

---

# CSST-MCI 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

<b>1 综述</b>	<b>1</b>
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	3
<b>2 定标仿真</b>	<b>12</b>
2.1 DARK 仿真图像实例	12
2.2 FLAT 仿真图像	13
2.3 BIAS 仿真图像	13
<b>3 观测仿真结果</b>	<b>15</b>
3.1 STAR 仿真图像	15
3.2 EXDF 仿真图像	18
<b>4 一些仿真细节</b>	<b>21</b>
4.1 PSF 采样数据说明	21
4.2 像场畸变	22
4.3 PSF 插值	24
4.4 SED、FILTER、PSF 卷积	25
4.5 宇宙线	25
4.6 快门效应	26
4.7 PRNU	26
4.8 BRIGHTER-FATTER 及电荷扩散效应	27

---

4.9	非线性	27
4.10	暗电流	27
4.11	热像素、坏像素	27
4.12	BIAS	27
4.13	饱和溢出	28
4.14	CTI 效应	28
4.15	读出噪声	28
4.16	增益	28
4.17	天光背景	28
4.18	量化读出	29
4.19	杂散光效应	29

---

# 1 综述

## 1.1 简介

多通道成像仪 (MCI) 超深场分为普通超深场 (类似哈勃极深场 HXDG) 和强引力透镜超深场 (类似 HFF) 两种, 超深场将达到约 30 星等。强引力透镜深场对碰撞星系团的研究有助于限制暗物质碰撞截面, 分辨自相互作用暗物质。提取如此暗弱的信号, 需要对多通道成像仪光学系统、滤光片 (多达 30 片)、鬼像以及杂散光等效应进行模拟仿真, 生成最终的观测图像文件。

MCI 仿真软件流水线流程图见图 1 所示。MCI 仿真软件从输入星表出发, 分别生成星系图像和恒星图像, 之后进行图像叠加, 而后添加背景天光、宇宙线、杂散光、探测器噪声等效应, 得到最终观测图像文件, 主要工作内容包括以下几个方面:

- 建立滤光片特性数据库。此步骤根据地面滤光片测试结果, 建立滤光片特性数据库, 主要包括: 光强透过率、中心波长、带宽等参数。
- 计算点扩展函数 PSF。结合仿真得到的输入波前像差数据, 计算不同视场、不同波长的点扩展函数。
- 宽波长图像卷积叠加。MCI 中有三个通道, 每个通道采用的滤光片中心波长和带宽各不相同, 观测目标还具有不同的 SED, 此步骤中将天文科学图像与之对应的 PSF 进行多次卷

积、叠加以生成模拟图像。

- **CCD 采样模拟**，此过程完成多色图像 CCD 采样模拟。此模拟步骤考虑的内容有：**CCD 量子效率、快门效应、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**等。
- **添加鬼像、抖动、杂散光等效应**。此步骤用于空间轨道观测时观测目标之外的亮源、地气光等引起的杂散光，光束多次反射产生的鬼像，主望远镜跟踪精度、系统微振动等因素引入的抖动等效应。
- **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。

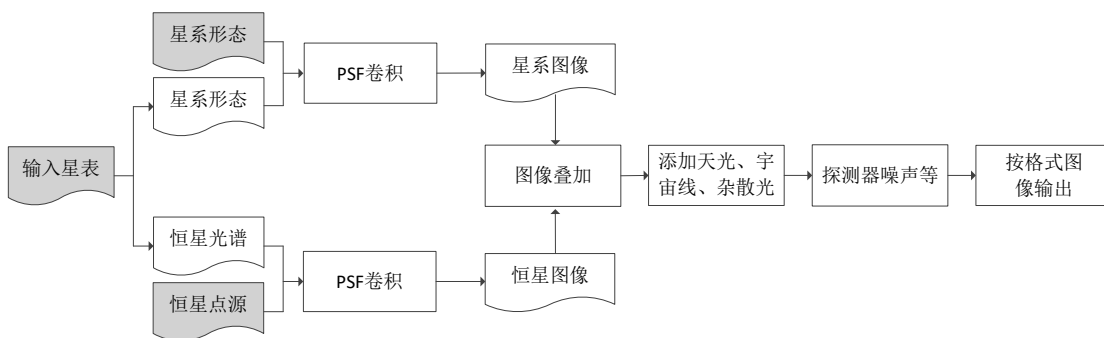


图 1 MCI 仿真软件流水线流程图

---

## 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 的仿真数据共包含弱引力透镜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/mci\_simData/

### 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 = '2024-05-11T10:48:13.4' / written date (yyyy-mm-ddThh:mm:ss.s)  
FILENAME='CSST\_MCI\_C1\_EXDF\_20240511092141\_20240511092321\_20100000001\_07\_L0\_V01'  
FILETYPE='EXDF' / observation type

---

TELESCOP= 'CSST' / telescope name  
INSTRUME= 'MCI' / instrument name  
RADECSYS= 'ICRS' / coordinate system of the object  
EQUINOX = 2000.0  
FITSSWV = 'mci\_sim\_0.8.03' / FITS creating software version  
COMMENT

---

---

COMMENT OBJECT INFORMATION

COMMENT

---

---

OBJECT = 'MCI\_obj' / object name  
TARGET = '074443.3+392523' / target name (hhmmss.s+ddmmss)  
OBSID = '20100000001' / observation ID  
RA\_OBJ = 116.18081536720157 / object RA (deg)  
DEC\_OBJ = 39.42316681016602 / object Dec (deg)  
COMMENT

---

---

COMMENT TELESCOPE INFORMATION

COMMENT

---

---

REFFRAME= 'CSSTGSC-1.0' / guiding catalog version  
DATE-OBS= '2024-05-11T10:48:13.4' / observation date (yyyy-mm-ddThh:mm:ss.s)  
SATESWV = 'softwave-1.0' / satellite software version  
EXPSTART= 60441.390069440014 / exposure start time (MJD)  
CABSTART= 2460441.89006944 / 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 = -6004.913236 / orbital position in X at CABSTART (km)  
POSIO\_Y = 2451.893411 / orbital position in Y at CABSTART (km)  
POSIO\_Z = -1886.225566 / orbital position in Z at CABSTART (km)  
VELO0\_X = -0.940734 / orbital velocity in X at CABSTART (km/s)  
VELO0\_Y = -5.963378 / orbital velocity in Y at CABSTART (km/s)  
VELO0\_Z = -4.750091 / 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 = 116.18081536720157 / pointing RA at CABSTART (deg)  
 DEC\_PNT0= 39.42316681016602 / pointing Dec at CABSTART (deg)  
 EXPEND = 60441.391226847416 / exposure end time (MJD)  
 CABEND = 2460441.891226847 / 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  
 POSI1\_X = -6014.357385 / orbital position in X at CABEND (km)  
 POSI1\_Y = 2329.193638333333 / orbital position in Y at CABEND (km)  
 POSI1\_Z = -1977.997933333333 / orbital position in Z at CABEND (km)  
 VELO1\_X = -0.7843205 / orbital velocity in X at CABEND (km/s)  
 VELO1\_Y = -6.017402166666667 / orbital velocity in Y at CABEND (km/s)  
 VELO1\_Z = -4.693886 / 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 = 116.18081536720157 / pointing RA at CABEND (deg)  
 DEC\_PNT1= 39.42316681016602 / pointing Dec at CABEND (deg)  
 EPOCH = 2460442.0 / equinox of pointing RA and Dec  
 EXPTIME = 100.0 / exposure time (s)  
 COMMENT

---



---

#### COMMENT VERIFICATION INFORMATION

COMMENT

---



---

CHECKSUM= '84dA83b983bA83b9' / HDU checksum updated 2024-05-11T18:48:13  
 DATASUM = '0' / data unit checksum updated 2024-05-11T18:48:13  
 END

#### Extension Header:

---

XTENSION= 'IMAGE' / extension type  
 BITPIX = 16 / array data type  
 NAXIS = 2 / number of array dimensions  
 NAXIS1 = 23984  
 NAXIS2 = 4936  
 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 FILE INFORMATION

COMMENT

---



---

DATE = '2024-05-11T10:48:13.5' / written date (yyyy-mm-ddThh:mm:ss.s)  
 FILENAME= 'CSST\_MCI\_C1\_EXDF\_20240511092141\_20240511092321\_20100000001\_07\_L0\_V01'  
 FILETYPE= 'EXDF' / observation type  
 RADECSYS= 'ICRS' / coordinate system of the object  
 EQUINOX = 2000.1  
 FITSSWV = '4.2.1' / FITS creating software version  
 COMMENT

---



---

#### COMMENT INSTRUMENT STATUS AND OBJECT INFORMATION

COMMENT

---



---

TELESCOP= 'CSST' / telescope name  
 INSTRUME= 'MCI' / instrument name  
 CHANNEL = 'C1' / channel number  
 FILTERNO= '07' / filter number  
 DIFFUSER= T / insert diffuser status for flat calibration  
 FLAMP = 0 / status of flat lamp

---

MCISTAT = 0 / MCI components status parameter  
 DATE-OBS= '2024-05-11T10:48:13.5' / observation date (yyyy-mm-ddThh:mm:ss.s)  
 OBJECT = 'MCI\_obj' / object name  
 TARGET = '074443.3+392523' / target name (hhmmss.s+ddmmss)  
 OBSID = '20100000001' / observation ID  
 RA\_OBJ = 116.18081536720157 / object RA (deg)  
 DEC\_OBJ = 39.42316681016602 / object Dec (deg)  
 COMMENT

---

#### COMMENT DETECTOR AND FILTER INFORMATION

COMMENT

---

FILTER = 'u' / filter band  
 DETSN = 'E2V-CCD-290-0000000' / detector serial number  
 DETNAME = 'uv' / detector name  
 DETTEMP0= 0.0 / detector temperature at EXPSTART (K)  
 DETTEMP1= 0.0 / detector temperature at EXPEND (K)  
 DETTEMP2= 0.0 / detector temperature at READT1 (K)  
 DETSIZE = '9232\*9216' / detector size  
 DATASECT= '4936\*23984' / data section  
 PIXSCALE1= 0.05 / pixel scale for axis 1 (arcsec/pixel)  
 PIXSCALE2= 0.05 / pixel scale for axis 2 (arcsec/pixel)  
 PIXSIZE1= 10 / pixel size for axis 1 (micron)  
 PIXSIZE2= 10 / pixel size for axis 2 (micron)  
 NCHANNEL= 16 / number of readout channels  
 PSCAN1 = 27 / horizontal prescan width, per readout channel  
 PSCAN2 = 0 / vertical prescan width, per readout channel  
 OSCAN1 = 320 / horizontal overscan width, per readout channel  
 OSCAN2 = 320 / vertical overscan width, per readout channel  
 BIN\_X = 1 / bin number in X  
 BIN\_Y = 1 / bin number in Y  
 COMMENT

---

#### COMMENT WORLD COORDINATE SYSTEM INFORMATION

COMMENT

---



---

WCSAXES = 2 / number of WCS axes  
 CRPIX1 = 4607.5 / x-coordinate of reference pixel  
 CRPIX2 = 4615.5 / y-coordinate of reference pixel  
 CRVAL1 = 116.18081536720157 / value of reference pixel on axis 1  
 CRVAL2 = 39.42316681016602 / value of reference pixel on axis 2  
 CTYPE1 = 'RA---TAN' / type of RA WCS projection  
 CTYPE2 = 'DEC--TAN' / type of Dec WCS projection  
 CD1\_1 = -1.3888888888888E-05 / transformation matrix element (deg/pix)  
 CD1\_2 = -0.0 / transformation matrix element (deg/pix)  
 CD2\_1 = -0.0 / transformation matrix element (deg/pix)  
 CD2\_2 = 1.3888888888888E-05 / transformation matrix element (deg/pix)  
 COMMENT

---



---

COMMENT READOUT INFORMATION

COMMENT

---



---

GAINLVL = 1.5 / gain level (e-/ADU)  
 GAIN01 = 1.53 / CCD gain [channel 1] (e-/ADU)  
 GAIN02 = 1.54 / CCD gain [channel 2] (e-/ADU)  
 GAIN03 = 1.55 / CCD gain [channel 3] (e-/ADU)  
 GAIN04 = 1.53 / CCD gain [channel 4] (e-/ADU)  
 GAIN05 = 1.51 / CCD gain [channel 5] (e-/ADU)  
 GAIN06 = 1.56 / CCD gain [channel 6] (e-/ADU)  
 GAIN07 = 1.58 / CCD gain [channel 7] (e-/ADU)  
 GAIN08 = 1.53 / CCD gain [channel 8] (e-/ADU)  
 GAIN09 = 1.54 / CCD gain [channel 9] (e-/ADU)  
 GAIN10 = 1.57 / CCD gain [channel 10] (e-/ADU)  
 GAIN11 = 1.51 / CCD gain [channel 11] (e-/ADU)  
 GAIN12 = 1.53 / CCD gain [channel 12] (e-/ADU)  
 GAIN13 = 1.55 / CCD gain [channel 13] (e-/ADU)  
 GAIN14 = 1.57 / CCD gain [channel 14] (e-/ADU)  
 GAIN15 = 1.53 / CCD gain [channel 15] (e-/ADU)  
 GAIN16 = 1.52 / CCD gain [channel 16] (e-/ADU)  
 RON01 = 4.53 / readout noise [channel 01] (e-)

---

RON02	=	4.54 / readout noise [channel 02] (e-)
RON03	=	4.55 / readout noise [channel 03] (e-)
RON04	=	4.53 / readout noise [channel 04] (e-)
RON05	=	4.51 / readout noise [channel 05] (e-)
RON06	=	4.56 / readout noise [channel 06] (e-)
RON07	=	4.58 / readout noise [channel 07] (e-)
RON08	=	4.53 / readout noise [channel 08] (e-)
RON09	=	4.54 / readout noise [channel 09] (e-)
RON10	=	4.57 / readout noise [channel 10] (e-)
RON11	=	4.51 / readout noise [channel 11] (e-)
RON12	=	4.53 / readout noise [channel 12] (e-)
RON13	=	4.55 / readout noise [channel 13] (e-)
RON14	=	4.57 / readout noise [channel 14] (e-)
RON15	=	4.53 / readout noise [channel 15] (e-)
RON16	=	4.52 / readout noise [channel 16] (e-)
DETBJA01=		500.0 / amplifier bias grey value [channel 1] (ADU)
DETBJA02=		510.0 / amplifier bias grey value [channel 2] (ADU)
DETBJA03=		514.0 / amplifier bias grey value [channel 3] (ADU)
DETBJA04=		520.0 / amplifier bias grey value [channel 4] (ADU)
DETBJA05=		524.0 / amplifier bias grey value [channel 5] (ADU)
DETBJA06=		540.0 / amplifier bias grey value [channel 6] (ADU)
DETBJA07=		530.0 / amplifier bias grey value [channel 7] (ADU)
DETBJA08=		532.0 / amplifier bias grey value [channel 8] (ADU)
DETBJA09=		534.0 / amplifier bias grey value [channel 9] (ADU)
DETBJA10=		526.0 / amplifier bias grey value [channel 10] (ADU)
DETBJA11=		532.0 / amplifier bias grey value [channel 11] (ADU)
DETBJA12=		516.0 / amplifier bias grey value [channel 12] (ADU)
DETBJA13=		540.0 / amplifier bias grey value [channel 13] (ADU)
DETBJA14=		560.0 / amplifier bias grey value [channel 14] (ADU)
DETBJA15=		536.0 / amplifier bias grey value [channel 15] (ADU)
DETBJA16=		528.0 / amplifier bias grey value [channel 16] (ADU)
ROSPEED	=	100.0 / readout speed (MHz)
COMMENT		

---



---

COMMENT EXPOSURE AND SHUTTER INFORMATION

---

COMMENT

---

EXPSTART= 60441.390069440014 / exposure start time (MJD)

EXPEND = 60441.391226847416 / exposure end time (MJD)

EXPTIME = 100.0 / exposure time (s)

DARKTIME= 100.0 / dark current time (s)

SHTSTAT = T / shutter status

COMMENT

---

COMMENT SATELLITE AND ITS ATTITUDE INFORMATION

COMMENT

---

REFFRAME= 'CSSTGSC-1.0' / guiding catalog version

SATESWV = 'softwave-1.0' / satellite software version

CABSTART= 2460441.89006944 / 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 = -6004.913236 / orbital position in X at CABSTART (km)

POSIO\_Y = 2451.893411 / orbital position in Y at CABSTART (km)

POSIO\_Z = -1886.225566 / orbital position in Z at CABSTART (km)

VELO0\_X = -0.940734 / orbital velocity in X at CABSTART (km/s)

VELO0\_Y = -5.963378 / orbital velocity in Y at CABSTART (km/s)

VELO0\_Z = -4.750091 / 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 = 116.18081536720157 / pointing RA at CABSTART (deg)

DEC\_PNT0= 39.42316681016602 / pointing Dec at CABSTART (deg)

CABEND = 2460441.891226847 / 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

---

```

POS1_X =      -6014.357385 / orbital position in X at CABEND (km)
POS1_Y =    2329.193638333333 / orbital position in Y at CABEND (km)
POS1_Z = -1977.997933333333 / orbital position in Z at CABEND (km)
VELO1_X =      -0.7843205 / orbital velocity in X at CABEND (km/s)
VELO1_Y = -6.017402166666667 / orbital velocity in Y at CABEND (km/s)
VELO1_Z =      -4.693886 / 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 = 116.18081536720157 / pointing RA at CABEND (deg)
DEC_PNT1=  39.42316681016602 / pointing Dec at CABEND (deg)
EPOCH   =          2460442.0 / equinox of pointing RA and Dec
COMMENT

```

---

```

COMMENT VERIFICATION INFORMATION
COMMENT

```

---

```

CHECKSUM= 'LfflNefkLefkLefk' / HDU checksum updated 2024-05-11T18:48:14
DATASUM = '3333119874' / data unit checksum updated 2024-05-11T18:48:14
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 MCI 紫外通道 dark 仿真实例图像

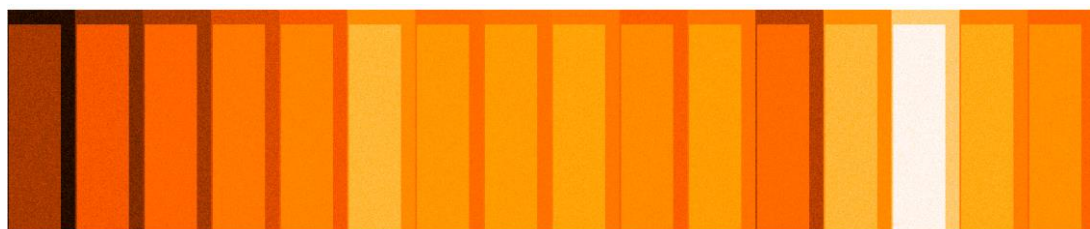


图 3 MCI 可见光通道 dark 仿真实例图像

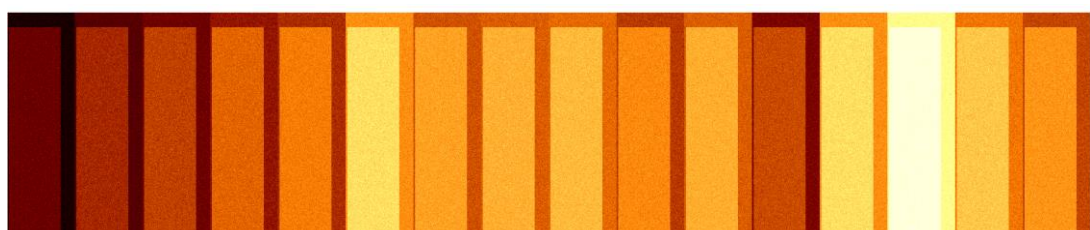


图 4 MCI 近红外通道 dark 仿真实例图像

---

## 2.2 FLAT 仿真图像

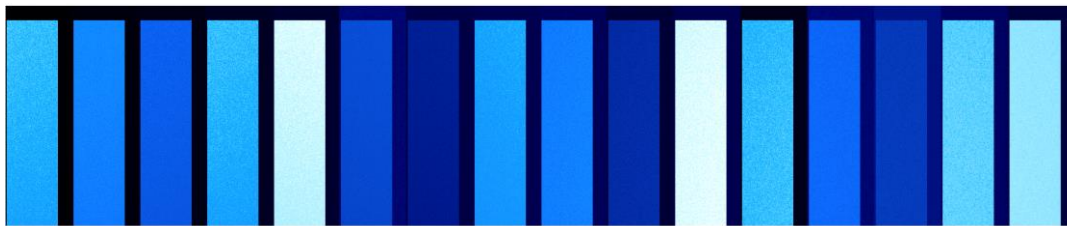


图 5 MCI 紫外通道平场仿真实例图像

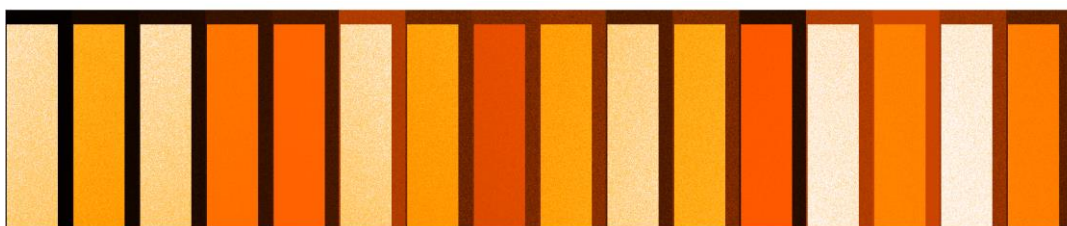


图 6 MCI 可见光通道平场仿真实例图像

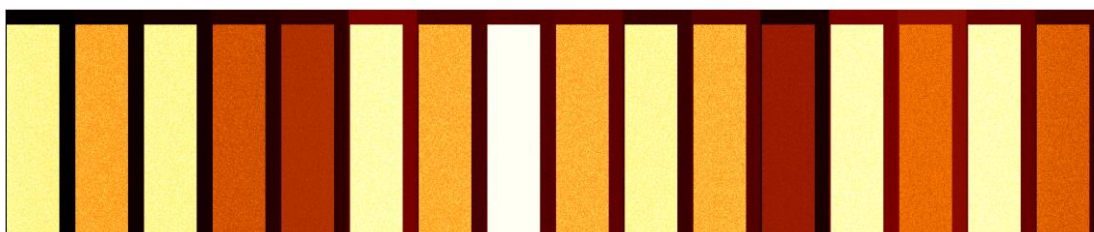
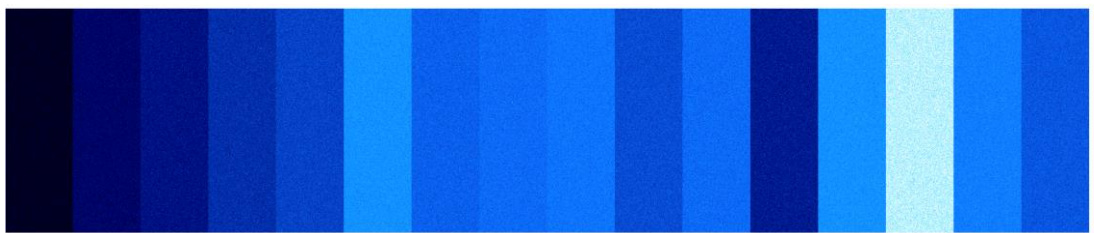


图 7 MCI 近红外通道平场仿真实例图像

## 2.3 BIAS 仿真图像



---

图 8 MCI 紫外通道 BIAS 仿真实例图像

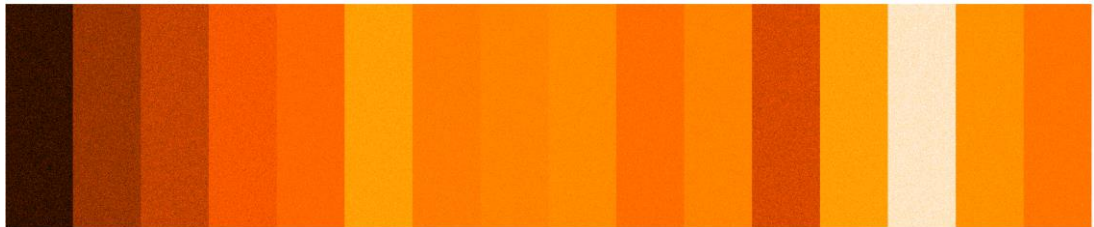


图 9 MCI 可见光通道 BIAS 仿真实例图像

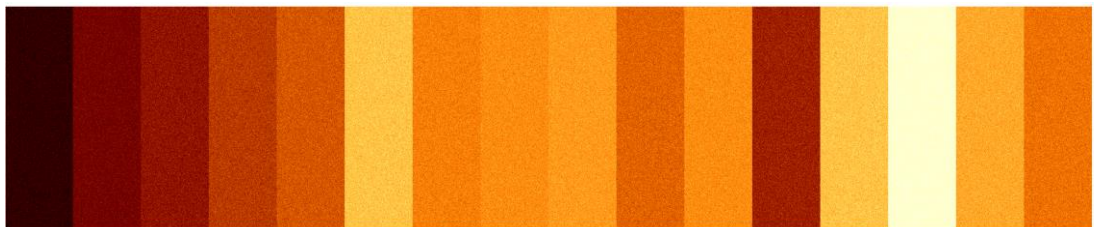


图 10 MCI 近红外通道 BIAS 仿真实例图像

### 3 观测仿真结果

MCI 仿真数据 Cycle 9 的物理效应包括光线追踪数值模拟的弱透镜效应、宇宙线、背景天光、杂散光、天测效应等。仪器效应包括点扩散效应、读出噪声、快门效应、暗电流、坏像素、热像素、非线性、CCD 饱和溢出、CTI、prescan 和 overscan 等。

#### 3.1 STAR 仿真图像

恒星星等分布直方图如下所示，星等从约 10 等-31 等，观测视场中大概有一千颗恒星。

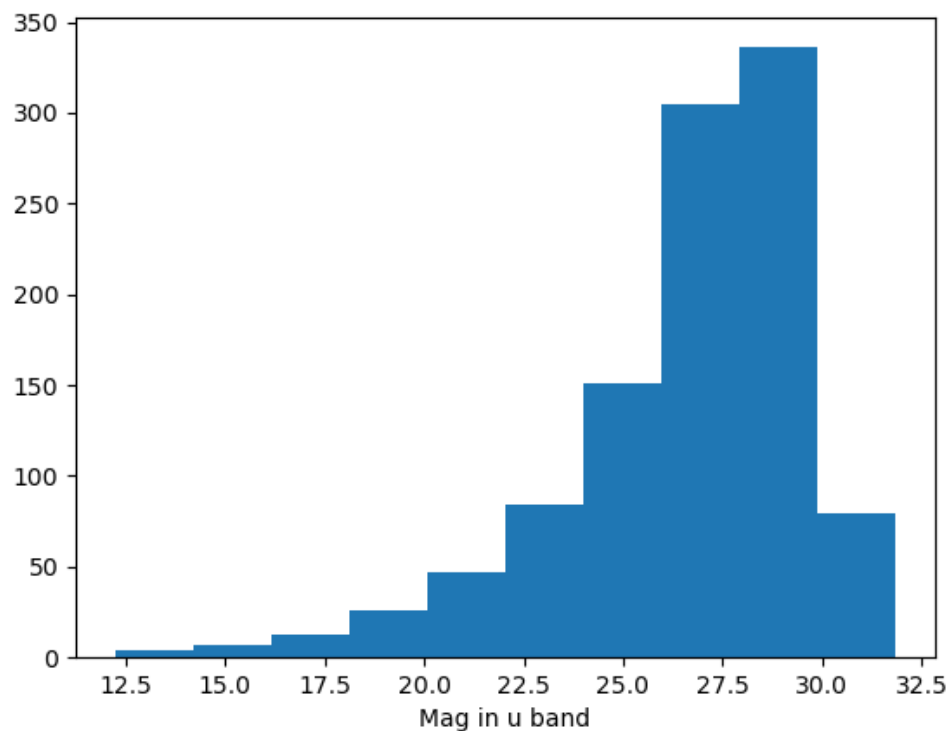


图 11 u 波段恒星星等分布

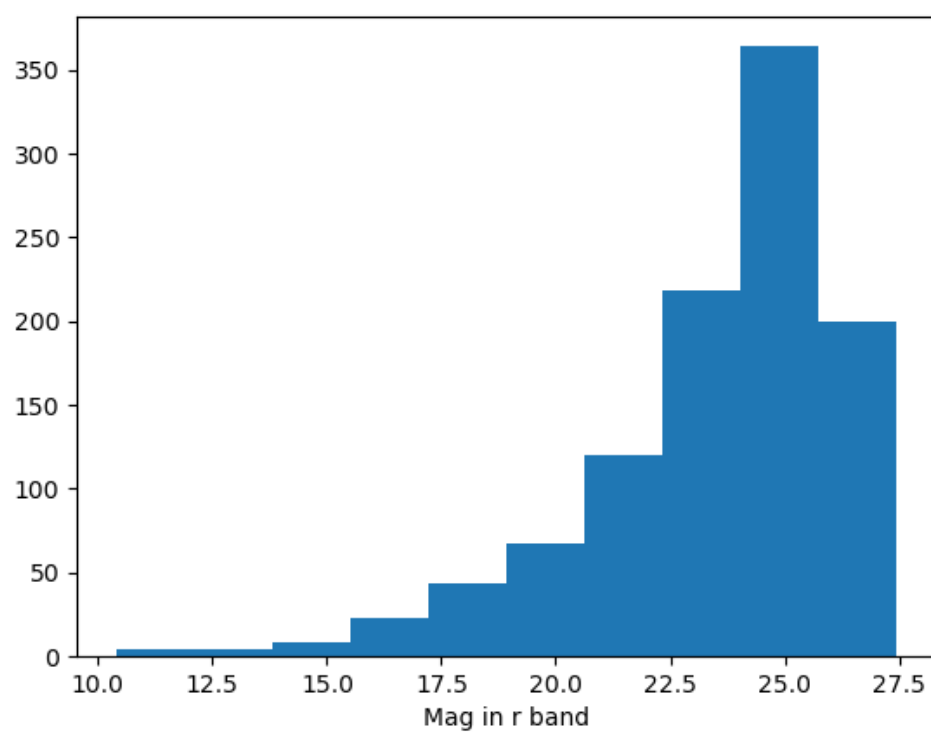


图 12 r 波段恒星等分布

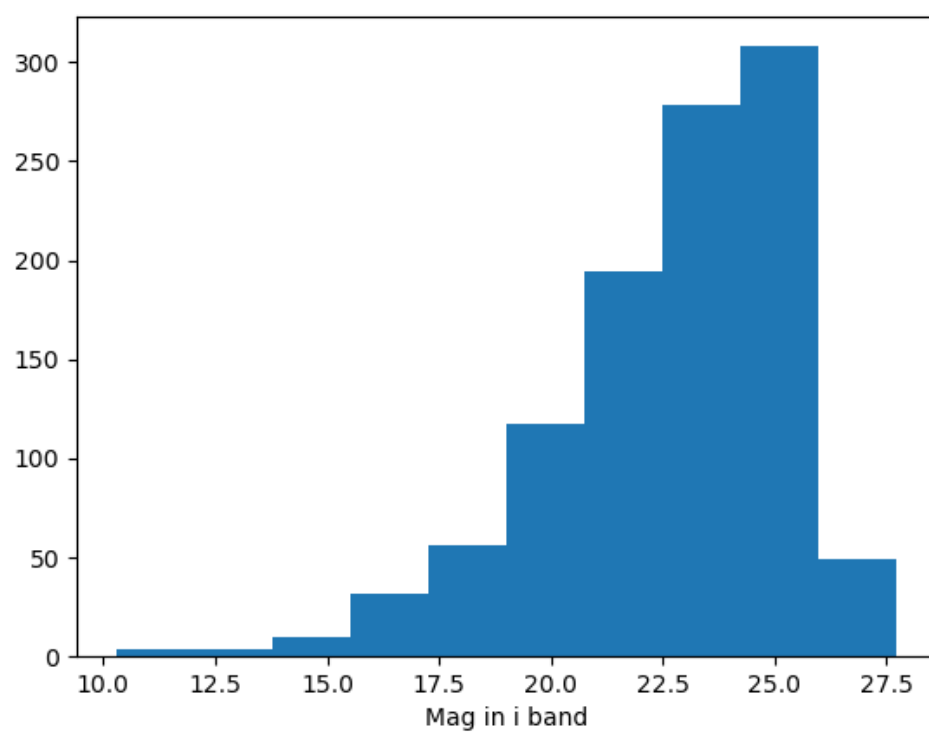


图 13 i 波段恒星星等分布

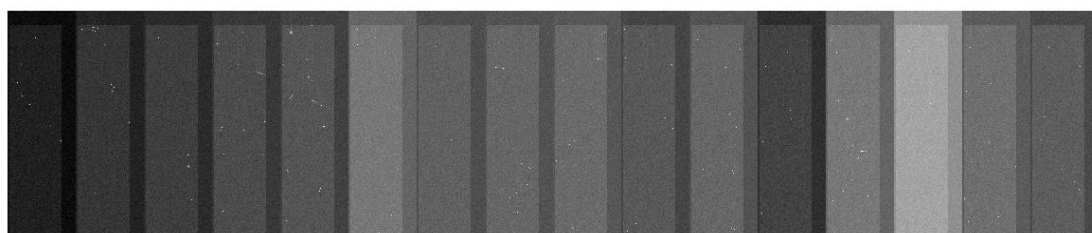


图 14 紫外通道 STAR 仿真图像



图 15 可见光通道 STAR 仿真图像

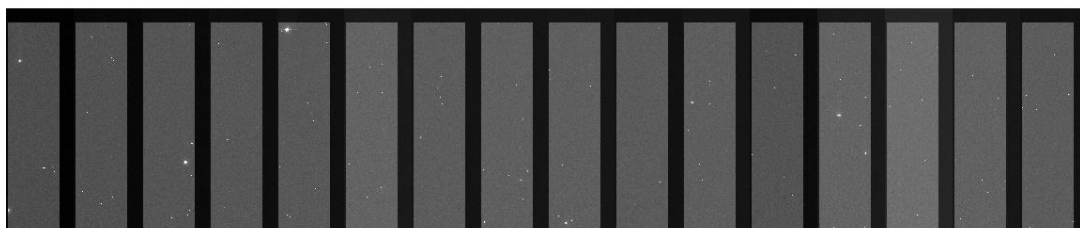


图 16 近红外通道 STAR 仿真图像

### 3.2 EXDF 仿真图像

超深场星系星等分布直方图如下所示，星等从约 16 等-31 等，大约有三千多个星系落在 MCI 视场中。

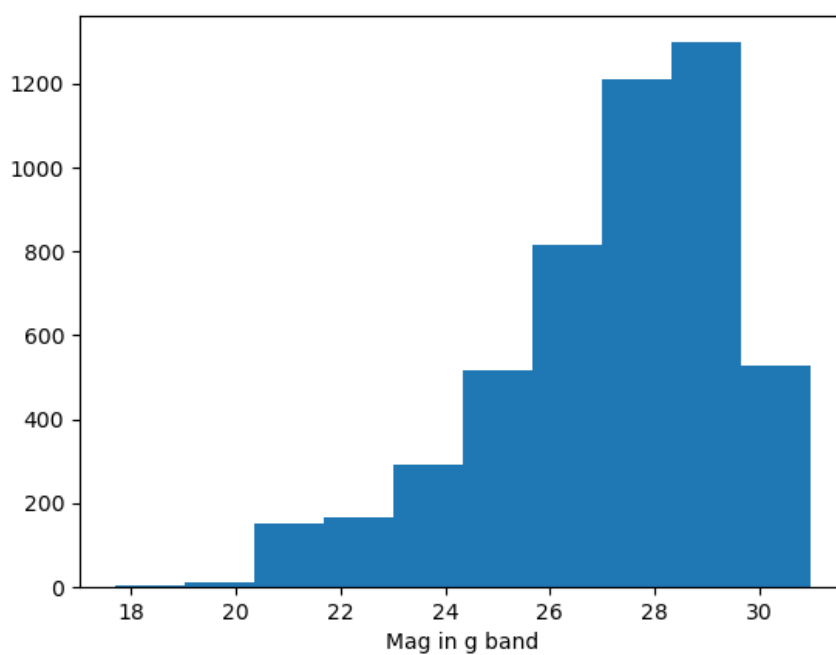


图 17 超深场 galaxy 星等在 g 波段的分布直方图

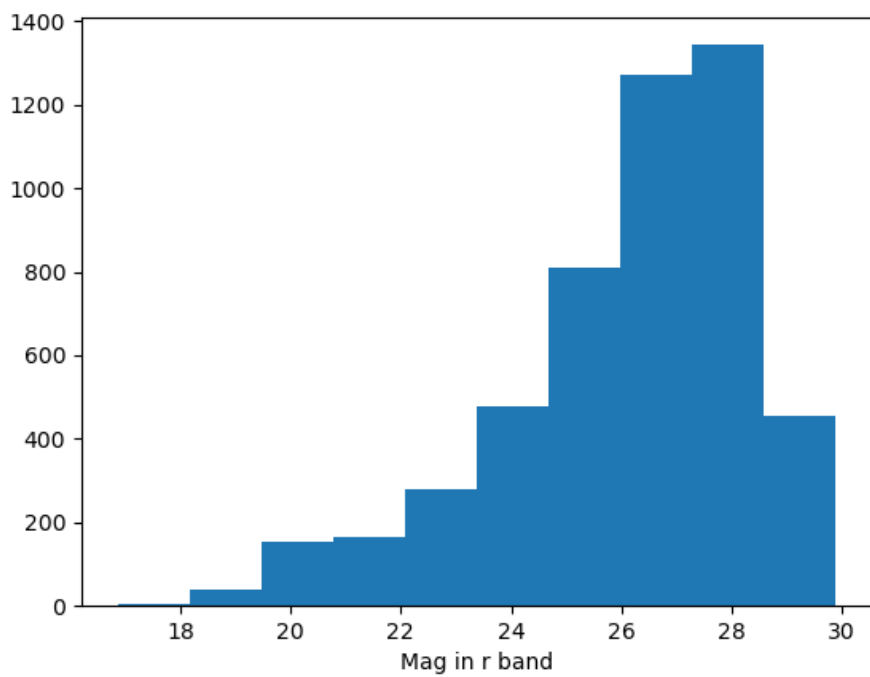


图 18 超深场 galaxy 星等在 r 波段的分布直方图

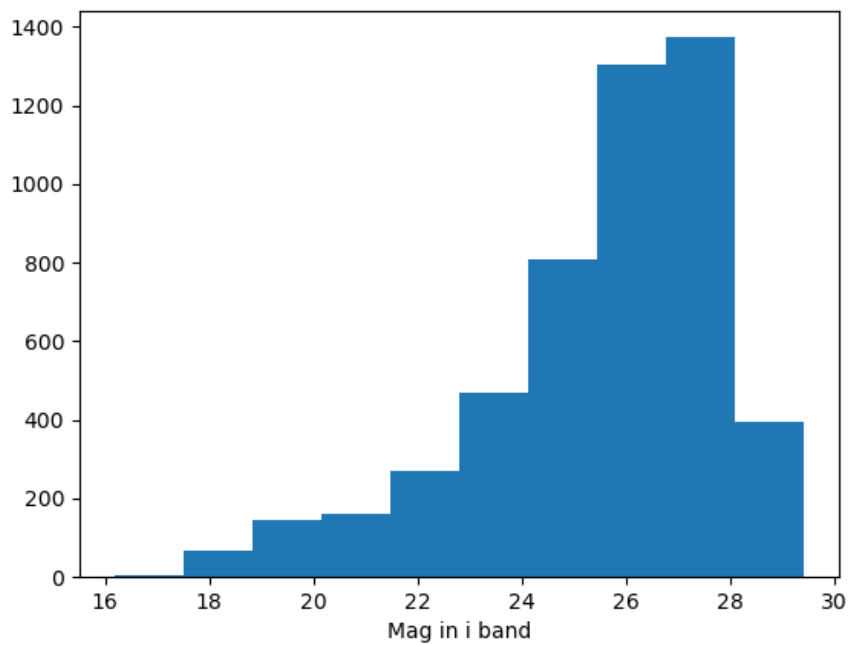


图 19 超深场 galaxy 星等在 i 波段的分布直方图

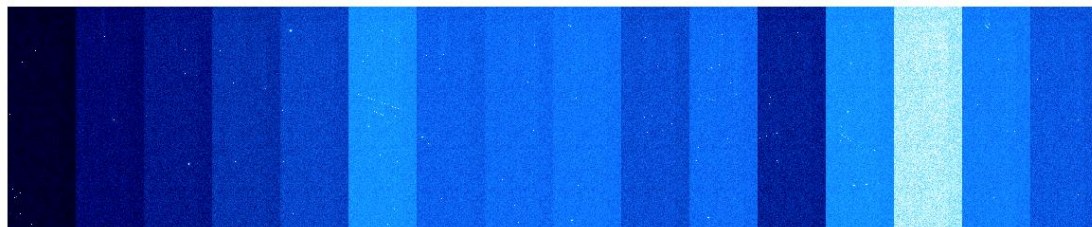


图 20 紫外通道超深场仿真图像

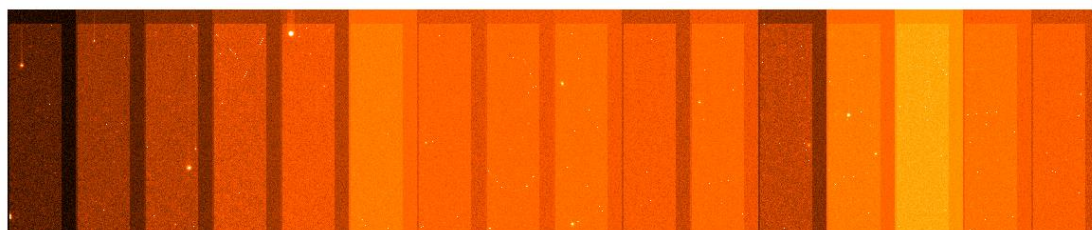


图 21 可见光通道超深场仿真图像

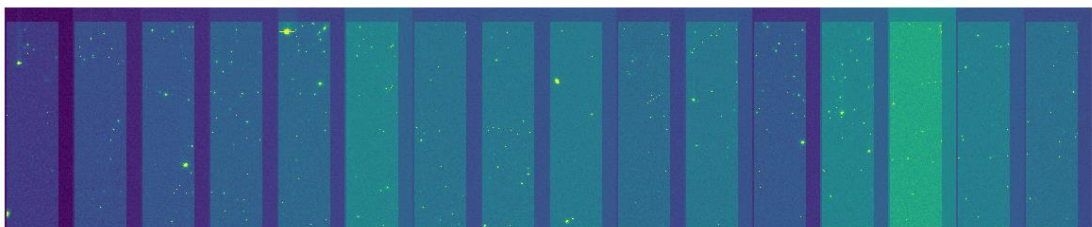


图 22 近红外通道超深场仿真图像

## 4 一些仿真细节

### 4.1 PSF 采样数据说明

本轮 MCI 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乘以二倍作为 MCI 光学系统的综合像差，通过波前数据来计算 PSF 数据。为了保证 PSF 的插值精度，在每片 CCD 视场内均匀采样了 10x10 个视场位置，在 633nm 波长时，PSF 的 80%能量集中度半径如下图所示 23 所示, PSF 的图像如下图所示(PSF 的分辨率为 0.05arcsec)。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 7 个子波段来实现 PSF 的亚波段采样。

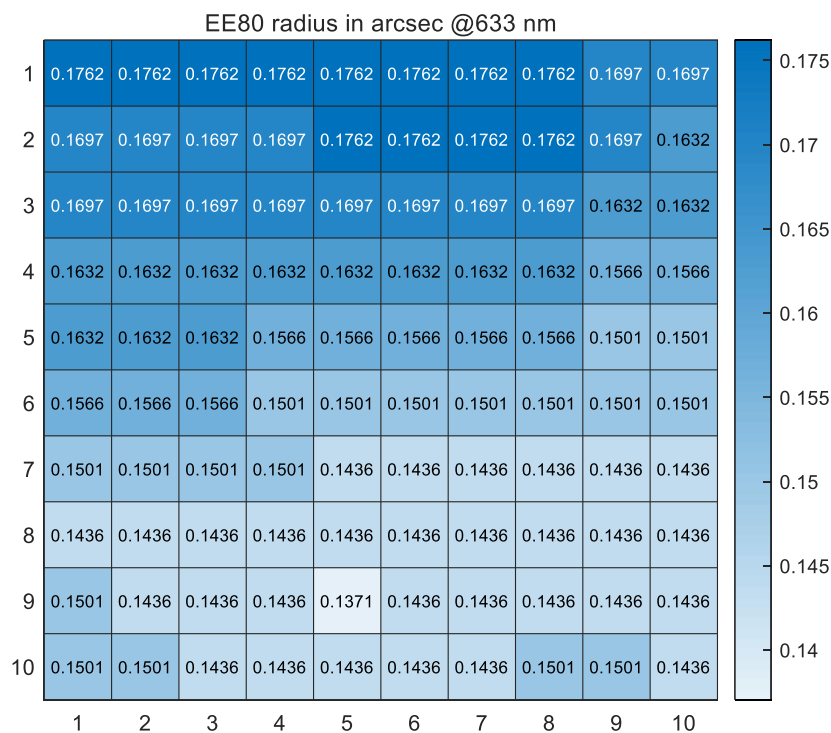


图 23 80%能量集中度半径@633nm

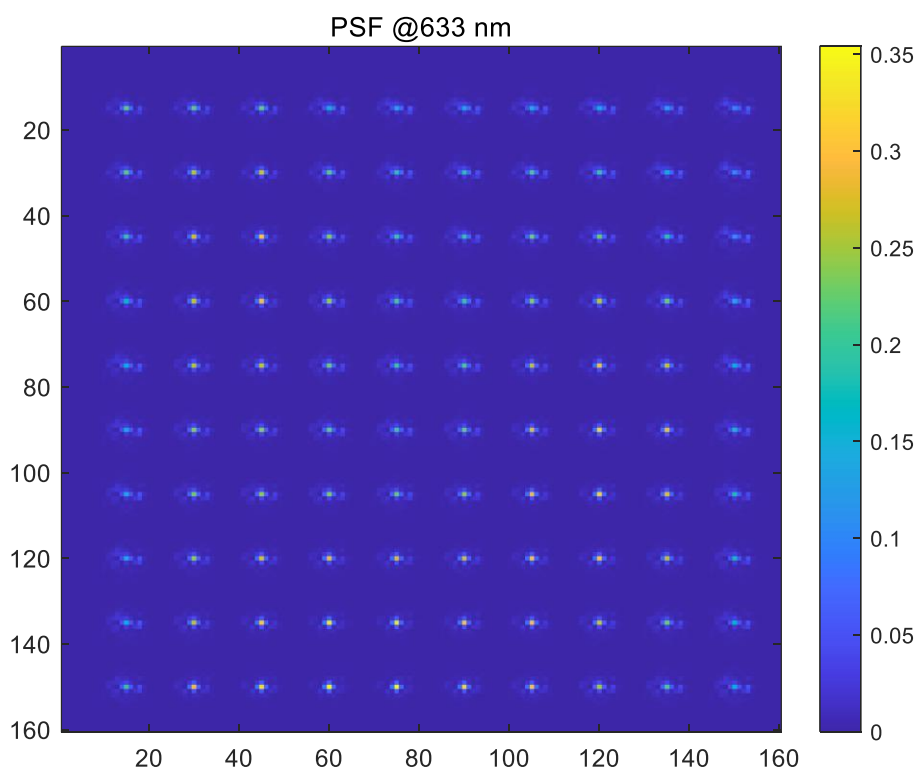


图 24 仿真得到的 PSF @633nm

## 4.2 像场畸变

像场畸变的数据从 MCI 的 zemax 文件通过 python 联合编程导出，625nm 波长的像场畸变数据如下图所示，全视场共 50\*50 个采样点，通过 5 阶的多项式拟合来实现任意视场的像差畸变，Ra 和 Dec 方向畸变的最大拟合误差大致在 0.1 微米，也就是百分之一像素。这里我们构建望远镜入射光瞳面的视场坐标 ( $Ra_0$ 、 $Dec_0$ ) 和出射光瞳面的视场坐标 ( $Ra_1$ 、 $Dec_1$ ) 之间的映射关系函数，来构建像场畸变效应。

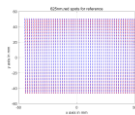


图 25 像场畸变模拟的采样点

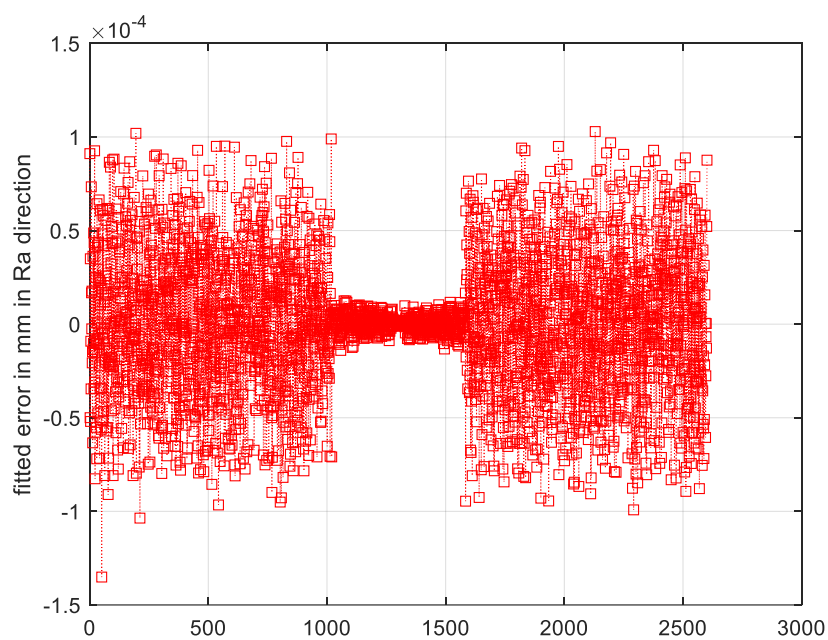


图 26 像场畸变拟合误差 (Ra 方向)

### 4.3 PSF 插值

在当前版本的图像仿真中,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。为了检验 IDW 算法对图像仿真精度的影响,利用 30x30 的数据来插值 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以已知的采样做一对一的交叉检验。下图展示了视场所有位置处的插值相对误差统计结果,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<1%以内。

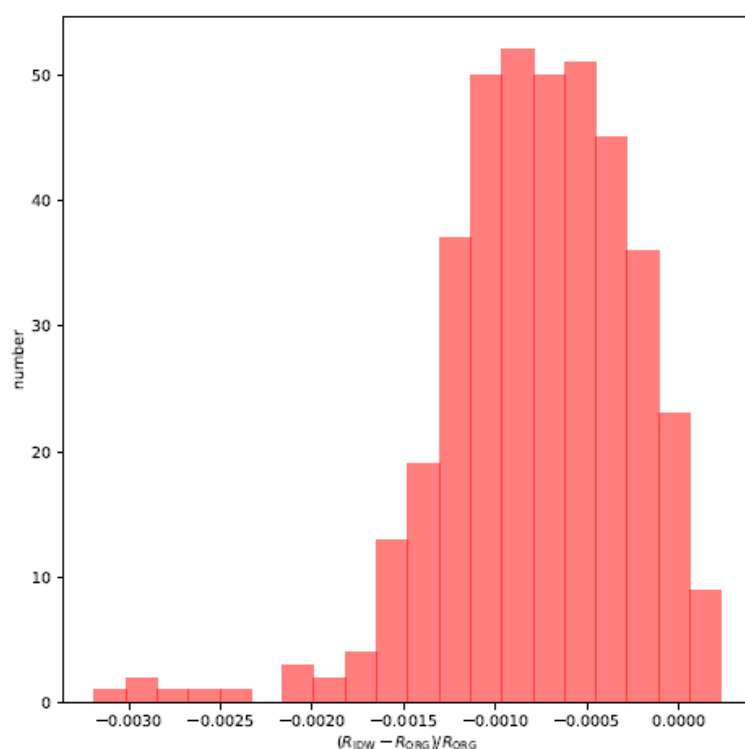


图 27 PSF 插值相对误差分布

---

## 4.4 SED、Filter、PSF 卷积

$$IMG = S_{phon} * I * (PSF_1 \cdot C_1 + PSF_2 \cdot C_2 + \dots + PSF_N \cdot C_N)$$

模拟生成的图像由上式子计算得到，只需要进行一次图像卷积，其中：

- $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\dots$ 、 $C_N$ ：能量归一化系数，包括了输入源的 SED 以及光学系统和滤光片的光学效率、探测器效率。
- $S_{phon}$ ：总的光子数，由输入源的 SED 以及光学系统和滤光片的光学效率、探测器效率以及曝光时间确定。
- $I$ ：输入源的归一化二维强度分布。
- $N=7$ ， $\lambda_n = \lambda_c + (n - 4) * \lambda_{FWHM}/4$ 。即每个滤光片有 7 个采样波长。
- 卷积都在 0.025arcsec 分辨率尺度上进行。
- PSF 大小为 515\*512。

## 4.5 宇宙线

输入宇宙线覆盖率可以 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 快门效应

定义 MCI 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。当曝光时间大于 5s 时施加快门效应。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，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。快门效应在垂直于轴承方向上没有变化，在平行于轴承方向上各处的曝光时间不同，产生不均匀性。Shutter 某一行的图像如下图所示。（ $\text{ShutterMat}=1-\text{shutter}/\text{exptime}$ ,  $\text{Img}=\text{img}*\text{ShutterMat}$ ）

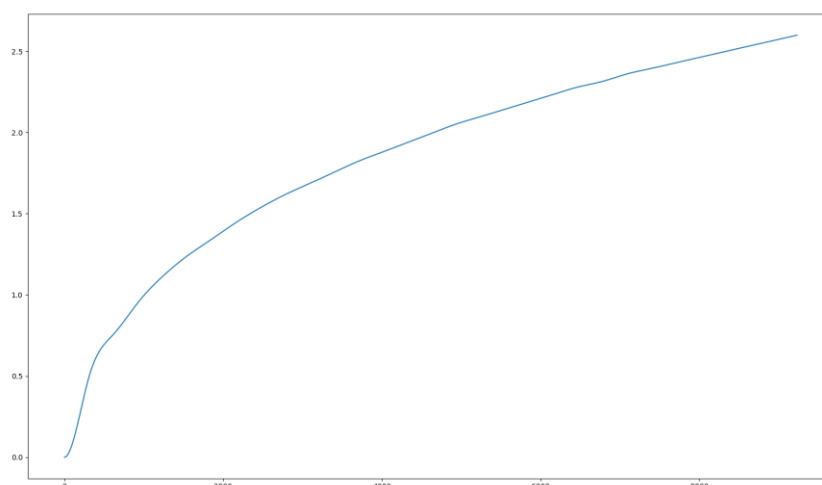


图 28 shutter 矩阵中的某一行的分布曲线

## 4.7 PRNU

模拟归一化平场的像元间响应不均匀性（ $\text{mean}=1$ 、 $\sigma=0.01$  的高斯分布）；每个滤光片通过指定 seed 随机种子，实现滤光片仿真图像差异性。

---

## 4.8 Brighter-fatter 及电荷扩散效应

使用 Galsim 内置的 SiliconSensor 模块实现亮胖、电荷扩散效应。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。

## 4.9 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： $f(x) = x - \text{beta} * x^2$ ,  $\text{beta} = 6E-7$ 。

## 4.10 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。

## 4.11 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 MCI 三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。

## 4.12 BIAS

每个探测器有 16 个读出通道，即 16 路读出通道的本底具有不同的 bias 值（单位：ADU）。

---

## 4.13 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<sup>-</sup>。

## 4.14 CTI 效应

当前版本 CTI 拖尾方向沿列读出方向。（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）。

## 4.15 读出噪声

读出噪声为高斯分布，每个探测器的 16 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。

## 4.16 增益

每个探测器的 16 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。

## 4.17 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。

---

## 4.18 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。

## 4.19 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。