

doi: 10.7690/bgzd.2023.05.014

卫星通信系统对抗技术与态势仿真分析

刘旭光, 代鹏举, 钱志升, 周继航

(中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 为获得信息优势, 在分析卫星通信系统态势仿真需求的基础上, 探讨卫星通信链路的干扰技术。针对某静止轨道卫星通过 STK 设计战情进行仿真, 验证比较同波束情况下各种干扰方法的可行性; 利用 STK 软件的通信分析功能和仿真外部接口, 结合 Matlab 对卫星波束切换条件下的通信态势进行仿真设计和实现。结果表明: 该分析可为卫星通信系统相关仿真研究提供借鉴和参考。

关键词: 卫星通信; 干扰; 态势; 误码率

中图分类号: TJ861 **文献标志码:** A

Countermeasure Technology and Situation Simulation Analysis of Satellite Communication System

Liu Xuguang, Dai Pengju, Qian Zhisheng, Zhou Jihang

(No. 63892 Unit of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to obtain information superiority, the jamming technology of satellite communication link is discussed based on the analysis of satellite communication system situation simulation requirements. The simulation of a geostationary orbit satellite through STK is carried out to verify and compare the feasibility of various jamming methods under the same beam. By using the communication analysis function and simulation external interface of STK software, the simulation design and implementation of communication situation under the condition of satellite beam switching are carried out with Matlab. The results show that the analysis provides a reference for the related simulation research of satellite communication system.

Keywords: satellite communication; interference; situation; BER

0 引言

随着人类社会发展和科学技术进步, 卫星通信已成为当今通信领域最受青睐的技术, 融入人们日常生活的方方面面。卫星通信的重要性不仅体现在普通通信传输中, 而且对国防军事和社会发展产生着深刻的影响^[1]。卫星通信已经在现代战争中发挥着巨大作用, 是指挥控制系统的大脑。它一旦受到干扰或者破坏, 战略、战役通信将受到严重阻碍, 从而造成指挥、控制等信息传递不畅, 影响战场决策和战机把握^[2-3]。为获得信息优势, 有必要开展卫星通信对抗技术和态势仿真技术的研究。

笔者基于 STK 自定义模型文件的功能级建模技术, 重点对选取的某静止轨道卫星系统的轨道分布、卫星上的转发器、卫星用户终端的收发信机、对抗系统干扰设备等进行仿真建模, 并通过分配其属性约束, 开发点波束、赋形波束等天线模型, 模拟卫星上下行链路。在此基础上开展在同波束、波

束切换条件下的卫星通信系统通信性能仿真分析, 可为虚实结合的卫星通信场景提供态势仿真。

1 卫星通信系统态势仿真组成

根据卫星通信信号流向以及对抗系统的任务需求, 卫星通信系统态势仿真主要由卫星仿真模型、信号传输计算模型、卫星终端仿真模型和对抗系统仿真模型等组成, 如图 1 所示。

卫星仿真模型主要用于模拟实际卫星在空间中的位置以及信号发射功能。卫星终端模型主要模拟卫星终端的基本特性和位置信息。对抗装备模型是指搭载干扰设备的地面装备和无人机, 其中地面装备向卫星发射干扰信号来压制上行通信链路, 无人机向地面终端发射干扰信号以干扰敌方星地下行链路。传输环境模型分别对大气损耗、雨衰、天线极化误差等进行建模, 针对不同的链路选择不同的链路模型, 包括: 星一地无线信道衰减模型, 地一地无线信道衰减模型, 空一地无线信道衰减模型。

收稿日期: 2023-01-06; 修回日期: 2023-02-18

作者简介: 刘旭光(1982—), 男, 河南人, 硕士, 从事卫星通信仿真研究。E-mail: paddylu@126.com。

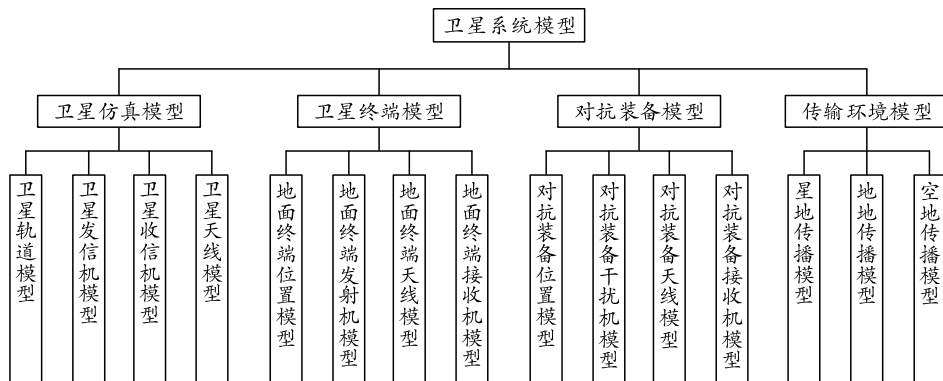


图 1 卫星通信系统态势仿真模型

2 卫星对抗仿真设计流程

根据卫星对抗仿真试验的设计和仿真软件的任务目标,卫星系统对抗仿真的工作流程如图 2 所示。

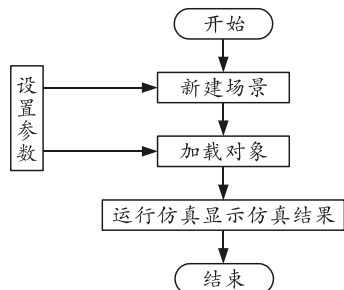


图 2 仿真设计流程

具体工作流程为:

1) 根据设置新建场景。

2) 在场景中加载该卫星对象、卫星终端、地基/空基干扰站或者干扰卫星对象,也可通过 STK/Matlab 接口模块与 Matlab 连接。用户可新建对象或读取预设配置文件,也可在加载场景后调整各模型模块参数。

3) 根据仿真的任务场景设置各类加载对象参数,如位置类信息、信号类信息、天线类信息和对抗类信息等。

4) 运行该卫星对抗仿真并实时显示仿真数据。在场景中实时显示卫星波束变化、链路连接、对抗态势变化,并在仿真结果中给出卫星通信及对抗数据处理结果。

3 卫星系统对抗仿真应用

3.1 针对卫星的对抗技术

一般来说,“硬毁伤”就是针对卫星本身展开的攻击,主要是将空间武器部署在卫星、飞行器或者地面等平台上,利用动能或者高能微波、激光对目标卫星进行物理摧毁。根据平台类别的不同,干扰平台可分为地基、空基、海基和星基等。按照干扰

站所处地理位置的不同,干扰卫星通信可分为地基干扰、天基干扰和空基干扰^[4-5]3种形式,分别指部署在陆地、舰船、飞机和空间轨道或航天器上的系统。

3.2 针对卫星信道的对抗技术

卫星通信信道对抗方式主要有3种:1)对卫星到卫星用户终端的上行和下行通信链路的干扰;2)对卫星到卫星地面无线接入站的上、下行链路的干扰;3)对卫星系统的测控链路的干扰。

1) 卫星到用户终端的上下行链路。

对用户终端到卫星的上行信号的干扰可采用地面装备和空中平台。相对于卫星较远通信距离,干扰距离与对方的通信距离近似相等,而通信方通常使用扩频、跳频等技术来增强其抗干扰性;因此,要达到干扰上行通信链路的目的,只靠增大干扰功率不太现实。原则上,只要干扰设备和卫星用户终端在同一波束内都能实施有效干扰,但不在同一波束内时,地面干扰设备发射的干扰信号由卫星天线副瓣进入,干扰信号衰减较大,如要进行有效干扰,只能加大干扰功率,如果卫星使用天线调零技术,干扰几乎不可能。反之,采用空基抵近侦察干扰时,干扰方获得了距离优势;此时,只要满足地球曲率、距离损耗、地物等因素,干扰对准对方接收天线主瓣,能够取得良好的干扰效果。

2) 卫星到地面无线接入站的上下行链路。

根据地面用户是否在同一波束内,卫星系统需要通过地面无线接入站进行信息转发。地面无线接入站采用大功率 Ku、Ka 频段站型,口径大、增益大,对于静止轨道卫星,地面无线接入站静止对准卫星,使其天线波束变窄,地面干扰设备的信号很难进入接入站主波束内,只能从旁瓣进入,无法实施有效干扰。星基干扰平台采用高轨抵近,可对其上下行链路实施有效干扰,但是实施成本巨大,干

扰准备时间较长。组网通信中，一般都有星间链路，衰减小，采用通信带宽小，天线的指向性明确，地基干扰对此几乎没有作用，即使是星基干扰，如果不能在卫星发射天线的波束内，干扰也难以实现。

3) 卫星测控链路。

大多数卫星系统的通信有 2 种实现途径，分别是遥测信息和遥控信息。同时，部分系统还通过卫星组网传递信息，大大减少通过地面运控站传递的任务量，当地面运控站被干扰或者被袭击时，卫星系统依靠空间网络仍可以正常执行任务；因此，也不易实现对卫星测控链路的干扰。

笔者主要分析卫星通信中对星地链路的干扰，暂不对组网中的星间链路进行仿真分析。综合考虑不同平台的作战效能、技术代价、经费需求等因素，针对覆盖我国区域的卫星目标，开展对抗研究，选择地基干扰平台和空基平台综合对抗的途径，对卫星到终端用户上下行通信链路进行干扰。

4 基于 STK 的卫星通信对抗态势仿真

4.1 同波束条件下的仿真分析

战情如下：假定位于域外的 26.5°N，75°E 的地面站与位于 75°E 上空的某卫星进行通信。地面站发射机功率设置为 1 kW，天线口径为 3 m，信号频率为 312/372 MHz，数据速率为 16 Kbit/s。卫星的收发机天线口径设置为 1 m，发射机功率为 800 W，方向对准地面站。

4.1.1 干扰上行链路

干扰上行链路，可采用地基干扰设备进行干扰。干扰机位置位于 30.56°N，79°E，发射机的功率设置为 1 kW，信号频率为 312 MHz，天线口径设置为 3 m。干扰机发射干扰信号干扰卫星接收机，通过运行仿真，得到上行链路的误码率变化情况如图 3 所示。

C/N (dB)	C/(N+I) (dB)	Eb/No (dB)	Eb/(No+Io) (dB)	BER	BER+I
61.4656	6.4901	61.4656	6.4901	1.000000e-30	1.415524e-03
61.4656	6.4901	61.4656	6.4901	1.000000e-30	1.415524e-03
61.4656	6.4901	61.4656	6.4901	1.000000e-30	1.415524e-03
61.4656	6.4901	61.4656	6.4901	1.000000e-30	1.415524e-03
61.4656	6.4901	61.4656	6.4901	1.000000e-30	1.415524e-03
61.4656	6.4901	61.4656	6.4901	1.000000e-30	1.415525e-03
61.4656	6.4901	61.4656	6.4901	1.000000e-30	1.415525e-03
61.4656	6.4901	61.4656	6.4901	1.000000e-30	1.415525e-03

图 3 干扰实施前后的误码率

1) 干扰位置变化的影响。

一台发射功率为 1 kW 的干扰机干扰后的误码率不到 1%，不能起到很好的干扰效果，需要通过

增大干扰功率或改变干扰站干扰位置来提升干扰效果。若改变干扰站位置，最理想的情况，当干扰机与卫星站发射机处于同一位置时，此时误码率会达到峰值，如图 4 所示；但此时干扰效果仍很差，误码率仍然很小，不到 8%，说明这样的干扰站无法起到有效干扰，须通过增大干扰功率来增强干扰效果。

2) 干扰功率变化的影响。

假设干扰机位置不变，继续干扰上行链路，随着干扰功率逐步增加，误码率变化曲线如图 5 所示。刚开始，当干扰机的功率增大时，误码率也增大，但是当干扰功率增大到 5 kW 时，误码率才提升到 9%左右，误码率增大的幅度变化并不大，干扰效果差，说明干扰机单凭增大功率就想获得较好的干扰效果也不太实际。

C/N (dB)	C/(N+I) (dB)	Eb/No (dB)	Eb/(No+Io) (dB)	BER	BER+I
61.4656	-0.0000	61.4656	-0.0000	1.000000e-30	7.864968e-02
61.4656	-0.0000	61.4656	-0.0000	1.000000e-30	7.864968e-02
61.4656	-0.0000	61.4656	-0.0000	1.000000e-30	7.864968e-02
61.4656	-0.0000	61.4656	-0.0000	1.000000e-30	7.864968e-02
61.4656	-0.0000	61.4656	-0.0000	1.000000e-30	7.864968e-02
61.4656	-0.0000	61.4656	-0.0000	1.000000e-30	7.864968e-02
61.4656	-0.0000	61.4656	-0.0000	1.000000e-30	7.864968e-02
61.4656	-0.0000	61.4656	-0.0000	1.000000e-30	7.864968e-02
61.4656	-0.0000	61.4656	-0.0000	1.000000e-30	7.864968e-02

图 4 同位置单机干扰的误码率

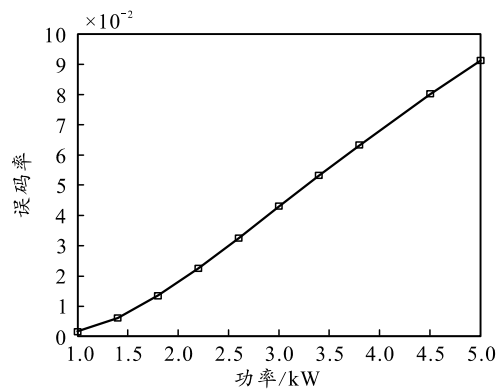


图 5 干扰机功率变化对误码率的影响

3) 干扰机数量变化的影响。

保持地基干扰机位置和功率都不变，增加干扰机的数量，误码率变化规律如图 6 所示。增加干扰机数量逐步从 1 台增加到 12 台时，误码率显著提升，12 台干扰机同时工作时，误码率为 20%左右，干扰设备能够起到较好的干扰效果。继续增加干扰机的数量，误码率的增速却变慢，干扰效果不再有明显变化，25 台干扰机的误码率只比 12 台干扰的效果提升不到 8%，干扰效果提升不明显。可见单纯依靠增加干扰机的数量并不是很好的干扰选择。

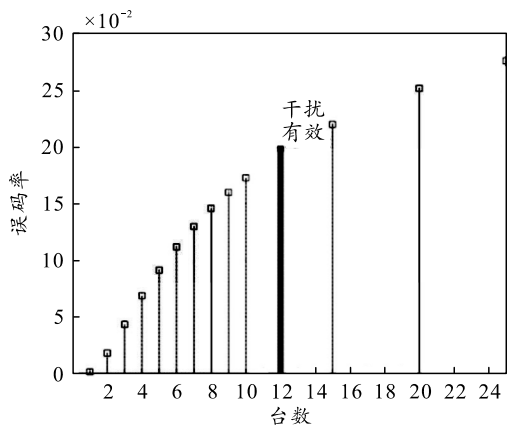


图 6 干扰机数量变化对误码率影响

4) 干扰样式变化的影响。

假设原有仿真场景的参数设置不变，地面站发射机采用 QPSK 调制，而地基干扰机分别采取 BPSK、QPSK、8PSK、16PSK、16QAM、MSK、Gaussian 的调制样式，上行链路受到干扰后的误码率如图 7 所示。仿真发现，不同调制样式的干扰信号对卫星通信系统的误码率产生影响也不相同。干扰机运用 QPSK、8PSK、16PSK、16QAM 调制样式时，上行链路受到干扰后的误码率最大，干扰效果没有变化；当干扰机采用 MSK、BPSK 或 Gaussian 的调制样式，上行链路受到干扰后的误码率都有明显的减小，且效果越来越差。

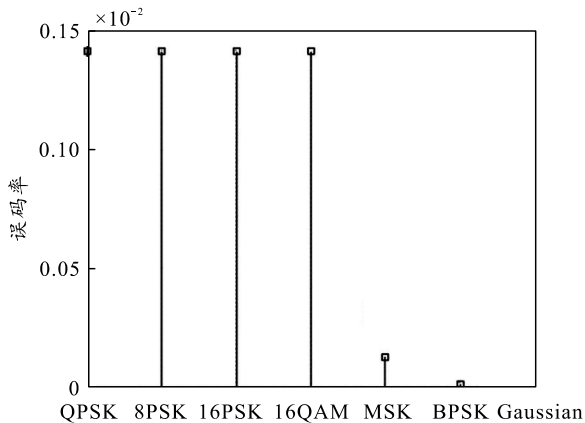


图 7 调制样式变化对误码率的影响

5) 干扰数据速率变化的影响。

数据速率代表通信系统的有效性，误码率代表可靠性。误码率随干扰信号码速率变化的仿真结果如图 8 所示。仿真发现，干扰信号的数据速率变化会对误码率产生较大影响，当干扰信号的数据速率小于卫星通信速率，即两者速率比小于 1 时，系统的误码率最大，且基本保持不变；而当干扰信号的数据速率大于卫星通信速率，也即两者速率比大于 1 时，系统的误码率迅速减小，随着干扰数据速率

与通信速率比不断增大，此时干扰信号对通信系统几乎没有影响。

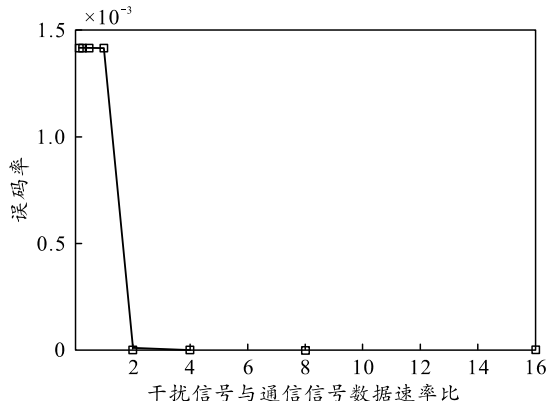


图 8 数据速率变化对误码率的影响

综上，到达卫星天线的干扰信号没有太大功率优势，而通信用户双方却可以使用跳频、扩展频谱等手段来进行抗干扰。为了干扰有效，干扰方往往需要被动地去增大天线口径，或采用更先进的干扰技术来提升对抗能力。可见，干扰卫星通信的上行链路费效比不高。

4.1.2 干扰下行链路

干扰卫星通信下行链路可采用空基平台进行干扰，空基平台包括无人机和邻近卫星。设无人机飞行高度为 5 km，飞行速度为 120 m/s，由 25°N~35°N 范围飞临地面站进行干扰，地面站接收卫星下行信号，此时的干扰态势仿真如图 9 所示。干扰机功率设置为 1 kW，干扰天线的口径为 1 m。运行仿真场景，干扰时长以及干扰前后的误码率曲线如图 10 和 11 所示。

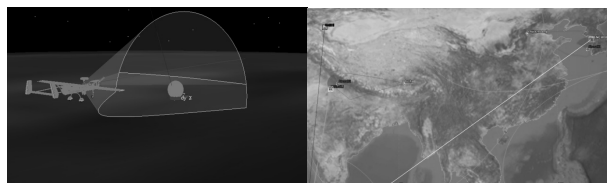


图 9 无人机与卫星对抗态势

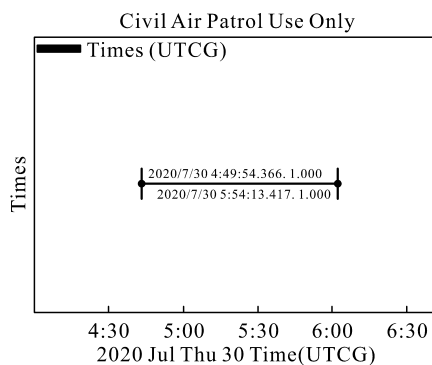


图 10 无人机干扰实施覆盖时长

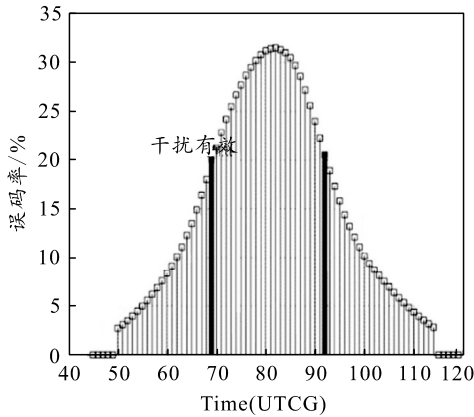


图 11 无人机干扰实施前后的误码率

表 1 卫星干扰前后下行链路误码率

功率/W	800	1 000	1 500	2 000	3 000	5 000
误码率/%	7.853 094	10.282 20	15.071 16	18.540 99	23.247 68	28.569 38

伴星使用相同 800 W 发射功率进行干扰时，误码率不到 8%，而要达到误码率为 20% 的有效干扰，需增大发射功率到 3 kW；但由于卫星受造价、体积尺寸的限制，其发射功率和天线尺寸不可能太大，干扰发射功率到 5 kW，误码率变化缓慢。

可见，对卫星下行链路进行干扰，无论从干扰效果还是实际效果看，干扰卫星通信的下行链路是高效、实际可行的对抗方式。特别针对于静止轨道卫星，由于其轨道高、信号传输损耗大，干扰更容易。

空基平台距离被干扰用户终端距离较近，信号传输损耗较小，相同干信比情况下的干扰效果好。星基平台由于天线指向，干扰不易对准主瓣等因素，单颗星的干扰功率不可能太大；但是，空基平台干扰覆盖范围有限，干扰时需到达被干扰用户终端上空，且容易被发现和摧毁，由于滞空时间受限，即使能够达到被干扰用户终端上空进行干扰，干扰时间受到限制。星基干扰就不存在这些问题，在无法进行抵近干扰情况下，实施卫星干扰就更加有效。

4.2 波束切换条件下的仿真分析

笔者利用 STK 快速建立星地模型，根据卫星的位置、接收机天线等各种参数，通过 STK/Matlab 接口模块与 Matlab 连接，利用 Matlab 的计算分析功能仿真不同波束间卫星链路动态分析^[6-7]。

笔者仿真同一颗卫星下的点波束间切换场景。每个当前信道都有一个最低的接收阈值，在信息交互过程中，卫星系统对该信道进行实时监测，当信道质量低于该阈值时，用户对当前所处的所有点波束信号进行检测选择，提出切换请求。

可见，一台发射功率为 1 kW 的干扰机在一个仿真周期内约有 64 min 的干扰时长，且能起到很好的干扰效果。误码率随飞机抵近目标地面接收站的距离而变化，最初距离远无法干扰，在到达较近或抵近目标时，误码率迅速增加到 32%，能达到较好的干扰效果。在飞机远离后，误码率急剧降低直至无法干扰。

假设干扰机附在该卫星附近的 (72 °E) 一颗地球同步卫星时，功率为 800 W，其余参数同通信卫星。运行仿真场景，得到卫星干扰前后的误码率变化，如表 1 所示。

仿真场景中，螺旋状波表示波束 1，通信频段为 370 MHz，实柱状波表示波束 2，通信频段为 376 MHz，实线表示通信链路，有数据业务传输，而虚线表示建立或释放链路。地面移动终端沿长春、北京、西安、成都、昆明方向，沿波束 1 向波束 2 运动，仿真场景分为 4 个时间段。

在时段 1，地面终端从长春运动到波束 1 中，只在波束 1 的覆盖范围内，卫星与波束 1 保持通信，故只存在通信链路。在时段 2，当地面终端到达北京时，开始进入波束 1 和波束 2 的重叠区域，卫星能够同时接收到波束 1 和 2 的信号，通过 Matlab 仿真运算比较，由于终端接收机此时接收到的波束 1 的信号的质量还优于通信信道的最低接收阈值，故波束 1 与终端通信，波束 2 开始建链，但业务数据仍还是通过波束 1 下的信道传送。在时段 3，当终端运动到西安时，接收到的波束 1 的信号的质量低于通信信道的最低接收阈值，波束 1 和波束 2 完成通信信道的切换。卫星发出释放波束 1 链路的请求卫星波束 2 与地面移动终端建立下行通信链路，波束 1 的覆盖范围内，只存在通信链路，而不再传输业务。在时段 4，地面终端运动到昆明时，地面移动终端只在波束 2 覆盖范围内，只接收波束 2 的信号，卫星只与波束 2 保持通信，波束 1 链路释放完成。仿真态势如图 12 所示。

波束切换情况下的卫星链路动态仿真结果如图 13 所示。通过比较分析，在波束 1 中，干扰信号逐渐变强，误码率由小变大，同样，当进入波束 2 中远离波束 1 过程中，干扰逐渐变小，误码率由大变小。

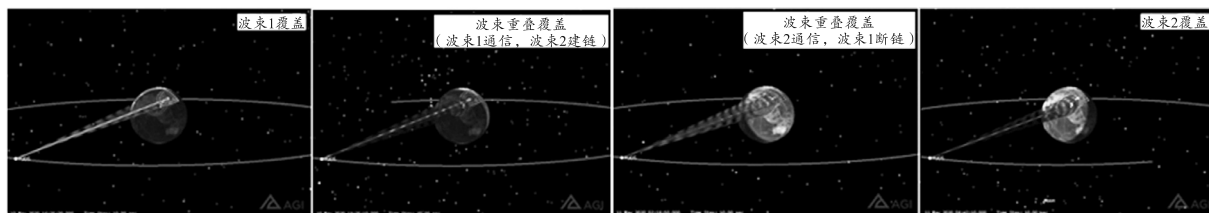
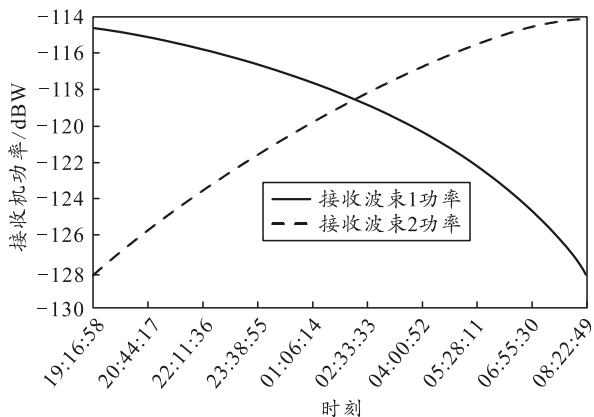
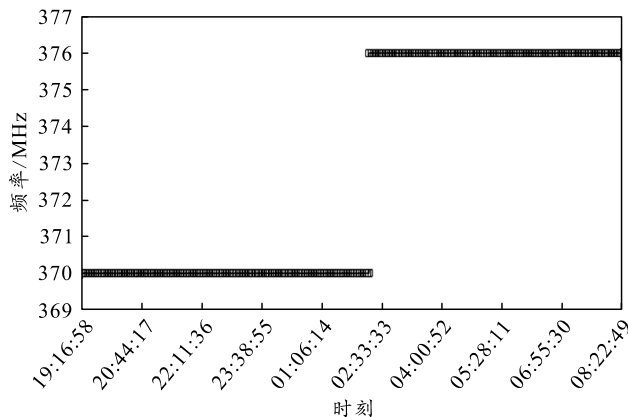


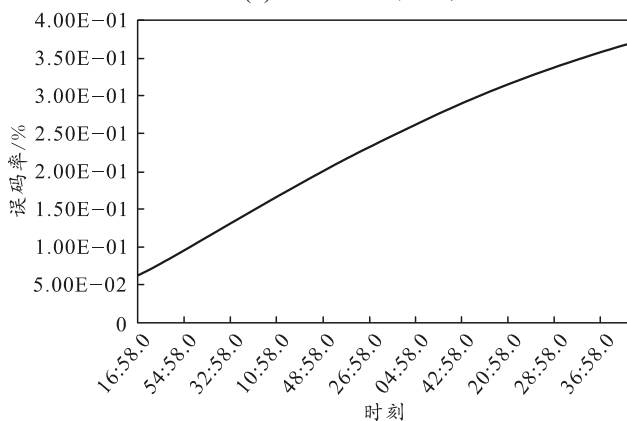
图 12 波束覆盖下的通信态势仿真示意



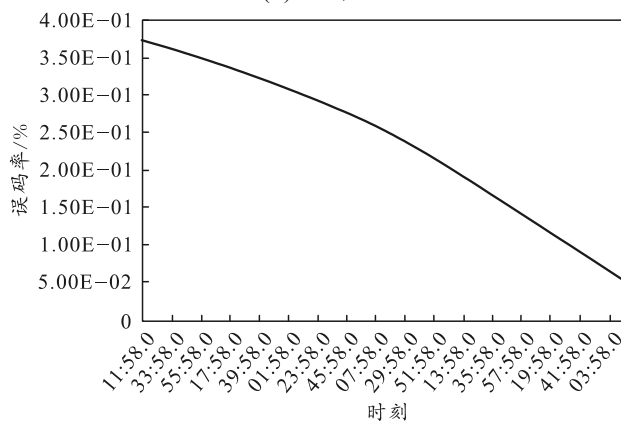
(a) 重叠区波束功率



(b) 频率切换



(c) 波束 1 误码率



(d) 波束 2 误码率

图 13 波束切换情况下的卫星链路动态仿真结果

5 结束语

笔者重点探讨卫星系统的对抗仿真技术，通过 STK 设计战情进行仿真分析，分别比较了同波束情况针对上、下行链路干扰的可行性，并通过用 STK 软件对卫星通信系统干扰的仿真演示。可以看出，笔者所讨论的各干扰方法均具有一定的可行性，但从功率实现考虑，利用星基或空基平台等对下行链路进行干扰是一种比较理想的卫星通信干扰方法。最后，利用 STK 外部接口，调用 Matlab 进行仿真，分析波束切换条件下的卫星通信系统态势仿真的过程，为进一步研究打下基础。

参考文献：

[1] 张钧. 卫星通信的发展前景与展望[J]. 数字技术与应

用, 2017(5): 23.

[2] 侯柳英, 徐慨, 王路. 卫星通信系统在上、下行综合干扰条件下的性能分析[J]. 通信技术, 2008, 41(12): 120-121.
 [3] 杨其聪, 程昱宇, 钟海, 等. 基于低轨卫星通信 K/Ka 车载相控阵设计[J]. 兵工自动化, 2022, 41(7): 21-24.
 [4] 黄晓飞, 徐池. 卫星通信干扰样式研究[J]. 航天电子对抗, 2011, 27(6): 17-19.
 [5] 刘文文, 熊伟, 韩驰. 基于改进 NSGA-II 的通信卫星资源动态调度方法[J]. 兵工自动化, 2022, 41(4): 69-75.
 [6] 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: 275-285.
 [7] 刁华飞, 张雅声, 程文华. 掌握与精通 STK[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2021: 126-132.