

# 基于 STK 的海上卫星通信链路建模与仿真

徐曼睿, 张雅声

(航天工程大学 研究生院, 北京 101416)

**摘要:** 文章对海上远距离航行船只卫星通信链路连通性进行了研究, 在理论分析卫星通信系统组成、天线和信道模型基础上, 基于 STK/Comm 通信分析模块和软件集成的发射机和接收机模型、大气吸收模型、雨衰模型, 完成链路参数设置, 构建包括星间链路的卫星通信链路仿真环境, 利用软件动态处理能力完成三维态势可视化显示, 生成了详细海上卫星通信多跳链路性能报告, 并对可能存在的干扰进行分析, 为海上卫星通信链路的设计提供重要参考。

**关键词:** 多跳通信链路; 可视化仿真; STK

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 2096-4706 (2022) 07-0053-05

## Modeling and Simulation of Maritime Satellite Communication Links Based on STK

XU Manrui, ZHANG Yasheng

(Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** This paper studies the connectivity of satellite communication links for the maritime long-distance sailing ships. On the basis of theoretical analysis of satellite communication system composition, antenna and channel models, based on the STK/Comm communication analysis modules, software-integrated transmitter and receiver models, atmospheric absorption models and rain attenuation models, this paper completes the setting of the link parameters, builds a satellite communication link simulation environment including inter-satellite links, uses the software dynamic processing capability to complete the three-dimensional situational visualization display, and generates the detailed maritime satellite communication multi-hop link performance reports. And the possible existing interference is analyzed to provide an important reference for the design of maritime satellite communication links.

**Keywords:** multi-hop communication link; visualization simulation; STK

## 0 引言

信息化的急速发展使海上作战任务面临节奏快、覆盖空间大、情况复杂的情况, 对海上战场通信传输可靠性和时效性提出更高要求。卫星和船舶的相对运动使得星地链路自由空间损耗、雨衰、大气吸收损耗等诸多参数也随之变化<sup>[1]</sup>。为确保海上卫星通信链路畅通, 前期需对发射功率等参数进行规划, 面对受扰或中断情况时, 可及时根据链路性能给出应对措施。

STK (System Tool Kit) 由美国分析图形有限公司研制, 在复杂航空、航天任务及陆海等环境进行分析中得到广泛应用<sup>[2]</sup>。它提供二维和三维可视化演示图形仿真, 可实现对任意对象及对象间复杂计算分析。本文基于 STK 搭建复杂海上卫星通信场景, 建立逼真可视化动态场景仿真, 实现链路性能快速分析。

## 1 链路建模

卫星通信系统通常由地球站、通信卫星、跟踪遥测及指令系统和监控系统四大部分组成。船载星地链路是指卫星与船舶节点间的信息传输链路。星间链路是波束指向其他卫星, 在自由空间内进行传播的微波链路或激光链路。卫星

通信链路组成如图 1 所示。

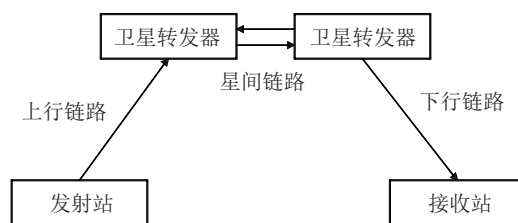


图 1 卫星通信链路组成

### 1.1 天线模型

天线增益  $G$  定量描述一个天线把输入功率集中辐射的程度, 在输入功率相等的条件下, 实际天线与理想的全向辐射单元在空间同一点处所产生的信号的功率密度之比, 用于衡量天线对特定方向收发信号能力。卫星通信使用的喇叭天线、抛物面天线等天线增益计算式为:

$$G=4\pi A_{\text{eff}}/\lambda^2 \quad (1)$$

$A_{\text{eff}}$  为天线有效面积 ( $\text{m}^2$ ), 由于电功率与电磁波形式的功率通过天线进行相互转换时会有损失, 所以并非天线口物理面积, 一般抛物面天线的天线效率大约 0.55, 天线效率超过 0.7 的天线成为高性能天线。 $\lambda$  为工作波长 ( $\text{m}$ ), 抛物面天线波束的半功率点宽度  $\theta_{1/2} \approx 70\lambda/D$ ,  $\theta$  为半功率角的大小,  $D$  为天线直径 ( $\text{m}$ )。

## 1.2 信道模型

信道模型主要考虑信号的干扰和损耗, 卫星通信链路信号在穿越大气层时, 受到电离层影响带来信号空间扩散的自由空间损耗、气体吸收能量的大气损耗、雨水吸收造成的降雨衰减、电离层对信号的综合效应、天线造成的指向误差、系统馈线电阻引起的馈线损耗、系统电子噪声以及天线接收的外部噪声<sup>[3]</sup>。对于 Ka 频段卫星通信链路来讲, 仅大气中氧分子、水汽凝结体的吸收损耗就可达 1 ~ 2 dB<sup>[4]</sup>。EIRP 即等效全向辐射功率, 是表征地球站或者转发器发射能力的重要技术指标, 即发出的功率  $P_t$  与天线增益  $G_t$  的乘积。自由空间损耗  $L_{FS}$  计算, 主要受通信频率和距离的影响。

$$L_{FS}=101\lg[(4\pi d/\lambda)^2]=201\lg(4\pi d/\lambda) \quad (2)$$

$d$  为传播距离, 单位 km。用频率  $f$  替换波长  $\lambda$ , 单位 GHz。

$$L_{FS}=92.45+20\lg f+20\lg d \quad (3)$$

频率与自由空间损耗呈正相关, 随着距离的增加, 自由空间损耗也会增加。 $L_0$  表示其他因素引起的附加损耗, 卫星接收功率用  $P_r$  的分贝表达式为:

$$P_r(\text{dBW})=\text{EIRP}(\text{dBW})+G_r(\text{dB})-L_{FS}(\text{dB})-L_0(\text{dB}) \quad (4)$$

## 2 场景构建

STK/Comm 通信分析模块支持用户定义和分析详细的通信系统, 考虑了详细的降雨模型、大气损耗和射频干扰源, 卫星轨道引擎与接收机和发射机属性建立高真实度系模型,

可以实现详尽的多条通信链路品质分析。以远海海域某货运船只经两颗同步轨道通信卫星接续向陆地通信站传输信息的链路为例, 建立多跳通信链路场景, 该场景由远海船舶、近海船舶和两颗同步轨道卫星组成。假设海上船舶使用 Ka 波段 (26.5 ~ 40 GHz) 通信, 卫星间通信采用 S 波段 (2 ~ 4 GHz)。远海船只 ship1 将其相控阵通信天线瞄准卫星, 近海船只 ship2 将其抛物线接收天线瞄准卫星。卫星间通信通过小型抛物面天线实现。卫星对水面的天线是固定的, 通信覆盖在船舶航迹附近区域。场景模型如图 2 所示。

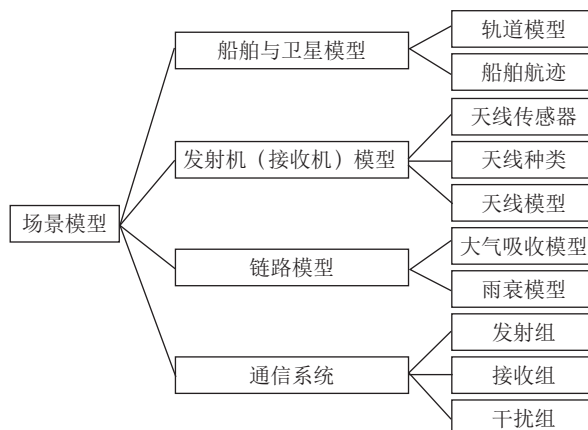


图 2 场景模型

### 2.1 航迹和轨道确定

以两颗地球位于赤道面上空, 与地球同步运转同步轨道为例, 导入卫星星历数据, 建立完整的卫星轨道模型。场景起始时间设置为协调世界时 1 Jul 2016 16: 00: 00.000, 船舶和卫星参数如图 3 和表 1 所示。

Time (UTCG)	ship1_Transit - Lon (deg)	ship1_Transit - Lat (deg)	ship2_Transit - Lon (deg)	ship2_Transit - Lat (deg)
1 Jul 2016 16:00:00.000	-79.563	8.941	115.435	22.098
1 Jul 2016 17:00:00.000	-79.582	8.986	115.212	22.033
1 Jul 2016 18:00:00.000	-79.619	9.022	114.989	21.967
1 Jul 2016 19:00:00.000	-79.656	9.056	114.768	21.896
1 Jul 2016 20:00:00.000	-79.685	9.096	114.547	21.825
1 Jul 2016 21:00:00.000	-79.727	9.119	114.327	21.753
1 Jul 2016 22:00:00.000	-79.775	9.114	114.112	21.669
1 Jul 2016 23:00:00.000	-79.810	9.142	113.903	21.572
2 Jul 2016 00:00:00.000	-79.838	9.181	113.703	21.461
2 Jul 2016 01:00:00.000	-79.886	9.191	113.507	21.343
2 Jul 2016 02:00:00.000	-79.924	9.221	113.311	21.226
2 Jul 2016 03:00:00.000	-79.922	9.272	113.115	21.108

图 3 船舶航迹经纬度

表 1 两颗卫星轨道参数

Orbit elements	$a$ (km)	$e$	$i$ (°)	RAAN (°)	$\omega$ (°)	$f$ (°)
Geo-east	42166.3	0	0.3	220.134	0	0
Geo-west	42166.3	0	0.2	60.134	0	0

分别添加船舶和卫星模型, 设置添加船舶经纬度信息, 卫星轨道选用 J2 外推模型, 得到车载通信站与卫星的相对位置关系。

### 2.2 发射机 / 接收机

传感器是 STK 中应用广泛, 可看作带指向功能伺服机构, 对准方向代表天线主瓣最大值对准方向<sup>[3]</sup>。将发射机 / 接收机对象连接到指定传感器对象上, 分别设置发射机或接收机的工作频率、功率、数据传输速率、天线种类和调制样

式。若已知平台发射天线的方向图, 可将天线类型设置为 External Antenna Pattern 外部导入后缀为“ant”格式的自定义天线方向图文件。发射机和接收机参数如表 2 所示, 模拟 Geo\_West 单跳射频转发器, 饱和通量密度 (SFD) 是衡量转发器输入的灵敏度, 设为  $-90 \text{ dBW/m}^2$ , 反映卫星转发器对上行功率的需求量。传输功能中默认系数  $-7 \times 10^8$  和 1.0, 来模拟 700 MHz 的下行转换, 将系数  $-7 \times 10^8$  改为  $-2.6 \times 10^{10}$ 。模拟 Geo\_East 单跳射频转发器, 饱和通量

密度 (SFD)  $-90\text{ dBW/m}^2$ , 传输函数系数改为  $2.6 \times 10^{10}$ 。

表 2 发射机 / 接收机参数

对象	Ship1_Transit 发射机	Geo_West 卫星接收机	Geo_East 卫星 接收机	Ship2_Transit 接收机	Geo_West 卫星转发器	Geo_East 卫星转发器
模型	Complex Transmitter	Complex Receiver	Complex Receiver	Complex Receiver	Re-Complex Transmitter	Re-Complex Transmitter
频率	30.15 GHz	自动跟踪	自动跟踪	自动跟踪	4 GHz	30.15 GHz
功率	30 dBW	—	—	—	30 dBW	30 dBW
数据速率	6 Mbps	—	—	—	—	—
天线类型	相控阵天线 (“元素数量”改 为 7, 光束转向为 GEO_West)	直径 4.6 m 固定孔 径抛物线型	直径 2 m 固定孔径 抛物线型	直径 2 m 固定孔 径抛物线型	天直径 2 m 高 斯型	直径 4.6 m 抛物 线型

2.3 通信链路

首先完成复杂大气环境设置, 在场景属性 RF-Environment 选择“Rain and Cloud& Fog”和“Atmospheric Absorption”模型, 分别使用国际电信联盟推荐云雾衰减模型 ITU-R P840-3 和大气吸收模型 ITU-R P676-9。STK 中使用的雨量模型是全球年度统计模型, 一个特定地点的年降雨率和概率是由历史测量结果决定的。

场景一: 信号从 ship1 经 Geo\_West 和 Geo\_East 传到 ship2, 在卫星上经过一个类似于管道转发过程再传送到出去, 在这过程中任何信号的衰减都会传递给下一个接收器, 建立“Chain”链条对象, 按照上行链路到下行链路的顺序 up—uplink—GTlink—GRlink—down—downlink 定义多跳链路, 确保每一个节点都满足访问条件, 通信链路示意图如图 4 所示。

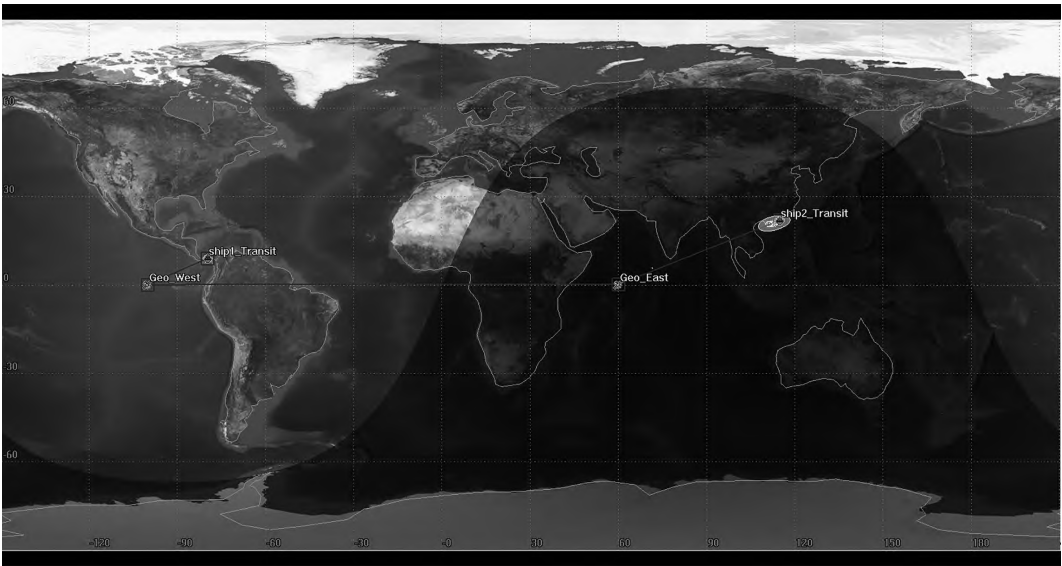


图 4 通信链路示意图

2.4 通信系统

场景二: STK/Comm 可识别干扰源并计算出干扰对通信链路的影响<sup>[5]</sup>。将相关的通信资产分为三组: 发射组、接收组和干扰组。本文对 ship1 上行通信链路建立“CommSystem”对象, 分析它受扰链路性能, 发射组加入 ship1 发射机, 接收组为 Geo-West 接收机, 假设在 ship1 附近有其他船只同时与 Geo-West 进行数据传输, 载波信道分配的不合理会导致相邻信道信号频带发生重叠, 造成邻信道干扰。干扰组加入 ship 发射机, 发射频率 30.14 GHz, 发射功率 30 dB, 带宽 12 MHz。两艘船的位置关系如图 5 所示, 阴影部分表示卫星传感器子对象接收天线 3 dB 的覆盖范围。



图 5 两艘船相互位置关系



### 3 链路性能分析

#### 3.1 三维动态链路实时显示

STK 二维地图窗口可实时显示任务场景随时间动态变化,等值线根据所选对象显示单位为 dB 的通信发射机/接收机和雷达增益,每损失 3 dB 相当于能量“减半”。卫星和舰船位置、卫星传感器覆盖区域、可见情况、光照条件结果均可以位图或动画形式保存。图 6 是多跳卫星通信链路三维视角显示,船舶与卫星之间的星地链路和远距离星间链路。

#### 3.2 链路性能分析报告生成

STK 在分析通信性能时,除常用的“linkinformationdetailed”“interference information detailed”外,也可根据需要定制重点关注的数据图表和报告。误码率(BER)是反映卫星通信系统性能的一个重要衡量指标。由于卫星所处空间的特殊,与地面通信相比,误码率相对高一些。



图 6 多跳卫星通信链路三维显示

(1) 本文重点围绕误码率分析链路性能质量,误码率越低,信号质量越好。默认情况下,STK 在报告中只处理两条链路。本文创建新的报告对从 ship1-Transit 到 ship2-Transit 的完整通信链路进行建模,在报告内容窗口第 3 行依次添加如图 7 前三行项目,并显示三条链路的误码率总数。

Rcvd. Iso. Power1 (dBW)	Flux Density1 (dBW/m <sup>2</sup> )	g/T1 (dB/K)	C/No1 (dB*Hz)	Bandwidth1 (kHz)	C/N1 (dB)	Eb/No1 (dB)	BER1
Rcvd. Iso. Power2 (dBW)	Flux Density2 (dBW/m <sup>2</sup> )	g/T2 (dB/K)	C/No2 (dB*Hz)	Bandwidth2 (kHz)	C/N2 (dB)	Eb/No2 (dB)	BER2
Rcvd. Iso. Power3 (dBW)	Flux Density3 (dBW/m <sup>2</sup> )	g/T3 (dB/K)	C/No3 (dB*Hz)	Bandwidth3 (kHz)	C/N3 (dB)	Eb/No3 (dB)	BER3
BER Tot.3							
-163.624	-112.582651	34.522915	99.497972	12000.000	28.7062	31.7165	1.000000e-30
-159.587	-125.769923	11.567792	80.580361	12000.000	9.7885	12.7988	3.362036e-10
-171.936	-120.894976	28.792532	25.455264	12.000	14.6635	17.6738	1.393206e-27
4.762257e-08							
-163.624	-112.582639	34.523844	99.498913	12000.000	28.7071	31.7174	1.000000e-30
-159.587	-125.769912	11.567792	80.580373	12000.000	9.7886	12.7989	3.361861e-10
-171.924	-120.883030	28.792532	25.467210	12.000	14.6754	17.6857	1.184160e-27
4.715394e-08							
-163.624	-112.582628	34.524771	99.499852	12000.000	28.7080	31.7183	1.000000e-30
-159.587	-125.769900	11.567792	80.580384	12000.000	9.7886	12.7989	3.361687e-10
-171.913	-120.871108	28.792532	25.479132	12.000	14.6873	17.6976	1.006374e-27
4.669152e-08							
-163.624	-112.582616	34.525698	99.500790	12000.000	28.7090	31.7193	1.000000e-30
-159.587	-125.769889	11.567792	80.580396	12000.000	9.7886	12.7989	3.361512e-10
-171.901	-120.859211	28.792532	25.491029	12.000	14.6992	17.7095	8.551900e-28
4.623521e-08							
-163.624	-112.582604	34.526625	99.501729	12000.000	28.7099	31.7202	1.000000e-30
-159.587	-125.769877	11.567792	80.580407	12000.000	9.7886	12.7989	3.361338e-10
-171.889	-120.847339	28.792532	25.502901	12.000	14.7111	17.7214	7.266429e-28
4.578493e-08							
-163.624	-112.582593	34.527551	99.502666	12000.000	28.7109	31.7212	1.000000e-30
-159.587	-125.769866	11.567792	80.580419	12000.000	9.7886	12.7989	3.361163e-10
-171.877	-120.835492	28.792532	25.514748	12.000	14.7229	17.7332	6.173553e-28
4.534057e-08							
-163.624	-112.582581	34.528477	99.503604	12000.000	28.7118	31.7221	1.000000e-30
-159.587	-125.769854	11.567792	80.580430	12000.000	9.7886	12.7989	3.360989e-10
-171.865	-120.823669	28.792532	25.526571	12.000	14.7348	17.7451	5.244521e-28
4.490205e-08							

图 7 链路分析报告

由图 7 链路计算报告可知,给定仿真参数条件下,从 ship1 到 GEO-West 的通信上行链路质量良好。船舶与卫星链路之间的通信误码率为  $10 \sim 30$ ,远远小于  $10 \sim 7$ ,星间链路传输误码率提高到  $3.36 \times 10^{-10}$  仍然满足通信要求,从 GEO-East 到 ship2 的通信误码率因船只运动在  $10 \sim 27$  附近少许波动是正常情况,整个通信系统的传输误码率最大为  $4.76 \times 10^{-8}$  因此,场景一中的海上卫星通信链路传输可靠。若想获得更好的传输性能,可以通过提高发射功率<sup>[6]</sup>,降低传输速率或调整信息传输频率方式减小误码率,判断干扰产生原因,改善信息传输质量。适当提高发送功率,可补偿自由路径损耗、降雨、闪烁等因素造成的信号衰减,使接收端信号功率保持在一定范围。通过改变 ship1 参数仿真,在 1 Jul 2016 16: 05: 00.000 时刻,发射功率、传输速率与通信系统总误码率的关系如图 8、

图 9 所示。

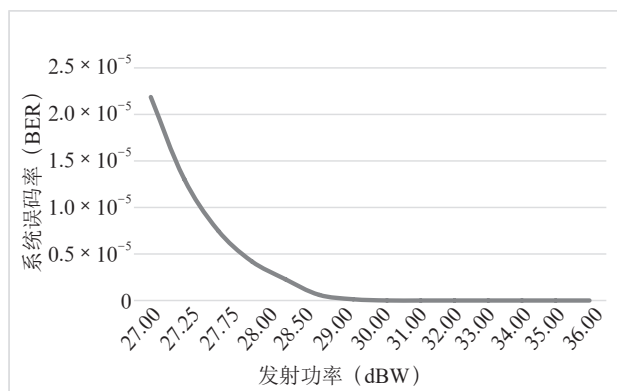


图 8 发射功率与通信系统误码率关系

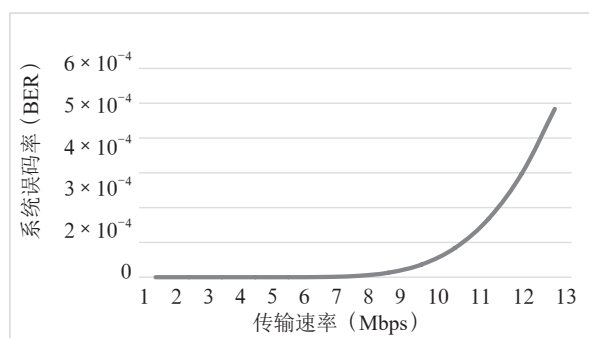


图9 传输速率与通信系统误码率关系

(2) 对于可能存在的干扰,生成场景二通信系统的

C/N (dB)	C/(N+I) (dB)	Eb/No (dB)	Eb/(No+Io) (dB)	BER	BER+I
25.4343	13.0509	28.4446	16.0612	1.0000e-30	1.2796e-19
25.4353	13.0829	28.4456	16.0932	1.0000e-30	9.4629e-20
25.4362	13.1188	28.4465	16.1291	1.0000e-30	6.7226e-20
25.4372	13.1587	28.4475	16.1690	1.0000e-30	4.5851e-20
25.4381	13.2025	28.4484	16.2128	1.0000e-30	2.9986e-20
25.4391	13.2503	28.4494	16.2606	1.0000e-30	1.8778e-20
25.4401	13.3021	28.4504	16.3124	1.0000e-30	1.1243e-20
25.4410	13.3579	28.4513	16.3682	1.0000e-30	6.4246e-21
25.4420	13.4177	28.4523	16.4280	1.0000e-30	3.4974e-21
25.4429	13.4817	28.4532	16.4920	1.0000e-30	1.8099e-21
25.4439	13.5362	28.4542	16.5465	1.0000e-30	1.0244e-21
25.4449	13.5784	28.4552	16.5887	1.0000e-30	6.5616e-22
25.4457	13.6242	28.4560	16.6345	1.0000e-30	4.0226e-22
25.4466	13.6741	28.4569	16.6844	1.0000e-30	2.3491e-22
25.4475	13.7280	28.4578	16.7383	1.0000e-30	1.3056e-22
25.4484	13.7854	28.4587	16.7957	1.0000e-30	6.9216e-23
25.4493	13.8464	28.4596	16.8567	1.0000e-30	3.4953e-23
25.4502	13.9114	28.4605	16.9217	1.0000e-30	1.6697e-23
25.4512	13.9805	28.4615	16.9908	1.0000e-30	7.5260e-24
25.4522	14.0536	28.4625	17.0639	1.0000e-30	3.1918e-24
25.4532	14.1309	28.4635	17.1412	1.0000e-30	1.2699e-24

图10 场景二详细链路报告

## 参考文献:

- [1] 张金贵. 信道特性对卫星通信系统性能影响仿真 [J]. 无线电工程, 2015, 45 (4): 9-11+19.
- [2] 杨颖, 王琦. STK 在计算机仿真中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] 杨欣, 张占月, 何中柱, 等. 基于 GEO 通信卫星干扰技术的建模与仿真 [J]. 现代电子技术, 2013, 36 (13): 5-9.
- [4] ITU. Characteristics of Precipitation for Propagation Modeling

详细链路报告看到, 因为附近船只的出现, 信噪比下降了 12 dB, 误码率虽升高了近十个量级, 但仍可以满足通信质量要求, 在航行中只需随时关注本船数据传输情况, 适时调整发射机参数设置应对可能存在的干扰。场景二详细链路报告如图 10 所示。

## 4 结 论

本文详细介绍了 STK 海上卫星通信多跳链路仿真过程, 通过仿真结果检验海上卫星通信质量, 完成链路计算和干扰分析, 能够确保数据图像信息可靠地传回地面, 将为海上卫星通信系统、航迹规划、地面站部署等方案论证、设计优化, 为提高海上作战体系快速反应能力提供重要支撑。

[EB/OL].[2022-01-03].[https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-1-199408-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-1-199408-S!!PDF-E.pdf).

[5] 张生, 岳廷高, 徐敬. 基于 STK 的卫星通信链路对抗仿真分析 [J]. 电子对抗, 2008 (2): 12-15+33.

[6] 夏利元. 卫星传输系统中的干扰因素与应对策略分析 [J]. 无线互联科技, 2016 (11): 21-23.

作者简介: 徐曼睿(1993.10—), 女, 汉族, 安徽合肥人, 助理工程师, 硕士研究生, 研究方向: 卫星通信建模仿真。

(上接 52 页) 业白皮书 (2020) [R/OL]. 赛迪工业和信息化研究院. [2021-10-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1682597868196105813&wfr=spider&for=pc>.

[2] 伍嘉, 王志会, 刘凡栋, 等. 5G 端到端切片技术实现探讨 [J]. 邮电设计技术, 2020 (9): 12-17.

[3] 洪珂一, 李嘉. 5G 网络应用现状与发展趋势分析 [J]. 电脑知识与技术, 2017, 13 (13): 22-23.

[4] 欧洲电信标准协会 (ETSI). 5G; Management and orchestration; 5G Network Resource Model (NRM); Stage 2 and stage 3 (V16.9.0; 3GPP TS 28.541 version 16.9.0 Release 16; Includes Diskette): ETSI TS 128 541-2021 [S/OL]. (2021-08-01). <https://www.nssi.org.cn/nssi/front/112827450.html>.

[5] 欧洲电信标准协会 (ETSI). 5G; System architecture for the 5G System (5GS) (V16.8.0; 3GPP TS 23.501 version 16.8.0 Release 16): ETSI TS 123 501-2021 [S/

OL]. (2021-04-01). <https://www.nssi.org.cn/nssi/front/112827786.html>.

[6] 方琰崴, 陈亚权, 李立平, 等. 5G 网络切片解决方案和关键技术 [J]. 邮电设计技术, 2020 (3): 70-74.

[7] 李一, 许国平, 刘光海, 等. 5G NSA 网络评价指标体系研究 [J]. 邮电设计技术, 2020 (8): 38-43.

[8] 刘珊, 韩潇, 黄蓉. 面向 5G 的无线侧网络切片发展与研究 [J]. 邮电设计技术, 2020 (1): 45-49.

[9] 汤建东, 肖清华. 5G 容量能力分析 [J]. 邮电设计技术, 2020 (3): 50-53.

[10] 彭登, 姚光韬. 5G 网络切片技术研究及应用 [J]. 信息技术与信息化, 2021 (1): 202-205.

[11] 田涛. 5G 网络切片技术的管理与 5G 组网应用分析 [J]. 中国新通信, 2021, 23 (8): 31-32.

作者简介: 王静奕(1984.01—), 女, 汉族, 湖北武汉人, 讲师, 硕士研究生, 研究方向: 计算机网络技术。