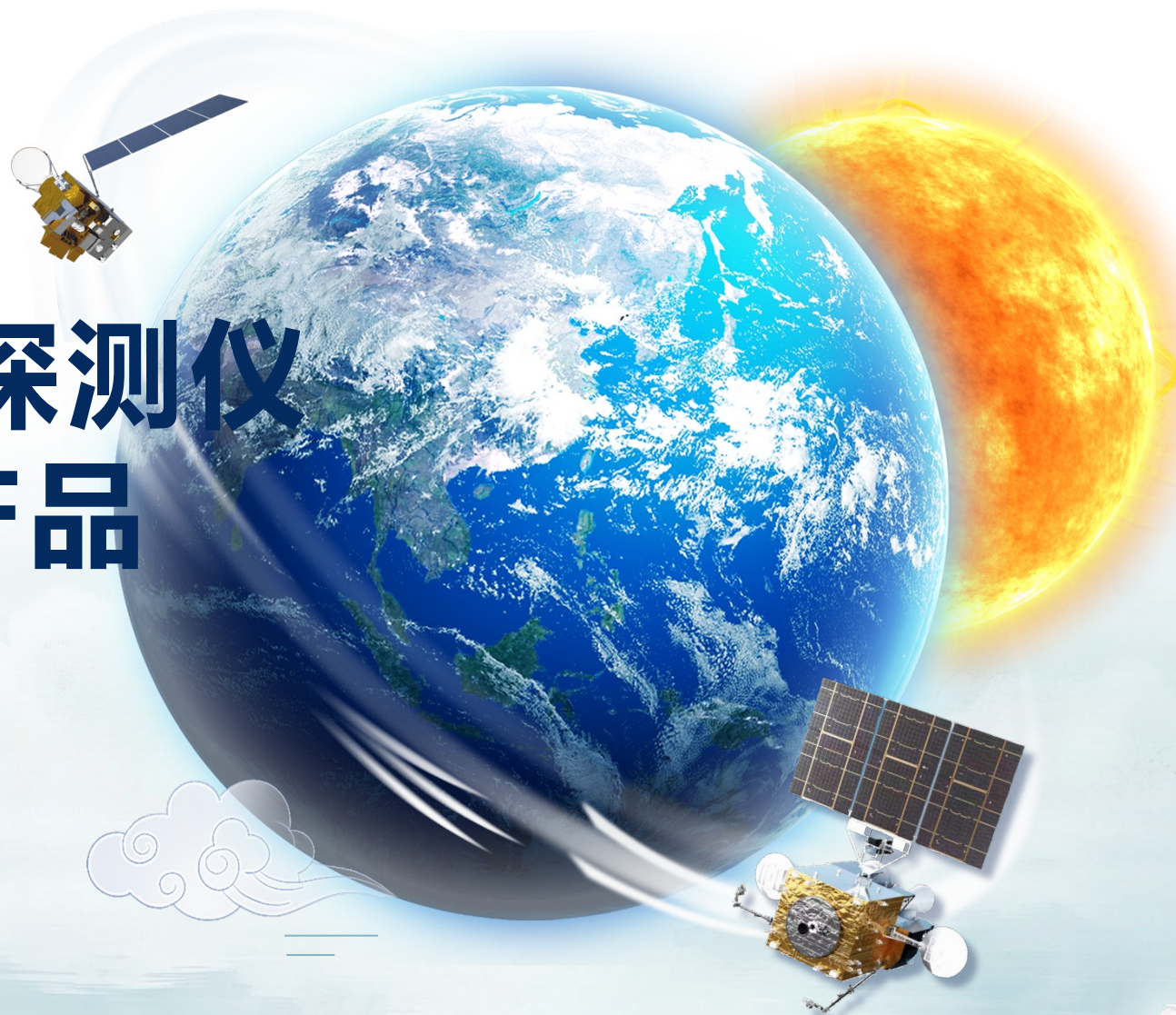


风云三号H星掩星探测仪 仪器与L1数据产品

鲁文强

2026年6月



目录

01 仪器简介

02 L1预处理关键技术及数据质量

03 L1产品及使用指南

04 典型应用场景及实例

01

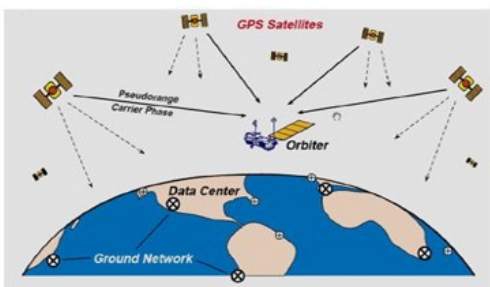
仪器简介



1. 仪器简介

■ GNOS II主要任务是进行**GNSS掩星探测**和**GNSS反射探测**

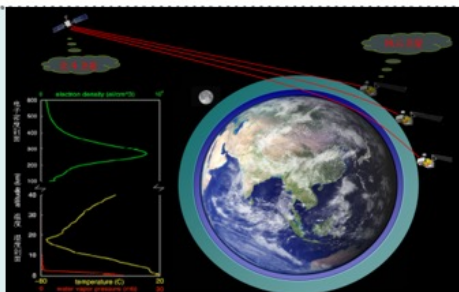
精密定轨



提供:

- ① 事后精密定轨
- ② 实时定位
- ③ 实时校时
- ④ 实时轨道参数

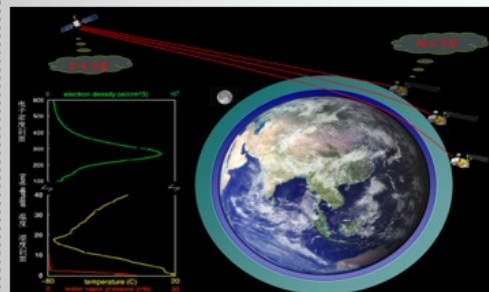
电离掩星



为空间天气预警预报提供:

- ① 电子密度廓线
- ② TEC电子总含量
- ③ 电离层闪烁指数

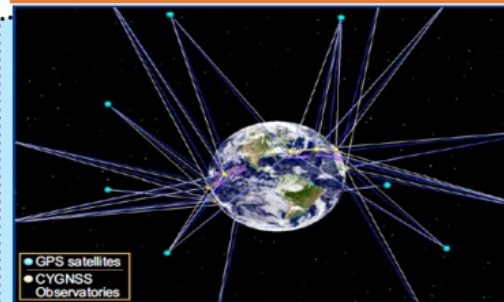
大气掩星



为数值天气预报等提供:

- ① 折射率廓线
- ② 温度廓线
- ③ 湿度廓线
- ④ 压力廓线

GNSS-R



为极端天气监测提供:

- ① 海面风速
- ② 海冰参数
- ③ 土壤湿度



1. 仪器简介

FY3C(AM)

GNOS I
GNSS-RO(BDS+GPS)

Launched on Sep. 23rd, 2013.
First GNSS-RO instrument can receive both GPS and BDS signals in world

FY3D(PM)

GNOS I
GNSS-RO(BDS+GPS)

Launched on Nov. 11st, 2017.

FY3E(EM)

GNOS II
GNSS-RO(BDS+GPS)
GNSS-R(BDS+GPS +Galileo)

Launched on July. 5th, 2021.
First GNSS-RO&R instrument in world
First GNSS-RO instrument can receive BDS III signals

FY3F(AM)

GNOS II
GNSS-RO(BDS+GPS +Galileo)
GNSS-R(BDS+GPS +Galileo)

Launched on August. 3rd, 2023.
Increase Galileo signals

FY3G(RM, 400km)

GNOS II
GNSS-RO(BDS+GPS +Galileo)
GNSS-R(BDS+GPS +Galileo)

Launched on April. 16th, 2023.

FY3H(PM)

GNOS II
GNSS-RO(BDS+GPS +Galileo)
GNSS-R(BDS+GPS +Galileo)

Launched on Sep. 27th, 2025.



02

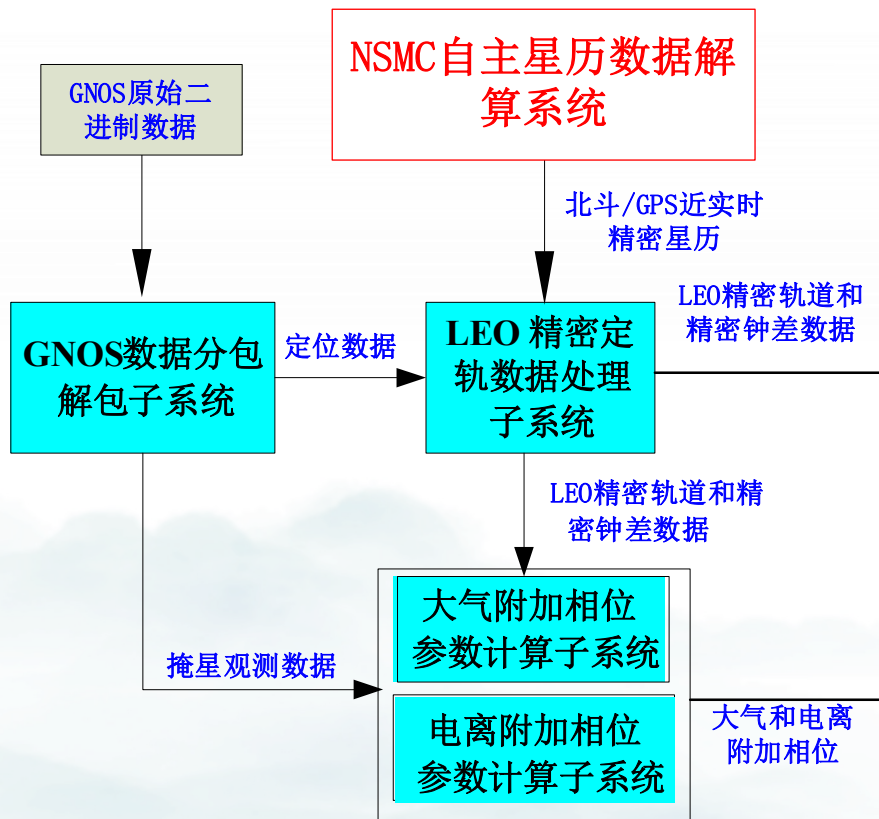
L1预处理关键技术及数据质量



2. L1预处理关键技术及数据质量

掩星预处理算法

GNOS-II的掩星预处理算法主要包括LEO精密定轨和附加相位计算。



LEO精密定轨的主要功能是使用简化动力学法估计FY-3H卫星的精密轨道和GNOS-II时钟偏差，为附加相位的计算提供输入数据。

GNSS 观测方程为：

$$P_i^j = \rho^j + c \cdot (\delta T - \delta t^j) + I_i^j + E_i^j$$

$$\Phi_i^j = \rho^j + c \cdot (\delta T - \delta t^j) - I_i^j + \lambda_i N_i^j + e_i^j$$

卫星动力学方程：

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3} \mathbf{r} + \mathbf{f}_1(t, \mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, p, \dots, p) \approx \mathbf{f}$$



图 LEO定轨基本算法流程

附加相位计算是指计算中性大气及电离层对信号的折射作用对信号传播距离造成影响，也即由于信号折射使信号偏离LEO卫星与GNSS卫星的几何距离的延迟量。

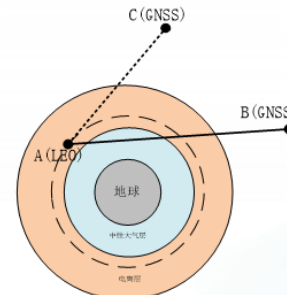


图 GNSS掩星观测几何结构图

LEO钟差	GNSS钟差	相对论效应
$L_{a,1}^b(t_r) = \rho_a^b(t_r) + c(\delta t_a(t_r) - \delta t_{a,rel}(t_r)) - c(\delta t^b(t_r - t_a^b) - \delta t_{rel}^b(t_r - t_a^b)) + \delta \rho_{a,rel}^b(t_r) + \delta \rho_{a,ion}^b(t_r) + \delta \rho_{a,atm}^b(t_r)$		
$L_{a,3}^c(t_r) = \rho_a^c(t_r) + c(\delta t_a(t_r) - \delta t_{a,rel}(t_r)) - c(\delta t^c(t_r - t_a^c) - \delta t_{rel}^c(t_r - t_a^c)) + \delta \rho_{a,rel}^c(t_r)$		

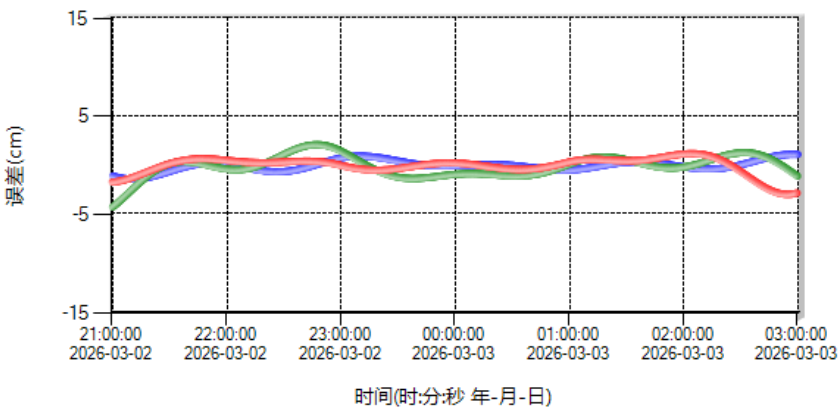


2. L1预处理关键技术及数据质量

掩星事件数量/天

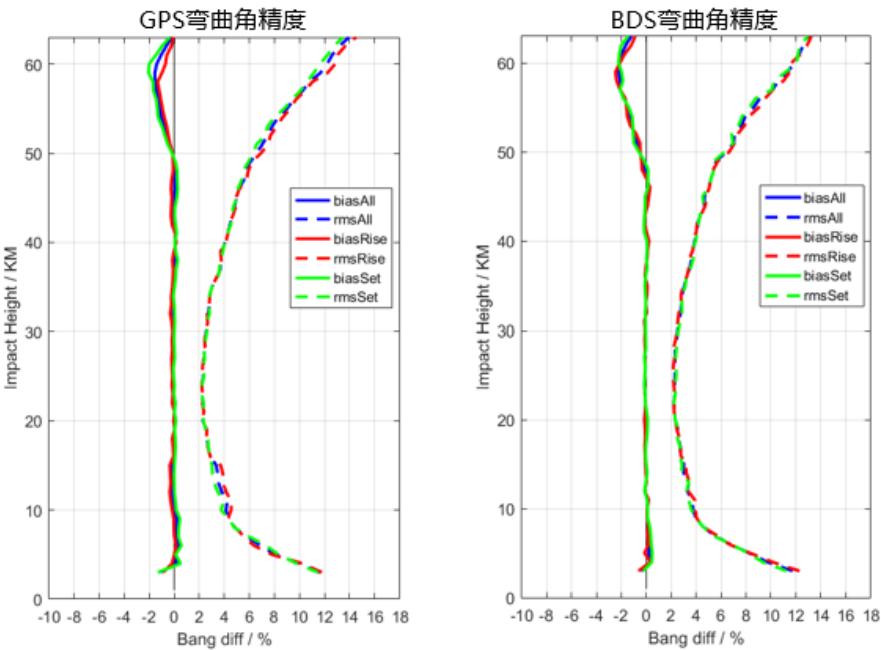
掩星事件数	BDS大气	BDS电离	GPS大气	GPS电离
平均值	500	780	500	680

精密定轨精度



3D位置平均精度：2.27cm

切点高度检验



大气掩星弯曲角O-B标准偏差小于 3 % (15~35km)

切点高度误差对弯曲角精度影响

高度区间	平均RMS (%)		
	10m误差	100m误差	1000m误差
15-35 km	0.23	4.55	15.56

切点高度误差优于100m

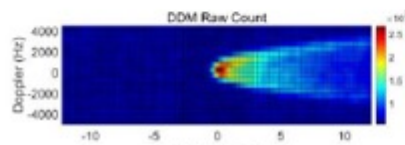


2. L1预处理关键技术及数据质量

反射预处理算法

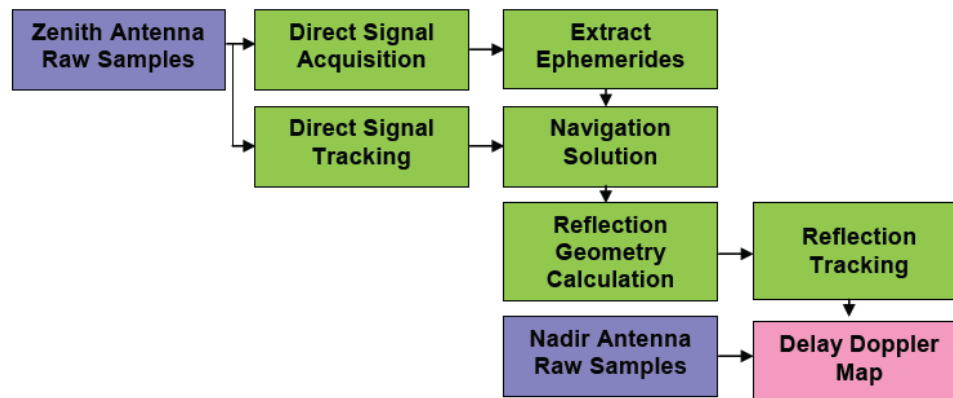
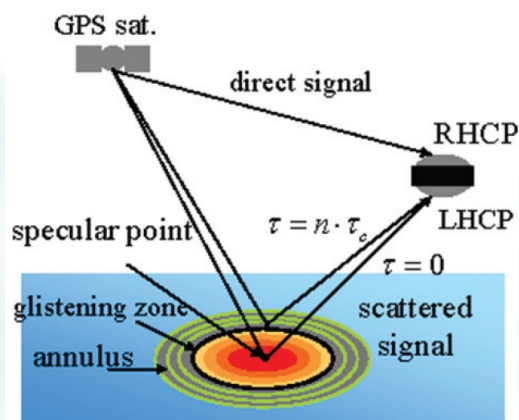
GNSS定位：GNSS信号的时延/相位（距离）

GNSS-R：GNSS信号的幅度（功率）



雷达散射截面 σ^0
反射率 Γ

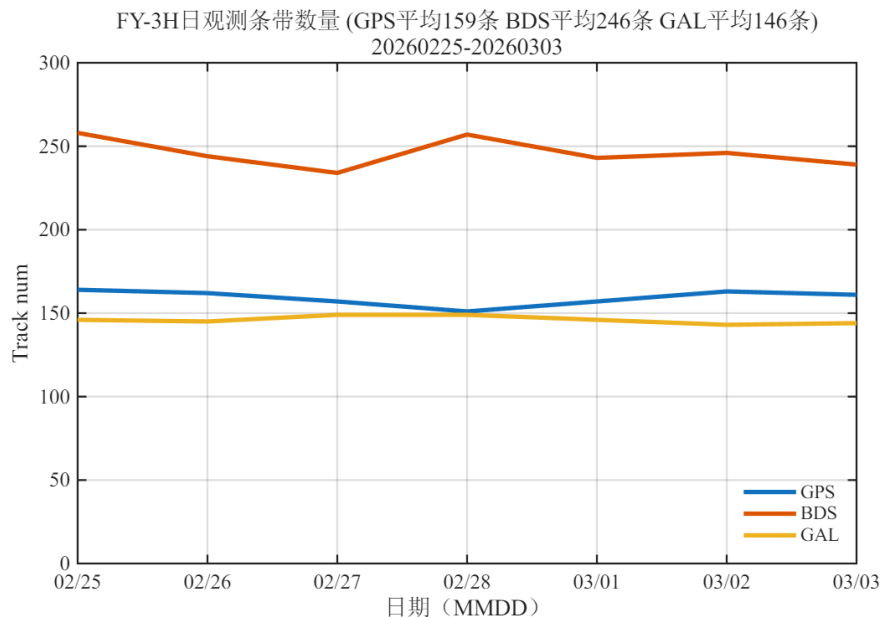
海面风速、土壤湿度、
海冰参数等





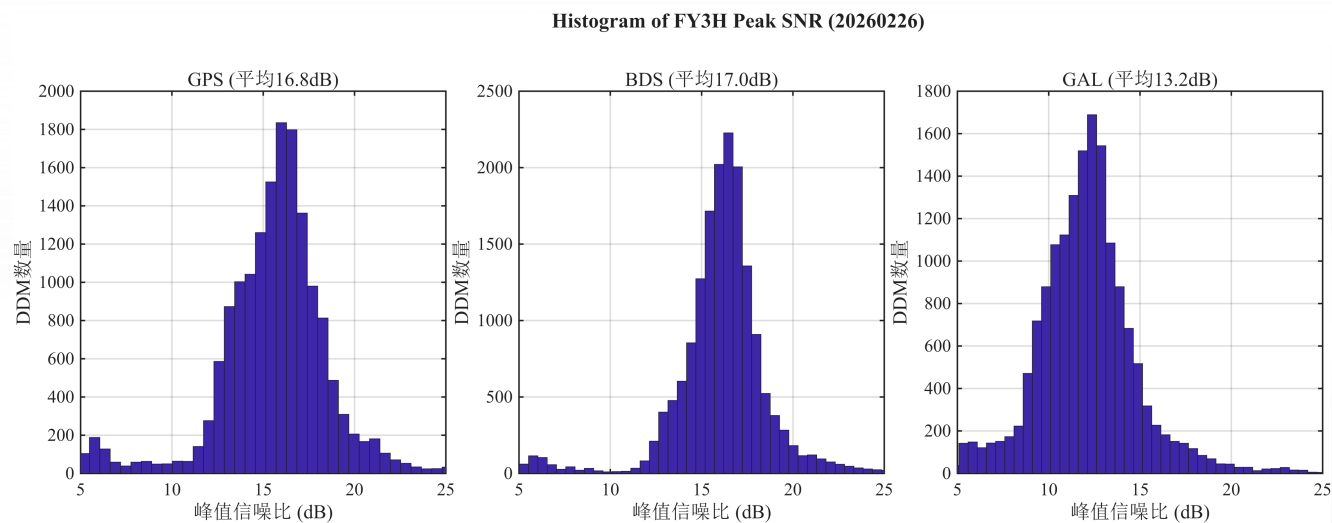
2. L1预处理关键技术及数据质量

DDM连续观测轨迹条带数量



GPS 159条
BDS 246条
GAL 146条

SNR



GPS 16.8 dB
BDS 17.0 dB
GAL 13.2 dB



2. L1预处理关键技术及数据质量

发射前定标

- 增益 G vs A_{tt} 和 T 查找表，高低温实验；
- 天线方向图 $G_r(\theta, \phi)$ ，微波暗室
- 导航卫星EIRP，地面监测站

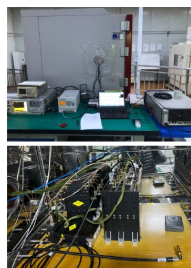
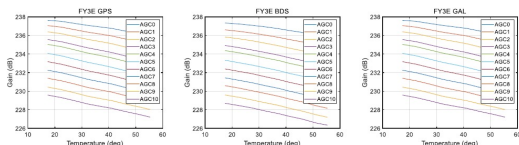
1、基于高低温冷热源的接收机增益两点定标 $P(\tau, f) = G_r(\tau, f)$



$$C_{\text{黑体}} = G \times (P_{\text{黑体}} + P_r)$$
$$C_{\text{液氮}} = G \times (P_{\text{液氮}} + P_r)$$

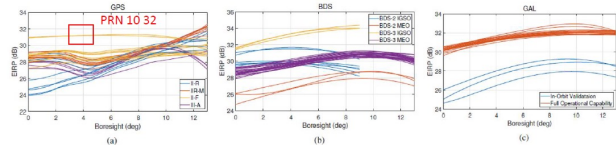
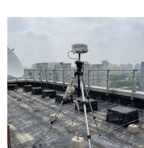
两式联立，求解出接收机增益 G

通过热循环实验，测量出不同温度和仪器参数下的增益：



接收机增益和信号频率有关，GPS L1和伽利略E1(1575.42MHz)的曲线基本相同，BDS B1I(1561.098MHz)略有差异

2、基于地面监测站的GNSS卫星等效全向辐射功率（EIRP）估计



$$P_r = \frac{P_t G_t(\theta, \phi)}{4\pi R^2} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) G_r$$

特点：

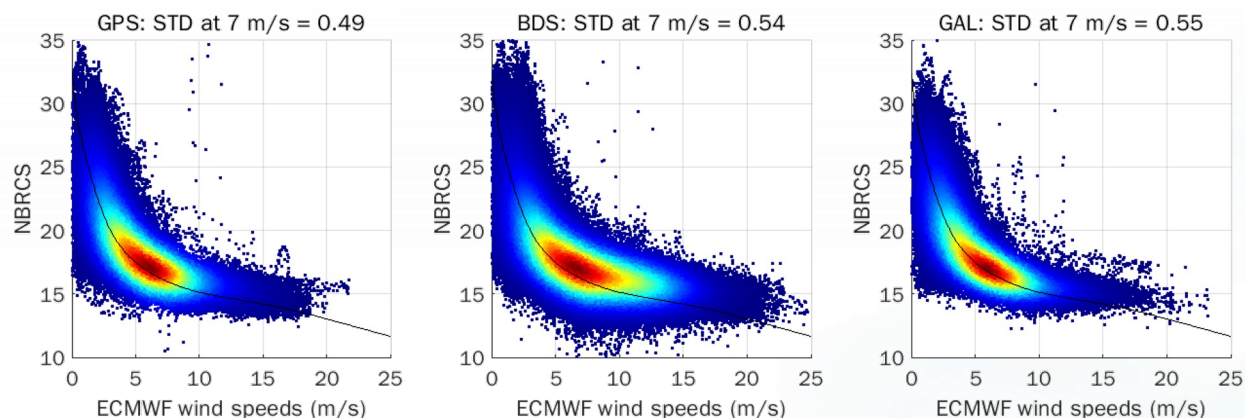
- GPS不同批次卫星（II-R, IIR-M, II-F, III-A）的EIRP曲线差异非常大
- BDS-3 MEO和Galileo（FOC）卫星的EIRP相对一致性非常好
- 部分GPS卫星的EIRP会随时间和空间变化（Flow power event）

在轨定标

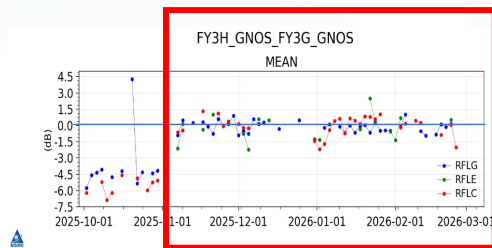
在轨海洋定标：

与ERA5比较理论NBRCS与实测值，修正接收机增益

$$\Delta G = \sigma^0 - \hat{\sigma}^0(u)$$



在轨交叉定标



定标误差	定标前 (dB)	定标后 (dB)
MEAN	-5	0.2
STD	0.5	0.2
RMS	5	0.5

GPS/BDS/GAL的NBRCS标准差为0.49/0.54/0.55dB



03

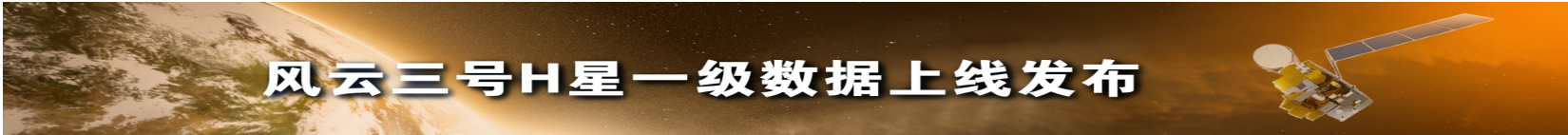
L1产品及使用指南



3. L1产品及使用指南

L1产品

- 大气附加相位
 - GPS自主星历
 - BDS自主星历
- 电离层附加相位
 - GPS自主星历
 - BDS自主星历
- GNSS反射数据



名称	卫星	仪器	时段	分辨率	开始日期	最新日期	文件数	数据量
FY-3H全球导航卫星掩星探测仪II型L1数据(大气附加相位/BDS自主星历)	FY3H	GNOS	ORBIT	--	2026-06-01	2026-06-03	1,042	858.09 MB
FY-3H全球导航卫星掩星探测仪II型L1数据(大气附加相位/GPS自主星历)	FY3H	GNOS	ORBIT	--	2026-06-01	2026-06-03	1,059	1.06 GB
FY-3H全球导航卫星掩星探测仪II型L1数据(GNSS反射数据)	FY3H	GNOS	ORBIT	--	2026-06-01	2026-06-03	520	8.19 GB
FY-3H全球导航卫星掩星探测仪II型L1数据(电离层附加相位/GPS自主星历)	FY3H	GNOS	ORBIT	--	2026-06-01	2026-06-03	1,487	134.44 MB
FY-3H全球导航卫星掩星探测仪II型L1数据(电离层附加相位/BDS自主星历)	FY3H	GNOS	ORBIT	--	2026-06-01	2026-06-03	1,739	151.60 MB
总计:							5,847	10.37 GB



3. L1产品及使用指南

L1产品使用说明

风云三号（03 批）气象卫星地面应用系统工程

H 星全球导航卫星掩星探测器-II 型

L1 产品使用说明

(V1.0)

编写： 鲁文强

校对： 郭 杨

审核： 商 建

批准： 胡秀清

国家卫星气象中心

2026 年 4 月

目 录

1. 引言	1
1.1 文档概述	1
1.2 依据文件	1
2. 仪器介绍	2
3. L1 产品处理简介	2
3.1 概述	2
3.2 产品处理	2
4. 数据简介	3
4.1 文件基本信息	3
4.2 核心科学数据集	4
4.2.1 附加相位数据集	4
4.2.2 GNSS 反射数据集	5
4.2.3 L1 产品质量码	6
5. 数据服务	7



3. L1产品及使用指南

L1科学数据集（大气掩星）

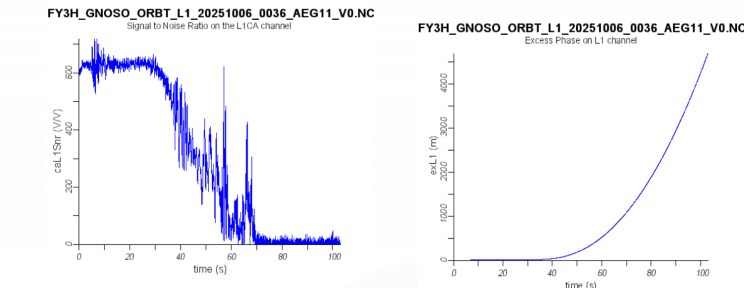
主要包括：

- 采样时间
- LEO卫星位置/速度
- GNSS卫星位置/速度
- 切点高度
- 大气附加相位
- 信噪比

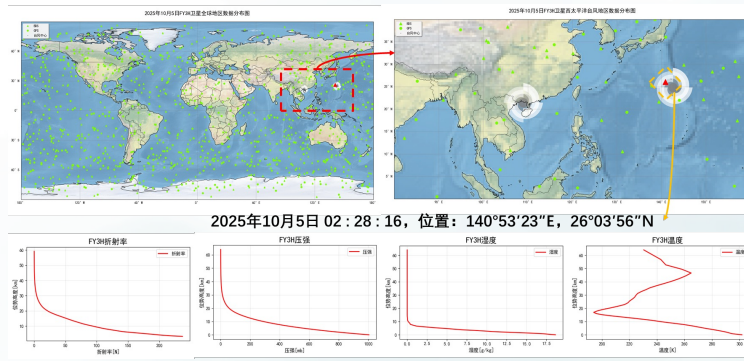
掩星L1文件

Variables		
	Name	Description
time	time; (s)	
caL1Snr	Signal to Noise Ratio on the L1CA channel; (V/V)	
pL1Snr	Signal to Noise Ratio on the L1P channel; (V/V)	
cL2Snr	Signal to Noise Ratio on the L2C channel; (V/V)	
pL2Snr	Signal to Noise Ratio on the L2P channel; (V/V)	
xLeo	LEO X position (ECI); (km)	
yLeo	LEO Y position (ECI); (km)	
zLeo	LEO Z position (ECI); (km)	
xdLeo	LEO X velocity (ECI); (km/s)	
ydLeo	LEO Y velocity (ECI); (km/s)	
zdLeo	LEO Z velocity (ECI); (km/s)	
xGnss	GNSS X position (ECI); (km)	
yGnss	GNSS Y position (ECI); (km)	
zGnss	GNSS Z position (ECI); (km)	
xdGnss	GNSS X velocity (ECI); (km/s)	
ydGnss	GNSS Y velocity (ECI); (km/s)	
zdGnss	GNSS Z velocity (ECI); (km/s)	
TPH	Tangent point height; (km)	
exL1	Excess Phase on L1 channel; (m)	
exL2	Excess Phase on L2 channel; (m)	
exLC	Excess Phase (ionosphere corrected); (m)	
exL2P	Excess Phase on L2P channel; (m)	
exL2C	Excess Phase on L2C channel; (m)	
exLC_C1C2	Excess Phase (ionosphere corrected with L1CA and L2C); (m)	
exLC_C1P2	Excess Phase (ionosphere corrected with L1CA and L2P); (m)	
xmdl	OpenLoop Phase Model; (m)	
xmdlidd	OpenLoop Phase Model (DD); (m)	
xrng	OpenLoop Range Model; (m)	
Dphs	OpenLoop Track Residual Phase; (m)	

NetCdf格式，一个文件对应一次掩星事件。



大气掩星信噪比和附加相位曲线





3. L1产品及使用指南

L1产品科学数据集（电离掩星）

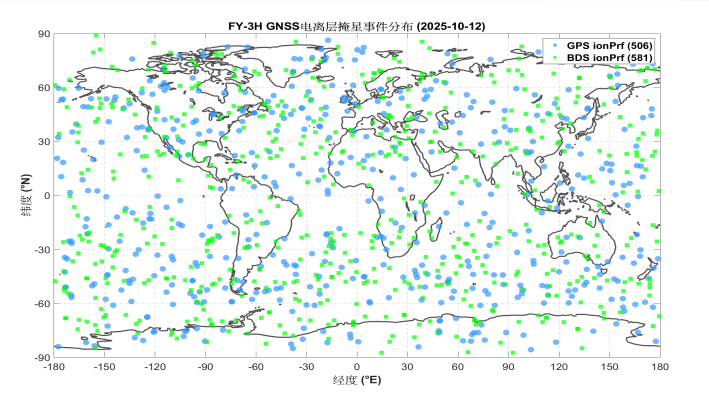
主要包括：

- 采样时间
- LEO卫星位置/速度
- GNSS卫星位置/速度
- 切点高度
- 电离附加相位
- 信噪比

电离掩星L1文件

Variables	
Name	Description
time	time; (s)
caL1Snr	Signal to Noise Ratio on the L1CA channel; (VM)
pL1Snr	Signal to Noise Ratio on the L1P channel; (VM)
cL2Snr	Signal to Noise Ratio on the L2C channel; (VM)
pL2Snr	Signal to Noise Ratio on the L2P channel; (VM)
xLeo	LEO X position (ECI); (km)
yLeo	LEO Y position (ECI); (km)
zLeo	LEO Z position (ECI); (km)
xdLeo	LEO X velocity (ECI); (km/s)
ydLeo	LEO Y velocity (ECI); (km/s)
zdLeo	LEO Z velocity (ECI); (km/s)
xGnss	GNSS X position (ECI); (km)
yGnss	GNSS Y position (ECI); (km)
zGnss	GNSS Z position (ECI); (km)
xdGnss	GNSS X velocity (ECI); (km/s)
ydGnss	GNSS Y velocity (ECI); (km/s)
zdGnss	GNSS Z velocity (ECI); (km/s)
TPH	Tangent point height; (km)
exL1	Excess Phase on L1 channel; (m)
exL2	Excess Phase on L2 channel; (m)

NetCdf格式，一个文件对应一次掩星事件





1. 仪器介绍与L1数据概况

• L1科学数据集（反射）

• 几何参数

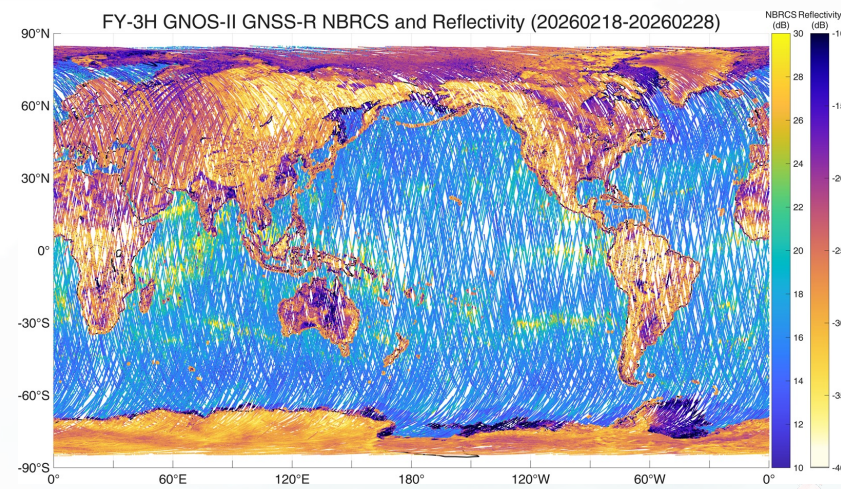
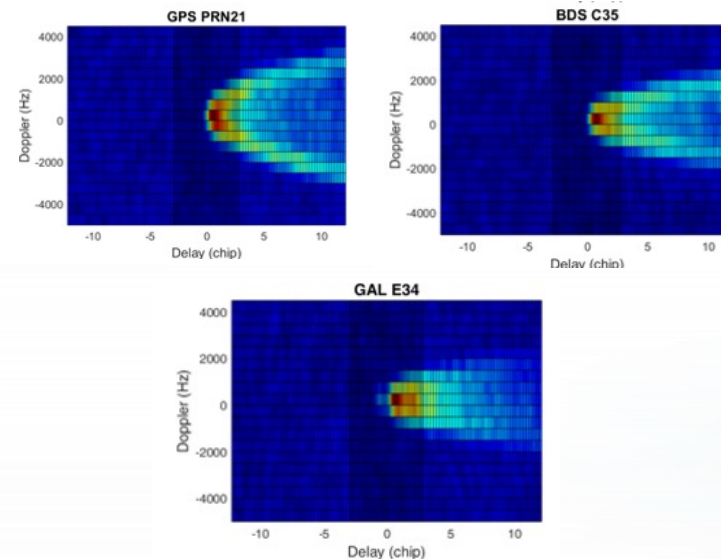
- 发射机位置速度
- 接收机位置速度
- 镜面反射点位置速度

• 观测量

- 时延多普勒图
- 归一化雷达散射截面
- 反射率

• 信号质量（Ddm_quality_flag）

FY3H_GNOSR_ORBT_L1_20260113_0436_RFLC6_V0_HDF		FY3H_GNOSR_ORBT_L1_20260113_0436_RFLC6_V0_HDF	
▶ Channel	Channel	▶ Receiver	Receiver
▼ DDM	DDM	▶ Specular	Specular
Ddm_brsc_factor	Factor used to compute DDM BRCS (power/BRCS)	▶ Time	Time
Ddm_doppler_refer	DDM doppler reference	▶ Transmitter	Transmitter
Ddm_effective_area	DDM effective scattering area		
Ddm_kurtosis	DDM kurtosis		
Ddm_noise_m	DDM noise m		
Ddm_noise_raw	DDM noise raw		
Ddm_noise_source	DDM noise source		
Ddm_peak_column	DDM peak bin column		
Ddm_peak_delay	DDM peak bin delay		
Ddm_peak_doppler	DDM peak bin doppler		
Ddm_peak_power_ratio	DDM peak power ratio		
Ddm_peak_raw	DDM peak raw		
Ddm_peak_row	DDM peak bin row		
Ddm_peak_snr	DDM peak snr		
Ddm_power_factor	Factor used to compute DDM power		
Ddm_quality_flag	DDM quality flag		
Ddm_range_refer	DDM range reference		
Ddm_raw_data	DDM bin raw counts		
Ddm_skewness	DDM skewness		
Ddm_sp_column	DDM specular point column		
Ddm_sp_delay	DDM specular point delay		
Ddm_sp_dles	DDM specular point DLES		
Ddm_sp_doppler	DDM specular point doppler		
Ddm_sp_les	DDM specular point LES		
Ddm_sp_nbrcs	DDM specular point NBRCS		
Ddm_sp_normalized_snr	Normalized SNR at specular point		
Ddm_sp_raw	DDM specular point raw		
Ddm_sp_reflectivity	Specular point reflectivity		
Ddm_sp_row	DDM specular point row		
Ddm_sp_snr	DDM specular point SNR		
Sp_delay_doppler_flag	Specular point delay doppler flag		





04

典型应用场景及实例

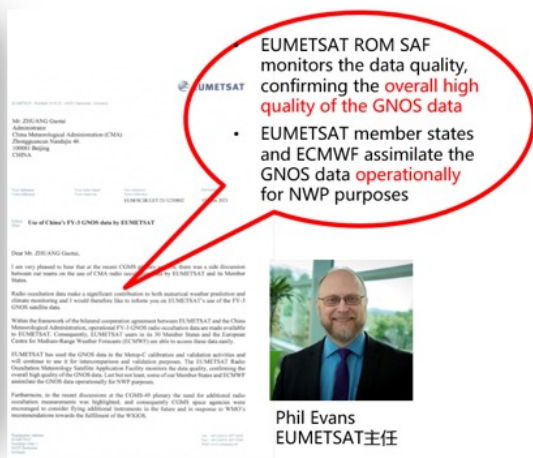


4. 典型应用场景及实例（大气掩星）

全球各数值预报中心同化

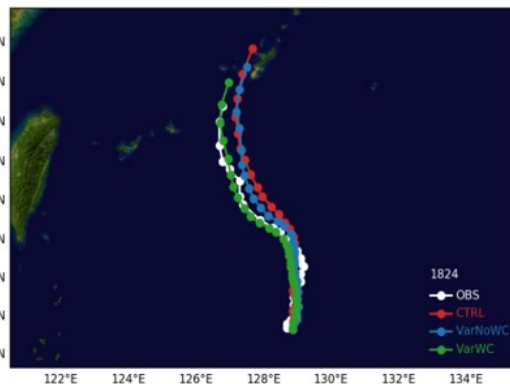
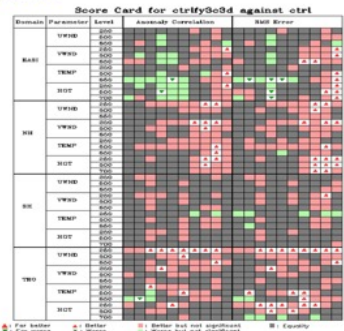


欧洲EUMETSAT的ROM SAF
近实时精度评估网页截图

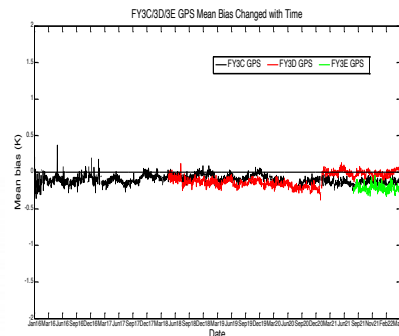


有效改进了台风预报的精度和时效

中国气象局CMA_GFS系统对FY3掩星同化的综合评分

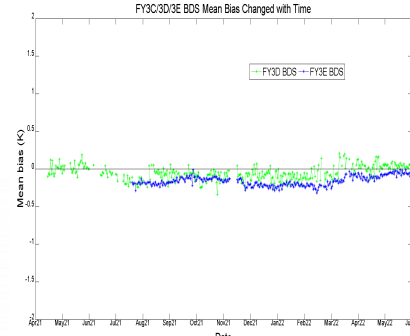


多星长时序，可用于气候变化研究



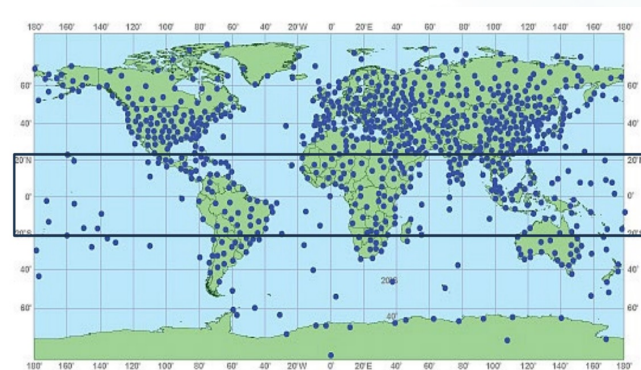
FY3C GPS掩星的平均偏差约-0.101K，
变率0.0054 K/a

廖蜜, 张鹏, 刘健, 等. 风云卫星的掩星干大气温度廓线精准度特征. 应用气象学报, 2023, 34(3): 270-281.



FY3D北斗平均偏差约为-0.048K，变
率0.058K/a

各种观测间相互校验：海洋上探空，微波辐射率资料等资料同化中需要做偏差订正



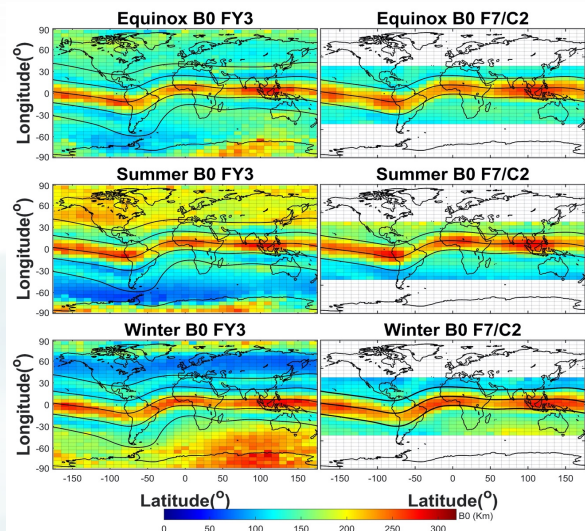
Current global radiosonde network – not all sites here fly regularly. Flights are generally once or twice daily at 00 or 12 UTC. Unsurprisingly a huge land bias.



4. 典型应用场景及实例（电离掩星）

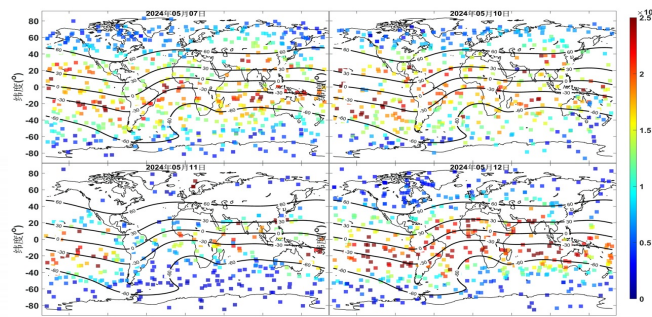
- 空间天气和电离层气候学研究；
- 电离层特征分析研究；
- 自然灾害监测；
- 导航定位性能提升。

◆ 电离层厚度研究



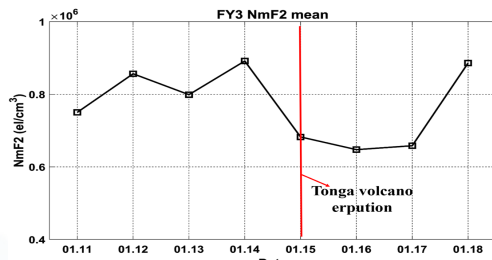
FY3与COSMIC-2的全球电离层厚度分析特征 (Tan et al., 2026)

◆ 空间天气监测

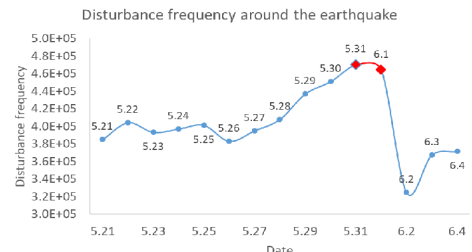


FY3 NmF2磁暴前后变化 (Bai et al., 2019)

◆ 自然灾害分析监测

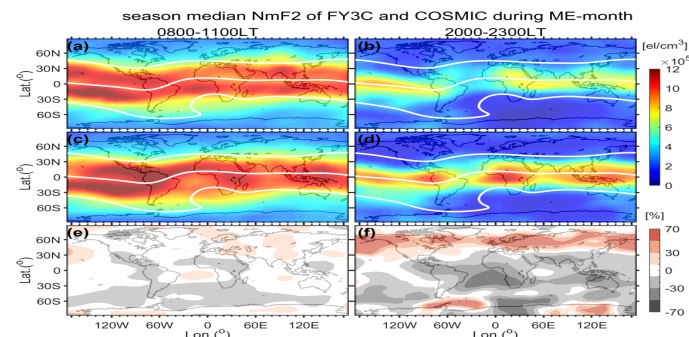


汤加火山爆发前后震中FY3 NmF2变化(Bai et al., 2022)



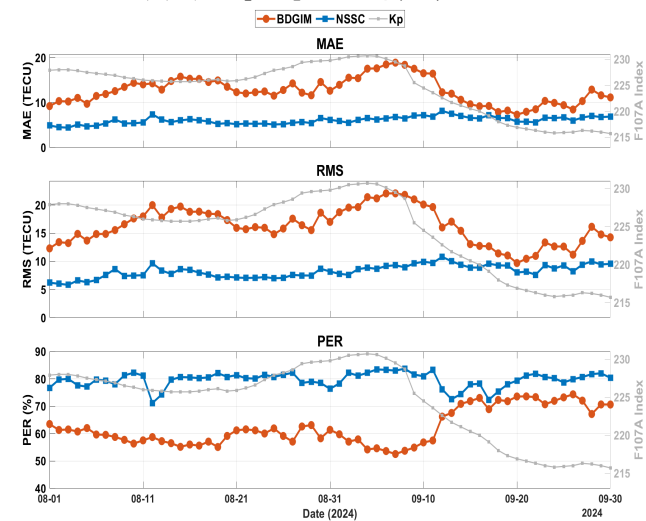
雅安地震前后扰动指数变化, 震前急剧上升、震后下降 (Zhang, Tan et al., 2023)

◆ 电离层气候学分析



FY3与COSMIC-1的全球NmF2气候学变化(Bai et al., 2019)

◆ 导航定位性能提升



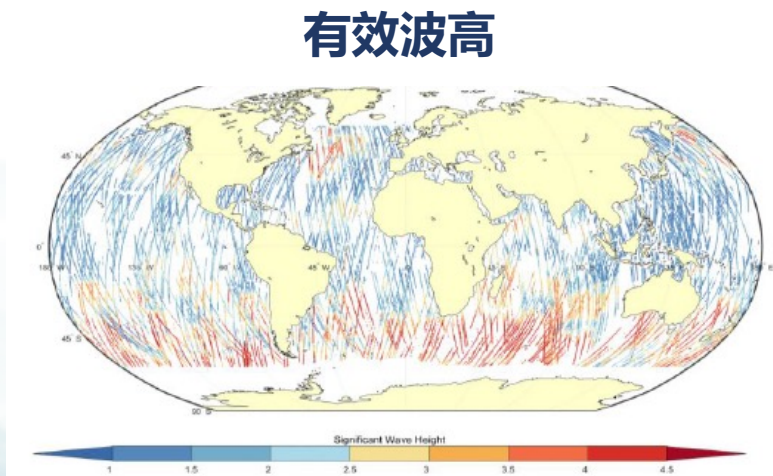
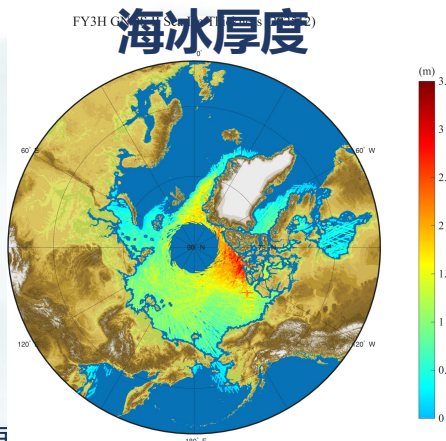
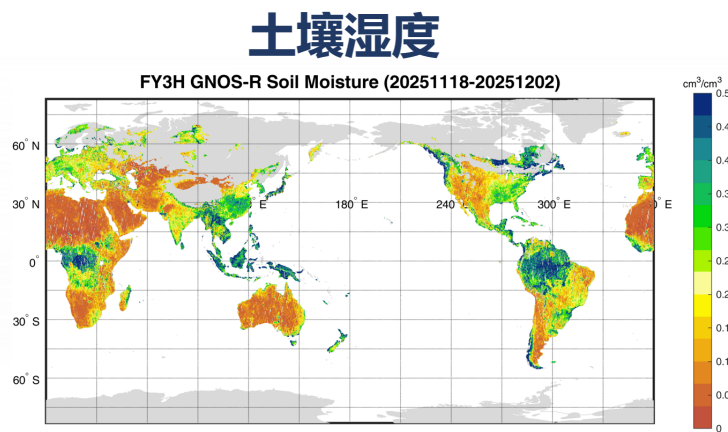
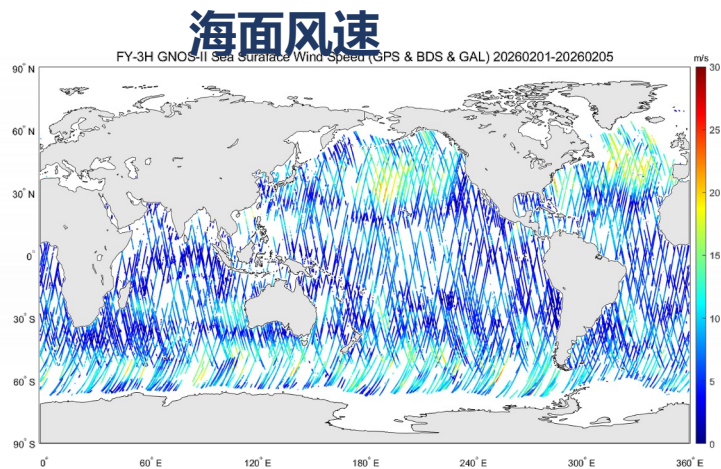
使用FY3电离掩星数据优化前后北斗广播模型BDGIM的MAE RMS PER变化 (RMS降低40%, PER提升23%, 达到70%修正标准) 20



4. 典型应用场景及实例（反射）

- 海面风速/土壤湿度/海冰参数产品
- L1数据在数值天气预报模式中的直接同化

数值天气预报

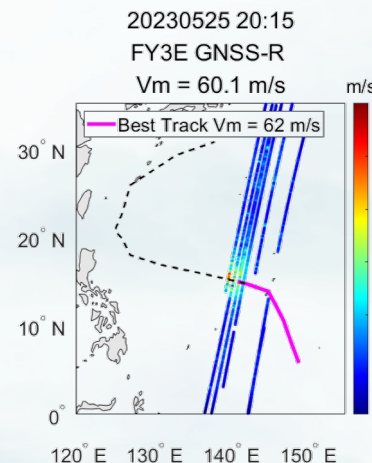


Score Card for rwind_fy3gf_err2.0 against ctrl

Domain	Parameter	Level	Anomaly	Correlation	RMS Error
NH	HGT	850	▲	▼	▼
		500	▲	▼	▼
		250	▲	▼	▼
	TEMP	850	▲	▼	▼
		500	▲	▼	▼
		250	▲	▼	▼
SH	HGT	850	▲	▼	▼
		500	▲	▼	▼
		250	▲	▼	▼
	TEMP	850	▲	▼	▼
		500	▲	▼	▼
		250	▲	▼	▼
EASI	HGT	850	▲	▼	▼
		500	▲	▼	▼
		250	▲	▼	▼
	TEMP	850	▲	▼	▼
		500	▲	▼	▼
		250	▲	▼	▼
TRO	HGT	850	▲	▼	▼
		500	▲	▼	▼
		250	▲	▼	▼
	TEMP	850	▲	▼	▼
		500	▲	▼	▼
		250	▲	▼	▼

▲: For better ▼: For worse ▲: Better but not significant ▼: Worse but not significant ■: Equality

台风监测



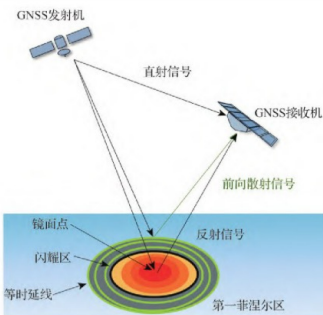


4. 典型应用场景及实例（协同）

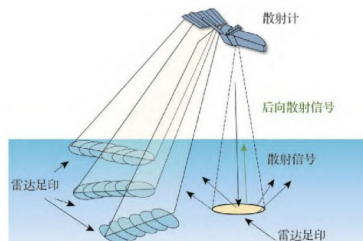
• 同平台多仪器

FY3E GNOS+WINDRAD

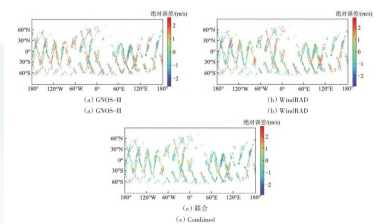
海面风速均方根误差降低13%；土壤湿度均方根误差降低6%



(a) 星载GNSS-R
(a) Spaceborne GNSS-R



(b) 星载散射计
(b) Spaceborne scatterometer



3 2022年4月2日GNOS-II、Wind RAD以及联合后共同观测区域海面风速反演结果

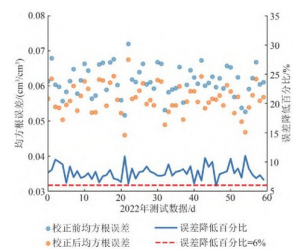


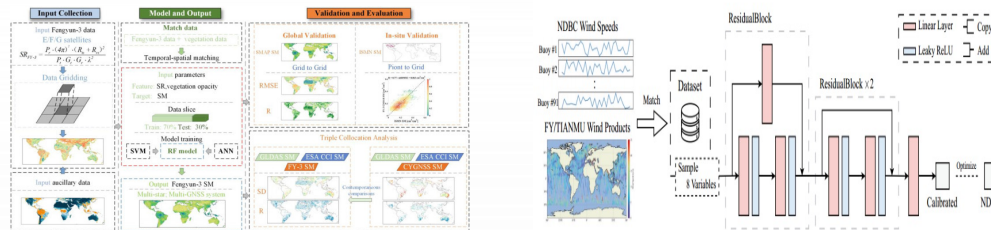
图1 2 校正前后Wind RAD全球土壤湿度反演结果的均方根误差及校正后的误差降低百分比

万献慈,万玮,郭祉轲,等.星载GNSS-R与散射计联合探测能力分析及其海陆典型应用[J].遥感学报,2025,29(8):2544-2558.

• 多卫星同仪器

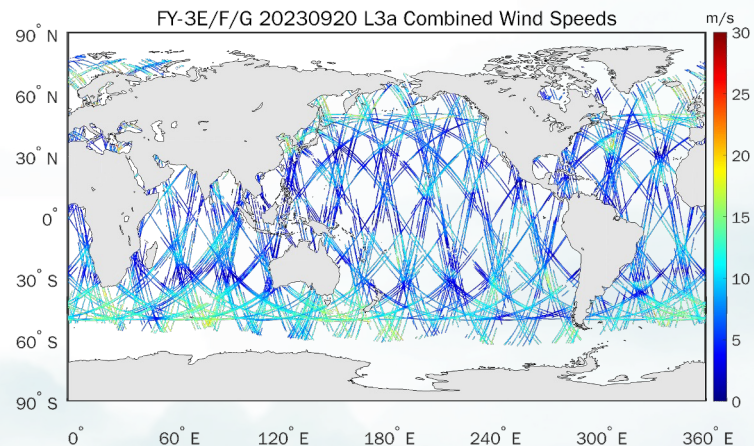
FY-3 GNSS-R 星座准全球日尺度土壤湿度反演

融合风云三号E星和天目GNSS-R数据提高近岸海面风速精度



Yang W, Guo F, Zhang X, et al. First quasi-global soil moisture retrieval using Fengyun-3 GNSS-R constellation observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 321: 114653.

Han, X., Li, X., Yang, J., et al. (2025). Evaluation and deep learning-based calibration of nearshore sea surface wind speeds from FY-3E GNOS-II and Tianmu-1 missions. Geo-Spatial Information Science, 28(6), 2709–2720.



Sun, Y.; Huang, F.; Xia, J.; Yin, C.; et al. GNOS-II on Fengyun-3 Satellite Series: Exploration of Multi-GNSS Reflection Signals for Operational Applications. Remote Sens. 2023, 15, 5756



用户意见反馈

1、GNSS-R是否为多极化? (中科院上海天文台)

非多极化

2、菲涅尔反射系数对应的是哪个界面? (上海海洋大学)

基于空气-海水界面计算的光滑海水表面菲涅尔系数,在陆地上是填充值

3、菲涅尔反射系数的介电常数模型是什么? 盐度温度输入参数是静态还是动态值? (上海海洋大学)

Klein-Swift模型, 输入参数为气候态静态值

4、地表反射率如何计算? (南信大)

Friis传输公式

$$\Gamma = \frac{P_{peak}(4\pi)^2(R_t + R_r)^2}{\lambda^2 P_t G_t G_r}$$

欢迎应用GNOS数据 提出宝贵反馈意见

鲁文强, luwq@cma.gov.cn

