

## 天拓五号卫星天基物联网系统关键技术与在轨验证

李松亭, 陈利虎\*, 余孙全, 崔俊伟, 赵勇, 杨磊  
(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**天基物联网是地基物联网的有效补充和延拓,是建设万物互联、泛在感知的基础性技术手段。以天拓五号卫星中集成的天基物联网系统为例,瞄准覆盖陆海空的多域多场景应用需求,重点解决船舶自动识别系统信号、广播式自动相关监视系统信号的高可靠侦收以及数据搜集系统的多址接入问题,实现航海目标、航空目标的实时监管以及极海量窄带物联传感终端的全球布局,为我国天基物联网的论证、建设、发展以及规模应用提供借鉴方案。

**关键词:**天拓五号;天基物联网;船舶自动识别系统;广播式自动相关监视系统;数据搜集系统自然能

中图分类号:TN971 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)01-168-13



论  
文  
拓  
展

## Key techniques and on-orbit verification for SIoT system in TT-5 satellite

LI Songting, CHEN Lihu\*, YU Sunquan, CUI Junwei, ZHAO Yong, YANG Lei

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The SIoT (space-based Internet of Things) is an effective supplement and extension of the ground-based IoT, and it is a basic technical means to build the interconnection of all things and ubiquitous perception. Taking the SIoT integrated in TianTuo-5 as an example, it aims at the application requirements of multi-domain and multi-scenario covering land, sea and air. It focuses on solving the high-reliability detection of the signals of AIS (automatic identification system), ADS-B (automatic dependent surveillance-broadcast) system and the multiple access of DCS (data collection system). This achieves real-time supervision of navigation and aviation goals and the global layout of extremely massive narrowband IoT sensor terminals, and provide reference scheme for the demonstration, construction, development and scale application of our country's SIoT.

**Keywords:** TianTuo-5; space-based internet of things; automatic identification system; automatic dependent surveillance-broadcast; data collection system

天拓五号卫星是国防科技大学重大科技创新工程项目——“纳星集群飞行计划”的重要延续,集成船舶自动识别系统<sup>[1]</sup>(automatic identification system, AIS)、广播式自动相关监视(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)系统<sup>[2]</sup>、数据搜集系统(data collection system, DCS)三种天基物联网(space-based Internet of Things, SIoT)试验载荷,于2020年8月23日10时27分在酒泉卫星发射中心搭载长征二号丁运载火箭发射升

空,在轨开展船舶、飞机、窄带物联网多域多目标侦收关键技术验证。

SIoT可以克服极端地形地貌限制,真正实现全球海量目标各类传感信息的无差别接入,构建扁平化多源数据融合时空体系,面向海洋/火山/沙漠/极地环境监测、生物研究、物流运输、应急救援以及船舶/飞机监测等多场景应用领域,广泛服务于一带一路、交通强国、海洋科学勘探、维权护航、经济对外交流活动等国家战略意图。SIoT具

收稿日期:2022-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61804182)

第一作者:李松亭(1985—),男,河南安阳人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail: songtingl@sina.com

\*通信作者:陈利虎(1980—),男,江西萍乡人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail: clh2055@163.com

引用格式:李松亭,陈利虎,余松全,等.天拓五号卫星天基物联网系统关键技术与在轨验证[J].国防科技大学学报,2025,47(1):168-180.

Citation: LI S T, CHEN L H, YU S Q, et al. Key techniques and on-orbit verification for SIoT system in TT-5 satellite[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(1): 168-180.

体系系统架构如图 1 所示。

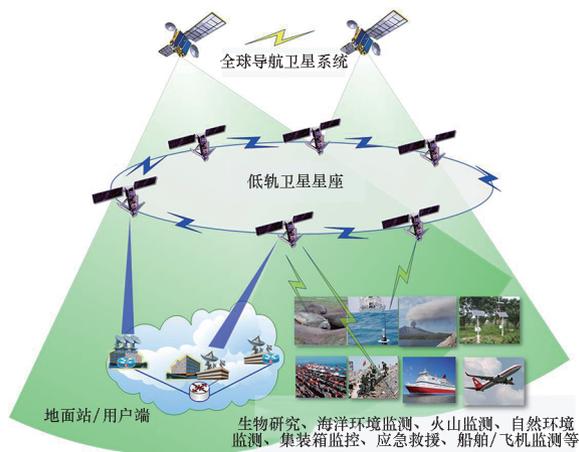


图 1 天基物联网系统架构

Fig. 1 Architecture of SLoT system

航海和航空运输是天基物联网的两个重要组成部分,天基航海航空监管可以解决陆基航海航空监管在远洋运输以及跨海域飞行中存在的巨大监管盲区,带来监管的实时化、广域化以及无差别化。典型的基于 AIS 的船舶监控系统是美国的轨道通信系统(Orbcomm)<sup>[3]</sup>,目前在轨可用卫星数量约 30 颗,采用倾斜椭圆轨道和极轨道混合的形式覆盖全球,通过全球建站确保 AIS 数据的准实时下传。我国的天拓系列卫星<sup>[4-6]</sup>、海洋系列卫星、海南一号卫星以及天行者卫星等也已成功进行了 AIS 信号的在轨侦收,但均是单星或者多星试验,目前还不具备全球组网实时监管的能力。典型的基于 ADS-B 的航空监管系统是美国的二代铱星系统(Iridium-Next)<sup>[7]</sup>,采用 6 个极轨道面共计 66 颗卫星覆盖全球实现航空目标的实时监管。由于具备星间链路功能,可以保证航空目标传感信息的 8 s 刷新周期。欧空局的 Proba-V 卫星、丹麦的 GOMX 系列卫星以及我国的天拓三号/五号卫星、天行者卫星、空事一号卫星等均已成功进行了 ADS-B 系统信号的在轨侦收,但同样是单星或者多星试验,目前也不具备全球组网实时监管的能力。

目前较为成熟的天基物联网系统<sup>[8-9]</sup>(窄带通信)主要包括美国的 Orbcomm、Iridium-Next、Argos 系统和我国的北斗三号系统、天通系统、风云二号卫星等。Argos 系统和风云二号卫星主要服务于气象和海洋领域,Iridium-Next 仅提供针对语音通信的物联服务,三者应用范围较窄,无法满足未来天基物联网的多样场景需求。而天通系统属于高轨卫星通信系统,具有明显的背坡效应,且覆盖范围仅针对亚太地区。Orbcomm 和北斗

三号系统是严格意义上具备海量接入、广域覆盖功能的天基物联网系统,前者利用低轨卫星星座,采用频分多址(frequency division multiple access, FDMA)和时分多址(time division multiple access, TDMA)的混合体制实现海量目标的多址接入,卫星端通过电磁频谱扫描预先判断可用的通信信道并广播至地面终端,终端按照广播的信道随机选择时隙与卫星进行通信,在保证较高接入效率的情况下,系统支持的终端目标数通常不超过 1 000 万。北斗三号(高中轨)系统采用空分多址(space division multiple access, SDMA)、码分多址(code division multiple access, CDMA)和 FDMA 的混合多址接入体制,同样不区分目标的动静态属性。为了保证较高的接入量以及高可靠的接入率,每个波束每个频点的信号处理端必须具备多重信号的并行处理能力,对硬件资源的要求较高。因此北斗三号卫星采用透明转发的形式,在地面进行信号处理。在发送频次为 2 min、等效开机率为 5% 的情况下,系统可容纳的目标数量在千万左右。由于上述两个系统的可接入用户数量有限,目前多数情况仅针对高价值目标用户提供服务,对于未来天基物联网的极海量目标需求(亿级)并不适用。

我国正在建设的行云工程、36 天罡星群、天行者星座是严格意义上面向窄带通信需求的天基物联网系统,具体兼容的终端数量以及物联性能仍需后期持续性的在轨验证。另外,美国的 SpaceX、英国的 OneWeb 和我国的虹云工程、星网、银河航天、吉利星群等瞄准高通量通信的互联网星座也属于天基物联网的一部分,但是高通量与可以满足极海量目标需求的窄带通信属于完全异构的场景,无法解决天基物联网的根本问题。

本文重点关注天基物联网在航海监管、航空监管以及极海量目标多址接入的窄带通信三个方面的应用,详细阐述具体工作原理、相应载荷设计、地面试验以及在轨验证的全流程实现过程,为后续我国天基物联网的高质量建设及优化迭代提供参考。

## 1 船舶自动识别系统

AIS 是一种海上无线电通信系统,采用自组织时分多址通信协议,通过自动广播和接收船舶动态(位置、航速、航向等)和静态(船名、国籍、呼号、吃水等)信息对船舶进行领航、定位及船只避碰等。与岸/海/空基 AIS 相比,天基 AIS 具有覆盖范围广、组网后可实现全球在航船舶实时监管

的天然优势,可以为海上交通管制/事故处理、海上搜救、航线开辟、渔政管理等提供革新化解决方案<sup>[10]</sup>。与光学相机、合成孔径雷达等载荷进行多源数据融合处理后,可精准定位并识别具体船只,广泛应用于精准缉私、打击恐怖主义等方面。

2018 年以来,仅我国就有十几颗具备 AIS 接收功能的低轨卫星成功入轨并开展相应的研究工作。国防科技大学是我国较早开展星载 AIS 技术研究的科研院所,并分别于 2012 年 5 月、2015 年 9 月以及 2020 年 8 月依次发射天拓一号<sup>[4]</sup>、天拓三号<sup>[5]</sup>以及天拓五号<sup>[6]</sup>卫星进行技术迭代和在轨验证。

星载 AIS 系统除了必须确保足够的星地链路裕量,还必须重点考虑三个问题:多普勒频偏的估计和补偿问题、多信号冲突问题以及星上电磁兼容问题。

### 1.1 多普勒频偏估计和补偿

低轨卫星在空间的运行速度接近 7.5 km/s,在星地链路中会产生较大的多普勒频移,频移大小由信号传输方向与卫星运动方向之间的夹角、信号频率以及轨道高度共同决定,对于轨道高度小于 1 000 km 的低轨卫星而言,在目标仰角为 0°/180°时,多普勒频移值最大,约为 4 kHz。

天拓五号 AIS 载荷在设计实现时充分对算法先进性、设计复杂性、工程可实现性以及资源利用率进行了折中考虑并进行了多轮设计迭代,提出了如图 2 所示的 AIS 信号基带解调算法。

信号(4 倍过采样),由于 AIS 信号是短报文信号,没有足够的训练序列用于多普勒频偏估计,因此本算法引入功率检测模块,当检测到 AIS 信号时,首先对该信号进行存储,以保证有充足的时间可以进行多普勒频偏估计和补偿。功率检测采用滑窗模式实现,当计算得到的输入信号功率值超过设定的阈值时,比较器会输出置位存储标志位,开始对 AIS 信号进行存储直至输入信号功率值小于设定的阈值。星上复杂的电磁兼容 (electromagnetic compatibility, EMC) 问题通常会导致 AIS 接收机天线端的噪底无法准确确定,因此程序中加入了动态阈值调整的功能(可通过卫星遥控指令更改阈值)以适应不同的卫星平台。

对于高斯最小频移键控 (Gaussian filtered minimum shift keying, GMSK) 调制而言,传统的频偏估计算法为平方法<sup>[11]</sup>和多信道(不同的信道具备不同的频偏补偿)并行接收法。但是前者的估计结果会出现多个峰值,需要经过较复杂的逻辑电路估计出多普勒频偏的大小,同时该方法对噪声较为灵敏,估计效果较差;而后者需要消耗巨大的逻辑资源,对硬件平台的要求较高。天拓五号中的 AIS 载荷充分考虑到 AIS 信号 GMSK 调制中信号带宽与码元周期的乘积较大 ( $BT = 0.4$ ),对相邻符号相位差影响不大的情况(最差情况仍不低于 40°)<sup>[12]</sup>,因此将 GMSK 调制等效为最小频移键控(minimum shift keying, MSK)调制进行处理<sup>[13]</sup>,表达式为:

$$S_{AIS}(t) = A \cos\left(\omega_d t + \frac{a_k \pi}{2T_s} t\right) \quad (1)$$

式中, $S_{AIS}$  为 MSK 调制信号, $A$  为信号幅度, $\omega_d$  为多普勒频移, $a_k = \pm 1$  为码元信息, $T_s$  为码元宽度。为了忽略高斯滤波的影响,可以看出,相邻码元信号之间的相位差为  $\pm 90^\circ$ ,如果对存储的 AIS 信号通过位定时进行输出,平方后依次与  $(-1)^n$  相乘( $n$  为整数序列),则可得到一个频率为 2 倍多普勒频偏的连续单音输出信号,通过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 模块便可估计出多普勒频偏的大小。上述多普勒频偏估计算法均是在基带位定时后进行的,因此 FFT 模块的时钟频率为 9.6 kHz (AIS 码元速率)。在不存在频率模糊的情况下,能够估计的最大多普勒频偏为  $-2.4 \sim 2.4$  kHz,当多普勒频偏超过此范围时,会存在一定的频率模糊,此时估计出的多普勒频偏大小为  $\omega_d \pm 4.8$  kHz。由于 AIS 采用不归零码反转 (non-return-to-zero inverted, NRZI) 编码方式,当采用 1 bit 差分分解调方法时,产生的频率模糊成分不会对 AIS 最终

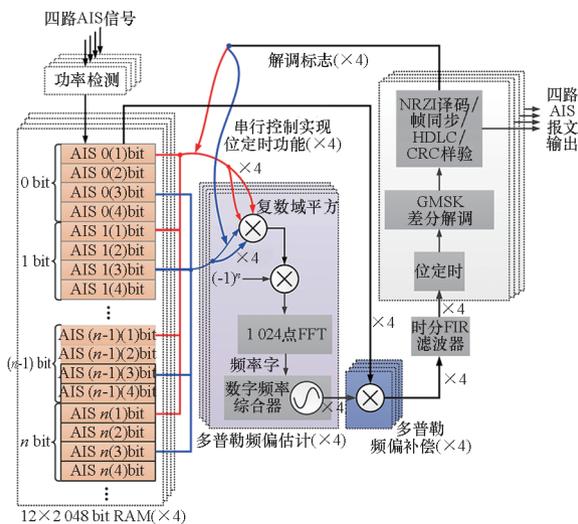


图 2 AIS 信号基带解调算法

Fig. 2 Baseband demodulation algorithm of AIS signal

经过下变频、放大以及模数采样后的中频 AIS 信号 (AIS 接收机射频前端部分采用高性能超外差架构) 经过再次数字下变频后变频至基带

的正确译码产生任何影响<sup>[13]</sup>。因此采用图 2 所示的多普勒频偏估计算法能够补偿的多普勒频偏范围为  $-4.8 \sim 4.8$  kHz,在消耗极少硬件资源的前提下可以满足实际的应用需求。

从前述的分析可以看出,在进行多普勒频偏估计之前,首先需要进行位定时操作,在天拓五号 AIS 载荷的工程化实现过程中,采用了较为简单的串行解调位定时方法,即对存储的过采样信号依次以间隔  $T_s$  的抽样方法进行串行解调,可以极大节省传统位定时算法<sup>[13]</sup>消耗的硬件资源,且不会引起信噪比的明显降低。包含多普勒频偏估计、补偿的 AIS 信号基带解调流程如图 3 所示。

天拓五号中的 AIS 载荷同时支持 4 频点(中心频率分别位于 156.775 MHz、156.825 MHz、161.975 MHz、162.025 MHz) AIS 信号的并行接收,如图 3 所示。为了降低解调算法对乘法器的需求,解调算法中的有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)滤波器采用时分复用的形式进行实现,如图 4 所示,并串转换、多级寄存、流水化数字运算(乘法和累加)、串并转换等操作实现 4 个并行解调通道的滤波器复用,极大节省乘法器和累加器资源。FIR 滤波器采用 22 阶巴特沃思低通滤波器实现,采用时分复用技术,可节省 33 个乘法器和 63 个累加器。

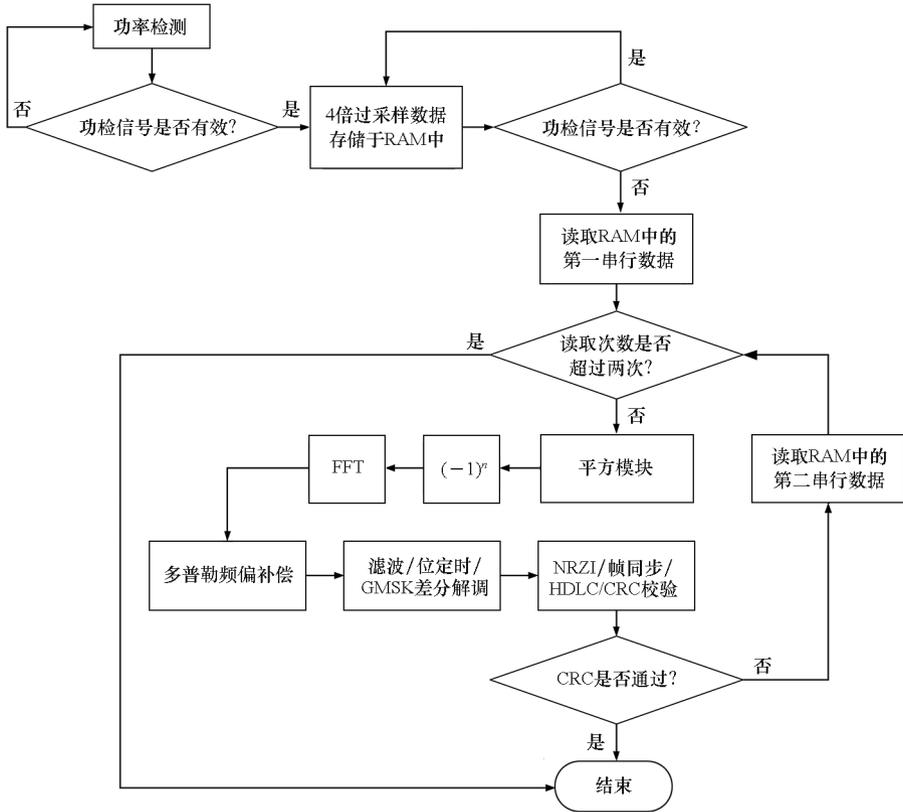


图 3 AIS 信号基带解调流程

Fig. 3 Baseband demodulation flowchart of AIS signal

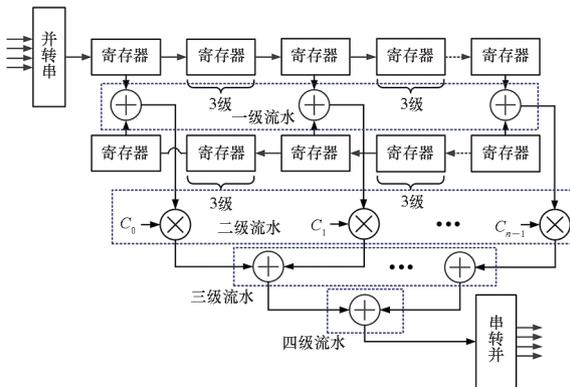


图 4 时分复用 FIR 滤波器

Fig. 4 Time-division reuse FIR filter

### 1.2 多信号冲突

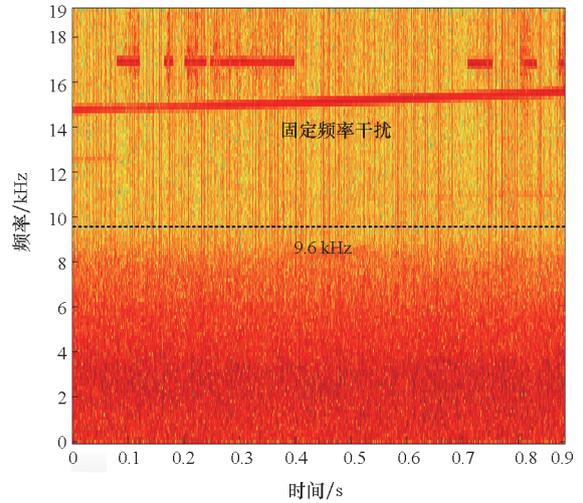
船舶 AIS 系统采用自组织时分多址形式形成通信网络实现船船之间的无冲突收发通信,由于地球曲率原因,每个通信网络覆盖的海面直径约 30 ~ 50 n mile,而卫星波束的覆盖范围通常超过 1 500 n mile,在船舶密集的近海区域,卫星波束覆盖的通信网络往往多达几十个,会造成严重的时隙冲突问题,降低船只检测概率。

降低时隙冲突、增大船只检测概率可以采用 5 种途径:①采用相控阵技术减小单个波束覆盖范围<sup>[14]</sup>。但是由于 AIS 信号位于甚高频(very high frequency, VHF)频段,天线单元之间的隔离

度要求使相控阵天线的面积过大,不适合微小卫星平台。②采用窄波束天线减小波束的覆盖范围<sup>[15]</sup>。考虑到全球覆盖问题,必须在窄波束天线法兰安装处增加伺服控制机构,通过与卫星运行方向的垂直摆动提升天线波束宽度,但是增加了卫星的设计复杂度、成本和质量。③星上加入 AIS 信号多冲突解调算法<sup>[16]</sup>。多冲突解调算法需要消耗大量的硬件处理资源,通常很难在微小卫星平台上实现,即使资源允许,由于 AIS 信号冲突都在 10 重以上,星上的多冲突解调算法较难发挥应有效益。④星上加入 AIS 原始信号采样功能,在地面进行多重信号解调,但是需要星上提供具有较大存储空间的存储器用以存放采样的原始数据,且由于在近海海域通常还存在较强的恒定带内频率干扰,地面多重解调算法也较难发挥良好的性能。图 5 给出了天拓五号在某海域采集的原始 AIS 数据的时频图,近海区域严重的 AIS 信号时隙冲突以及带内的定频干扰使多重解调算法较难实现 AIS 信号的互分离。⑤采用陆、海、空、星基混合接收方式进行多源数据融合,陆、海、空基由于覆盖范围有限,基本不存在 AIS 信号的多重时隙冲突问题,可作为星基 AIS 在近海海域的数据补充,从而实现了对全球海域的精准监控。

### 1.3 星上电磁兼容

AIS 载荷的接收频段位于 VHF 波段,因此极易由 EMC 问题导致性能受损甚至功能失常。通常采用以下手段解决:①合理布局星上天线满足隔离度要求。②合理设置滤波器减小收发链路的带外噪声和发射杂波功率。③采用屏蔽与隔离措施以减小低频线缆或者其他载荷的辐射能力并增



(b) 海域 2  
(b) Sea area 2

图 5 基带采样信号时频图

加 AIS 载荷单机的干扰抑制能力。④开展充分的 EMC 实验对上述 3 种措施进行优化迭代。

## 2 广播式自动相关监视系统

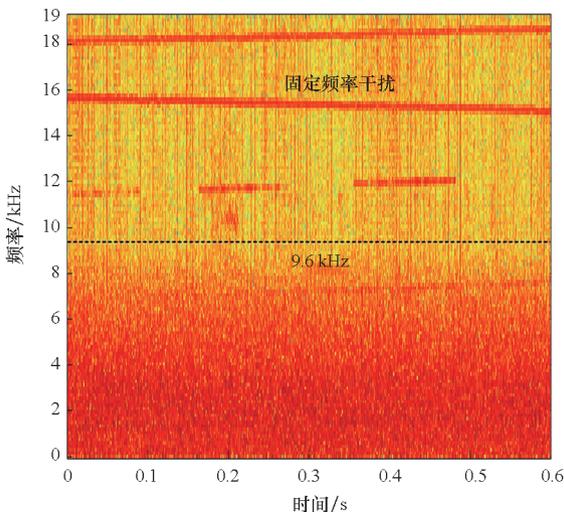
ADS-B 是航空监管的一种主要技术,自动、周期、连续性地广播飞机的速度、位置、航班号和方向,是当前空管监视手段的重要发展方向。一是能够极大拓展空管监视范围,将监视覆盖范围扩展到海洋、极地、沙漠等区域,实现 ADS-B 信号的全球实时可见;二是 ADS-B 监视数据更新速率快、定位精度高,有助于精准掌握态势,促进提高空域容量、运行效率和飞行安全;三是全域的监视数据储备能够提高多维度数据分析手段,有利于解决空难事故的搜救和事故分析问题。

### 2.1 单波束检测概率分析

ADS-B 系统采用随机接入式通信协议,符合 Aloha 协议特征,因此可采用 Aloha 信道模型分析 ADS-B 信号的冲突。设卫星波束覆盖范围内发射机数量为  $N_{TX}$ ,每个发射机的消息发送速率为  $v_{TX}$ ,则每帧信号时间  $t$  内传输消息的期望值为  $G = N_{TX}v_{TX}t$ 。采用泊松分布对航空器的帧发送进行建模,则  $G$  可以看作该泊松过程的速率,即输入负载,因此  $l$  帧时间内产生  $k$  个数据包的概率为:

$$P(k, l) = \frac{(lG)^k}{k!} e^{-lG} \quad (2)$$

只有在两帧时间内没有其他 ADS-B 信息插入时,信号才不会发生混叠,即视为成功传输,此时  $l=2, k=0$ 。将  $l=2, k=0$  代入式(2),可得每



(a) 海域 1  
(a) Sea area 1

条报文成功传输的概率为:

$$P_{\text{suc}} = \frac{(2G)^0}{0!} e^{-2G} = e^{-2G} \quad (3)$$

结合地面应用系统需求,引入  $T_{\text{UI}}$  时间内系统检测概率  $P_{\text{UI}}$  的概念,若要在  $T_{\text{UI}}$  时间内系统以不低于  $P_{\text{UI}}$  的检测概率获取航空器的状态信息,则式(4)成立。

$$1 - P_{\text{UI}} = (1 - P_{\text{d}})^{T_{\text{UI}}/f_{\text{TX}}} \quad (4)$$

式中,  $P_{\text{d}}$  为每条报文的检测概率,  $f_{\text{TX}} = 1 \text{ Hz}$  为每条报文的发送频率。每条报文的检测概率可以表示为每条报文成功传输的概率  $P_{\text{suc}}$  与解包概率  $P_{\text{p}}$  的乘积,即  $P_{\text{d}} = P_{\text{suc}} P_{\text{p}}$ , 其中:

$$P_{\text{p}} = (1 - P_{\text{b}})^{N_{\text{b}}} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{b}}$  为一定信噪比下 ADS-B 信号的误比特率;  $N_{\text{b}}$  为 ADS-B 报文的长度,典型值为 112。

图 6 给出了在信噪比为 8 dB、不同  $T_{\text{UI}}$  的情况下系统检测概率与单波束下航空器数量之间的关系曲线。可以看出,在 8 s 时间间隔内(确保航空器水平间隔超过 5 n mile 的安全距离<sup>[17]</sup>),如果要保证系统的检测概率大于 95%,单波束下的航空器数量不能超过 361。

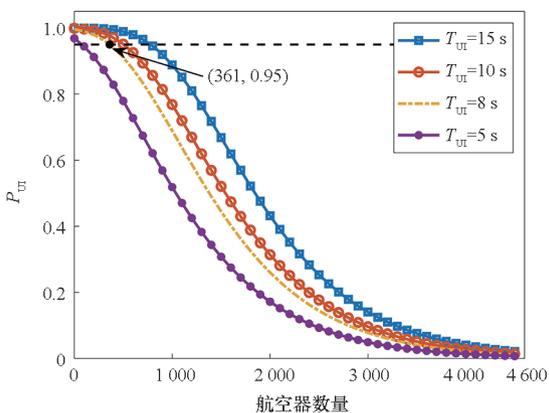


图 6 系统检测概率与单波束下航空器数量的关系  
Fig. 6 Relationship between the probability of system detection and the number of aircraft in a single beam

## 2.2 多波束 ADS-B 系统

典型的天基物联网星座通常采用 6 个极轨道面,每个轨道面均匀分布 11 颗卫星,相邻轨道面的卫星之间相位差为  $5.45^\circ$ ,为了达到实时覆盖全球的目的并考虑一定的设计冗余度,卫星对地波束覆盖范围需要超过 4 000 km。

考虑到航空器飞行过程中的动态变化、ADS-B 报文发射的随机性以及信号冲突导致的接收失败等因素,较难提供全球瞬时航流密度图。因此采用具有滤波效应的长时累加方式绘制一定时间段内的航流密度图<sup>[18]</sup>,累加数据时长为 3 个月,

确保航空器飞行过程中的动态变化因素降至最低以及接近 100% 的系统检测概率。图 7 为基于天拓三号侦收的 ADS-B 数据按照上述原理绘制的航流密度图,其中航流密度归一化因子为 4 500,绘制方式为将每个坐标位置作为星下点,波束覆盖范围为 4 000 km,统计 3 个月的航班累加数量,并通过不同颜色进行标示。

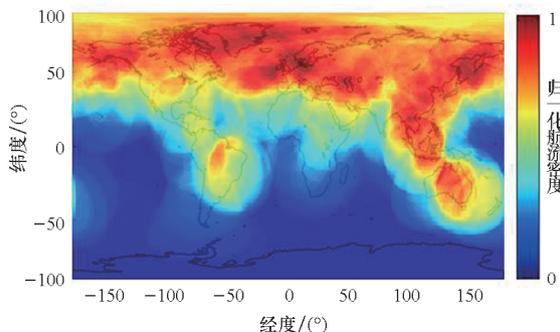


图 7 全球航流密度图

Fig. 7 Global airflow density map

考虑到航行中的航空器数量约为总数量的 1/3,在航流密度较高的区域(北美、欧洲、东亚上空),卫星单波束可同时覆盖的航空器数量超过 1 500,根据图 6 可知,8 s 的刷新间隔,系统检测概率会下降至 45% 左右,无法满足空管监视需求。

考虑到未来几十年航空器数量的迅速增长,以单波束覆盖的最大在航航空器数量为 4 500 进行设计,至少需要将单个波束划分为 12 个子波束才能满足空管的需求。考虑到单波束下航流密度分布的不均匀性,将划分的子波束个数确定为 19,如图 8 所示,此时每个子波束下覆盖的平均航空器数量为 237,确保在全球范围内均满足空管监视需求。

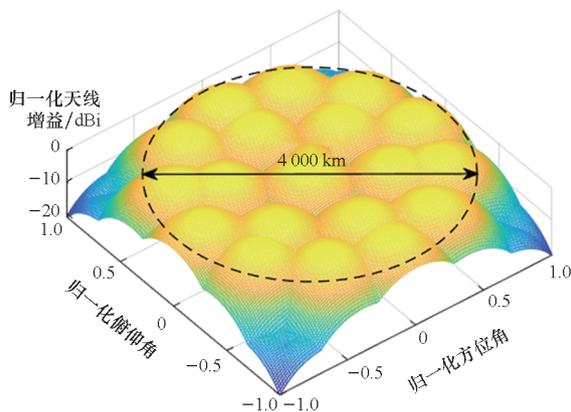


图 8 相控阵天线对地波束

Fig. 8 Earth-pointed beam of phased array antenna

## 2.3 相控阵 ADS-B 载荷

ADS-B 报文采用脉冲位置调制方式,其中

“1”编码为“10”，“0”编码为“01”，信号的调制方式为幅度调制，星地通信时多普勒频偏位于  $\pm 50$  kHz 频率范围内。天拓五号 ADS-B 载荷的基带解调流程如图 9 所示。

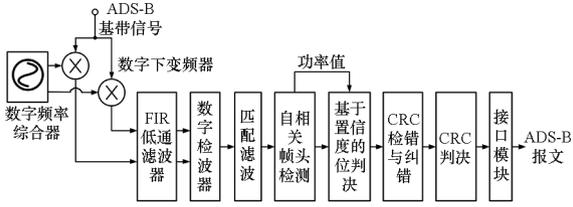


图 9 ADS-B 信号基带解调流程

Fig. 9 Baseband demodulation flowchart of ADS-B signal

经过 ADS-B 接收机射频前端下变频、放大以及模数转换后的 ADS-B 基带信号在经过复数域数字下变频以及 FIR 低通滤波后,通过拟合的方式(将正交两个支路的信号均取绝对值,采用较大幅值加上较小幅值的  $3/8$  实现检幅功能)检测输入基带信号的幅值,同时避免乘法器的使用以及多普勒频偏的影响。匹配滤波利用输入合作信号的确定性以及噪声的随机性,采用近距互相关操作提升接收信号的信噪比。自相关帧头检测利用 ADS-B 的固定帧头进行自相关检测,当帧同步时,自相关幅值均大于超前和滞后若干时刻的自相关幅值,据此可判断帧同步时刻,并输出相应的功率信息送入后端模块进行基于置信度的位判决。当 ADS-B 报文单比特的前半部分与后半部分的平均功率差值大于 0 时,位判决为 1,如果差值大于记录功率值的 0.6 倍,则置信度置为 1,否则置为 0;同理,当 ADS-B 报文单比特的后半部分与前半部分的平均功率差值大于 0 时,位判决为 0,如果差值大于记录功率值的 0.6 倍,则置信度置为 1,否则置为 0。循环冗余校验(cyclic redundancy check, CRC)检错与纠错模块根据 CRC 码特性建立错位查找表,根据低置信度信息生成错误图案,将报文经过 CRC 生成的 CRC 码与错误图案进行比对,如果比对成功,则将相应错误图案对应的低置信度报文比特进行反转,送入下级模块。需要注意的是,ADS-B 中采用的 CRC 码的汉明距为 6,因此最大只能检测 5 bit 的错误信息,如果低置信度个数超过 5,则该条报文需要丢弃;将经过纠错的报文送至 CRC 模块进行校验,校验通过后直接通过串口输出。

为了增加系统检测概率,通常采用基于数字波束合成的相控阵 ADS-B 载荷实现多波束侦收<sup>[19]</sup>,因此每个相控阵天线单元均需要接入一个射频接收通道,射频接收通道之间的幅度和相位

失配会严重恶化相控阵天线的波束赋形能力,进而影响多波束 ADS-B 系统的检测概率,因此需要在数字波束合成之前增加幅相失配校准模块。其校准基本原理如下:任意选取一个接收通道的输出(复数域)作为参考通道,其余通道作为除数通道,所得商即为剩余通道的幅相补偿参数。为了便于硬件实现,除法运算可以采用共轭的方式转换为乘法运算。幅相失配校准的输入测试向量采用无线或者有线单音注入的方式实现。

相控阵 ADS-B 载荷提供对地覆盖的 19 个波束,如图 8 所示。如果卫星的轨道高度为 1 000 km,则需要天线的半波束角超过  $55^\circ$ ,因此每个子波束的半张角为  $11^\circ$ 。

由于存在 19 个子波束,传统方法需要 19 个基带解调通路,消耗的硬件资源非常大,可采用图 10 所示的解调通道复用形式降低硬件资源消耗率。数字波束合成后的 19 个通道并行通过基带解调通道中的数字下变频至自相关帧头检测模块,并将完成帧同步后的通道解调数据存入相应的乒乓随机存储器(ping pang RAM, PPRAM)中,时分调度网络通过 5 倍时钟将 PPRAM 中存储的数据送入基带解调通路中(功能包括位判决、CRC 检错与纠错、CRC 判决),如果 PPRAM 中存储的帧同步数据超过 4 路,则采用时分的方式依次进行解调。图 10 所示低资源消耗率相控阵载荷虽然可以节省大量的硬件资源,但是时分调度网络之后的基带解调模块工作时钟频率较高,会对时序约束产生一定的影响,因此设计时需要根据具体的硬件资源情况折中选择时钟频率以及时分调度网络之后的并行通道数。最终各解调通路通过报文去重、组包后按照规定的接口格式进行报文输出。

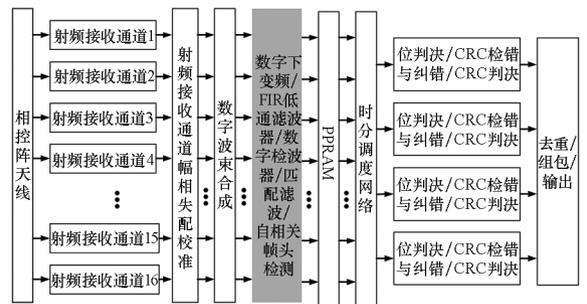


图 10 低资源消耗率 16 阵元相控阵 ADS-B 载荷电路结构  
Fig. 10 Low resource consumption rate 16 element phased array ADS-B load circuit structure

相控阵 ADS-B 载荷大小为  $100 \times 100 \times 15 \text{ cm}^3$ ,由上下三层板组成,上层板为由 16 个阵元组成的相控阵天线,中层板为 16 路并行射频接收通道,下层板为基带信号处理板。图 11 为图 8

双箭头线所覆盖的 5 个波束的对地张角仿真图,可以看出每个子波束的半张角约为  $15^\circ$ ,满足系统指标要求。

为了进一步提升系统检测概率,还可以根据地面绘制的全球航流密度图实时地调整天线的对地波束大小<sup>[20]</sup>,航流密度大的地方减小波束覆盖范围,航流密度小的地方增大波束覆盖范围。同时还可以采用信号分离算法提升检测概率<sup>[21]</sup>。

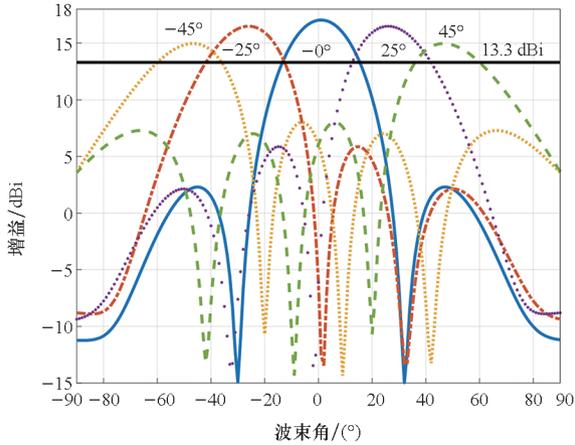


图 11 相控阵 ADS-B 载荷(16 阵元)仿真波束

Fig. 11 Phased array ADS-B payload (16 antenna unit) simulated beam

### 3 数据搜集系统

DCS 是一种典型的天基窄带通信物联网系统,是实现万物互联的重要技术手段,相较于基于地面基站的窄带物联网通信技术,例如 NB-IoT、Lora 等,天基手段不受地形条件的限制,组网后可以实现全球实时覆盖,为泛在感知型信息社会的建设提供可能。

DCS 的设计面向两种目标:静态目标和动态目标,分别服务于对静态传感信息和动态传感信息有需求的用户。静态传感信息主要用于海洋环境、森林资源、地质灾害、气象水文、农业畜牧业等常规监测。动态传感信息主要用于人员与装备、大型机械及工业设备、集装箱等高价目标定位搜寻以及跟踪控制。

静态目标具有传感周期长、极海量需求(亿级)等属性,采用 SDMA + FDMA + TDMA 的联合多址接入方式最大化接入容量<sup>[22]</sup>。动态目标具有传感周期短、主被动唤醒、目标价值高、抗干扰能力强、海量需求(百/千万级)等属性,可采用 SDMA + FDMA + CDMA 的联合多址接入协议在高可靠性(抗干扰能力强)的前提下获得海量终端目标的接入能力。

### 3.1 静态目标联合多址接入技术

构建低轨卫星星座(极轨星座),该星座共包含 6 个轨道面,每个轨道面 11 颗星,每颗卫星对地波束通过相控阵技术划分为 7 个子波束以实现 SDMA,子波束之间采用蜂窝网络进行频率复用,每个子波束下覆盖一个频率簇,因此只需要采用三个不同的频率簇即可实现全球范围的 FDMA。地面蜂窝网络如图 12 所示,如果有  $3n$  个频率可以被 DCS 所使用,则每个频率簇可以包含  $n$  个不同的频率。考虑到静态目标的传感信息对实时性要求并不严格,因此可以采用 TDMA 的形式进一步扩大接入容量。

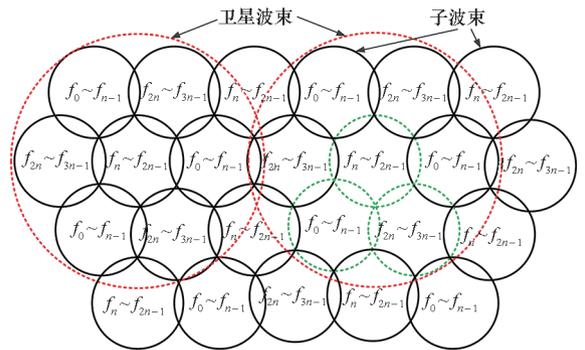


图 12 地面蜂窝网络

Fig. 12 Terrestrial cellular network

举例说明如下:

假设每个时帧中包含  $m$  个时隙,则图 12 中任意相邻的 3 个频率簇中可以容纳  $p = 3n \times m$  个接入终端,如果低轨卫星星座按照极轨星座的形式布局,则全球范围内可容纳的终端数量为  $N_T = 66 \times 7 \times p / 3 = 154 \times p$ 。如果每个信道的带宽为 25 kHz,占用的总带宽为 1 MHz,则静态目标传感可使用的频点个数为 40。考虑到静态目标的预警需求,需要额外留出 1 个频点用于域值触发报警功能,因此相邻的 3 个频率簇可容纳的频率个数为 39,假设每个时帧的长度为 0.5 h,通信报文的长度为 256 bit,则每个时隙的长度为 0.107 s,因此每个时帧中包含的时隙个数  $m = 16\ 822$ 。则可容纳的地面静态目标终端数量超过  $1 \times 10^8$  (考虑到高纬度地区尤其是极地的多重覆盖,实际可容纳的终端数量要小于该值),可以通过增加频点个数、延长时帧长度、减小时隙长度以及增加子波束个数等措施进一步提升容纳的终端数量。

考虑到应用场景以及用户需求的差异化,终端发送报文的码速率和时帧长度均是可调的,天拓五号卫星分别采用  $400 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} / 1 \text{ h}$ 、 $2.4 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1} / 0.5 \text{ h}$ 、 $4.8 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1} / 8 \text{ min}$  三种不

同的码速率和时帧长度组合为不同用户提供不同的业务需求,前者采用二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK),可以简易地实现多普勒频偏估计及后续的解调工作,而为了提升频谱利用效率,后两者采用 GMSK 调制,多普勒频偏补偿方式与 AIS 相同。同时需要专门预留部分频点用于触发报警功能,由于终端同时报警数量相对较少,因此可采用 Aloha 协议实现多址接入,为了保证触发报警的高度可靠性,需要卫星端在收到报警信息后的一定时间内向终端发送握手信号,否则终端会周期性持续发送。

### 3.2 动态目标联合多址接入技术

受限于波束的大小,静态目标采用的多址接入技术并不适用于动态目标,通常采用 SDMA + FDMA + CDMA 的联合多址接入协议来最大化动态目标的接入数量。终端的随机发送同样符合泊松分布模型,设卫星单个子波束覆盖范围内的终端数量为  $N_T$ ,开机概率为  $p_o$ ,每个发射机的消息发送速率为  $v_{TX}$ ,则每帧信号时间  $t$  内传输消息数的期望值为  $G = p_o N_T v_{TX} t$ 。

对于单个扩频伪码,如果星上载荷可以在 2 个报文帧长度内同时识别  $j$  个冲突信号,根据式(2)的泊松分布模型可知,每条报文被成功识别的概率(系统正确解调概率)为:

$$P_{\text{SUC}} = \sum_{i=0}^j \frac{(2G)^i}{i!} e^{-2G} \quad (6)$$

如果要保证每个报文均被成功解调,式(6)需要与正确解包率  $P_p$  相乘,正确解包率的计算可参考式(5)。

图 13 给出了在不同的冲突信号识别个数  $j$  下的系统正确解调概率与传输消息数的期望值  $G$  之间的关系曲线。可以看出,如果星上载荷每个波束均可提供  $j = 10$  个冲突信号识别能力,则在系统正确解调概率为 0.9 的情况下,  $G = 3.5$ 。假设终端发射报文的码速率为  $400 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ ,报文长度为 256,则  $t = 0.64 \text{ s}$ ,报文发送间隔为 1 包/min ( $v_{TX} = 0.0167 \text{ 包/s}$ ),开机概率  $p_o = 5\%$ 。则每个子波束下可覆盖的终端数量为  $N_T = 6549$ 。

假设每颗卫星提供的子波束个数为 7,FDMA 可提供 3 个不同的接入频率,则全球范围内可容纳的动态目标终端数量可接近  $1 \times 10^7$ 。可通过进一步降低报文发送码速率、报文发送间隔、报文长度以及提高星上冲突识别能力提升移动终端的接入数量。

星上采用的多冲突信号识别算法如图 14 所示,信号捕获模块完成对应数字信号的数字下变

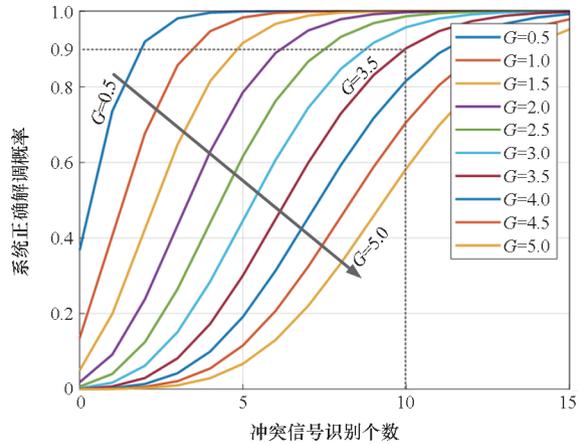


图 13 系统正确解调概率与识别的冲突重数之间的关系曲线

Fig. 13 Relationship curve between the correct demodulation probability of the system and the identified conflict multiplicity

频以及同步头捕获,捕获采用时频结合的分段时频累积方法,以获得终端用户的同步信息,并将用户同步信息(多普勒频偏和伪码时延信息)发送至信号跟踪解调通道。匹配滤波器通过累加求和的方式实现积分梳状低通滤波功能,累加时间越长,积分梳状滤波器的带宽越小,送入后续解调通道的信号信噪比越高,但是在多普勒频偏固定的情况下,捕获的并行通道数就会越多,消耗的硬件资源也会越大。设计过程中需要折中考虑。

为了简易地估计出上行信号的多普勒频偏值,终端发送的报文需要前置若干比特的全“0”或者全“1”值。DCS 基带信号经过不同频率的下变频后分别送入多个通道中(下变频频率间隔需要根据 FFT 模块的时钟以及计算点数决定),每个通道中的伪随机码以  $1/2$  伪码比特周期循环移动,当本地伪随机码与输入报文中的伪随机同步时(匹配滤波器完成匹配并累加输出),FFT 模块可以获得一个超过设定域值电压的峰值(单音信号的冲击频谱),峰值对应的频率即为多普勒频偏值,随后产生一个触发信号启动后续的跟踪解调功能,并提供多普勒频偏和信号延迟送至后续模块便于快速跟踪和同步解调。为了进一步提升多普勒频谱估计的可靠性,可以采用多 FFT 模块同时估计并累加求和的方式进行计算。

为了使捕获到的各路输入信号(冲突叠加)在多通道信号处理单元中得到及时处理,跟踪解调调度模块需要为各路输入信号分配对应的信号处理通道(跟踪解调通道)。有效的调度策略在充分调用有限的信号处理通道数目等方面起到至关重要的作用。

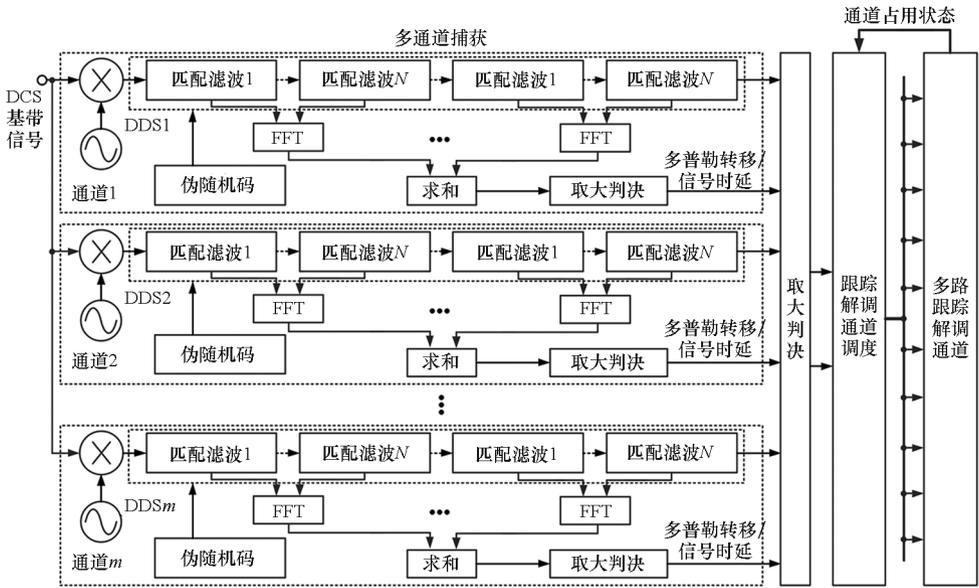


图 14 多冲突信号识别算法

Fig. 14 Multiple conflict signal recognition algorithm

本方案中跟踪解调调度模块采用堆栈方式,基本原理如下:

①判断是否捕获到同步头,若未捕获,则不分配有效信号处理单元通道;②若捕获,则根据各个跟踪解调通道实时反馈的状态和通道占用情况,取出堆栈排列最靠前的跟踪解调通道进行信号的后续处理;③若某一时段用户数量剧增,堆栈中没有空闲的跟踪解调通道,则不分配给该数据包有效的信号处理单元通道。

为了进一步降低高纬度地区卫星波束叠加的干扰性,每个卫星均会分配一个不同的扩频伪码,地面终端根据内置星历选取最优的通信卫星(相应地采用与其匹配的扩频伪码)与其进行通信。

### 4 入轨前地面试验

卫星发射入轨前,需要在地面经过严格的环境试验测试,主要包括:常温常压下测试、振动试验测试以及热真空试验测试,测试的性能指标包括载荷的功耗、灵敏度、动态范围以及抗多普勒频偏能力。另外,载荷装机后,还需要进行连接性试验以及整星 EMC 试验。

为了保证极轨卫星组网后对地面目标的无缝覆盖(天线对地覆盖范围大于 4 000 km),结合天拓五号卫星各载荷天线安装方位、设计方向图、增益以及卫星轨道高度,各载荷的性能指标必须满足表 1 所示要求。

表 1 载荷性能指标

Tab. 1 Performance of the payloads

载荷	灵敏度	动态范围
AIS	- 110 dBm	
ADS-B	- 95 dBm	
	- 124 dBm@ 400 bit · s <sup>-1</sup>	20 dB
DCS	- 118 dBm@ 2.4 kbit · s <sup>-1</sup>	
	- 115 dBm@ 4.8 kbit · s <sup>-1</sup>	

### 4.1 环境试验

常温常压下的测试主要通过有线测试的方式进行,载荷能够正常解调条件下的功耗即为测试功耗;正确解包率为 90% 时到达载荷输入口的信号功率即为测试载荷的灵敏度;依次改变发送频率以及衰减器的值,便可获得载荷的多普勒频偏的范围以及动态范围。

振动试验可有效模拟卫星发射时的振动环境,对载荷承受振动后的工作能力进行验证,暴露载荷组件的材料和工艺制作方面的潜在缺陷,确保振动后的载荷性能指标满足要求。

热真空试验的目的同样是暴露载荷组件的材料和工艺制作方面的潜在缺陷,确保低轨运行期间载荷性能指标满足要求。在进行热真空试验时,当压力减小到 1 ~ 10 Pa 时,保持约 5 min 时间,观察真空放电现象,检验低真空环境中样件承受电晕、飞弧、介质击穿的能力,并持续观察通信链路电平以及载荷工作状态。当压力减小至

$10^{-5}$  Pa 后,开展多次热真空循环并定期测试载荷性能指标检验其热真空性能。

力学和温度试验结束后的载荷测试性能指标如下:AIS 载荷灵敏度均超过  $-115$  dBm, ADS-B 载荷灵敏度均超过  $-98$  dBm, DCS 载荷灵敏度均超过  $-126$  dBm @  $400 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $-120$  dBm @  $2.4 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $-118$  dBm @  $4.8 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ,三类载荷的动态范围均超过  $25$  dB,满足设计需求。

## 4.2 连接性试验

连接性试验是载荷装机后检验安装于星体面的天线与安装于星体内部载荷的可靠性互联性。通过无线的方式建立地检设备与载荷之间的通信链路,分别对地检天线增益、载荷天线增益以及地检发射功率进行标定,并按照自由空间衰减估计收发天线之间的信号衰减,至此可以预估到达载荷输入端口的信号功率,将此时的遥测功率值与前期记录的遥测功率值对比,确保差值在  $\pm 5$  dB 以内,否则需要拆机检查。

## 4.3 电磁兼容试验

在 1.3 节的 EMC 设计基础之上在微波暗室开展整星 EMC 试验,对各组件依次进行开关机验证各载荷的电磁兼容能力,通过接入频谱仪的探针在载荷天线处对频谱进行扫描,定位干扰频率,随后在星体表面进行扫描以定位干扰频率位置,并重点对该区域进行二次包覆。

如果电磁兼容性能不能通过二次包覆得到有效解决,此时需要对星体进行拆卸,通过探针在星体内部扫描定位最终的干扰源位置,分析具体原因。通常可以通过对低频电源线缆的二次包覆加以解决,或者更换电源管理芯片。但是后者需要的迭代回溯流程过长,需要在设计之初对其干扰谐波进行充分考虑,避免对载荷接收频段的影响。

## 5 在轨试验

天拓五号卫星集成 AIS、ADS-B 以及 DCS 三个主载荷,卫星总质量小于  $80 \text{ kg}$ ,位于  $600 \text{ km}$  以内的极轨轨道,对地  $+Z$  面面积小于  $0.5 \text{ m}^2$ ,不太适合相控阵 ADS-B 载荷的搭载,因此天拓五号中的 ADS-B 载荷采用半全向天线,主要对图 9 所示的 ADS-B 高性能解调算法进行验证。

AIS 载荷采用双机热备的形式提升可靠性和对地覆盖范围,天线采用线极化细螺旋结构,主瓣增益为  $0 \text{ dBi}$ ,倾斜对地安装于星体的  $\pm Y$  面,与对地面成  $\pm 45^\circ$ 。ADS-B 载荷同样为双机热备,采用右旋圆极化螺旋天线,主瓣增益为  $7 \text{ dBi}$ ,分别

倾斜  $\pm 45^\circ$  安装于对地面。DCS 载荷天线采用右旋圆极化四臂螺旋结构,主瓣增益为  $0 \text{ dBi}$ ,垂直安装于对地面,如图 15 所示。

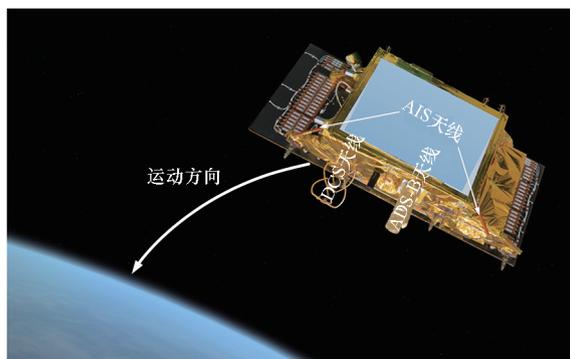


图 15 天拓五号在轨飞行示意图

Fig. 15 On-orbit flight schematic diagram of TT-5

图 16 和图 17 分别给出了 AIS 载荷双机和 ADS-B 载荷双机在发射当天(2020 年 8 月 23 日)对全球船舶和航班信息的侦收情况(通过侦收报文中包含的位置信息在地图上进行标注),两类载荷的天线对地幅宽均超过  $4\,000 \text{ km}$ ,与近期国内外的其他入轨载荷性能的对比如表 2 所示,均达到同期世界先进水平。

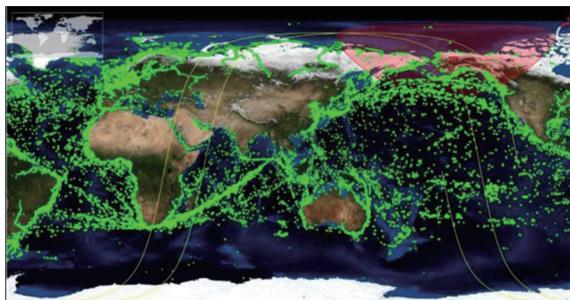


图 16 AIS 载荷双机发射当天数据侦收量

Fig. 16 Data detected on the launch day of two AIS payloads

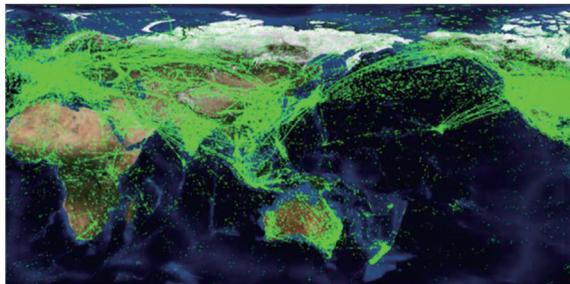


图 17 ADS-B 载荷双机发射当天数据侦收量

Fig. 17 Amount of data detected on the launch day of two ADS-B payloads

DCS 地面终端采用定制软件定义无线电模块实现,并且预留北斗定位授时接口、传感器输入端口以及电池供电接口及安装空间。该终端

可完成静态传感目标和动态传感目标的地面发射模拟,接入温湿度传感器以及北斗模块后,设定帧长度约 2 min,模拟静态传感目标,任选帧内的一个发送时隙在卫星过顶时对包含温湿度信息和位置信息的报文进行发送,卫星在后续过顶时将侦收的静态 DCS 数据下传,通过软件解析后可准确呈现相应传感信息和位置信息。

表 2 AIS/ADS-B 载荷性能对比

Tab. 2 Performance comparison of AIS/ADS-B payloads

载荷	载荷搭载平台	发射时间	报文接收能力	波束数量
AIS	天拓一号	2012-05-12	约 1 万条/d	1
	天拓三号	2015-09-20	约 5 万条/d	1
	海洋二号 B 星	2018-10-25	约 20 万条/d	1
	海洋一号 C 星	2019-09-07	约 36 万条/d	2
	海洋一号 D 星	2020-06-11	约 40 万条/d	2
ADS-B	天拓五号	2020-08-23	约 100 万条/d	2
	PROBA-V	2013-05-04	约 5 万条/d	1
	GOMX-3	2015-10-05	约 10 万条/d	1
	天拓三号	2015-09-20	约 40 万条/d	1
	天行者卫星	2020-06-17	约 80 万条/d	1
	二代铱星	2019-01-11	约 700 万条/d	7
	天拓五号	2020-08-23	约 340 万条/d	2

对动态传感目标的模拟采用类似的方式进行,区别在于动态传感目标数量为 10,分别模拟海运中的集装箱,并提供位置信息、温度信息、湿度信息以及箱门开关状态等传感信息,各集装箱发射的位置信息是相同的,温湿度信息及箱门开关状态各异,各传感参数预先写入终端中,并以 10 s 的周期在卫星过顶时进行发射,卫星在后续过顶时将侦收的动态 DCS 数据下传,通过软件解析后进行直观显示。试验结果显示,集装箱传感信息均可正确解析并显示。

## 6 结论

SIoT 是实现泛在感知的一个关键基础性技术手段,本文详细阐述了 SIoT 载荷中的三个关键组成部分: AIS 载荷(航海目标监视)、ADS-B 载荷(航空目标监视)以及 DCS 载荷(窄带传感)的关键技术及具体设计实现方法,并通过搭载天拓五号卫星进行了实际的试验验证,效果符合设计预期,可以为后续我国天基物联网系统的建设提供可靠的技术参考。

## 参考文献 (References)

- [1] International Telecommunications Union. Technical characteristics for a universal ship-borne automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band [S/OL]. [2022-07-01]. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-5-201402-1!!](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-5-201402-1!!) PDF-E. pdf.
- [2] RTCA. Minimum operational performance standards for 1 090 MHz extended squitter ADS-B and TIS-B [S/OL]. (2020-12-17) [2022-07-01]. <https://standards.globalspec.com/std/14355824/rta-do-260>.
- [3] BEST G. Satellite-based AIS system provides continuous tracking at sea [J]. Sea Technology, 2011, 52(3): 15-17.
- [4] 陈利虎, 陈小前, 赵勇, 等. 天拓一号星载自动识别系统设计及在轨应用 [J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(1): 65-69.  
CHEN L H, CHEN X Q, ZHAO Y, et al. Design and on-orbit application of TT-1 satellite-based automatic identification system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(1): 65-69. (in Chinese)
- [5] LI S Y, CHEN X Q, CHEN L H, et al. Data reception analysis of the AIS on board the TianTuo-3 satellite [J]. The Journal of Navigation, 2017, 70(4): 761-774.
- [6] CHEN L H, LI S T, ZHAO Y, et al. Satellite-based 6S payload for internet of things [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science (ICMEAS), 2022: 247-251.
- [7] GARCIA M, DOLAN J, HOAG A. Aireon's initial on-orbit performance analysis of space-based ADS-B [C]//Proceedings of the Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, 2017: 4A1-1-4A1-8.
- [8] 陈利虎, 崔俊伟, 李松亭. 天基物联网关键技术及应用前景 [J]. 国际太空, 2022(1): 26-32.  
CHEN L H, CUI J W, LI S T. Key technologies and application prospects of space-based internet of things [J]. Space International, 2022(1): 26-32. (in Chinese)
- [9] WALCZOWSKI W, MERCHEL M, RAK D, et al. Argo floats in the southern Baltic Sea [J]. Oceanologia, 2020, 62(4): 478-488.
- [10] ERIKSEN T, HELLEREN Ø, SKAUEN A N, et al. In-orbit AIS performance of the Norwegian microsatellites NorSat-1 and NorSat-2 [J]. CEAS Space Journal, 2020, 12(4): 503-513.
- [11] MENG X, MA S X, LIU C, et al. Frequency offset estimation in the intermediate frequency for satellite-based AIS signals [J]. Optoelectronics Letters, 2018, 14(4): 301-305.
- [12] LI S T, CHEN L H, ZHAO Y. GMSK viterbi demodulation for satellite-AIS [C]//Proceedings of the 2018 IEEE 3rd International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), 2018: 327-331.
- [13] 李松亭, 赵勇, 陈利虎, 等. 基于定时频偏补偿的星载 AIS 解调方法: 201810270861. X [P/OL]. 2018-09-07

- [2022 - 07 - 01]. <https://www.doc88.com/p-57516192337559.html>.
- LI S T, ZHAO Y, CHEN L H, et al. On-board AIS demodulation method based on timing frequency offset compensation; 201810270861. X [P/OL]. 2018 - 09 - 07 [2022 - 07 - 01]. <https://www.doc88.com/p-57516192337559.html>. (in Chinese)
- [14] XUE K, LIAO S W, XUE Q, et al. VHF band spaceborne element rotation angle controlled phased antenna array for SAT-AIS application[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(6): 2375 - 2382.
- [15] 程云, 陈利虎, 陈小前. 星载 AIS 检测概率建模与仿真分析[J]. *国防科技大学学报*, 2014, 36(3): 51 - 57.  
CHENG Y, CHEN L H, CHEN X Q. Modeling and simulation analysis of detection probability for space-based AIS [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(3): 51 - 57. (in Chinese)
- [16] 朱守中, 张喆, 李明. 星载 AIS 信号分析与处理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.  
ZHU S Z, ZHANG Z, LI M. Analysis and processing of spaceborne AIS signal[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese)
- [17] Eurocontrol. Safety and performance requirements document on a generic surveillance system supporting ATC services [S/OL]. (2021 - 11 - 01) [2022 - 07 - 01]. <https://standards.globalspec.com/std/14505756/ED-261/3>.
- [18] ZHAO Y, WANG N, CHEN Q, et al. Satellite coverage traffic volume prediction using a new surrogate model[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 193: 357 - 369.
- [19] YU S Q, CHEN L H, FAN C G, et al. Integrated antenna and receiver system with self-calibrating digital beamforming for space-based ADS-B[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 480 - 486.
- [20] YU S Q, CHEN L H, LI S T, et al. Adaptive multi-beamforming for space-based ADS-B [J]. *The Journal of Navigation*, 2019, 72(2): 359 - 374.
- [21] LUO A B, WU L, CHEN L H, et al. Single channel signals separation of space-based ADS-B based on compressed sensing[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP), 2021: 116 - 123.
- [22] 陈利虎, 赵勇, 陈小前, 等. 一种天基信息搜集系统的组网方法及系统; 201810271598. 6[P/OL]. 2018 - 09 - 28 [2022 - 07 - 01]. <https://www.zhangqiaokeyan.com/patent-detail/06120111081976.html>.  
CHEN L H, ZHAO Y, CHEN X Q, et al. Networking method and system of a space-based information collection system; 201810271598. 6[P/OL]. 2018 - 09 - 28 [2022 - 07 - 01]. <https://www.zhangqiaokeyan.com/patent-detail/06120111081976.html>. (in Chinese)