
CSST-IFS 仿真数据 Cycle 9 数据产品说明

编写：颜召军，陈维

2024 年 05 月 15 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	4
2 定标仿真	10
2.1 DARK 仿真图像实例	10
2.2 FLAT 仿真图像实例	10
2.3 BIAS 仿真图像实例	11
2.4 LAMP 仿真图像实例	11
2.5 打孔板 LAMP 仿真图像实例	12
3 观测仿真结果	12
3.1 NGC6397 仿真图像实例	13
4 一些仿真细节	13
4.1 仿真思路	13
4.2 PSF 采样数据说明	14
4.3 像场畸变	15
4.4 亚像素效应	15
4.5 宇宙线	16
4.6 多普勒效应	17
4.7 光学效率	17

4.8	非线性	18
4.9	暗电流	18
4.10	热像素、坏像素	18
4.11	BIAS	18
4.12	饱和溢出	18
4.13	CTI 效应	19
4.14	读出噪声	19
4.15	增益	19
4.16	天光背景	19
4.17	量化读出	19
4.18	帧转移效应	20
4.19	杂散光效应	22

1 综述

1.1 简介

IFS 图像仿真的核心任务是 IFS 光谱像质光学模拟。影响 IFS 光谱成像质量的因素主要包括：主光学系统、像切分器、瞳镜、光栅以及科学相机。根据 IFS 总光路，仿真出探测器采样光谱图像，需要实现“交错狭缝条件下的 CCD 图像重构”。IFS 像切分器采用 AB 两个部分，在瞳镜及狭缝上分别按两排交错排列。探测器上获得的光谱也将是交错排列的光谱图像，和传统地面上光纤 IFS 获取的探测器图像会有显著差别。此外，需要按照 IFS 光学系统完整考虑每一部分光学器件带来的误差，观测效果模拟结果也可用于光谱定标过程中的随机误差和系统误差分析。

IFS 图像仿真流水线结构如下图 1 所示，其展示了与 IFS 图像仿真相关的数据流向和关键处理模块流程关系。IFS 图像仿真流水线的完整工作过程描述如下：

- 根据 IFS 地面光机电测试系统的测试结果，建立像切分器、瞳镜等关键光学器件的光学参数数据文件。包括：面形加工误差、尺寸加工误差、反射率、镀膜均匀性、粗糙度等，最终建立 IFS 的光瞳函数。此步骤需要考虑主望远镜参数和数据接口以及 IFS 光学系统动态成像性能，主要是系统波前误差随时间、温度、成像位置的不同而发生的变化。

-
- 结合主望远镜和 IFS 光学系统的光瞳函数，考虑两个系统之间的对准误差（主要是旋转和倾斜），构建综合光瞳函数，之后计算 IFS 立方点扩展函数。PSF 与波长有关，在探测器上会产生不同的采样率。此步骤会对 PSF 进行二次采样、插值、合并等操作以获得任意采样率的 PSF。
 - 将前端模拟产生的天文科学图像（主要是观测目标光谱立方数据）与立方点扩展函数在对应波长处进行卷积，并根据光栅色散特性来计算二维色散光谱（线扩展函数）。
 - 对二维色散光谱图像进行 CCD 采样模拟。此模拟步骤考虑的内容有：CCD 量子效率、增益、读出噪声、曝光时间、暗电流、非线性响应、电荷扩散、几何畸变、像元尺寸等。
 - 添加鬼像、抖动、杂散光等效应。
 - 产生模拟科学图像文件。按照规定的文件格式生成模拟的科学图像文件。

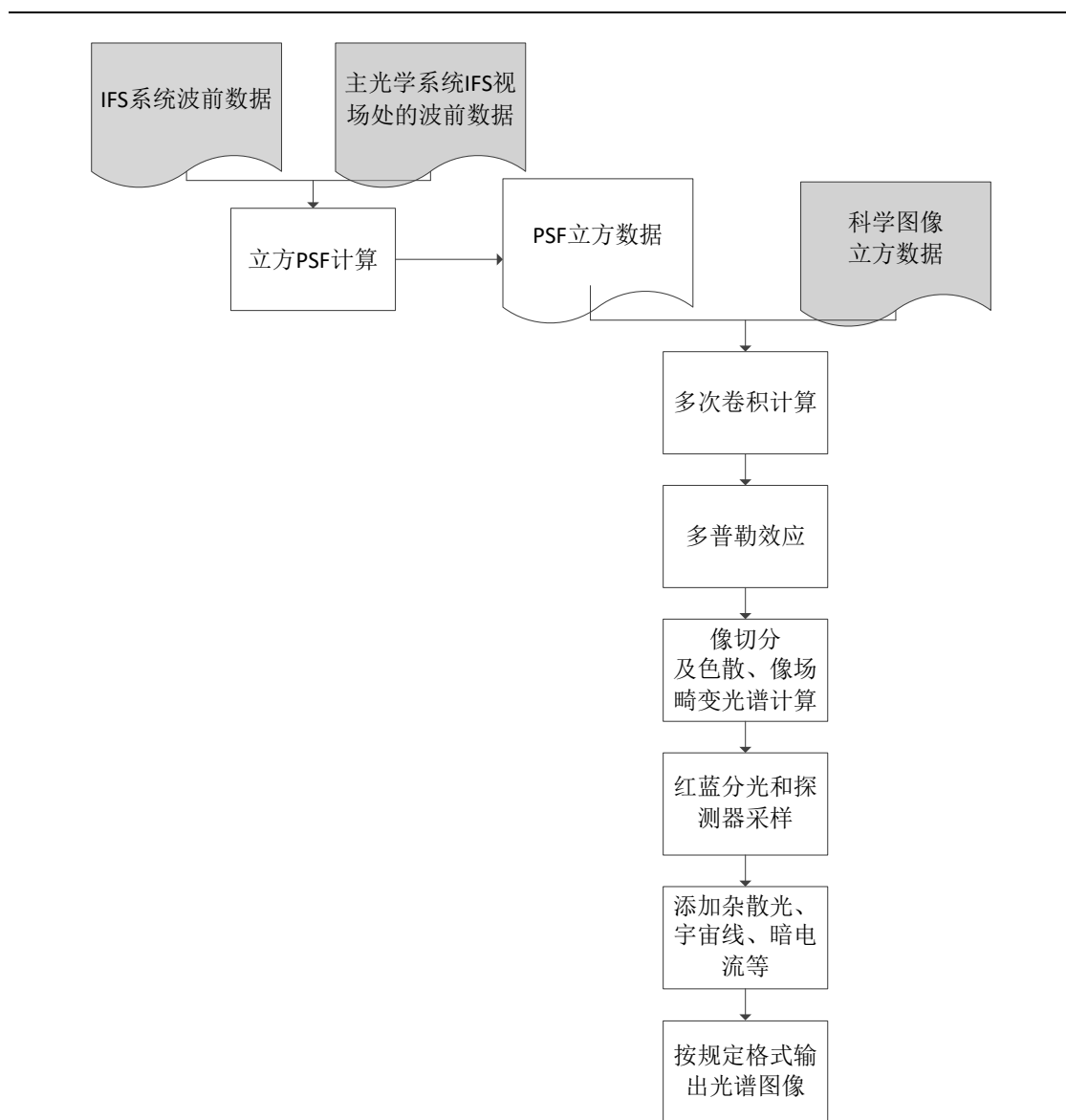


图 1 IFS 仪器仿真流水线

1.2 数据使用说明

1.2.1 获取数据

伴随仿真软件发布，Cycle 9 的仿真数据也一起发布。Cycle 9 的仿真数据共包含观测目标 SCIE 的仿真数据和定标仿真两部分数据。

仿真数据存放于上海台 CSST 服务器，目录：
user@119.78.226.28: /data/ifspip/

1.2.2 数据产品读取实例

(1) 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探测器进行定义，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 / number of array dimensions
DATE     = '2024-05-11T09:45:04.5' / written date (yyyy-mm-ddThh:mm:ss.s)
FILENAME= 'CSST_IFS_R_SCI_20240511094504_20240511103004_30100000002_R_L0_V92'
FILETYPE= 'SCI'                        / observation type
TELESCOP= 'CSST'                       / telescope name
INSTRUME= 'IFS'                        / instrument name
RADECSYS= 'ICRS'                       / coordinate system of the object
EQUINOX =                               2000.0
FITSSWV = 'ifs_sim_0.8.03'             / FITS creating software version
COMMENT

=====

OBJECT  = 'NGC524'                      / object name
TARGET  = '012447.7+093220'             / target name (hhmmss.s+ddmmss)
OBSID   = '30100000002'                 / observation ID
```

RA_OBJ = 21.198903 / object RA (deg)
DEC_OBJ = 9.538913000000001 / object Dec (deg)
COMMENT

COMMENT TELESCOPE INFORMATION
COMMENT

REFFRAME= 'CSSTGSC-1.0' / guiding catalog version
DATE-OBS= '2024-05-11T09:45:04.5' / observation date (yyyy-mm-ddThh:mm:ss.s)
SATESWV = 'softwave-1.0' / satellite software version
EXPSTART= 60441.40630180713 / exposure start time (MJD)
CABSTART= 2460441.906301807 / first cabin time after exposure start (MJD)
SUNANGL0= 0.0 / angle between the Sun and opt axis at CABSTART
MOONANG0= 0.0 / angle between the Moon and opt axis at CABSTART
TEL_ALT0= 0.0 / angle between opt axis and Elimb at CABSTART
POS_ANG0= 0.0 / angle between y axis and North Pole at CABSTART
POSIO_X = -4698.386589 / orbital position in X at CABSTART (km)
POSIO_Y = 4810.820136 / orbital position in Y at CABSTART (km)
POSIO_Z = 637.21861 / orbital position in Z at CABSTART (km)
VELO0_X = -4.399314 / orbital velocity in X at CABSTART (km/s)
VELO0_Y = -3.60795 / orbital velocity in Y at CABSTART (km/s)
VELO0_Z = -5.16294 / orbital velocity in Z at CABSTART (km/s)
EULER0_1= 0.0 / Euler angle 1 at CABSTART (deg)
EULER0_2= 0.0 / Euler angle 2 at CABSTART (deg)
EULER0_3= 0.0 / Euler angle 3 at CABSTART (deg)
RA_PNT0 = 21.198903 / pointing RA at CABSTART (deg)
DEC_PNT0= 9.538913000000001 / pointing Dec at CABSTART (deg)
EXPEND = 60441.43755500775 / exposure end time (MJD)
CABEND = 2460441.937555008 / first cabin time after exposure end (MJD)
SUNANGL1= 0.0 / angle between the Sun and opt axis at CABEND
MOONANG1= 0.0 / angle between the Moon and opt axis at CABEND
TEL_ALT1= 0.0 / angle between opt axis and Elimb at CABEND
POS_ANG1= 0.0 / angle between y axis and North Pole at CABEND
POSII_X = 5358.547596833333 / orbital position in X at CABEND (km)
POSII_Y = -4057.775396925 / orbital position in Y at CABEND (km)

POSI1_Z = 308.5542516416667 / orbital position in Z at CABEND (km)
 VELO1_X = 3.215572858333333 / orbital velocity in X at CABEND (km/s)
 VELO1_Y = 4.644816033333333 / orbital velocity in Y at CABEND (km/s)
 VELO1_Z = 5.197599083333333 / orbital velocity in Z at CABEND (km/s)
 EULER1_1 = 0.0 / Euler angle 1 at CABEND (deg)
 EULER1_2 = 0.0 / Euler angle 2 at CABEND (deg)
 EULER1_3 = 0.0 / Euler angle 3 at CABEND (deg)
 RA_PNT1 = 21.198903 / pointing RA at CABEND (deg)
 DEC_PNT1 = 9.538913000000001 / pointing Dec at CABEND (deg)
 EPOCH = 2460442.0 / equinox of pointing RA and Dec
 COMMENT

COMMENT VERIFICATION INFORMATION

COMMENT

EXPTIME = 2700.0 / exposure time (s)
 CHECKSUM= 'KSKUNSITKSITKSIT' / HDU checksum updated 2024-05-11T17:45:05
 DATASUM = '0' / data unit checksum updated 2024-05-11T17:45:05
 END

Extension Header:

XTENSION= 'IMAGE' / extension type
 BITPIX = 16 / bits per data value
 NAXIS = 3 / number of data axes
 NAXIS1 = 13768 /
 NAXIS2 = 1856 /
 NAXIS3 = 3 /
 PCOUNT = 0 / number of parameters
 GCOUNT = 1 / number of groups
 BSCALE = 1
 BZERO = 32768
 EXTNAME = 'SCI'

EXTVER = 1
BUNIT = 'ADU' / physical unit of array values
COMMENT

COMMENT INSTRUMENT INFORMATION

COMMENT

CMIRRPOS= F / position of calibration switch mirror
FLAMP = 0 / status of flat lamp
ALAMP = 0 / status of flat atomic emission line lamp
IFSMODE = 0 / IFS working mode
IFSTEMP = 0.0 / IFS components temperature in degC
IFSSTAT = 0 / IFS components status parameter
COMMENT

COMMENT DETECTOR INFORMATION

COMMENT

CAMERA = 'Red' / camera of IFS
DETSN = 'CCD231-c6-00' / detector serial number
DETNAME = 'red' / detector name
DETSIZE = '3072*6144' / detector size
DATASECT = 'data-section' / data section
PIXSCAL1= 1856.0 / pixel scale for axis 1
PIXSCAL2= 13768.0 / pixel scale for axis 2
PIXSIZE1= 15.0 / pixel size for axis 1 (micron)
PIXSIZE2= 15.0 / pixel size for axis 2 (micron)
NCHAN = 4 / number of readout channels
PSCAN1 = 50 / horizontal prescan width, per readout channel
PSCAN2 = 0 / vertical prescan height, per readout channel
OSCAN1 = 320 / horizontal overscan width, per readout channel
OSCAN2 = 320 / vertical overscan height, per readout channel
COMMENT

COMMENT READOUT INFORMATION

COMMENT

EXPT0_1 = '2024-05-11T06:43:41.9' / exposure start time of the 1st frame (UTC)
EXPT1_1 = '2024-05-11T06:58:41.9' / exposure end time of the 1st frame (UTC)
EXPT0_2 = '2024-05-11T06:58:42.1' / exposure start time of the 2nd frame (UTC)
EXPT1_2 = '2024-05-11T07:13:42.1' / exposure end time of the 2nd frame (UTC)
EXPT0_3 = '2024-05-11T07:13:42.2' / exposure start time of the 3rd frame (UTC)
EXPT1_3 = '2024-05-11T07:28:42.2' / exposure end time of the 3rd frame (UTC)
DETTEMP0= 0.0 / detector temperature at EXPT0_1 (K)
DETTEMP1= 0.0 / detector temperature at EXPT1_3 (K)
BIN_X = 1 / bin number in X (wavelength)
BIN_Y = 1 / bin number in Y (spatial)
GAIN1 = 1.519999980926514 / CCD gain (e-/ADU, channel 1)
GAIN2 = 1.549999952316284 / CCD gain (e-/ADU, channel 2)
GAIN3 = 1.490000009536743 / CCD gain (e-/ADU, channel 3)
GAIN4 = 1.529999971389771 / CCD gain (e-/ADU, channel 4)
DARK1 = 0.000809999997727572 / CCD dark (e-/s, channel 1)
DARK2 = 0.000839999993331730 / CCD dark (e-/s, channel 2)
DARK3 = 0.000859999970998615 / CCD dark (e-/s, channel 3)
DARK4 = 0.000850000011269003 / CCD dark (e-/s, channel 4)
RON1 = 4.0 / read noise (e-, channel 1)
RON2 = 3.900000095367432 / read noise (e-, channel 2)
RON3 = 4.800000190734863 / read noise (e-, channel 3)
RON4 = 4.900000095367432 / read noise (e-, channel 4)
DETBIA1 = 510.0 / amplifier bias voltage (ADU, channel1)
DETBIA2 = 515.0 / amplifier bias voltage (ADU, channel2)
DETBIA3 = 495.0 / amplifier bias voltage (ADU, channel3)
DETBIA4 = 512.0 / amplifier bias voltage (ADU, channel4)
ROSPEED = 100.0 / readout speed (MHz)
TOML_TAG= 'csst-ifs-l0-c09' / the tag of toml file
CHECKSUM= 'jOPPkONPjONPjONP' / HDU checksum updated 2024-05-11T17:45:06
DATASUM = '1725036921' / data unit checksum updated 2024-05-11T17:45:06
END

数据定义可以参考文档 KSC-00-JK-0001-03.01 《CSST 科学数据处理系统 0 级数据输入需求和数据结构设计说明》，2024.04。

2 定标仿真

2.1 DARK 仿真图像实例

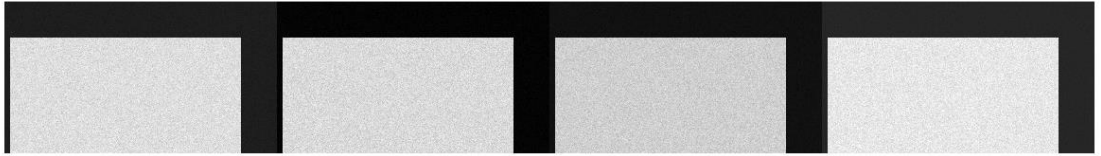


图 2 IFS 蓝端探测器 dark 仿真实例图像

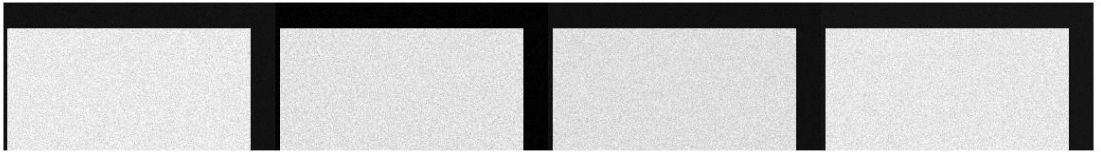


图 3 IFS 红端探测器 dark 仿真实例图像

2.2 FLAT 仿真图像实例



图 4 IFS 蓝端探测器平场仿真实例图像



图 5 IFS 红端探测器平场仿真实例图像

2.3 BIAS 仿真图像实例

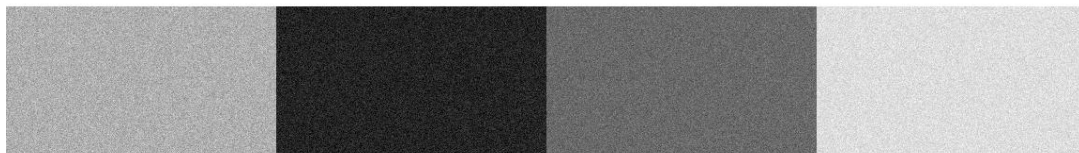


图 6 IFS 蓝端探测器 BIAS 仿真实例图像

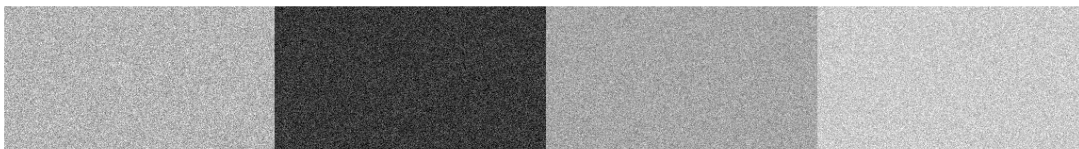


图 7 IFS 红端探测器 BIAS 仿真实例图像

2.4 LAMP 仿真图像实例

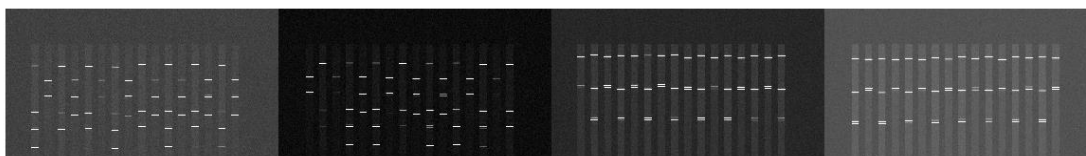


图 8 IFS 蓝端探测器 LAMP 仿真实例图像

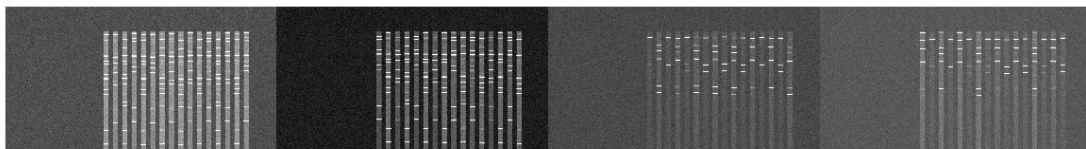


图 9 IFS 红端探测器 LAMP 仿真实例图像

2.5 打孔板 LAMP 仿真图像实例

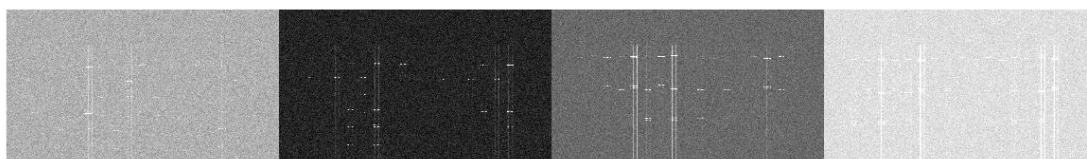


图 10 IFS 蓝端探测器打孔板 LAMP 仿真实例图像

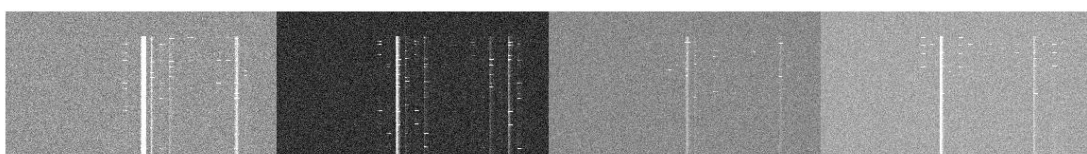


图 11 IFS 红端探测器打孔板 LAMP 仿真实例图像

3 观测仿真结果

IFS 仿真数据 Cycle 9 的物理效应包括光线追踪数值模拟的各分系统或元件反射、透射效率；各分系统或元件反射、透射效率；切分器和狭缝带来的光学衍射效应；亚像素效应、像场畸变、谱线弯曲、宇宙线、天光背景、杂散光、多普勒效应；探测器效应，例如：分区域个性化读出、坏点、亮点、暗电流、读出噪声等；视场的不均匀性，即 slicer 具有不同的反射率；实现了 bias、flat、lamp、dark、hole 模拟功能；不同曝光时间、不同观测位置并行模拟仿真。

需要说明的是在 Cycle9 中更行了天光背景和杂散光模块，增加了帧转移效应，增加了多重曝光模式，更新了 CTI 效应的方向。

3.1 NGC6397 仿真图像实例

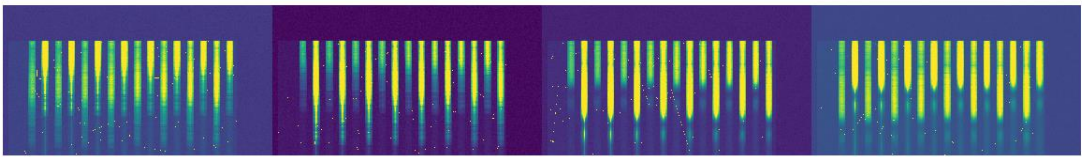


图 12 IFS 蓝端探测器 NGC6397 仿真图像

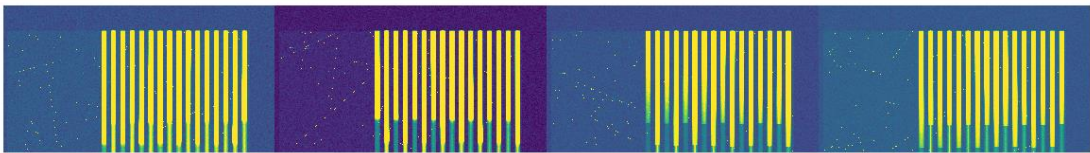


图 13 IFS 红端探测器 NGC6397 仿真图像

4 一些仿真细节

4.1 仿真思路

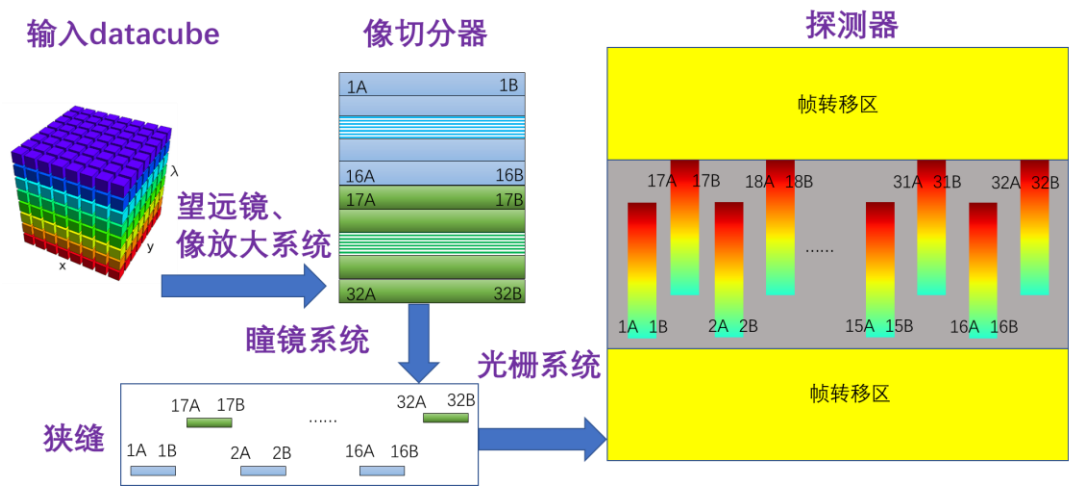


图 14 IFS 仪器仿真思路示意图

影响 IFS 光谱成像质量的因素主要包括：主光学系统、像切分器、瞳镜、光栅以及科学相机。IFS 仪器仿真的大致思路是，将前端仿真生成的观测目标三维 datacube 数据，经过 CSST 主望远镜、像放大系统、像切分器、瞳镜系统、狭缝系统、光栅系统，添加相应的仪器效应，最终在两个探测器上形成二维光谱图像。

4.2 PSF 采样数据说明

本轮 IFS 仿真的输入波前由长光所提供的主望远镜系统的波前像差作为主望远镜的像差，通过波前数据来计算给定波长的 PSF 数据。由于 IFS 的视场范围非常小，这里我们认为视场范围内的波前误差都是一样的，也就是 PSF 都是相同的。同时，为了更加真实的模拟后端光学系统的仪器效应，我们将系统分为几个部分来分段模拟，如下图所示 15 所示。各个部分的像差如下图所示 16 所示。

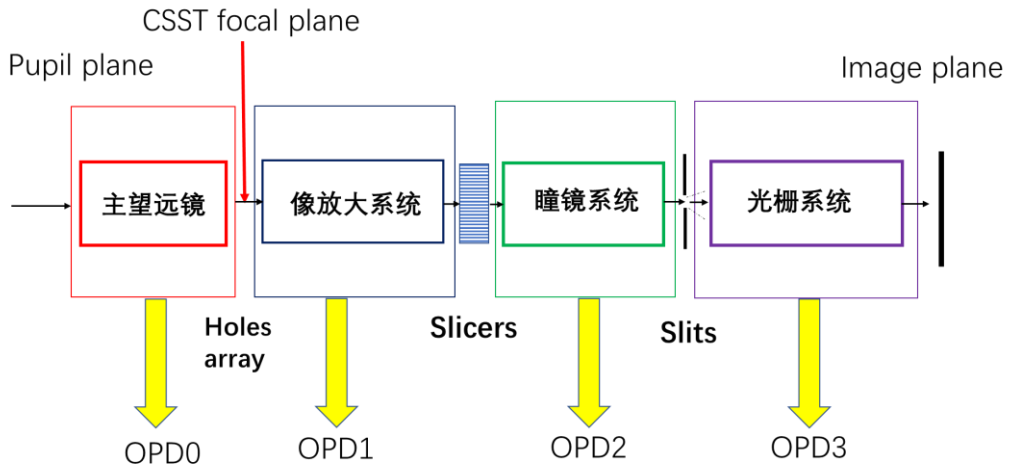


图 15 IFS 仪器仿真光学系统模型

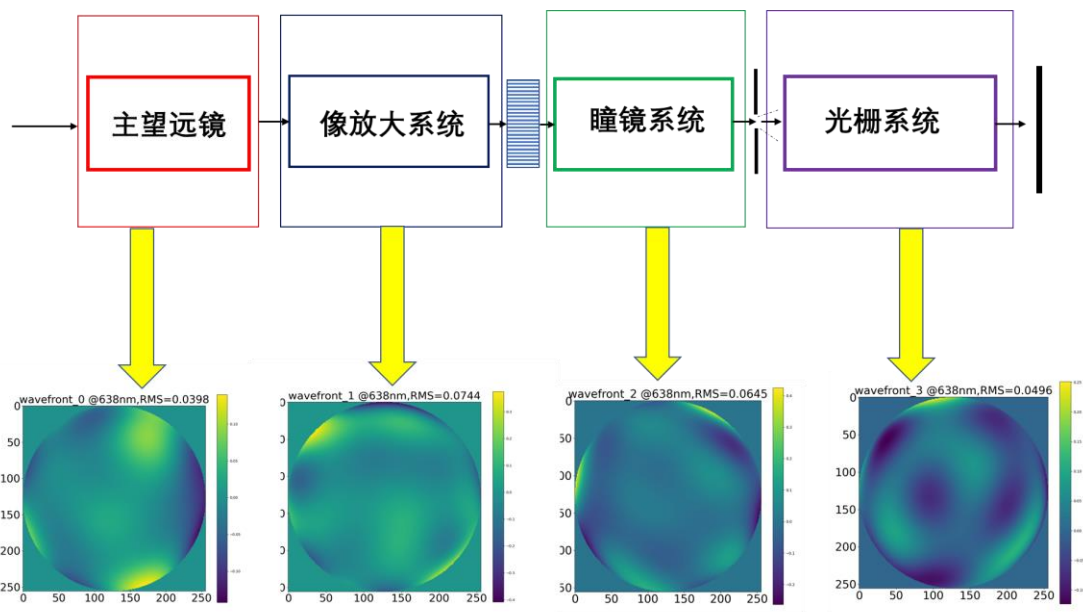


图 16 IFS 仪器仿真光学系统各部分的像差

4.3 像场畸变

当前的仿真中没有添加像场畸变效应，原因是我们在光学设计软件 CodeV 中通过仿真分析发现，IFS 系统的像差畸变非常小，可以忽略。

4.4 亚像素效应

在 Cycle 7 图像仿真阶段，为了更加准确的模拟 IFS 仪器中的各种亚像素效应，我们通过 galsim 模块中的特定功能将图像转为光子，每个光子具有流量、波长、空间位置等特性参数，如下图 17 所示。通过图 18 中的公式，可以非常完美的模拟各种亚像素效应，包括光栅的色散效应，像场畸变以及切分器的位置误差。

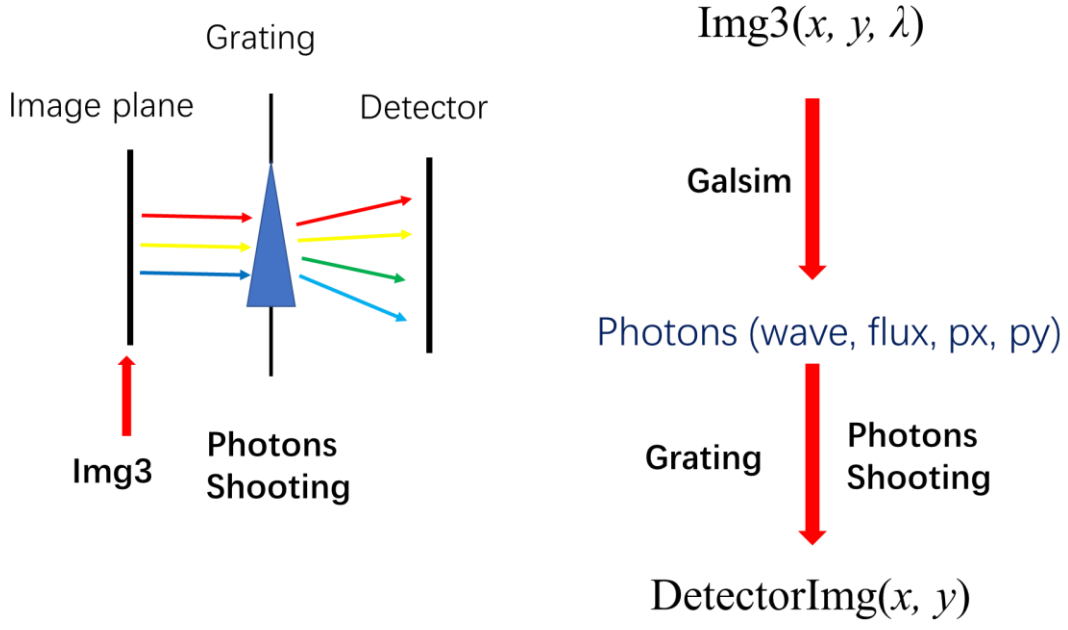


图 17 IFS 仪器仿真中的图像到光子转换

$$\begin{aligned}
 dx &= \boxed{\sum a_i \lambda^i} + \boxed{\sum b_i x^i y^{n-i} + \sum c_i x^i + \sum d_i y^i} + \boxed{Slicer_x(k)}, \\
 dy &= \boxed{\sum e_i \lambda^i} + \boxed{\sum f_i x^i y^{n-i} + \sum g_i x^i + \sum h_i y^i} + \boxed{Slicer_y(k)},
 \end{aligned}$$

↑
↑
↑

光栅色散 像场畸变 切分器亚像素偏移

图 18 IFS 仪器仿真中亚像素效应计算公式

4.5 宇宙线

输入宇宙线覆盖率可以在 config 配置文件中设置，程序中默认宇宙线的覆盖率为 0.1%，即覆盖探测器 0.1% 的面积。

4.6 多普勒效应

在 Cycle7 阶段, IFS 的仪器仿真还考虑了多普勒效应, 根据当前曝光时刻, 计算出望远镜当前的轨道信息参数, 计算相对于观测目标的视向速度 v_1 , 计算光子因多普勒效应而变化后的波长 $\lambda_1 = \lambda_0 * (1 + v_1/c)$; 曝光完成后再次计算相对于观测目标的视向速度 v_2 , 再次计算光子因多普勒效应而变化后的波长 $\lambda_2 = \lambda_0 * (1 + v_2/c)$ 。自此, 可以很好的模拟多普勒效应。

4.7 光学效率

IFS 光学系统的光学效率曲线如下图 19 所示, 这里考虑了光学系统中所有光学元件的光学效率及探测器的量子效率。

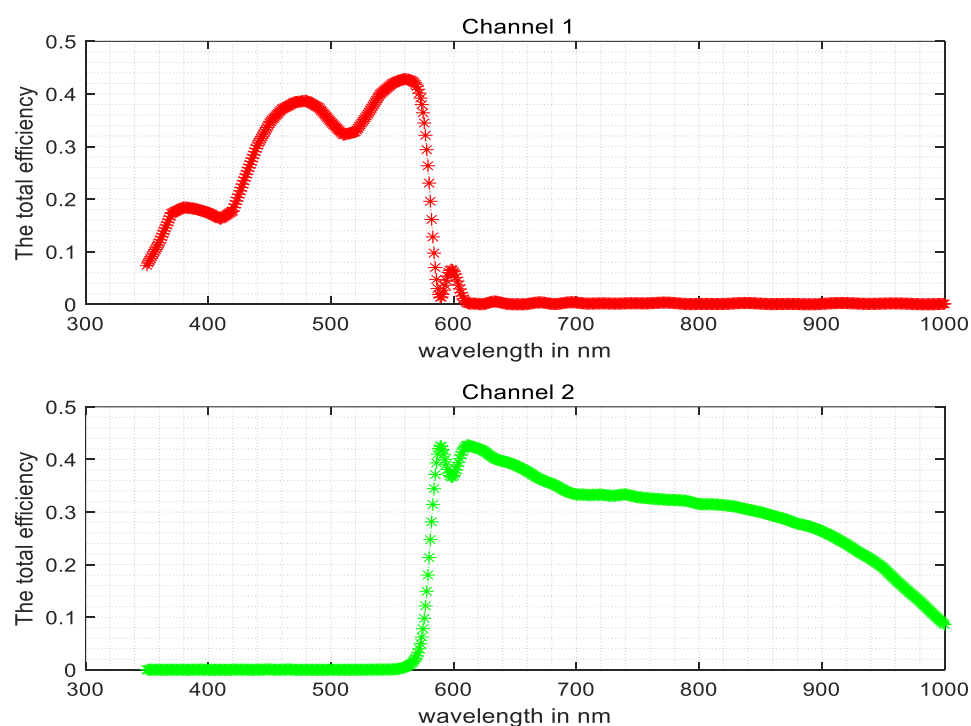


图 19 IFS 系统光学效率曲线（上图是蓝端，下图是红端）

4.8 非线性

模拟探测器像素的非线性响应。模拟的非线性关系为： $f(x) = x - \beta x^2$, $\beta = 6E-7$ 。

4.9 暗电流

目前按照按 0.001 e-/s/pixel 计算暗电流值，直接加到图像各像元值上。

4.10 热像素、坏像素

失效像元：包含暗像元和热像元，设置了效应开关是否添加该效应。事先随机生成了 IFS 两个探测器的热像素和坏像素文件，仿真时直接调用数据该数据模拟热像素、坏像素。

4.11 BIAS

每个探测器有 4 个读出通道，即 4 路读出通道的本底具有不同的 bias 值（单位：ADU）。

4.12 饱和溢出

探测器的像素接收的光子如果超过满阱值，则会达到饱和、乃至溢出；溢出方向沿行方向，中心两侧基本等长；目前像素的满阱

90000e⁻。

4.13 CTI 效应

当前版本 CTI 拖尾方向沿着 CCD 的帧转移读出方向。(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)。

4.14 读出噪声

读出噪声为高斯分布, 每个探测器的 4 路读出具有不同的读出噪声, 在 config 文件中可以设置每个通道的读出噪声水平。

4.15 增益

每个探测器的 4 路读出通道具有不同的增益, 在 config 文件中可以设置每个通道的增益。

4.16 天光背景

目前加入的天光背景包括地气光和黄道光, 其流量和 SED 与望远镜所在的空间轨道、望远镜指向、观测时间参与有关。

4.17 量化读出

探测器中读出的图像会经过四舍五入后进行 16 位整数图像输出, 格式为 FITS 文件。

4.18 帧转移效应

对于 IFS 的蓝端的探测器 CCD230-84 (4096x4112), 帧转移时间为 0.09216s。

对于 CCD231-C6 (6144x6160), 全帧移动时间为 $1536 \times 90 \times 10^{-6} = 0.13824\text{s}$ 。

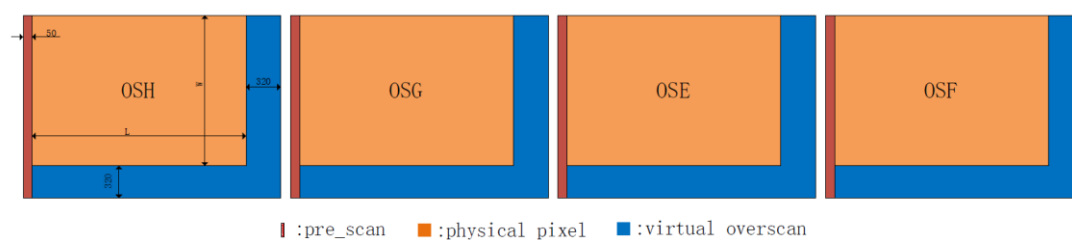


图 20 0 级数据读出示意图

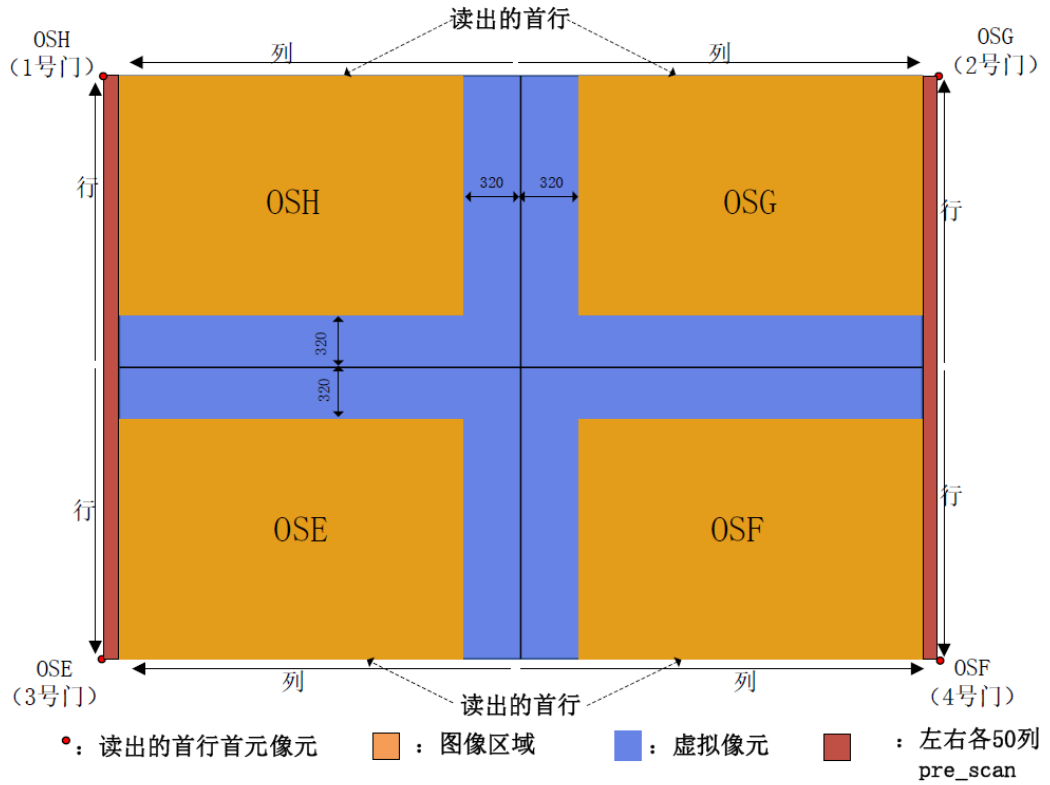


图 21 0 级数据原始图像示意图

◆ 帧转移效应仿真流程:

Step 1: 仿真得到曝光时间 $exptime$ 内的原始图像（未添加任何仪器效应）。

Step 2: 取出 OSH 区域的图像，矩阵记为 $I_{OSH}(i, j)$ ，计算帧转移效应的拖尾向量 $F_{OSH}(k) = \alpha / exptime \sum_i I_{OSH}(i, k)$ ，对于蓝端探测器 $\alpha = 0.09216$ ，对于红端探测器 $\alpha = 0.13824$ ；则添加帧转移效应后的矩阵计算过程为： $I'_{OSH}(i, j) = I_{OSH}(i, j) + F_{OSH}(j)$ 。

Step 3: 对 OSG、OSE、OSF 区域的图像，进行 Step 2 中的计算，

得到添加帧转移效应后的图像矩阵 I'_{OSG} 、 I'_{OSE} 、 I'_{OSF} 。

Step 4: 在 I'_{OSH} 、 I'_{OSG} 、 I'_{OSE} 、 I'_{OSF} 的基础上添加其他的仪器效应, 例如宇宙线、噪声、非线性、分通道读出等。

4.19 杂散光效应

加入了新的杂散光效应模块, 该模块中调用了亮恒星星表, 依据当前观测时刻望远镜轨道及指向参数, 计算进入望远镜视场内的杂散光流量 SED, 这些杂散光最终将均匀的落到探测器中。