

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106297

# 风云三号卫星多星组网数据传输与接收分析

张 恒<sup>1</sup> 邓斯康<sup>1</sup> 朱爱军<sup>2</sup> 高旭东<sup>1</sup> 袁牧野<sup>1</sup>

(1.上海卫星工程研究所 上海 201109; 2.国家卫星气象中心 北京 100081)

**摘要:** 风云三号多颗星在轨组网观测与数据传输, 受限于频带、极化及地面天线资源, 数据接收可能存在潜在干扰风险。重点阐述了风云三号卫星数传频点、带宽以及天线极化方式等信道设计, 建立双星信号干扰仿真模型, 分析了多星在轨组网观测对数据接收的影响, 分析结果表明, 多星数传信号特性和信道参数设计合理可行。在多星同时与地面站可见的情况下, 通过对多颗星的轨道进行优化调整, 可避免多星同时与国内外数传地面站可见, 从而确保数据的正常传输与接收。

**关键词:** 风云三号卫星; 多星组网; 数据传输; 干扰分析

**中图分类号:** TN927+.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Analysis of data transmission and reception for multi-satellite network of FY-3 satellite

Zhang Heng<sup>1</sup> Deng Sikang<sup>1</sup> Zhu Aijun<sup>2</sup> Gao Xudong<sup>1</sup> Yuan Muye<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China; 2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Due to the limitation of frequency band, polarization and ground antenna resources, data reception may have potential interference risks. Expounds the situation of three satellite digital frequency, bandwidth and the polarization of antenna as the channel design, establishes double satellite signal interference simulation model, and analyzes the influence of the multi-satellite in-orbit network observation on the data reception. The analysis results show that the multi-satellite data transmission signal characteristics and channel parameters is reasonable and feasible. In the case that multiple satellites exist and are visible to the same ground station, through the adjustment of their orbit optimization, the simultaneous visibility of multiple satellites with domestic and foreign ground stations can be avoided, so as to ensure the normal transmission and receiving of data.

**Keywords:** FY-3 satellite; multi-satellite network; data transmission; interference analysis

## 0 引 言

风云三号气象卫星是我国自主研制的第二代太阳同步轨道气象卫星, 在国内首次实现了从紫外、可见光、红外到微波探测的多载荷、全球、全天候、多光谱、三维、定量综合对地观测, 探测能力达到国际先进水平<sup>[1]</sup>。目前已成功发射4颗风云三号卫星, 分别于2008年5月27日、2010年11月5日、2013年9月23日和2017年11月15日在太原卫星发射中心发射。FY-3(05)星(风云三号05星)是国际上首次采用晨昏轨道太阳同步轨道卫星, 2021年择机发射, 用于增加上午8:00气象会商窗口卫星气象遥感数据, 同在轨多颗风云三号卫星组网观测, 进而提高天气预报时效性。

数据传输分系统主要完成星上载荷数据的复接、组帧、存储、信道编码及射频传输等功能。据相关报道, 现有的美国NOAA及欧洲METOP极轨气象卫星全球具有丰富的地面站、天线资源以及中继星通信资源, 基本不存在多星气象卫星同时与地面站可见情况, 可正常实现载荷数据的准实时传输与接收处理。风云三号卫星各载荷及平台全球数据由数传MPT链路(实时广播链路)和DPT链路(延时记录与回放链路)数据组成。地面接收站配置国内三站、国外基律纳站及南极站, 地面站采用12 m天线同时接收处理MPT/DPT链路数据, 国内省级地面站采用4.2 m天线接收MPT数据<sup>[2-3]</sup>。国际电联规定, 气象卫星数传MPT链路频带范围为7 750~7 900 MHz, DPT链路频带范围为8 025~8 400 MHz, 风云三号多星存在频带资源重叠; 另

收稿日期: 2021-04-05

外, FY-3(05) 星气象数据服务于全球多个国家, 欧洲地面站仅支持接收右旋圆极化数传信号; 在多星组网通信系统设计时须考虑邻星干扰问题, 保证多星通信系统的误码率满足组网使用要求<sup>[4]</sup>。因此, 在轨多颗风云三号卫星组网观测, 存在多颗星与同一地面站可见情况。当多颗卫星同时进入某一地面站接收范围时, 由于同时向主天线下发数据, 造成一副天线不能同时完整地接收多个卫星的数据, 这种现象称之为轨道冲突<sup>[5]</sup>。微波干扰是地面电磁干扰的主要来源, 多星同频或邻频的微波信号串入下行链路将会恶化各项接收指标, 最终导致接收质量下降<sup>[6]</sup>。而此前尚无对风云三号卫星组网轨道冲突和数据传输干扰的技术研究分析。

本文通过对风云三号卫星多星组网数据传输与接收的研究, 分析数传射频特性划分合理性, 使用软件工具仿真同时可见情况, 并分析数据接收的信噪比影响。为即将发射的

FY-3(05) 星与在轨卫星相位关系提供依据, 确保多星在轨运行互相不受干扰, 以保证风云三号多星组网的数据正确性。

## 1 星地数传特性设计

### 1.1 星地数据处理流程

风云三号在轨多星组网设计如图 1 所示, 地面站配置为国内的佳木斯、广州、乌鲁木齐, 国外站配置为基律纳和南极站。各地面站接收风云三号卫星遥感数据, 其中南极站将接收到的遥感数据通过中继卫星转发至挪威地面站, 挪威地面站通过地面商用光纤网络专线将数据传输至北京数据中心, 基律纳接收风云三号气象卫星数据<sup>[7]</sup>, 同样通过地面商用光纤网络专线将数据传输至北京数据中心, 地面数据传输延时基本在 30 min 左右。目前, 风云三号卫星从星上载荷探测、星地传输、地面传输到地面应用系统, 延迟时间在 90~180 min 之间, 数据获取时效性差。

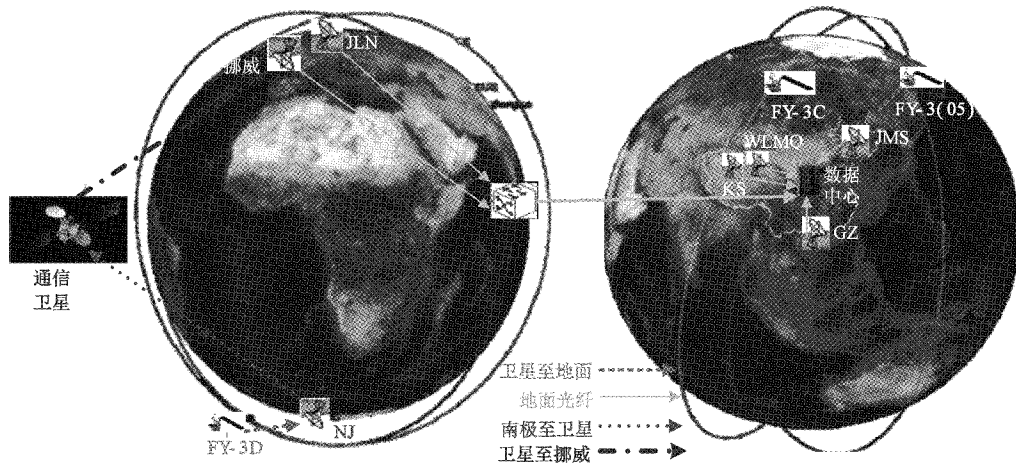


图 1 星地数据传输流程图

### 1.2 数传链路信号特性设计

风云三号数传分系统将来自十余路载荷及经过 1553B 总线多路复用后的规约数据合路成一路, 并格式化生成 CCSDS 标准的 AOS 协议数据, 经 RS 编码、加扰、定界后

串行传输到数传发射机, 经位宽变换、卷积编码或 LDPC 编码、QPSK 调制及信号放大滤波后输出, 最终通过数传天线实现信号对地辐射传输。风云三号卫星数传信号特性设计如表 1 所示。

表 1 风云三号数传信号特性设计

链路	FY-3B 星		FY-3C 星		FY-3D 星		FY-3(05) 星	
	MPT	DPT	MPT	DPT	MPT	DPT	MPT	DPT
频点/MHz	7 775	8 145.95	7 780	8 175	7 820	8 250	7 860	8 212.5
带宽/MHz	37.4	124	37.4	124	60	300	77	375
编码方式	RS(255,223)+ CONV(7,1/2)	RS(255,223)+ CONV(7,3/4)	RS(255,223)+ CONV(7,1/2)	RS(255,223)+ CONV(7,3/4)	RS(255,223)+ CONV(7,3/4)	RS(255,223)+ CONV(7,3/4)	RS(255,223)+ CONV(7,3/4)	LDPC (8 176,7 154)
极化方式	右旋	右旋	左旋	左旋	右旋	右旋	右旋	右旋
发射功率/W	45	45	45	45	45	45	45	65

## 2 数传重叠频段影响分析

### 2.1 数传链路频带重叠分析

由表 1 可知, FY-3D 星与 FY-3(05) 星 MPT 链路重叠带宽为 27.5 MHz, DPT 链路重叠带宽为 300 MHz。

使用高码率接收机模拟卫星 MPT 和 DPT 链路信号<sup>[8]</sup>, 设计及模拟结果如图 2 所示。

### 2.2 干扰场景分析及计算

当 FY-3D 星处于地面站可见的工作弧段时, 若其下行信号波束落在乌鲁木齐地面接收天线的主瓣或旁瓣范围

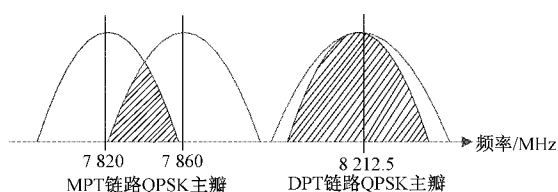


图 2 MPT 和 DPT 链路频谱分析图

内,可能会对 FY-3(05)星造成潜在的信号干扰,邻星干扰场景模型如图 3 所示。

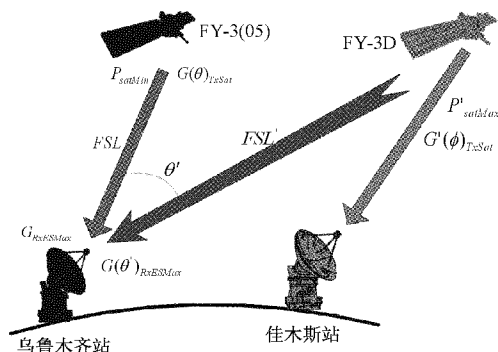


图 3 卫星在轨潜在干扰场景图

由于 FY-3D 星与 FY-3(05)星 DPT 链路重叠带宽为 300 MHz,在轨潜在信号干扰最为严重,因此下面仅计算分析 DPT 链路干扰情况。采用国际电联 ITU 推荐的  $C/I$  的计算方式衡量干扰的影响大小,计算公式为:

$$Margin = C/I - C/I_{required} \quad (1)$$

式中: $C/I$  为载干比, $C/I_{required}$  为信号干扰保护门限。若  $Margin \geq 0$ ,则认为不存在有害的干扰,若  $Margin < 0$ ,则认为存在有害干扰。

由国际电联规范<sup>[9]</sup>可知,此干扰场景下  $C/I_{required}$  的计算公式为:

$$C/I_{required} = C/N + 12.2 \quad (2)$$

式中: $C/N$  为 FY-3D 星可以正常解调的信噪比门限值,取值为 11.4 dB,因此计算得到  $C/I_{required} = 23.6$  dB。

载干比  $C/I$  的计算公式为:

$$C/I = (C/I)_{basic} - I_a \quad (3)$$

式中: $I_a$  为调节因子,计算公式为:

$$I_a = BW_{overlap} / BW_i \quad (4)$$

式中: $BW_i$  为干扰信号带宽, $BW_{overlap}$  为重叠带宽,由表 1 所知, $BW_i$  和  $BW_{overlap}$  均为 300 MHz,计算可得  $I_a = 0$ 。

$(C/I)_{basic}$  计算公式为:

$$(C/I)_{basic} = P_{satMin} + G(\theta)_{TxSat} + G_{RxESMax} - FSL - (P'_{satMax} + G'(\phi)_{TxSat} + G(\theta')_{RxESMax} - FSL') \quad (5)$$

式中: $P_{satMin}$  为 FY-3(05)星 DPT 发射天线输入端发射功率(计算时取最小值), $G(\theta)_{TxSat}$  为其星上天线增益, $G_{RxESMax}$  为其乌鲁木齐地面站 12 m 接收天线增益, $FSL$  为空间损耗; $P'_{satMax}$  为 FY-3D 星 DPT 发射天线输入端发射功率, $G'(\phi)_{TxSat}$  为天线指向佳木斯地面站的天线增益,

$G(\theta')_{RxESMax}$  为乌鲁木齐地面站指向 FY-3D 星的接收增益, $FSL'$  为其空间损耗。代入 FY-3D 星、FY-3(05)星及地面站天线参数计算可得:

$$(C/I)_{basic} = 42.12 - G(\theta')_{RxESMax} \quad (6)$$

式中: $\theta'$  为乌鲁木齐站 12 m 接收天线轴向与 FY-3D 星的夹角。若两颗卫星相对于地面站夹角过小,则干扰卫星会对观测卫星数传链路产生较大的干扰,从而影响观测卫星的数传链路接收。当双星之间刚好没有干扰时,即  $Margin = 0$ ,此时  $G(\theta')_{RxESMax} = 18.52$  dB。

根据 ITU 国际电联标准<sup>[10]</sup>在接收天线与电磁波波长的比值  $(D/\lambda) > 100$  时,相邻卫星夹角超过  $1^\circ$  并且小于  $20^\circ$  时,地面站接收天线 90% 旁瓣峰值增益拟合曲线为:

$$G = 29 - 25 \lg(\theta') \quad (7)$$

将  $G(\theta')_{RxESMax} = 18.52$  代入计算得到  $\theta' = 2.63^\circ$ ,因此当双星同时与地面站可见时,地面接收天线的主瓣波束对准一颗星,另一颗星的数传信号波束偏离主波束角度大于  $2.63^\circ$  以上时,对正在数据传输卫星带来的干扰影响很小,该影响程度取决于地面天线的指向精度以及对旁瓣的抑制能力。在实际天线增益值及指向精度测算中,可通过对实测多组数据,进行最优化方法及加权、平均等数据融合技术求取结果,以抑制随机测量误差<sup>[11-12]</sup>。

### 3 多星组网可见性仿真分析

#### 3.1 仿真条件

采用 STK(卫星工具包仿真软件)仿真分析风云三号卫星同时与地面站可见情况<sup>[13]</sup>,地面站参数如表 2 所示,卫星轨道参数如表 3 所示。

表 2 卫星地面站位置和任务分工

站名	位置		备注	
	东经/(°)	北纬/(°)	MPT	DPT
广州	113.338 9	23.164 4	✓	✓
乌鲁木齐	87.568 9	43.871 4	✓	✓
佳木斯	130.380 0	46.755 6	✓	✓
基律纳	21.06	67.88	✓	✓
南极	2.529 72	-72.007 5	✓	✓

#### 3.2 同时可见及干扰分析

FY-3A/B/C 星均在轨运行多年,处于在轨超期服役状态,目前仅国内地面站接收数传数据。另外,为了让欧洲地面站接收 FY-3(05)星数据,数传天线采用右旋圆极化设计,极化方式与 FY-3D 星完全一致,极化方式相同,信号隔离度低,在轨更容易产生互相干扰<sup>[14]</sup>。因此,文中重点针对 FY-3(05)星与 FY-3D 星同时可见情况进行 STK 建模仿真,卫星在轨仿真如图 4 所示。

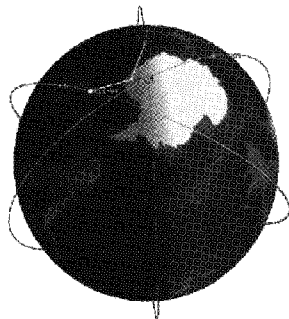
由于 STK 仿真时没有考虑 FY-3(05)星与 FY-3D 星之间的相位关系,结果出现双星与地面站同时可见情况,

表 3 卫星轨道参数

参数	FY-3B	FY-3C	FY-3D 星	FY-3(05)星
轨道高度/km	849.917 6	824.473	831	831
降交点地方时	13:30PM	10:30AM	13:30PM	5:20AM
轨道倾角/(°)	98.844 4	98.690 7	98.645	98.735 5
偏心率/(°)	0.001 831	0.000 093	0.001	0
主半长轴/km	7 214.84	7 201.937 5	7 202.23	7 208.14
真近地方角/(°)	274.880 7	300.564 2	105.935	—
轨道类型	太阳同步	太阳同步	太阳同步	太阳同步
发射时间	2010 年 11 月 5 日	2013 年 9 月 23 日	2017 年 11 月 15 日	计划 2021 年 7 月 5 日



(a) 4颗卫星轨道面



(b) 双星同时与南极站可见

图 4 FY-3 卫星在轨仿真示意图

在仿真周期 6 个月内, FY-3(05)星和 FY-3D 星与地面站同时可见情况统计如图 5 所示。

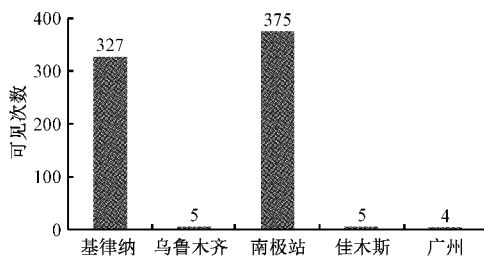


图 5 双星同时进站情况

仿真结果表明, 高纬度的基律纳站和南极站更容易出现双星同时进站情况, 6 个月内南极站同时可见次数为 375 次, 平均每天同时可见 2.08 次, 最长同时可见弧长为 710.8 s。在轨可通过轨位调整双星或者多星间的相位关系, 确保多颗卫星在各自的轨道上运行, 且保持恒定的相位关系, 可以避免多星与地面站同时可见。

考虑到卫星实际轨道变化, 出现运行轨道漂移, 逐渐破坏多星间的相位关系, 可能会出现双星或三星同时与地面站可见情况, 经 STK 仿真, 在国内站很少出现双星同时与地面站可见, 一旦出现同时可见, 双星之间的夹角远大于  $2.63^\circ$ , 且天线指向不同的方位, 经第 2 节分析, 考虑到地面接收天线的旁瓣抑制能力, 不会出现双星互相干扰问题。在基律纳站和南极站会出现双星或三星同时与地面站可见, 偶尔会在极区出现小于  $2.63^\circ$  的情况 (约 20 s), 该情况下会存在潜在干扰。因此, 在轨在轨道上进行优化设计, 定期调整在轨多星之间的相位关系, 保证多星不同时与地面站可见, 从物理上隔离信号干扰。

#### 4 卫星发射及组网策略

FY-3(05)星与 FY-3D 星组网运行, 两者运行高度需保持一致。双星运行的轨道高度均为 831 km, 对应的半长轴为 7 202.23 km。为节约系统资源, 降低地面接收系统建设负担, 地面站仅采用一副 12 m 接收天线实现多星数据接收。在轨风云三号卫星多星组网观测时, 综合考虑地面接收系统归零时间、系统预置时间、任务切换时间和余量, 须满足进出同一地面站的间隔时间不小于 5 min (可满足双星夹角  $>2.63^\circ$ ) 约束条件<sup>[15]</sup>, 即前一颗卫星出站 5 min 之后, 后一颗卫星才能进入该地面站。

经过仿真计算, 以 FY-3D 星为基准, FY-3(05)星相对 D 星相位处于  $80^\circ \sim 305^\circ$  区间时, 双星进出地面站的时间间隔可以满足约束条件, 两星相位关系如图 6 所示。

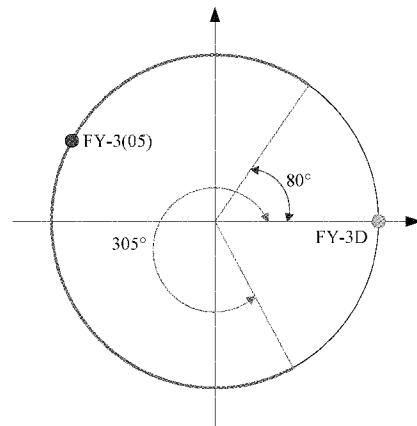


图 6 满足地面站约束的双星相位关系

## 5 结 论

通过对风云三号卫星多星组网同时可见仿真及数据传输干扰计算分析,得出如下结论。

1) 数传频点、带宽、信道编码以及天线极化方式等信道参数设计,合理可行;

2) 双星间卫星夹角大于  $2.63^\circ$  时,数传传输不受邻星信号干扰;

3) 多星存在与同一地面站可见情况,在轨通过对多颗星的轨道进行优化调整,可避免多星同时与国内外数传地面站可见,可保证数据的正常传输与接收。

### 参考文献

- [1] 朱爱军,胡秀清,林曼筠,等. 风云三号 D 气象卫星全球数据获取方法及数据分发[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(3): 1-10.
- [2] 周海莺,黄锦渊,祝春萌. 风云三号气象卫星及广州地面数据接收处理系统[J]. 卫星与网络, 2009(5): 59-63.
- [3] 卢乃锰,董超华,杨忠东,等. 我国新一代极轨气象卫星(风云三号)工程地面应用系统[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 10-19.
- [4] 郭强,刘波,司圣平,等. 卫星通信系统邻星干扰分析方法研究[J]. 上海航天, 2017, 34(3): 131-135.
- [5] 马友,朱爱军,赵现纲. 基于业务等效性的极轨卫星轨道冲突预测算法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(19): 7-12.
- [6] 蔡菲菲. 气象卫星地面站接收质量关键点分析[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(3): 47-50.
- [7] 刘波,张恒,刘辉,等. FY-3 卫星 DPT 延时链路高可靠全球数据获取技术研究[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 96-103.
- [8] 王哨军,陈天立,陈鑫. 基于 LabVIEW 的卫星干扰监测技术研究[J]. 电子测量技术, 2011, 34(4): 74-76.
- [9] Radio Communication Sector of ITU. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems: ITU-R P. 618-13. 2017 [S/OL]. [2017-12-01]. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-13-201712-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-13-201712-I!!PDF-E.pdf).
- [10] Radio Communication Sector of ITU. Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites: ITU-R S. 580-6. 2004 [S/OL]. [2004-01-06]. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.580-6-200401-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.580-6-200401-I!!PDF-E.pdf).
- [11] 杨振龙. 矢量信号分析的溯源[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(7): 43-46.
- [12] 缪东晶,孙威,李建双,等. 测站数量对多边法坐标测量系统测量精度的影响[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 38-44.
- [13] 刘洪伟,韩晓峰,王金秀,等. STK 软件在卫星系统中的仿真应用[J]. 信息通信, 2016, (11): 105-106.
- [14] 赵宁. 极化复用技术在遥感卫星数据传输中的应用[J]. 航天器工程, 2010, 19(4): 55-62.
- [15] 朱爱军,孙凤丽,马友,等. 极轨卫星极区多任务数据接收冲突检测与对策[J]. 电子测量技术, 2018, 41(12): 5-11.

### 作者简介

张恒,硕士,工程师,主要研究方向为风云三号卫星数传系统设计及卫星激光通信技术。

E-mail: 942032776@qq.com

朱爱军(通信作者),本科,正研高工,主要研究方向为气象卫星地面应用系统。

E-mail: zhuaj@cma.cn