

引用格式:程城人,任仙海,徐帅旗.星链系统及其作战运用分析[J].指挥控制与仿真,2024,46(1):154-160.CHENG C R,REN X H,XU S Q.Starlink and its operational analysis[J].Command Control & Simulation,2024,46(1):154-160.

## 星链系统及其作战运用分析

程城人<sup>1,2</sup>, 任仙海<sup>1</sup>, 徐帅旗<sup>2</sup>

(1. 国防大学联合作战学院, 北京 100091; 2. 中国人民解放军 31151 部队, 北京 100091)

**摘要:**星链系统作战运用日趋成熟,考虑星链系统仍在快速建设,有必要对其未来作战运用进行系统分析。为探究美军星链系统未来作战运用方式,以星链基本情况分析为基础,聚焦大国高端战争,从作战理论的四个层次探究了星链对美军作战的影响,展现了星链的体系支撑作用;最后通过星链作战运用仿真实验,对星链中期作战运用方式与能力进行了定量分析,为后续反制策略的研究奠定了基础。

**关键词:**星链系统; 作战理论; 作战运用; 仿真分析

**中图分类号:**V474/E96

**文献标志码:**A

**DOI:**10.3969/j.issn.1673-3819.2024.01.020

### Starlink and its operational analysis

CHENG Chengren<sup>1,2</sup>, REN Xianhai<sup>1</sup>, XU Shuaiqi<sup>2</sup>

(1. Joint Operations College of National Defense University, Beijing 100091; 2. Unit 31151 of PLA, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The operational application of Starlink system is becoming more and more mature. Considering that Starlink system is still under rapid construction, it is necessary to conduct a systematic analysis of its future operational application. In order to explore the future operation mode of the Starlink system of the US military, this paper, based on the analysis of the fundamental state of Starlink, focuses on high-end wars of great powers, explores the impact of Starlink on the operations of the US military from four levels of operational theory, and shows the system supporting role of Starlink. Finally, an operational simulation experiment of Starlink is given to analyze the long-term capability. By analyzing the operational mode and capability of the mid-stage Starlink operation, it lays a foundation for the follow-up countermeasures.

**Key words:** Starlink; operational theory; operational application; simulation analysis

星链英文名称 Starlink,是 SpaceX 公司于 2015 年推出的低轨卫星互联网星座,旨在提供高效的全球卫星通信服务。在俄乌冲突中,SpaceX 公司向乌军提供了 2 万个终端,有效提升了乌军在信息拒止条件下的通信能力。2022 年 12 月,美军与 SpaceX 公司签署“星盾”计划,SpaceX 公司将以 3 万颗卫星为美军提供传感、通信、导航服务。

目前,星链的相关研究主要集中在技术领域,可以概括为七个方面,即星座构型、发射情况、星间链路、星座管理、路由机制、安全策略以及组网运行。与作战相关的研究成果主要分三类,一类是集中研究俄乌冲突中星链的作战运用<sup>[1-3]</sup>,突出城市作战;另一类是以星链的特点为基础,研究星链对作战可能产生的影响<sup>[4-5]</sup>;还有一类是利用仿真手段分析星链对地面的覆盖情况<sup>[6]</sup>,但作战问题研究仅限于技术层面。当前,星链作战运用研究的主要问题在于基本情况认知不全,主体服务对象不作代入,作战理论分析不成体系。

因此,本文基于对星链基本情况研究现状的总结,

从作战理论的四个层次对美军在大国高端战争中使用星链的可能情况进行了分析,最后结合仿真实验,对星链的中期能力进行了评估。

### 1 星链基本情况

星链计划在 2019—2024 年间完成由 1.2 万颗卫星构成的第一星座,之后再发射 3 万颗卫星构成第二星座。后调整为在 2024 年完成第一星座的一半,2026 年前后完成第一星座。本文面向第一星座展开研究。

#### 1.1 星座构型

第一星座分两个阶段部署,其中第一阶段由 5 个壳层的 4 000 多颗卫星构成,以高度 540 km 左右、倾斜 53°左右的壳层 1 与壳层 2 为主;第二阶段由 3 个壳层的 7 000 多颗卫星组成,高度 340 km 左右,倾角分别为 42°、48°、53°。一阶段壳层的主要构型是 72 轨道面,每个轨道面有 22 颗卫星。二阶段卫星分布更为密集,72 轨道面的情况下,每个轨道面将有 35 颗卫星。星座构型如图 1 所示。

#### 1.2 发射情况

星链发射使用美天军的发射基地,运载器为可以做到 10 次以上重复使用的猎鹰火箭,主要发射加装了星间链路的 1.5 版本星链卫星,卫星重 295 kg,目前单

收稿日期:2023-07-24

修回日期:2023-08-23

作者简介:程城人(1997—),男,陕西咸阳人,硕士,研究方向为太空作战。

任仙海(1981—),男,博士,副教授。

次发射最大运载 56 颗,年发射数量在 2000~3000 颗。2.0 版本卫星设计通信能力达到 1.5 版本的 4 倍,但重量达到 1 250 kg。因此,要利用星舰进行运载,星舰首次发射失败使计划相应后延,是否使用 2.0 代替 1.5 尚且没有声明。目前,2.0 mini 版本已经利用猎鹰火箭发射 2 248 颗,单次运载 20 颗左右。

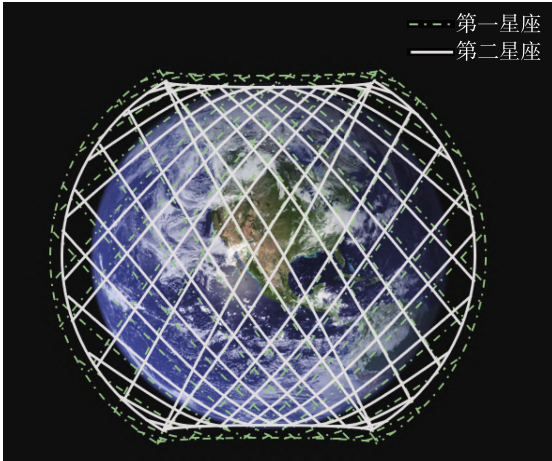


图 1 星链星座构型示意图

Fig. 1 Configuration diagram of Starlink constellation

1.3 星间链路

星链的星间链路包括同轨道、异轨道卫星之间的永久链,以及大量临时的交叉链<sup>[7]</sup>,其数量与通信距离的关系如表 1。

表 1 有效星间通信距离与星间链路数量的关系表

Tab. 1 The relationship between effective inter-satellite communication distance and the number of inter-satellite links

链路距离/km	永久星间链路数量				临时星间链路数量			
	同轨	临轨	近轨	总计	临轨	近轨	交轨	总计
659	2	0	0	2	4	21	37	62
1 319	4	0	0	4	8	41	67	116
1 500	4	2	0	6	8	43	85	136
1 700	4	6	0	10	4	53	87	144
5 016	14	30	44	88	2	113	281	396

研究者认为目前单个星链卫星所具备的建立 4 个星间通信链路的能力远远不能够支持大规模的星间通信,必须将大量临时星间链路利用起来。从表 1 来看,星链目前可靠星间通信距离应该在 1 000 km~2 000 km。

星间链路还存在网络拓扑更新的问题,周期太长将导致大量可用链接丧失,周期太短会导致频繁切换,增加管理难度。中国空间技术研究院<sup>[8]</sup>利用整数线性规划给出了优异的拓扑更新策略。

1.4 控制策略

星链本质上提供了一种接入服务,在全球拥有 150

个信关站,对卫星的管控包括测控和运控,预报过顶时间及进行任务分配。李宁<sup>[9]</sup>等人提出了一种域管控策略,将星座网络拓扑划分为若干域,每个域中选择一个簇首,进行初始化并动态维护,使地面参与管理的卫星节点数量降至 14%。

除了星座整体的控制策略,还需要考虑单星的机动控制策略。余舜京<sup>[10]</sup>等人通过公开的运行信息绘制其高度变化情况,发现星链的控制策略不同于传统的化学推进使用的集中式边界控制方法,而是针对电推进特点使用频繁的分布控制,这种控制具有较高的精度。

1.5 路由策略

低轨卫星互联网星座的路由策略设计包括经典路径求解算法、深度神经网络方法和强化学习方法。刘洋<sup>[11]</sup>等人提出了基于树突神经网络智能路由方法。该方法使用树突神经网络感知全局的拓扑结构,并进一步更新全局链路权重,使迪杰斯特拉算法的效率得到提升,得到了更低的时延。基于强化学习的方法<sup>[12]</sup>主要是以网络拓扑为状态空间,以星间链路选择为动作空间,不断选择动作、更新状态,到达目标节点之后给出累计奖励,比较不同路径,以累计奖励最大路径为最优路径。这种路由策略优化带来的网络性能提升有限,不会改变时延与数据容量的数量级。

1.6 安全策略

星链的安全策略包括两方面,即规避碰撞与规避干扰。仿真实验<sup>[10]</sup>中,两颗星链卫星之间的距离最小可以达到 4.9 km,小于最小的安全距离 10 km,避碰既要考虑太空碎片,也要考虑两星之间的碰撞。对于地面可观测的碎片,可以将预测碰撞风险上传至星链卫星之后,星链卫星进行自主规避。

星链的干扰规避<sup>[13]</sup>技术主要有 8 种。高仰角意味着视野内的障碍物更少,卫星分集通过复制传输再合并提高信号质量,高定向、功率控制、高频段与相控阵天线技术可以避免与其他卫星信号的相互干扰,自适应调制编码可以降低天气的影响,星间链路可以绕过被干扰的拓扑节点进行信号传输。对于星链内部的相互干扰,张钊<sup>[14]</sup>等人提出了基于干扰与受扰链路夹角的干扰规避方法,基本可以将星链之间噪声清零。

1.7 组网运行

星链目前已有大量地面信关站,为部分地面移动通信不发达地区的民众提供了卫星通信服务。低轨卫星互联网星座经济效益模型的研究<sup>[15]</sup>指出,综合考虑数据容量与投资成本,星链只有在用户密度较低的地区才能维持有竞争力的通信。但人口主要集中在城市,而星链有限的通信容量对城市服务来说太小,无法

与 5G 或 6G 竞争。因此,其网络服务未来主要还是面向政府与军队,独立组网运行以提高其安全性的可能较大。

整体来看,以上 7 个方面都已经比较成熟的方案或技术手段,星舰发射与 2.0 入轨将进一步提升其网络建设速度及能力增长速度。俄乌冲突中星链的表现只是冰山一角,深入研究星链的作战运用十分紧要。

## 2 星链作战运用框架分析

从美军近年来的作战概念看,“穿透性制空”“分布式杀伤”“远征前进基地”都面向区域据止环境,以打赢濒海高端战争为目的。因此,有必要研究美军在区域据止环境中如何运用星链实现区域介入。

美军的军事理论包括作战构想、作战概念、作战条令三个层次,其中,作战条令包含具体的战术、行动、程序,但星链在条令中的具体运用尚未可见。因此,需要围绕美军区域介入的目的,在其作战概念所包含的具体行动中进行星链作战运用研究。

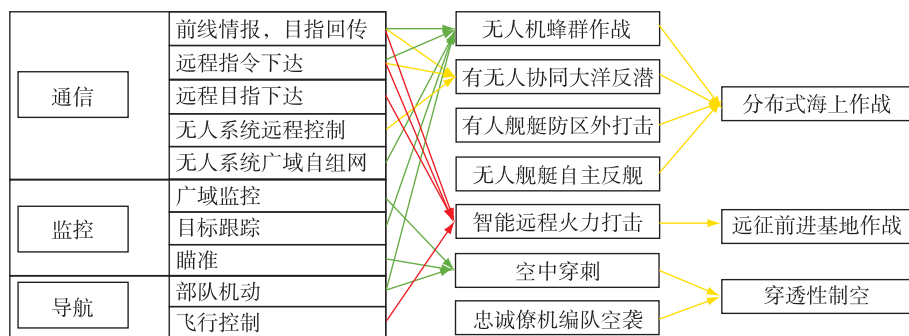


图 2 星链作战运用分析框架

Fig. 2 Framework of Starlink operation application analysis

## 3 星链作战运用技术能力分析

美军提出了 7 层国防太空架构,包括一个地面支持层,以及太空的传输层、战斗管理层、跟踪层、监控层、导航层、威慑层。星链的技术能力主要体现在传输层、监控层、导航层。

### 3.1 高质量信号传输

星链 1.5 版本单星下行通信容量在 20 G 左右,“星盾计划”1.5 万颗卫星若全部携带通信载荷,考虑 2.0 版本通信能力为 1.0 版本的 4 倍,则星座总带宽在 1 200 T。

美军现在最先进的 AEHF 通信卫星,即“先进极高频率”,单星 430 M 带宽、重达 4 吨,星间传输速率 60 M/s,目前总共发射了 6 颗卫星。相比较而言,星链的单星带宽大,重量小,但其规模庞大带来的通信能力与 AEHF 相比已不在一个量级。

在近海,美军设想利用大量的无人系统以及小型编队进行“分布式杀伤”;在近海岛屿,美军设想利用远程火力进行“远征前进基地”作战;在远海,美军设想利用航母起飞的舰载机进行“穿透性制空”。

其中,“分布式杀伤”包含无人机蜂群作战、有人/无人协同反潜、有人舰艇防区外打击、无人舰艇自主反舰等作战行动;“远征前进基地”主要是精确智能远程火力打击行动;“穿透性制空”主要是进行高强度多轮穿刺打击濒海目标、“忠诚僚机”编队多轮穿刺进行空中格斗。星链支撑上述行动要在多个杀伤环节中发挥不同技术能力,因此,需要首先分析星链的技术能力边界。

综上所述,分析星链作战运用应该从技术能力、杀伤环、作战行动、作战样式、作战目的 5 个层次考虑。其中作战目的与作战样式已经明确,由于杀伤环节、作战行动随着星链的技术能力更新会不断变化,因此,以数个行动的杀伤链分析进行举例说明。整体框架如图 2 所示。

另一个低轨卫星互联网星座“铱星”,单星 700 kg,最大下行速率 200 M,共 66 颗卫星覆盖全球,相比之下,星链的单星带宽提升了 100 倍,数量提升了 200 倍以上,具体参数对比如表 2。

表 2 星链 2.0 与其他通信卫星参数对比

Tab. 2 Comparison of parameters between Starlink 2.0 and other communication satellites

	重量	数量	单星带宽	星间传输速率
星链 2.0	1 250 kg	15 000	80 Gbps	10 Gbps
AEHF	4 000 kg	6	430 Mbps	60 M/s
铱星	700 kg	66	200 Mbps	25 M/s

另外,星链的低轨道,成熟的星间链路建设规划与路由策略带来了较低的时延,测试时延在 25 ms 左右,远低于同步轨道通信卫星。星链广域分布的低时延大容量军事通信可以支持前线情报目指回传、远程指令



下达、远程目指下达、无人系统远程控制、无人系统广域自组网等环节。

3.2 有限的目标监控

从杀伤链的角度,发现、定位、跟踪、瞄准都属于监控的范畴。从北美防空司令部建立的星链运行可视化网站上可以看到,上升段的星链卫星间距在 100 km 左右,如此高密度的星座足以形成视场重叠与长时间、连续区域监控,做到发现、定位、跟踪,但瞄准阶段是否能提供有效目指仍然存疑。

传统的低轨大型光学侦察卫星如“锁眼 12”,重达 17 吨,雷达侦察卫星如“长曲棍球”,重达 15 吨,即使考虑星载一体化等卫星设计技术的进步以及侦查设备的轻量化,重量 1 250 kg 的星链 2.0 单星仍无法满足高质量的侦察载荷需求,但这并不能完全否定其提供有效目指的能力。

以“鸽群”遥感星座为例,单星重量只有 5 kg,搭载的高倍望远镜却能够以 3~5 m 精度拍摄到我军南海演习的情况。即使星载能力有限,但考虑多星的情报合成、低精度目指条件下导弹的射击方法、纯方位目指情况下导弹的搜索策略<sup>[16]</sup>,星链仍旧有可能提供有效目指。

3.3 高精度导航定位

伦敦大学学院的研究团队研究了受干扰情况下星链对地面车辆及无人机的辅助导航能力<sup>[17]</sup>,在仿真环境中,对于运动中的车辆或无人机,切断其全球导航定位,利用惯性导航向预定目标运动 300 s 之后结束仿真并统计误差,惯性导航分为全球导航定位系统辅助(GNSS-INS)与星链星座辅助(LEO-INS)两种类型,实验结果如表 3 所示。可以看到,在信号受干扰的情况下,星链的辅助导航能力优于传统的全球定位系统。

表 3 星链与 GPS 辅助导航能力对比

Tab. 3 Comparison of star link and GPS assisted navigation capability

		GNSS-INS	LEO-INS
车辆	均方根误差/m	118.5	21.6
	最终误差/m	472.7	53.6
无人 机	均方根误差/m	2713	13.75
	最终误差/m	5554	28.49

4 星链作战运用之行动杀伤链分析

4.1 智能远程火力打击

在陆战领域,以智能远程火力打击作战为例。美军陆军使用低轨卫星与无人机进行探测,发现目标后迅速将信息回传至战术情报地面接入点,将信息输入“普

罗米修斯”进行快速的目标分析与坐标计算,得到可靠目指之后利用人工智能“火力风暴”进行迅速的弹目匹配,形成多套方案之后由指挥官进行决策,命令下达后由远程精确火力进行打击。如图 3 所示。



图 3 智能远程火力打击行动

Fig. 3 Intelligent long-range fire strike operations

星链的庞大规模、高速星间通信以及分布式计算的成熟使得“普罗米修斯”与“火力风暴”存在星上运行的可能,能够提供情报回传、远程指令下达、远程目指下达、武器飞行控制等服务,在美军遭受重创,指挥机构无法遂行职能的情况下,星链可以独立发现、定位、跟踪、瞄准、评估,支撑远程精确火力完成打击,实现人不在回路的杀伤链。

4.2 有人/无人协同大洋反潜

在海战领域,以有人/无人协同大洋反潜为例。平时利用各种平台常态化搜集海洋环境信息与目标特征,战时利用大型无人潜航器、水下预置武器、敏捷反潜系统进行反潜作战,必要时与反潜机、驱逐舰等进行协同反潜。

星链作为成功的广域信息网络,描绘了一幅“军事物联网”的宏大场景,数字孪生技术的成熟使得无人系统在稳定信息支援条件下可以发挥出堪比有人平台的能力,星链能够提供前线情报、目指回传、远程指令下达服务、远程目指下达,使得有人/无人协同大洋反潜将呈现出更强烈的无人化与“物联网”特征,杀伤链闭合速度与效率得到大幅提升。如图 4 所示。

4.3 无人蜂群作战

在空战领域,以无人蜂群作战为例。2017 年 DARPA 为小精灵项目提出了分布式空中作战运用的作战构想,基本内容是由卫星发现目标并通过云网络回传至情报中心,由情报中心上传至指控节点,指控节点向 C-130 发送目标位置并下达攻击指令,C130 在目标防区外释放侦察、攻击、干扰类型的无人机,以蜂群的形式对目标进行探测与干扰,侦察型与攻击型无人



图 4 有人-无人协同大洋反潜

Fig. 4 Manned-unmanned coordinated ocean anti-submarine

机进行通信引导打击。

星链加入前线情报目指回传、远程指令下达、无人系统广域自组网、目标跟踪、部队机动等环节,使得蜂群自主协同能力增强,蜂群与云端智能系统之间的即时交互成为可能,蜂群的智能程度以及战场适应性会得到大幅提升,杀伤链弹性升级,如图 5 所示。

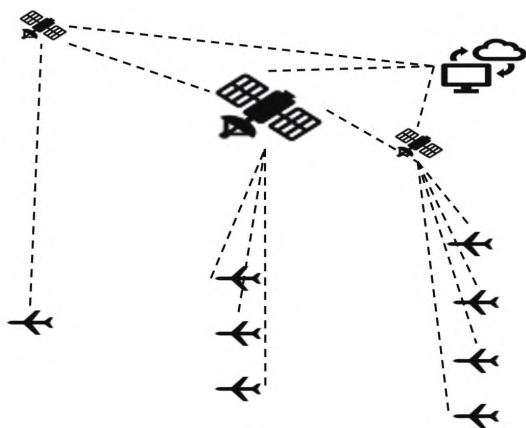


图 5 星链支撑无人蜂群广域自组网

Fig. 5 Starlink supported UAV wide area network

本节选取了分析框架中陆、海、空三个作战域的典型作战行动进行了举例说明,基于技术能力分析,分别描述了星链系统对现有作战行动杀伤链的构成、弹性、效率带来的影响。应该认识到,星链有融入几乎所有作战行动的潜力,可以说星链是美军实现“分布式杀伤”“远征前进基地作战”“联合全域指挥控制”等核心作战概念的泛在底层联通传感系统,未来必将深度嵌入美军作战体系。

## 5 星链作战运用仿真分析

公开发表的星链仿真分析多以专业的卫星仿真工具 STK 进行。受限于 STK 的运行速度,多以一个壳层 1 584 颗卫星为仿真对象,因此规模受限。

考虑 Matlab 优异的计算能力,本文主要依赖 Matlab 的卫星工具箱,以星链第一星座 1.2 万颗卫星为对象,对其在智能远程火力打击行动中的武器飞行控制能力进行分析。

### 5.1 星链星座仿真

星座仿真流程如图 6 所示。



图 6 中期星链星座仿真流程

Fig. 6 Simulation process of mid-stage Starlink constellation

1.2 万颗星链卫星的 TLE 文件一部分来源于北美防空司令部网站,包括现有的 4 000 多颗卫星,剩余 7 000 多颗卫星的 TLE 根据星链建设规划由 STK 生成。

其中,Matlab 星座仿真主程序对星链卫星仿真回放如图 7 所示。

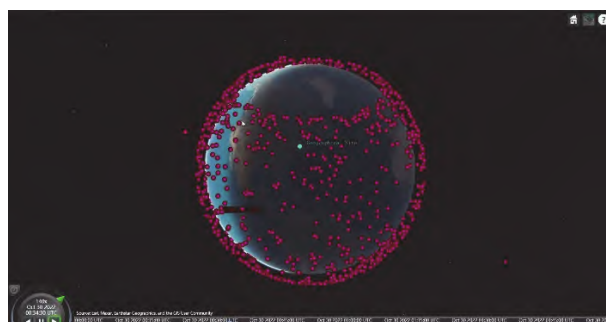


图 7 中期星链星座仿真可视化

Fig. 7 Visualization of mid-stage Starlink constellation simulation

星座对地面点覆盖时域变化情况如图 8 所示,其中横轴为时间,纵轴为地面点被覆盖情况,可与卫星连接则覆盖性为 1,否则为 0。

### 5.2 星链作战运用仿真框架

除星座仿真主程序之外,交战仿真还包括导弹仿真、目标仿真、星弹铰链原理仿真、导弹命中解算 4 个子程序。由于本文主要关注星链的作战运用,因此对导弹仿真、目标仿真、星弹铰链原理仿真、导弹命中解算基于主要原理建立了轻量级程序模型。

导弹仿真主要实现基于星弹通信的目指更新,目标仿真主要是点目标的路径设计,星弹铰链仿真主要是导弹可见的卫星连接选择,导弹命中解算主要考虑

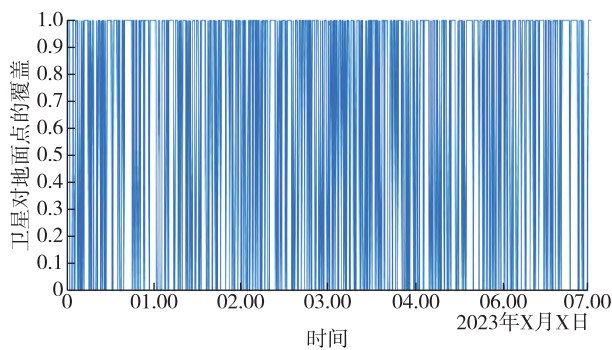


图 8 星座对地面点覆盖时域变化情况

Fig. 8 Changes of constellation coverage of ground points in time domain

导弹落点与目标之间的距离。程序逻辑如图 9 所示。

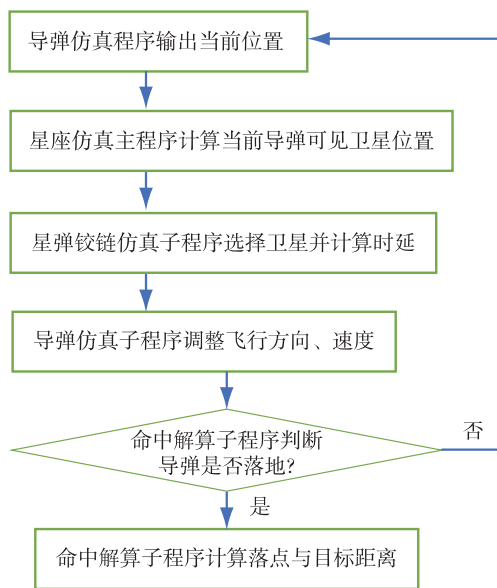


图 9 星链作战运用仿真框架

Fig. 9 Starlink Operation simulation framework

5.3 仿真实验设计与实验分析

基于以上仿真框架,以火力单元数量、单星数据容量、制导弹药比例为自变量,以摧毁的目标数量为因变量。实验设计如表 4 所示,单星数据容量 20 G 为 1.5 版本卫星,80 G 为 2.0 版本,考虑星链建设情况与美军导弹星弹铰链能力,以 2 水平的单星数据容量与 2 水平的制导弹药比例交叉组成 4 个基本情况,再分别在 4 水平的火力单元数量下进行实验,其中每个火力单元有 16 枚导弹。

统计 16 组实验下命中目标数量,结果如图 10。

纵向看,从情况 1 到情况 4 命中目标越来越多,说明卫星数据容量与制导弹药比例都与打击能力正相关;对比情况 2 与情况 3,制导弹药比例下降的情况下,提升卫星数据容量命中目标数量增加,说明卫星数据容量是更重要的制约因素。横向看,四种情况都显示火力单元数量增加引起命中目标数量上升,但在高带

宽卫星通信网络保障下,打击能力提升更为迅速。

表 4 实验设计

Tab. 4 Experimental design

实验编号	火力单元数量	单星数据容量	制导弹药比例	
1	1	20 G	50%	情况 1
2	1	80 G	50%	情况 2
3	1	20 G	100%	情况 3
4	1	80 G	100%	情况 4
5	4	20 G	50%	情况 1
6	4	80 G	50%	情况 2
7	4	20 G	100%	情况 3
8	4	80 G	100%	情况 4
9	6	20 G	50%	情况 1
10	6	80 G	50%	情况 2
11	6	20 G	100%	情况 3
12	6	80 G	100%	情况 4
13	15	20 G	50%	情况 1
14	15	80 G	50%	情况 2
15	15	20 G	100%	情况 3
16	15	80 G	100%	情况 4

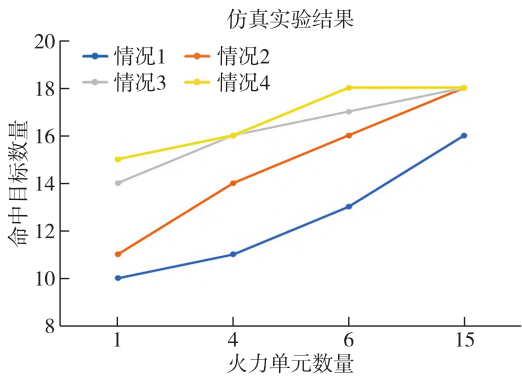


图 10 仿真实验结果

Fig. 10 Results of simulation experiment

以上实验结论说明,星链作为高带宽低轨卫星通信星座,能够有力保证大规模远程精确武器作战效能,支撑美军实施分布式作战。

6 结束语

本文首先从星链系统 7 个方面的基本情况出发,研判了其建设情况,得到星链系统技术成熟、作战运用潜力大的初步结论。其次,给出了星链作战,运用分析的基本框架,在此框架内,重点从技术能力支撑杀伤环和杀伤环支撑行动杀伤链两部分对星链作战运用进行了理论解析。最后,以星链在智能远程火力打击行动中的作战,运用仿真实验定量分析了星链系统对于该杀伤链效能所起到的倍增器的作用。星链系统仍在迅



速扩大规模,星链的作战运用研究是解析美军未来作战的重要途径,运用更系统的理论分析框架、更完备的作战仿真平台将进一步提升星链作战运用分析的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 王太军,唐麟綦,周超.“星链”在俄乌军事冲突中的应用探研[J]. 通信技术, 2022, 55(8): 1 006-1 013.  
WANG T J, TANG S Q, ZHOU C. Research on starlink applications in russia-ukraine military conflict[J]. Communications Technology, 2022, 55(8): 1 006-1 013.
- [2] 刘业民,田黎曦,龚柳洁,等.“星链”在俄乌冲突中的应用及对策浅析[J]. 长江信息通信, 2023(1): 130-133.  
LIU Y M, TIAN L X, GONG L J, et al. Simple analysis on application and countermeasures of starlink in Russia-Ukraine conflict [J]. Changjiang Information & Communications, 2023(1): 130-133.
- [3] 彭中新,祁振强,钟圣,等.“星链”在俄乌冲突中的运用分析与思考启示[J]. 战术导弹技术, 2022(6): 121-127.  
PENG Z X, QI Z Q, ZHONG S, et al. Analysis and reflection on the application of starlink in the Russia-Ukraine conflict [J]. Tactical Missile Technology, 2022(6): 121-127.
- [4] 杨广华,王强,陈国玖,等.美国“星链”低轨星座军事应用前景探析[J]. 中国航天, 2022(9): 60-63.  
YANG G H, WANG Q, CHEN G J, et al. Future military application of the US starlink LEO constellation[J]. Aerospace China, 2022(9): 60-63.
- [5] 黄杰,于旭锐,郭婧.“星链”星座军事化应用浅析[J]. 国防科技, 2022, 43(6): 8-13.  
HUANG J, YU X R, GUO J. Thoughts on the militarization of the “starlink” constellation [J]. National Defense Technology, 2022, 43(6): 8-13.
- [6] 李元龙,李志强.基于STK的Starlink星座覆盖仿真分析[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(1): 119-129.  
LI Y L, LI Z Q. Simulation analysis of starlink constellation coverage based on STK [J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(1): 119-129.
- [7] Chaudhry, A. U., Yanikomeroglu, et al. Laser intersatellite links in a starlink constellation: A classification and analysis[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(2): 48-56.
- [8] QIAO L, YAN, et al. Onboard Centralized ISL-Building Planning for LEO Satellite Constellation Networks[J]. Electronics, 2023, 12(3): 635.
- [9] 李宁,岳程斐,郭海波,等.大规模卫星星域管控策略设计[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(1): 18-28.
- LI N, YUE C F, GUO H B, et al. Domain control strategy for the large-scale satellite cluster [J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(1): 18-28.
- [10] 余舜京,赵黎晔,杨智博,等. Starlink 激光终端卫星现状分析[J]. 无线电工程, 2023, 53(8): 1 941-1 948.  
YU S J, ZHAO L Y, YANG Z B, et al. Analysis of current situation of starlink satellite laser terminals [J]. Radio Engineering, 2023, 53(8): 1 941-1 948.
- [11] 刘洋,王丽娜.基于树突神经网络的低轨卫星智能感知路由算法[J]. 工程科学学报, 2023, 45(3): 465-474.  
LIU Y, WANG L N. LEO satellite intelligent-sensing routing algorithm based on a dendrite network [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(3): 465-474.
- [12] 李信,李勇军,赵尚弘.基于深度强化学习的卫星光网络波长路由算法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(1): 264-270.  
LI X, LI Y J, ZHAO S H. A wavelength routing algorithm for optical satellite network based on deep reinforcement learning [J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(1): 264-270.
- [13] 魏文康,李英华,李世林,等. Starlink 星座系统的干扰规避技术分析[J]. 中国无线电, 2022(8): 38-42.  
WEI W K, LI Y H, LI S L, et al. Analysis of interference avoidance technology in starlink constellation system [J]. China Radio, 2022(8): 38-42.
- [14] 张钊,姚秀娟,高翔,等. NGS0 星座 Q/V 波段星间链路干扰规避技术[J]. 空间科学学报, 2023, 43(2): 352-360.  
ZHANG Z, YAO X J, GAO X, et al. Interference analysis on Q/V band ISL between NGS0 constellation systems [J]. Chinese Journal of Space Science, 2023, 43(2): 352-360.
- [15] OGUTU O B, OUGHTON E J. A techno-economic cost framework for satellite networks applied to low earth orbit constellations: assessing starlink, OneWeb and kuiper [EB/OL]. 2021: arXiv: 2108.10834. <https://arxiv.org/abs/2108.10834>.
- [16] 孙涛,谢晓方,梁捷,等.纯方位目视条件下空舰导弹目标搜索策略研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(5): 72-74.  
SUN T, XIE X F, LIANG J, et al. Study on target search strategy for air-ship missile under the condition of bearing-only target designation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(5): 72-74.
- [17] KASSAS Z, NEINAVAI E M, et al. Enter LEO on the GNSS stage: Navigation with Starlink satellites [J]. InsideGNSS, 2021(6): 42-51.

(责任编辑:李楠)