

## 天基测控对抗技术研究

计平<sup>1</sup> 董方成<sup>2</sup> 张海江<sup>1</sup> 陈磊<sup>3</sup>

(1. 中国空间技术研究院通信卫星事业部 北京 100094; 2. 中国空间技术研究院总体部 北京 100094;  
3. 中国东方红卫星股份有限公司 北京 100094)

**摘要:** 卫星测控对抗会对战争中的制天权和制信息权构成直接威胁,已成为各军事大国关注的焦点。在挖掘卫星测控对抗特性的基础上,提出了天基测控对抗的概念,分析了天基测控对抗的优势和特性,并从干扰策略、对抗干信比、星间距离部署等方面对天基测控对抗问题进行了探讨,初步论证了天基测控对抗系统在工程实践中的可行性,最后阐述了天基测控对抗系统的功能、组成和对抗流程等,以上研究为未来天基测控对抗系统的建设提供了基本的研究框架。

**关键词:** 天基;测控;对抗

**中图分类号:** TN975 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5060

## Research on space-based TT&C confrontation

Ji Ping<sup>1</sup> Dong Fangcheng<sup>2</sup> Zhang Haijiang<sup>1</sup> Chen Lei<sup>3</sup>

(1. Institute of Telecommunication Satellite CAST, Beijing 100094, China; 2. Institute of Spacecraft System Engineering CAST, Beijing 100094, China; 3. China Spacesat Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** Satellite TT&C confrontation will be a direct threat to the mastery of space and mastery of information in the war. Thus it has been focused by major military powers all over the world. Based on satellite TT&C confrontation, the principle of space-based TT&C confrontation is proposed, the advantage and characteristic of space-based TT&C confrontation are analyzed. The problem of space-based TT&C confrontation in terms of jamming strategy, confrontation JSP and distance between two satellites are discussed, and the feasibility of satellite TT&C confrontation system in engineering practice is preliminary demonstrated. Finally, the composition and process of space-based TT&C confrontation is proposed. These research achievements provide a elementary framework for the construction of TT&C confrontation system in the future.

**Keywords:** space-based; TT&C; confrontation

### 1 引言

自20世纪后半叶以来,航天技术的兴起及其在军事上的广泛应用,拓展了军事活动和国防安全的领域,改变了战争形态。各类军用航天器系统作为军事信息获取、交互系统的核心,得到各国的重点关注。近年来,立足打赢未来高科技局部战争,各军事大国均从利用空间向控制空间过渡。作为空间信息传输关键节点与制高点的各类卫星系统,成为空间对抗的重要目标,由此带来的卫星系统的安全防护问题已引起了各军事大国的高度关注<sup>[1]</sup>。

卫星测控是测量卫星轨道、监视卫星状态、实现卫星操控的唯一手段,是军用卫星系统工程中的重要组成部

分,对卫星运行和应用至关重要。因其固有的开放性,卫星测控易受到干扰、截获和欺骗,成为现代战争中的重点攻击目标。因此,针对卫星测控的对抗干扰会对战争中的制天权和制信息权构成直接威胁。

天基测控对抗相当于将测控对抗的主战场从地面搬到了太空,因而相比传统的测控对抗方式有着无可比拟的优势,包括不受天气影响,不受国界、领空和领海的限制,空间损耗小、作用距离短、部署灵活、能长时间进行测控对抗等优势。随着空天飞行器技术(如各种战术卫星、临近空间飞行器、平流层飞艇)的高速发展,天基测控对抗技术将成为未来战争的一个新领域。综上所述,立足于打赢未来高科技局部战争,当前开展天基测控对抗的研究是非常

必要的,也具有相当重要的意义。

目前国内外围绕卫星测控对抗的研究主要集中在卫星通信抗干扰的理论和技术研究<sup>[2-5]</sup>,在测控调制体制上主要采用扩频或跳频等技术手段提高抗干扰水平<sup>[6-8]</sup>,近年来随着纠错编码技术的发展,诸如 Turbo 码、LDPC 码、Raptor 码等编码技术也被证实可以显著增强卫星通信的抗干扰性能<sup>[9-11]</sup>。目前有关卫星测控对抗问题的论述较少,并且主要局限在概念层面<sup>[12]</sup>,有关天基测控对抗问题的论述则更少。

## 2 卫星测控对抗

卫星测控对抗是指对抗双方在星地测控领域为争夺电磁信号使用优势而展开的电子对抗,其目的是在复杂的电磁环境下保持己方卫星测控系统的生存能力,使其发挥正常的效能,同时利用各种侦测和干扰手段,削弱、破坏或者摧毁敌方的卫星测控系统,以降低其效能。通过测控对抗手段,可以造成敌方军用卫星系统部分或全部功能紊乱,进而削弱敌方卫星系统对于作战部队和武器系统的信息传输支持,最终有效的降低敌方先进武器平台的打击效率和部队作战能力。

卫星测控对抗根据对抗方式的不同,可分为基于物理层、链路层以及信息层 3 个层面。

1)物理层指的是对敌测控系统进行的硬杀伤,典型例子就是美国在冷战期间实施的“星球大战”计划。物理层又可分为 3 种对抗方式:①利用地面高能微波武器或激光武器打击敌方卫星;②利用天基武器(携带高能微波武器或激光武器的航天器)打击敌方卫星;③利用远程精确打击力量摧毁敌方的测控中心、测控站或测量船。由于硬杀伤不属于电子对抗的范畴,因此不在本文研究范围内。

2)链路层指的是利用干扰设备向敌卫星或地面测控站发送同频的大功率信号,对敌方星地测控链路进行压制干扰,增大对方的误码率甚至完全堵塞对方的测控链路。

3)信息层指的是通过截获敌方卫星大量的星地测控信号,辅以大规模的数据统计与帧格式分析,获得目标卫星的测控格式。在此基础上,按照帧格式重新生产遥控指令等数据信息,进而对目标进行入侵、盗用、反制等操作。因此,帧格式分析的精细程度直接决定了干扰样式和干扰效能。

对卫星测控对抗来说,根据干扰设备的不同,可分为两种主要的对抗模式:①基于地面干扰设备对敌方卫星测控信息进行干扰,或称为“地基测控对抗”;②基于“干扰卫星”对敌方卫星测控信息进行干扰,或称为“天基测控对抗”。

## 3 天基测控对抗

### 3.1 天基测控对抗优势

“天基测控对抗”相比“地基测控对抗”具有较大的优势。

1)首先对于中、低轨卫星,由于卫星处于运动之中,要想截获目标,地面干扰站必须具有能捕获卫星信号的天线跟踪系统,这在技术上是很难实现的;其次对于高轨通信卫星,虽然卫星轨道是静止的,但假如卫星在敌方国土上方,不在本国国土的测控覆盖范围以内,则利用地面干扰站对敌方卫星进行干扰变得不可行;再次,干扰的是上行遥控信息,而敌方的遥控指令只在卫星通过它自己测控站的测控弧段内才发送,而且时间很短,如果想侦听、破解及分析对方的上行遥控信号,地面干扰站的位置选取是个问题,因此依靠地面截获敌方上行遥控信号是很难的。而这恰好是天基测控对抗系统的优势所在,干扰卫星可以飞行到目标卫星邻近的空间,侦收截获目标卫星的测控信息,进行各频段、各模式统一载波测控信号的侦察。

2)随着军用卫星频率的提高,以及星间链路等技术的使用,依靠地面干扰站对卫星进行测控对抗受到很大限制。而基于卫星平台的天基测控对抗,可以靠近敌方卫星,依靠作用距离短的优势减少无线电空间损耗。此外,由于没有大气衰减,可以对高频率信号实现有效的传输,使用较小功率的干扰设备就能对敌方卫星实施有效干扰和攻击。

### 3.2 天基测控对抗特点

要想实现对卫星的正确跟踪、测量和控制,均需得到卫星的各种数据和状态信息,然后通过遥控指令实现对卫星的控制和调整。因此,如果能够侦察、截获和识别敌卫星与测控站间的遥测、遥控指令系统的各种工作参数和数据,就可对其实施干扰,甚至摧毁卫星。卫星测控信息主要包括遥测、遥控以及跟踪测距等信息,由于遥测是一直下传,且遥测的调制体制相对简单、遥测帧格式相对固定,因此对下行遥测的干扰相对来说要容易,但仅针对卫星下行遥测的干扰意义并不大,因为一方面敌方对受干扰的下行遥测帧可以进行丢包处理,保留有效的遥测帧信息,另一方面无法破坏敌方对卫星的控制权,达不到测控对抗的目的。而测距信息是依附于上行遥控信息,一般测距音都随上行遥控一起调制到载波上,因此只要干扰了卫星上行遥控,就相当于干扰了卫星的测距。因此,天基测控对抗方式应重点针对上行遥控信息的干扰而展开研究。

为了掌握遥控帧格式,对于侦收到的目标卫星测控信息需要进行大量的分析计算,遥控信息的加密措施虽然严密,但遥控体制不会轻易改变,还是遵循了某种数学方法

来实现的,存在一定的规律,随着云计算、分布式计算机技术和超级计算机技术的发展,解析卫星上行遥控信息变得越来越有可行性。不过星载计算机一般资源有限,所以可以考虑将侦收截获到的目标卫星测控信息通过星地数传链路下传地面系统,由地面系统进行分析解算。

在已经侦收、分析出遥控指令的前提下,为了能够保证干扰实施的效果,需要地面根据目标信号接收与处理、目标信号分析,制定干扰策略,产生针对目标卫星的干扰信号,由干扰卫星利用星间链路对目标卫星实施干扰。

### 3.3 干扰策略分析

天基测控对抗策略包括链路压制干扰、重放式干扰、伪指令干扰和协议干扰等可行的干扰策略。

#### 3.3.1 链路压制干扰

链路压制干扰主要针对上行遥控链路,对抗对象是目标卫星的测控接收机。链路压制干扰依靠干扰卫星和目标卫星的作用距离近的优势,在功率域对目标卫星星地合作测控信号形成有效压制,其效果主要体现在对目标卫星测控接收机的射频信号堵塞,使星地合作射频信号不能进入目标卫星。

该干扰方式需要通过对测控信号的侦察,获取干扰频点、调制方式、信号带宽等参数,然后将参数通过干扰卫星测控信道上传,由干扰卫星根据参数形成干扰信号,通过干扰卫星的发射端向目标卫星的测控接收通道发射相同频段的干扰信号,干扰效果可分为3个等级:1)当干扰功率较弱时,干扰将叠加到信号中,造成信号解调时对判决分量中真值的随机分量影响,使误码率严重劣化;2)当干扰功率进一步加大时,干扰将导致接收机频繁的失锁、再捕获,上行链路时断时续,误码率严重到无法用纠错编码来克服;3)当干扰为脉冲干扰时,干扰信号瞬时功率远大于有用信号,将导致接收机射频前端的AGC电路进入饱和区,导致后端的数字信号处理难以实现,目标卫星完全无法接收上行遥控指令和注入遥控信息,从而破坏对该目标卫星的指令控制。

这种干扰方式的优点是技术状态简单、容易实现、且效果直接。由于这种方式只作用于信号功率域,并未在时域、空域、频域、信号域、协议层等多个维度实现全方位的压制,所以效果难以持久。

衡量链路对抗能力的指标为干信比,即干扰信号使目标卫星测控接收机输入功率电平变化的能力。

#### 3.3.2 重放式干扰

重放式干扰是指通过长期对目标卫星测控的侦察截获,获取大量的测控信号,存储于地面系统。当实施重放式干扰时,直接将已经获取的测控信号重放,通过地面系统上传干扰卫星,再由干扰卫星再对目标卫星实施干扰。

这种干扰方式在原理上较为简单,只需要将截获的目标星的上行遥控信号存储并透明转发,无需解析信号帧格式。随着DRFM(digital radio frequency memory)技术的发展,重放式干扰在工程上变得易于实现。DRFM技术

即数字射频存储技术,其能够对射频信号进行高速采样,并以数字形式进行存储,实现对信号捕获、保存和转发,目前数字射频存储器已成为电子对抗系统中的关键组成部分。

重放式干扰的缺点是无法破坏敌方地面测控站对目标卫星的控制、也无法夺取目标卫星的控制权,因此压制效果不够明显。此外,这种方式也未能在多个维度形成全面压制。

#### 3.3.3 伪指令干扰

伪指令干扰的干扰对象是目标卫星的星载遥控终端。伪指令干扰利用信号检测获得的信息,转录或篡改有效测控信号,通过欺骗的手段实现对目标卫星的干扰。伪指令干扰的效果主要体现在目标卫星遥控终端的功能紊乱,使目标卫星用户不能按其意愿控制和使用卫星。相比于链路压制干扰和重放式干扰,这种干扰方式的效果取决于侦测系统软硬件的能力,但可获得更好的效果。此外,这种方式也未能在多个维度形成全面压制。

为获得伪指令干扰的效果,干扰信号必须与目标信号在物理参数上一致或接近。衡量伪指令干扰能力的指标为伪指令锁定概率,即干扰信号进入目标卫星的星载遥控终端的能力。

#### 3.3.4 协议干扰

协议干扰的干扰对象是目标卫星的指令格式和指令内容。通过对目标卫星的侦测,辅以大规模的数据统计与分析,可以获得目标卫星的测控数据协议,数据协议的精细程度直接决定了干扰效能。在完全掌握数据协议的前提下,可按照数据协议重新生产遥控指令等数据信息,进而可对目标卫星进行入侵、盗用、反制等操作,如频繁发送南北位保、在轨姿态调整等指令信息,以达到降低其使用寿命和使用效果的目的。相比于伪指令干扰,协议干扰更加精细、效果更加突出。协议干扰的重点是获得和积累先验知识,依赖于侦测系统的能力,以及分析和解算侦测信号的能力。

为获得协议干扰的效果,在伪指令干扰的基础上,干扰信号必须进一步在数据结构上与目标信号一致或近似。衡量协议干扰能力的指标为信号执行概率,即干扰信号使目标卫星星载遥控终端译码的能力。

#### 3.3.5 小结

4种干扰策略中,协议干扰效果最好,但技术难度最大;伪指令干扰效果较好,同样技术难度较大;链路压制干扰技术难度最简单、容易实现,干扰效果居中;重放式干扰技术难度较易,干扰效果最差。在实施测控对抗时,应根据干扰目标特点灵活选取、综合运用多种干扰策略,才能达到最佳效果。

### 3.4 对抗干信比

不测控对抗中,衡量对抗能力的指标为干信比,即干扰信号使目标卫星测控接收机输入功率电平变化的能力。干信比的定义为,进入到接收机中频带宽的干扰信号与通

信信号的功率之比。干信比参数确定了干扰卫星进行链路对抗的压制能力,这是典型的在功率域中进行测控对抗干扰效果评估的方法。干扰位置示意图 1 所示。

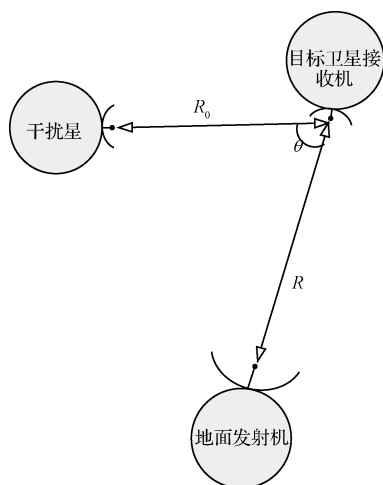


图 1 干扰位置示意

测控信号的传输遵循以下雷达方程,该公式也是测控链路设计的基础。目标卫星接收机输入信号功率  $P_r$  为:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2 L_s} \quad (1)$$

式中:  $P_t$  为地面测控站发射机输出功率;  $G_t$  为地面测控站发射天线增益;  $G_r$  为目标卫星接收天线相对于地面测控站方向的接收增益;  $\lambda$  为测控信号波长;  $R$  为星地测控作用距离;  $L_s$  为星地传输链路的总损耗,如天线指向损耗、天线极化损耗和大气损耗等(不包含空间损耗)。

而目标卫星接收机接收到的干扰卫星的干扰信号功率  $P_{r_0}$  为:

$$P_{r_0} = \frac{P_{t_0} G_{t_0} G_r(\theta) \lambda_0^2 B}{(4\pi)^2 R_0^2 L_{s_0}} \quad (2)$$

式中:  $P_{t_0}$  为干扰卫星发射机输出功率;  $G_{t_0}$  为干扰卫星发射天线的增益;  $G_r(\theta)$  为目标卫星接收天线相对于干扰卫星方向的接收增益;  $\lambda_0$  为干扰信号波长;  $R_0$  为干扰星和目标卫星的距离;  $L_{s_0}$  为星间传输链路的总损耗,如天线指向损耗、天线极化损耗和大气损耗等(不包含空间损耗)。  $B$  表示干扰有效带宽。

则干信比 JSR 可以表示为:

$$JSR = \frac{P_{t_0} G_{t_0} G_r(\theta) \lambda_0^2 R^2 L_s B}{P_t G_t G_r \lambda^2 R_0^2 L_{s_0}} \quad (3)$$

干扰卫星与目标星之间的最小对抗干信比可定义为: JSR 应至少优于目标星星地有效合作测控信号 2 dB。当干扰策略选择链路压制干扰时, JSR 还应在上述基础上再提高 20 dB,甚至更高,以突破目标星测控接收机的接收动态范围,才能取到最佳效果。

### 3.5 星间距离部署

基于 3.4 节定义的最小对抗干信比,根据星间链路预算<sup>[13]</sup>可以得到目标星和干扰星之间的星间距离与干扰星发射端 EIRP 的对应关系,最终可以得出干扰星可行的部署情况。

案例:以目标星为 UCB 体制的某地球同步轨道通信卫星为例,星地距离为典型值 37 690 km,上行测控信号的频率为典型值 6 GHz,测控接收天线为全向天线。干扰星向目标星发射同频段的干扰信号,干扰发射天线为具备高增益特性的定向抛物面天线。

信号空间损耗可表示为:

$$Lf = 10 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 32.44 + 20 \lg R (\text{km}) + 20 \lg f_T \quad (4)$$

式中:  $Lf$  为空间损耗(单位为 dB),  $R$  为信号传输距离(单位为 km),  $f_T$  为传输信号频率(单位为 MHz)。

经计算,当测控上行频率和干扰信号均为 6 GHz 时,有效测控信号在 37 690 km 距离上的空间损耗为 200 dB。而干扰信号 300~1 000 km 距离上的空间损耗依次为:

表 1 星间距离与空间损耗的关系

星间距离 $R_0$ / km	300	400	500	600	800	1 000
空间损耗 $Lf$ / dB	157	160	162	163.6	166	168

根据国军标《中国卫星测控网用户指南》(GJB/Z 111-98),我国测控网地面站 C 频段上行测控能力为 77~88 dBW,本案例中选取目标星的地面测控站的上行测控能力为最大的 88 dBW。6 GHz 工作频段时,考虑电离层中自由电子和离子的吸收,以及对流层中氧分子、水蒸气分子和云、雾、雨、雪等的吸收和散射,地面站上行信号的大气损耗为经验值 2 dB;天线指向损耗为经验值 0.5 dB;天线极化损耗为经验值 0.5 dB。

干扰星天线指向损耗为经验值 0.5 dB,极化损耗为经验值 0.5 dB。

目标星接收天线为全向天线,则可以假设接收天线相对于地面或目标星的接收增益等同,选取接收天线至接收机输入端的损耗(含接收天线增益在内)为恶劣值 -15 dB。

基于以上典型链路指标,对干扰星发射端的 EIRP 进行预算,其结果如表 2 所示。

当目标星在进行星地测控时,地面测控站使目标星测控接收机工作在 -100 dBm,则干扰星实施同频功率干扰后,测控接收机的工作点至少应高于 -98 dBm,才能满足最小对抗干信比的要求。而当星间距离为 300 km 时,干扰信号的空间损耗为 157 dB,则干扰星发射端 EIRP 必须不低于 45 dBW。

星载C频段行波管放大器(TWTA)的输出功率一般为50~800 W(最大29 dBW),而常见的星载抛物面天线在定向工作方式下,其增益可以达到30 dBi以上甚至更高,即使考虑到TWTA至发射天线端的损耗一般为0~10 dB之内,因此干扰星发射端在工程实践中完全可以实现45 dBW以上的EIRP。

表2 链路预算

干扰设备	地面测控站	干扰星
发射端 EIRP/dBW	88	45
大气损耗/dB	2	/
天线指向损耗/dB	0.5	0.5
极化损耗/dB	0.5	0.5
空间损耗/dB	200(37 690 km)	157(300 km)
目标星天线口径	-85(即	-83(即
处接收功率/dBm	-115 dBW)	-113 dBW)
目标星接收天线到接收机输入端损耗/dB	15	15
目标星接收机输入端功率/dBm	-100	-98

在各项链路指标为恶劣条件下,当干扰星和目标星的星间距离为300 km时,干扰星在工程实现上具备优于目标星星地有效合作测控信号2 dB的对抗干扰信比能力。

## 4 天基测控对抗系统初探

### 4.1 天基测控对抗系统功能和组成

天基测控对抗系统的主体是干扰星和地面数据处理系统(简称地面系统),主要划分为3大功能:目标信号接收与处理、目标信号分析与干扰策略制定、干扰实施。3个主体部分相对独立,但都会对最终的对抗效果产生影响,具体功能描述如下:

1)目标信号接收与处理功能:具有统一载波测控体制的侦察功能,适应各频段、各模式统一载波测控信号的侦察,实现目标信号检测、信号参数估计、信号解调、信号解码等处理功能。

2)目标信号分析功能:通过分析、计算与比对,获取目标信号数据结构关键内容,如有效信息长度、信息帧结构、重要字段内容解析等。

3)干扰实施功能:根据目标信号接收与处理、目标信号分析,制定干扰策略,产生针对目标的干扰信号,并对特定目标实施干扰。以上3个组成部分中,目标信号接收与处理由干扰星星地数传链路实现,目标信号分析由地面数据处理系统完成,干扰实施由干扰星星间测控链路完成。

### 4.2 天基测控对抗任务流程

天基测控对抗工程任务的工作流程大致如下:

1)侦收目标卫星上行测控信号

干扰星对地侦测地面测控站向目标卫星发送的有效上行测控信号。截获目标卫星测控信息,在干扰卫星上

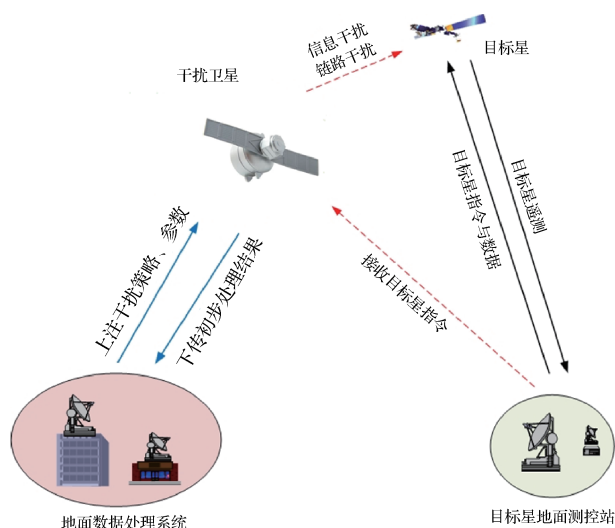


图2 测控对抗系统任务组成

完成高速采样及快速傅里叶变换(FFT),FFT运算后的信号在频率域进行检测,然后将高速采样和初步处理的结果通过数传分系统下传地面系统。

#### 2)地面系统检测识别

地面系统接收干扰卫星采集和初步处理的上传数据,完成对目标信号的检测、识别、解调、帧格式分析、协议分析等操作;

#### 3)实施遥控干扰

根据分析的结果,地面系统制定针对性的干扰任务,生成干扰策略和干扰参数;干扰策略与干扰参数通过地面系统上传干扰卫星,由干扰卫星对干扰数据进行解析,然后对目标卫星实施干扰。

## 5 结论

本文借鉴了卫星测控抗干扰的理论和技術,提出了天基测控对抗的概念,介绍了天基测控对抗的优势和特点,并就技术实现难易程度、干扰效果等角度对多种干扰策略进行了评估。经评估,链路压制性干扰在理论和技術上均比较成熟,基于当前技术水平最适合进行工程应用。给出了干扰卫星的最小对抗干扰信比的数值,并通过链路预算对星间距离部署进行了可行性论证分析。最后阐述了天基测控对抗系统的总体框架,可以为未来天基测控对抗系统的工程化实现提供有力参考。基于以上总体框架,还有诸如目标信号分析处理技术、目标星研制等众多关键技术有待攻关研究,这也是下一步将要开展的工作。

### 参考文献

- [1] MAGNUSON S. Air Force to Boost Budget to Prepare for Conflicts in Space [J]. National Defense, 2015, 99(6): 35-36.

(下转第71页)