



卫星数据

— 高效传输技术 —

EFFICIENT TRANSMISSION TECHNOLOGY
OF SATELLITE DATA

丁丹 杨柳 宋鑫 著



科学出版社

卫星数据高效传输技术

丁丹 杨柳 宋鑫 著



科学出版社

北京

简 介

随着在轨卫星数量激增以及卫星载荷技术的发展,卫星数据量大幅增长,此外,越来越多的突发局部战争、应急抢险救灾等应用场合对卫星数据时效性要求更加苛刻,因此,现代卫星应用对数据传输效率的要求越来越高,使得卫星数据传输成为卫星测控通信领域热点、难点技术之一。本书在梳理卫星数据传输发展现状、卫星数据高效传输机制与应用模式、卫星数据传输信道等关键问题的基础上,从自适应传输策略、无速率信道编码两个角度着手,分别深入研究基于自适应的卫星数据高效传输技术、基于无速率码的卫星数据传输技术。

本书可作为信息与通信工程、电子科学与技术等专业高年级本科生及相关专业研究生的教学用书或参考书,也可供无线通信、航天测控等领域的研究人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星数据高效传输技术 / 丁丹, 杨柳, 宋鑫著. —
北京: 科学出版社, 2020.3
ISBN 978-7-03-063316-3

I. ①卫… II. ①丁… ②杨… ③宋… III. ①卫星通信—数据传输—研究 IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 252507 号

责任编辑: 徐杨峰 / 责任校对: 谭宏宇
责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

南京展望文化发展有限公司排版

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2020 年 3 月第一次印刷 印张: 13

字数: 210 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言 | Foreword

随着在轨卫星数量日益增多和有效载荷信息分辨力的不断提升,卫星数据呈现出海量趋势,加之突发自然灾害、应急军事行动等对卫星信息响应的时效性要求不断提高,对卫星数据传输效率的要求越来越高。提升数据传输速率的传统思路是提高链路功率,但卫星平台承载能力有限,地面数据传输设备也在朝着机动化、小型化方向发展,致使数据传输平台规模受限,从而导致链路功率不能无限制提高。因此,探索能够在系统平台、链路功率受限条件下提高链路功率效率的新体制、新技术,是卫星测控通信领域亟须突破的重要问题之一。

根据现行的卫星数据传输工程技术方案,卫星数据传输速率是根据最恶劣信道条件(最低仰角,即最远传输距离)进行链路预算而设定,因此整个过境窗口内数据传输速率恒定。虽然在高仰角(传输距离近)条件下,链路损耗降低,相应的链路余量增大,但这些余量在以往的系统设计中并未得到充分利用,致使宝贵的链路功率资源浪费比较严重。因此,亟须一本专门研究卫星数据高效传输技术的著作,为解决上述问题提供理论指导和技术指引。

本书针对现行卫星数据传输工程技术方案中的这个突出问题,从自适应传输策略和无速率信道编码两个角度着手,论述提高卫星数据传输效率的新方法。基于自适应的卫星数据高效传输,是将移动通信中常用的自适应调制编码(adaptive modulation and coding, AMC)技术运用于卫星数据传输,随着卫星仰角的增加,自适应地切换调制阶数和编码速率的档位,从而显著提升卫星过境窗口下传的数据量。在此基础上,进一步研究基于无速率码的无级变速传输技术,使数据速率的改变连续、无缝地跟踪信道条件的变化,避免 AMC 的台阶式速率变化,最大限度地提高信道利用率。此外,该

技术还可避免 AMC 带来的星地之间频繁的握手交互,是一项具有很大应用潜力的技术。

全书共三篇,分为 10 章。第一篇梳理卫星数据传输关键问题,包括第 1~3 章:第 1 章分析卫星数据传输能力、技术、终端的发展现状;第 2 章设计具有新型传输机制和应用模式的卫星数据传输系统;第 3 章分析卫星数据传输信道,为后续内容奠定必要基础。第二篇研究基于自适应的卫星数据传输技术,包括第 4~6 章:第 4 章分析卫星数据变速率传输策略;第 5 章研究自适应变速率传输技术;第 6 章研究基于空间复用的卫星数据高效传输技术。第三篇围绕基于无速率码的卫星数据高效传输技术展开论述,包括第 7~10 章:第 7 章论述采用无速率码进行卫星数据传输的技术背景,分析了基于无速率码的卫星数据传输相对于传统恒定速率传输和自适应速率传输的优势;第 8 章研究适用于卫星数据传输场景的无速率码编码算法;第 9 章对基于无速率码的卫星数据传输进行系统设计;第 10 章进行了基于无速率码的卫星数据自适应传输系统的仿真与分析。

本书的写作得益于作者所在团队成员的鼎力相助,研究生刘步花撰写了第 3 章,程乃平研究员审阅全书并提出了宝贵建议。本书得到了装备预研、863 计划等多项课题资助。近年来,作者在国内重要学术期刊上发表论文 20 余篇,提交国家、国防发明专利 10 余项,本书是在上述研究成果基础上完成的。此外,本书在写作过程中参考了有关书籍和文献(见参考文献列表),在此也向这些作者一并致谢。

本书脉络清晰、深入浅出,且具有一定的创新性,可作为信息与通信工程、电子科学与技术等专业高年级本科生及相关专业研究生的教学用书或参考书,也可供无线通信、航天测控等领域的研究人员、工程技术人员参考。

由于作者水平所限,加上时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

丁 丹

2019 年 10 月

目录 | Contents

前言

第一篇 卫星数据传输关键问题

第 1 章 卫星数据传输发展现状	2
1.1 卫星数据传输能力发展现状	2
1.2 卫星数据传输技术发展现状	5
1.3 卫星数据传输终端发展现状	7
1.4 本章小结	11
第 2 章 新型卫星数据高效传输系统	12
2.1 直接面向用户的卫星数据高效传输机制	12
2.2 直接面向用户的卫星数据高效应用模式	14
2.3 本章小结	17
第 3 章 卫星数据传输信道	18
3.1 卫星数据传输损耗分析	18
3.2 卫星数据传输系统模型	23
3.3 卫星数据传输链路模型	24
3.4 本章小结	27

第二篇 基于自适应的卫星数据高效传输技术

第 4 章 卫星数据变速率传输技术	30
4.1 卫星数据变速率传输实现方法	30
4.2 卫星数据变速率传输机制设计	34
4.3 变速率传输与单速率传输比较	37
4.4 本章小结	38
第 5 章 卫星数据 AMC 传输技术	39
5.1 卫星数据传输 AMC 特性分析	39
5.2 卫星数据传输 AMC 总体设计	41
5.3 卫星数据传输的信道状态信息估计方法	42
5.4 本章小结	61
第 6 章 卫星数据空间复用传输技术	62
6.1 设计思路	62
6.2 空间复用在卫星数据传输中的适用性	64
6.3 基于空间复用的单用户卫星数据传输	65
6.4 基于空间复用的多用户卫星数据传输	68
6.5 AMC 与空间复用结合的高效传输技术	71
6.6 本章小结	84

第三篇 基于无速率码的卫星数据高效传输技术

第 7 章 基于无速率码的卫星数据传输初步分析	86
7.1 研究动因	86
7.2 无速率码特性分析	88

7.3	基于无速率码的卫星数据传输能力初步分析	92
7.4	基于无速率码的卫星数据传输关键问题分析	106
7.5	本章小结	108
第 8 章	适用于卫星数据传输的无速率码编码方法	109
8.1	误码平台对卫星数据传输影响及原因分析	109
8.2	基于节点分类选择的编码算法及性能分析	113
8.3	基于随机边扩展的编码算法及其性能分析	124
8.4	本章小结	143
第 9 章	基于无速率码的卫星数据传输系统	145
9.1	基于无速率码的卫星数据传输系统总体设计	145
9.2	基于无速率码的卫星数据传输组帧结构设计	147
9.3	基于无速率码的卫星数据传输工作机制设计	151
9.4	发送端编码速率自适应调整方法设计	169
9.5	本章小结	185
第 10 章	基于无速率码的卫星数据自适应传输系统的仿真与分析	186
10.1	系统模型和参数	186
10.2	仿真结果及分析	187
10.3	本章小结	194
参考文献	196

第一篇 卫星数据传输 关键问题

第 1 章 卫星数据传输发展现状

1.1 卫星数据传输能力发展现状

1.1.1 国外现状

随着现代卫星载荷技术的快速发展,卫星采集的数据量巨幅增长,卫星数据传输需达到更高的要求。以遥感卫星为例,目前遥感卫星数据传输技术发展主要集中在数据压缩技术、数据存储技术、拓宽传输频段、高阶编码调制方式以及高增益天线等方面。在遥感数据传输方面,美国、日本、澳大利亚和欧洲部分发达国家走在世界前列,NASA 和 ESA 构建了世界范围内的卫星跟踪地面接收站网络,数据传输速率超过 600 Mbps。美国地球之眼公司研制的 GeoEye-1 遥感卫星,其全色分辨率达 0.5 m,卫星获取的图像数据能够保存在星上 1 200 Gbit 固态存储器中,依靠全球接收站网络,可迅速将数据回传地面站,其数据传输速度最高可达 740 Mbps。美国数字地球公司研制的下一代 WorldView-1 遥感卫星,其全色分辨率可达 0.45 m,数据传输速率可达 800 Mbps。NASA 现在研制的下一代数据中继卫星项目 TKUP,其数据业务采用 16 阶调制技术和高效前向纠错编码技术,可支持 800 Mbps 的数据传输速率。法国的 Pleiades 遥感卫星,其图像分辨率高达 0.7 m,数据下传速率最高能达到 620 Mbps^[1]。目前大部分遥感卫星工作在 X 频段,国际上在 X 频段传输速率最大的是 WorldView 系列卫星,它采用极化复用传输技术,速率可达 800 Mbps。ITU 规定除了 X 频段可用于对地观测遥感卫星数据传输外,Ka 频段同样可用,这是因为 X 频段带宽仅有 375 MHz,而 Ka 频段带宽是 X 频段的 4 倍,带宽资源更丰富。NASA 在这方面走在世界前列,但是随着频段的提高,空间传输损耗随之提升,与之对应的数据传输系统设计难度增大,因此对 Ka 频段的数据传输技术性能的实验测试^[2-4]已经开展,部分卫星已采用 Ka 频段实现载荷数据传输。遥感影像数据的存储和压缩

无疑是提高传输效率的重要手段,遥感图像相比普通图像而言分辨率更高、纹理更多、内容更复杂、细节信息更多。以美国的军用对地观测卫星 KH-11 为例,图像分辨率高达 0.1 m,拍照频率达 8~12 次/min,但数传速率上限只有 600 Mbps,若不采用压缩技术难以实现影像数据的高效传输。近年来针对高分辨率的遥感影像压缩理论取得突破性进展^[5-8]。表 1-1 列出了国外部分遥感卫星的影像压缩和存储能力。

表 1-1 国外部分遥感卫星概况

国家、地区	卫星	分辨率 /m	压缩比	存储能力 /Gbit	数传速率 /Mbps
欧洲	EnviSat	28	8:4,8:3,8:2	60	100
加拿大	雷达 3 号卫星	3	8:4,8:2,8:2,8:1	150	105
意大利	第二代地中海观测卫星	<1	10:10,10:6~10:1	1530	560
印度	雷达 1 号成像卫星	1	6:3	300	300
日本	先进陆地观测 2 号卫星	1	—	130	400
欧洲	哨兵系列	5	8:1	1410	520
西班牙	帕斯	1	8:8,8:6,8:4,8:3,	320	300

1.1.2 国内现状

国内研究者在卫星数据传输方面也做了大量的研究工作,主要围绕高频段的遥感数据传输、遥感影像压缩技术以及相关数据传输分类等展开研究。文献[9]针对不同类型的遥感数据传输需求进行分类,采用虚拟信道动态调整策略进行数据的传输,满足不同类型数据传输的需求。文献[10]设计了遥感数据传输帧格式和码速率,有效降低 90%以上缓存需求;在终端小型化方面,文献[11]围绕遥感卫星数据传输中接收设备小型化展开研究,设计搭建硬件平台,实验验证设定协议和算法的功能性,系统最高可达到 450 Mbps 数据速率。航天恒星科技有限公司最新发布了 ANOVO2.0,产品采用自适应编码调制技术实现便携式终端的卫星通信,前向链路实现 300 Mbps,反向链路实现了 6~8 Mbps,支持 28 个调制编码级,解调门限调整范围达到 18 dB。针对传统遥感卫星数据传输过程中链路资源没有得到充分利用的问题,2010 年,中国空间技术研究院张佳鹏、黄普明等率先提出将自适应编码调制技术应用于遥感卫星数据传输,其主要是借鉴第二代卫星数字广播电视标准(DVB-S2)。根据遥感卫星数据传输特点,他们对 DVB-S2 的方案做了部分调整,所设计的自适应编码调制传输方案显著提升了系统

数据传输容量。为满足国内 ZY-3、GF 系列卫星的数据传输需求,中国科学院组织多家单位协同合作,开展了频率复用、高效调制编码数据接收等关键技术的研究及试验,完成了频率复用、高效调制编码遥感卫星数据接收系统的设计、研制加工、系统集成及工程建设等工作,成功接收了 ZY-3 卫星数据。该系统主要性能接近国际先进水平,在国内首创了频率复用的高码速极轨卫星地面接收系统。在高码率调制解调器方面,国内研制生产的全数字通用型高码速调制解调器(QPSK 达到 10 Mbps~640 Mbps,8PSK 达到 960 Mbps)支持 BPSK、UQPSK、QPSK、S/O-QPSK、8PSK 等多种调制/解调方式,以及 VITERBI、R-S 和 TCM 编译码功能,解调损耗小于 1.0 dB,具有多种数据输出能力。在此基础上,国内设计的数据接收系统成功完成遥感卫星(ZY-3 号卫星,数据速率 450 Mbps \times 2)的数据接收任务^[12]。中国电子科技集团公司研制了遥感综合应用终端原理样机,并在高分机动接收机处理系统技术试验中进行了系统互联互通验证。2013 年,重庆大学飞行器测控重点实验室的朱丽亚等^[13]发表了文章,提出遥感卫星的自适应传输策略,但不同的是他们采用的模型是基于 RCS(卫星回传信道)的卫星系统模型,通过中继网关实现信噪比(SNR)的测量和反馈,如图 1-1 所示。无论是遥感数据传输的新技术手段,还是围绕终端小型化的设计,以及自适应策略在遥感数据传输中的应用,都对卫星数据传输技术的体制设计、软件无线电平台的搭建及工程的实现方面有非常重要的借鉴意义。

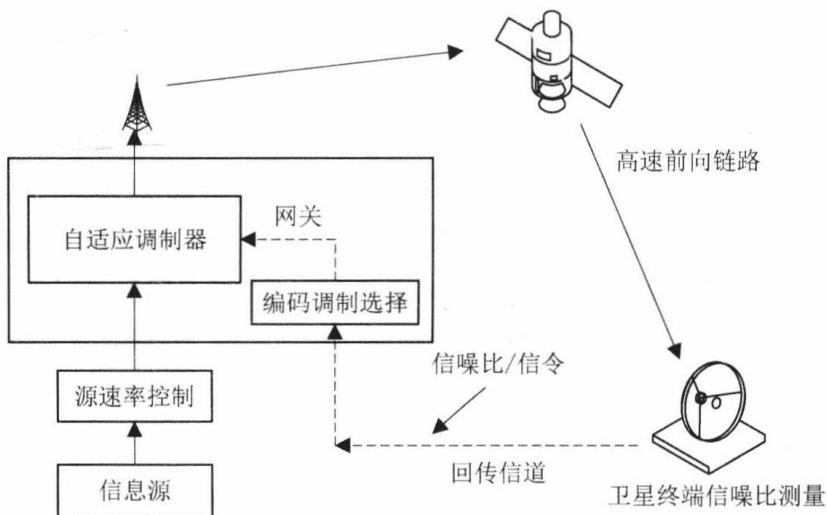


图 1-1 基于 RCS 的卫星数据传输 AMC 应用模型

尽管目前遥感卫星的数传技术不断发展,数传速率已经达到了几百 Mbps 甚至 Gbps 级,但都是在大型地面站采用大口径接收天线的前提下完成的,且链路功率资源的利用率仍然偏低。对基于小卫星平台、面向小型用户终端的卫星数据传输技术尚缺乏系统的研究。如何在功率、频谱信道资源有限的情况下尽可能提高传输速率是本书的研究意义所在。

1.2 卫星数据传输技术发展现状

1.2.1 差错控制技术

卫星数据在信道传输的过程中,不可避免地会受到噪声、干扰的影响,一些信息比特可能会出现严重的错误以致无法恢复。数据传输系统中最常用、最简单的处理差错的办法就是重传技术,即接收端向发送端发送反馈信息,要求重新传输出错的数据,这种方式又被称为自动重传请求(automatic repeat request, ARQ)技术^[14]。当然,接收端在要求重传之前还必须能够判断哪些数据是错误的,这就需要借助差错检测技术,其中最常用的检测技术是循环冗余校验(cyclic redundancy check, CRC)技术。CRC 技术通过特定的算法产生若干位校验码并添加至信息比特之后,接收端采用同样的算法进行检验,若结果一致,则表示信息比特完全正确;若结果不同,则表示信息比特出错,需要重传。

ARQ 技术和 CRC 技术确保接收端能够成功获取所有数据,但是,这种方式只能对数据进行检错重传,而不能对出错比特进行纠正。若数据包中仅有个别信息比特存在错误,发送端也需要再次重传整个数据包,会造成信道资源的浪费。因此,还需采用前向纠错(forward error correction, FEC)编码技术,即信道编码技术,实现纠正错误信息比特的目的。常用的 FEC 编码有卷积码、Turbo 码、LDPC 码等。另外,将两种编码级联可以组成纠错能力更强的级联码,例如将 RS 码和卷积码组成的级联码^[15]、LDPC 码和 BCH 码组成的级联码^[16]等。

事实上,ARQ 技术与 FEC 技术结合之后可以获得更好的传输性能,即先利用纠错编码纠正数据中的错误,之后根据反馈信息 ACK(acknowledgement)或者 NACK(non-acknowledgement)判断是否需要重传,这种方式又被称为混合式自动重送请求(hybrid automatic repeat request, HARQ)技术^[17],也是当

前卫星数据传输中普遍采用的一种差错控制技术。此外,凭借其高效的传输性能, HARQ 技术已经广泛应用于其他众多研究领域,例如多跳中继网络^[18]、高速铁路通信网^[19]、流星余迹通信^[20]等。

1.2.2 链路自适应技术

差错控制技术通过纠错、检错、重传解决数据出错的问题,确保传输的可靠性,但却没能解决有效性的问题。发送端往往采用固定的传输参数以满足最差信道条件下的数据传输要求,但是卫星信道动态变化范围较大,当信道状态变好时会有较多的链路余量无法使用,造成链路资源的浪费。因此,有学者提出采用链路自适应技术来提高数据传输的有效性,即根据当前信道信息,自适应地调整系统的传输参数以使当前的数据传输效率最大化。链路自适应技术主要有自适应功率控制技术和 AMC 技术。

自适应功率控制技术指的是发送端根据当前的信道状态信息主动调整发射功率,以提高系统的功率效率,使资源分配更加合理。文献[21]将功率控制技术应用于海事卫星通信系统中,达到了抑制干扰、补偿雨衰的效果,提升了系统容量和传输性能。文献[22]针对卫星通信中频谱资源利用率较低的问题,提出了一种支持时延约束的功率控制算法,并给出了该算法能够得到的最大信道容量及不同场景下的最佳调整策略,优化了功率控制过程。文献[23]以分布式卫星系统为背景,提出了一种上下行功率联合控制方法,该方法解决了链路动态变化及预测误差累积的问题,具有较高的准确性和较好的时效性。功率控制的前提是需要确知信道状态信息,但是卫星信道具有多变性和较长的时延,使得发送端获得的信道信息是不准确的。针对这个问题,文献[24]对功率控制技术的抗干扰性进行了研究,提出了一种低复杂度、强鲁棒性的功率控制算法,该算法不仅能够保证用户的通信质量,而且能够提高卫星的能量转化效率。

AMC 技术是对编码码率、调制方式进行调整,来提高系统的频谱效率及链路余量利用率。文献[25]将多元 LDPC 码与 AMC 技术结合,并设计了增量冗余型速率兼容方案,与二元 AMC 技术相比,该方案以较低的复杂度在衰落信道下获得了更高的编码增益。文献[26]通过推导含参误差函数的闭环表达式,得到了影响 AMC 技术性能的信道参数,分析了这些参数对切换门限值的影响。文献[27]针对卫星通信背景下信噪比估计不准的问题,提出了一种适用于 AMC 技术的信噪比预测算法,有效降低了传输时延对切换

方案带来的影响。文献[28]分别将 AMC 技术应用于导航卫星的星间通信、星地链路资源分配、遥感卫星数据传输中,实现了较好的自适应匹配信道切换效果,提高了链路余量利用率^[28-30]。

1.3 卫星数据传输终端发展现状

1.3.1 蓝军跟踪系统便携终端

蓝军跟踪系统(blue force tracking, BFT)是美军用来掌握参战部队位置与行踪、实现敌我识别的一种信息系统,也是美军 21 世纪部队旅和旅以下战斗指挥系统(FBCB2)的核心功能之一,主要用于向旅和旅以下作战人员、主战武器平台提供近实时指挥控制和态势感知数据信息,是美陆军作战指挥系统数字化建设的一部分。FBCB2/BFT 的发展历程可以划分为第一代蓝军跟踪系统(FBCB2/BFT1)和第二代蓝军跟踪系统(FBCB2/BFT2)两个阶段。蓝军跟踪系统有多种型号,部分版本包括独立的便携终端,供徒步步兵、特种作战部队、侦察部队使用。

1. 终端形态

蓝军跟踪系统包含多种便携终端形态(图 1-2),内嵌 L 频段卫星通信收发信机、GPS 定位接收机、FBCB2 系统软件、双向指挥控制消息集、CADRG 格式地图等,可进行红蓝态势感知。

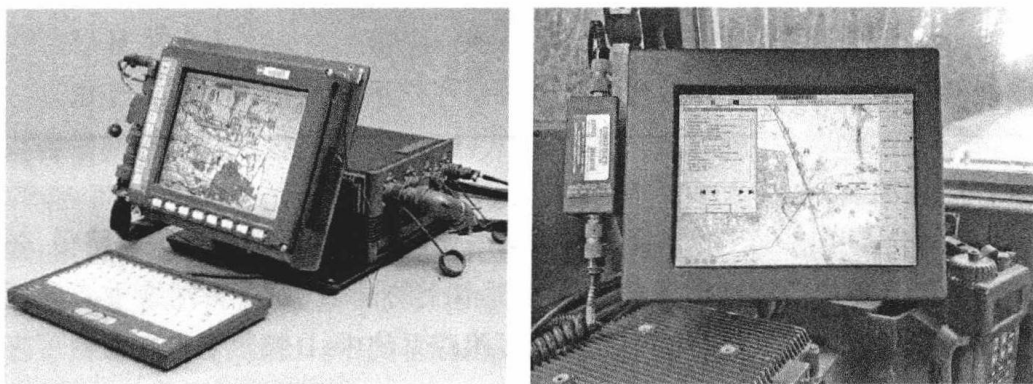


图 1-2 蓝军跟踪系统便携终端形态

2. 主要功能

用户利用终端内部的 L 频段卫星收发器向通信卫星发送信号,卫星将

其位置信号反馈到战区中央计算机中,中央计算机将战区内所有友军部队和车辆的位置发送给终端用户。在终端用户的屏幕上,蓝色图标代表友军,红色图标代表敌军。点击任何一个蓝色图标都会显示该单元的方向和速度。该系统每隔 5 min 或地面车辆每移动 800 m、飞机移动 2 300 m 时,就更新一次数据。

第二代蓝军跟踪系统(FBCB2/BFT2)是在第一代蓝军跟踪系统基础上,主要围绕信息传输路径简化、网络协议优化和软件系统升级,使得信息能够直接从 L 频段卫星传送至用户。第二代蓝军跟踪系统使态势信息传送、数据下载、作战单位定位信息更新时间缩短至秒级,并装配了更安全的数据加密设备和先进的测绘套件等,下载态势感知数据比第一代快 60 倍,上传数据率则提高了 100 倍,如表 1-2 所示。

表 1-2 第一代和第二代蓝军跟踪系统技战术参数对比表

技术升级项目	第一代蓝军跟踪系统	第二代蓝军跟踪系统
友军位置更新速度	≥5 min	5~10 s
下载信息速率	2.6 kbps	≥122 kbps
上传信息速率	0.3 kbps	≥3 kbps
下行技术体制	TDMA-QPSK	CDMA-GMSK-LDPC
上行技术体制	TDMA-QPSK	TDMA-QPSK-PCCC
信息容量	600 msg/s	6 000 msg/s
分发/接收方式	半双工通信	全双工通信
IP 网络技术	无	有
FIPS 140-2 数据链安全技术	无	有
支持发送数据文件和文本信息	无	有
军事环境测试	无	有
电磁干扰测试	无	有
电磁兼容认证	无	有

3. 技术特点

(1) 便捷的数据传输路径。按照第一代蓝军跟踪系统信息传输路径,来自前沿部署单位的数据需先传送到美国本土的网络中心,由网络中心处理并转发至战区指挥人员。而第二代蓝军跟踪系统中,L 频段卫星转发器可直接将信息数据传送至战区指挥人员。另外,第二代采用全双工通信方式,效率高于第一代的半双工单向通信方式。

(2) 开放的 IP 网络。蓝军跟踪系统成熟之前只能通过增强型定位报告系统(enhanced position location reporting system, EPLRS)的视距电台,再结合

战术互联网络,才能保持战场态势感知能力。而第二代蓝军跟踪系统则将传统的专用网转换成开放的 IP 标准通信网。第一代蓝军跟踪系统在汇接点可以与第二代蓝军跟踪系统兼容,所传送的数据也完全相同。两者在未来几年都能保持兼容。

(3) 新型的软件。第二代蓝军跟踪系统通过采用新型软件,将卫星数据更新延迟时间缩短到 10 s 或者更短,提高了总部和部队间信息传输容量,新的用户界面具有触摸缩放、图标拖放等更直观的操作特性。

1.3.2 SeeMe 卫星系统手持终端

1. 终端形态

SeeMe 计划的目标是支持接近便签簿尺寸的、安装安卓操作系统的商用手持终端,使用户在终端上能够输入感兴趣目标的经纬度和时间,并附上 ID 标志;也能够接收、显示并处理所得图像。

2. 主要功能

SeeMe 计划旨在为单兵在遥远地带和超视距条件下提供立即响应式的天基战术情报支持能力。从基层作战部队提出成像请求到分发图像可在 90 min 内完成,支持“即指即拍”。每颗 SeeMe 卫星能同时支持 10 个并发地面用户,从地面用户通过手持设备向卫星发出成像请求到接收到图像数据用时不超过 90 min。在 300 km 轨道高度上,能够获取星下点分辨率优于国家图像解析度分级标准中的 5 级(NIIRS5)的可见光图像,对应的地面分辨率为 0.75~1.2 m。

3. 技术特点

由于 SeeMe 卫星系统用户手持终端天线增益仅为 0 dB,为解决星地链路传输问题,采用如图 1-3 所示的方法。首先,星上和手持终端都采用基于 FPGA 的灵活软件无线电架构,支持从 L 到 S 的宽频段和多种波束形状;其次,因用户需求上传和响应信息下传速率数据量较小,在无线电可视范围内采用 S 频段、25 kbps 数据率进行传输;而由于下行图像传输数量较大,在 50° 仰角以上区域内采用 L 频段、1.6 Mbps 数据率进行传输。

SeeMe 系统手持终端直接与卫星进行 25 kbps 指令和 1.6 Mbps 图像的传输(图 1-4)。SeeMe 系统支持星间交叉链路,采用 S 频段低速链路(25 kbps)将相互可见的卫星铰链在一起。SeeMe 系统对用户上传的需求采取先入先出(first input first output, FIFO)的规则进行处理。如果某颗卫星无法满足用