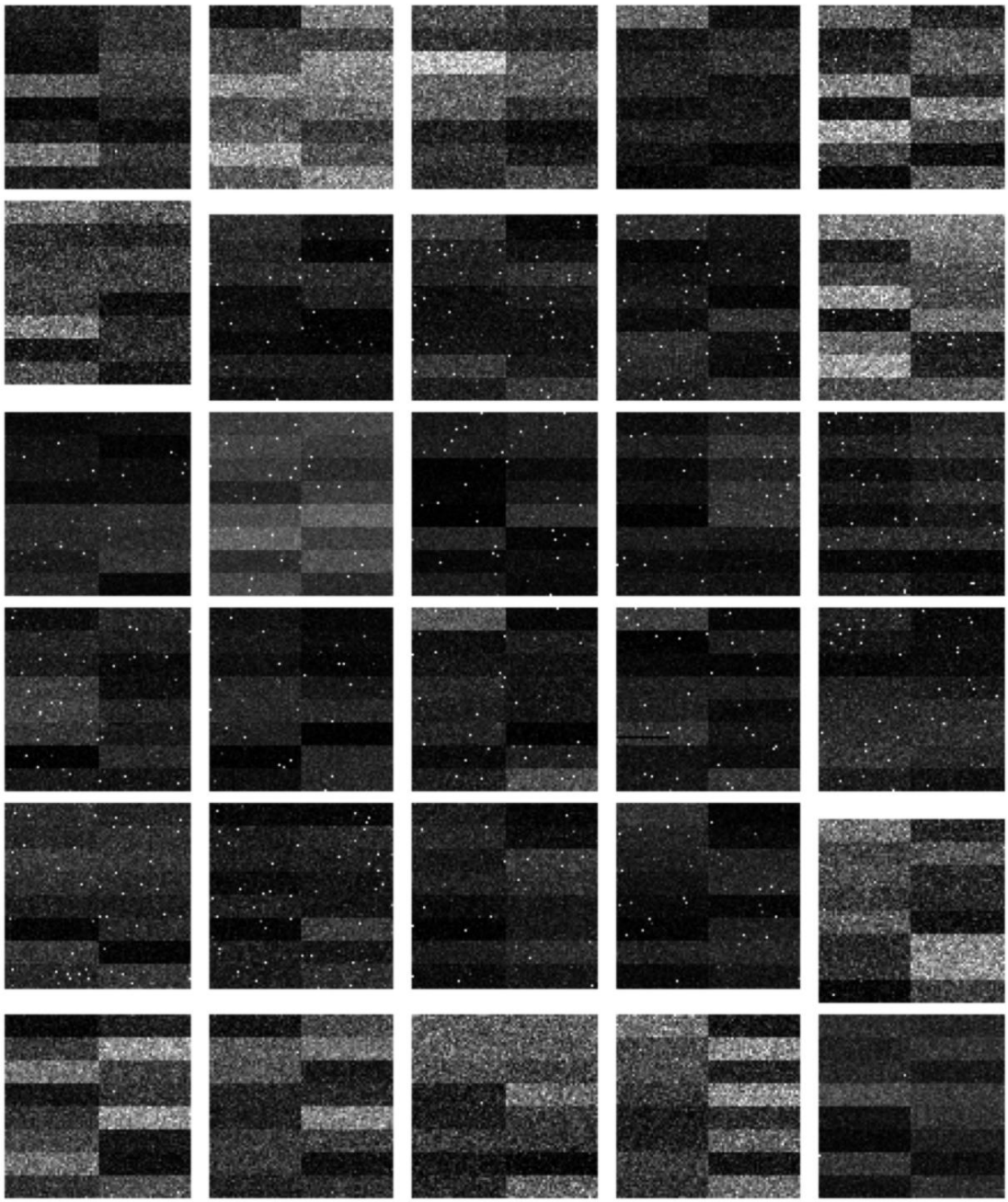


图 3.0-1 Cycle 6 仿真数据中单次曝光数据产品示意图，按照图 2.0-4 WCS 映射焦面排布的对应关系排列

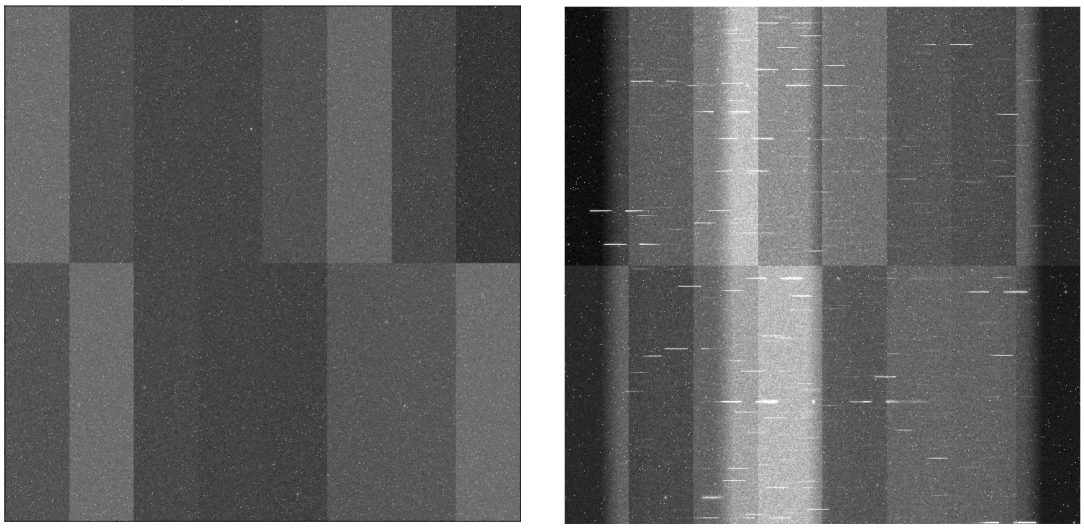


图 3.0-2 仿真产品中单次曝光单个探测器数据产品示意图。左侧为多色成像 g 波段图像，右侧为无缝光谱 GI 波段图像。图像显示使用像元坐标系。