

天拓一号星载自动识别系统设计与在轨应用*

陈利虎, 陈小前, 赵勇, 程云

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:介绍了星载自动识别系统的技术优势和应用前景;针对由传统地面自动识别系统向星载自动识别系统发展所带来的多网信号冲突、多普勒频移、空间链路衰减等技术难题,对天拓一号星载自动识别系统的系统进行了设计,包括系统组成、接收机指标和功能、天线和微波开关设计,对星地自动识别系统链路电平进行了估算;重点介绍了自动识别系统接收机的空间应用性能测试和环境试验方案;介绍了天拓一号星载自动识别系统在轨应用情况,结果表明所设计的 AIS 接收机可一定程度上缓解星载自动识别系统的技术难题,满足大范围海事目标监测的应用需求。

关键词:星载自动识别系统;天拓一号;接收机

中图分类号:TN971 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2015)01-065-05

Design and on-orbit application of TT-1 satellite-based automatic identification system

CHEN Lihu, CHEN Xiaoqian, ZHAO Yong, CHENG Yun

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

Abstract:The technology advantages and application prospects of satellite-based automatic identification system (AIS) were introduced, and then the system of the satellite-based AIS of TT-1 was designed to overcome the problems of multi-cell signal collision, Doppler shift and large space link attenuation, originating from the development of ground-based AIS to satellite-based AIS. This design included the composition of system, the qualification and function of AIS receiver, the design of antenna and microwave switch and the link level estimation of satellite-ground AIS. For the preparation of space applications, it mainly discussed the performance and environment test for the AIS receiver. The on-orbit application situation of TT-1 satellite-based AIS was introduced and the results show that the innovated AIS receiver can partly ease these technical problems and achieve a wide range of maritime surveillance requirements.

Key words: satellite-based automatic identification system; TT-1; receiver

船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS)是指在甚高频海上移动频段采用自组织时分多址 (Self Organized Time Division Multiple Access, SOTDMA) 接入方式自动广播和接收船舶动态、静态等信息以便实现识别、监视和通信的系统。该系统以 SOTDMA 为核心技术,其主要功能在于交换船只之间的位置、路线和速度等信息,对船舶进行领航、定位以及船只避碰等^[1-3]。

最初 AIS 仅用于船舶之间的避碰和船舶导航,后来由于 AIS 的强制加装和自报位特性, AIS 逐步推广应用于海域感知、海面监视、辅助识别、环保、缉私、打击恐怖主义等方面。随着 AIS 在船舶、沿岸、飞机等平台的加装, AIS 的监视范围有

所扩展,但这些平台的搭载仍不能满足对 AIS 信息的覆盖范围和时效性要求。通常岸基 AIS 的覆盖半径在 30~50 海里(1海里=1.852km)以内,空基 AIS 的覆盖半径在 200 海里以内,而星载 AIS(以轨道高度 600km 为例)的覆盖半径可达 1500 海里^[3-4]。

星载 AIS 有着全天时、全天候、远距离、大范围、卫星探测合法性等优点,在海洋监管领域具有独特的优势,其信息在国民经济建设中可用于掌握全球船舶动态、维护航行安全、分析全球经济态势等,在军事上可用于监视全球海域舰船目标,特别是在与其他手段配合的基础上,可以提高定位精度,准确判定目标属性,生成全球海洋目标态势。

* 收稿日期:2014-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61302092)

作者简介:陈利虎(1980—),男,江西萍乡人,副研究员,博士, E-mail:clh2055@163.com

然而,正是由于星载 AIS 具有侦测范围广和卫星搭载的高远特性,带来了不同于传统地面 AIS 的新的技术难题,主要包括:1)多网信号冲突,即来自于星载 AIS 覆盖范围内的多个自组织子网络的 AIS 信号同时达到 AIS 接收机,使接收信号产生时隙冲突,导致丢包;2)多普勒频移,即星载 AIS 接收机相对地面的监测目标有一个较大运动速度,这个速度将会导致接收信号的载波发生较大的频移,一般为 $-3.8\text{kHz} \sim 3.8\text{kHz}$;3)空间链路衰减,即地面目标发射的 AIS 信号到达星载 AIS 接收机的过程中由于远距离的空间路径传输和大气衰减会大大降低信号强度,对接收机的灵敏度提出了较高要求。所有以上这些技术问题都将直接影响到 AIS 信号的正确侦收和解调,制约着星载 AIS 对目标的检测概率性能。

2008 年发射的 NTS 和 2010 年发射的 AISSAT2 等纳星 AIS 载荷均采用单极子甚高频 (Very High Frequency, VHF) 天线来接收 AIS 信号,瞬时覆盖范围太大,对目标的检测概率低。为提高检测概率,多采用将部分冲突 AIS 数据存储后下传靠地面解决的方法,但此方法对数传压力较大,实时性不够好。

鉴于星载 AIS 具有巨大的军民应用价值和优势前景,国防科技大学自 2009 年起开展了相关技术攻关,包括星载 AIS 总体设计、接收机和天线设计、地面模拟试验方法等,研制了星载 AIS 接收机和天线。

1 TT-1 星载 AIS 设计

星载 AIS 包括射频前端(天线、微波网络)、接收机、数据存储和数据下传设备等。在卫星经过海域时,遥控 AIS 接收机开机,实时侦收覆盖范围内的 AIS 报文并存储;在卫星过境时通过卫星遥测/数传链路下传给地面站和数据中心。系统原理框图如图 1 所示。

TT-1 星载 AIS 设计了两副单极子 VHF 天线,两天线与卫星对地轴成 $\pm 45^\circ$ 安装,波束分别朝向卫星总覆盖范围的前区域和后区域,两天线由后端微波网络周期切换分时工作,在保证总覆盖的前提下减小瞬时侦收范围,减缓在船舶密集区域的多信号冲突,提高目标检测概率。

1.1 AIS 接收机设计

为保证在近地轨道上能收到船只的 AIS 信息,对接收机的灵敏度要求较高。具体参数如表 1 所示。

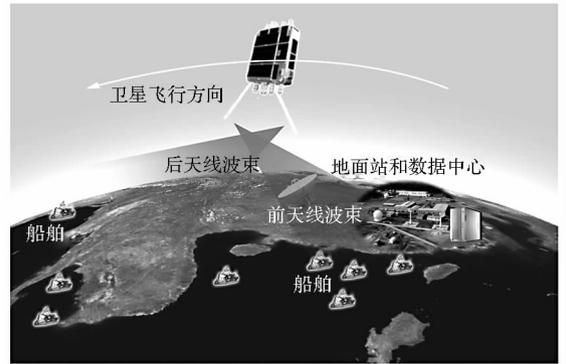


图 1 星载 AIS 侦收系统原框图

Fig. 1 Framework of satellite-based AIS receive system

表 1 星载 AIS 接收机指标

Tab. 1 Satellite-based AIS receiver indexes

指标	数值
接收机工作频率	双频:161.975MHz;162.025MHz
接收灵敏度	优于 -110dBm
带宽	25kHz
调制方式	GMSK
数据速率	38.4kbps
数据输出格式	NMEA 0183
功耗	$< 1.0\text{W}$
输入电压	6.5 ~ 8.2V
重量	小于 100g
尺寸	115 × 75 × 28 mm
工作温度	$-10 \sim 70^\circ\text{C}$

接收机包括射频前端、中频、基带三部分。其中射频前端包含低通滤波器、低噪放大器、射频带通滤波器、放大器;中频部分包含下变频器、中频带通滤波器、FM 解调器;基带包括 AIS 基带信号处理芯片(GMSK 解调和 NRZI/HDLC 解码)、数据处理器等。功能框图如图 2 所示。

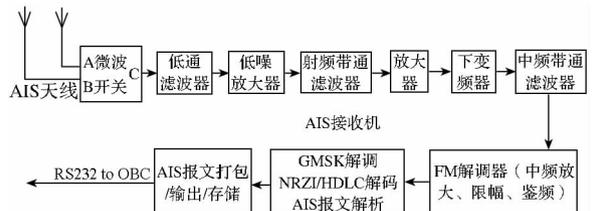


图 2 星载 AIS 功能框图

Fig. 2 Functional block diagram of satellite-based AIS

为了尽量提高接收机灵敏度,选取了插损小的微波开关(插损 $\leq 0.35\text{dB}$)。此外,为了有效去除卫星其他发射机的强干扰,并尽量减小通路插损,在低噪放大器之前选取插损较小(插损 \leq

0.5dB)的低通滤波器而非传统接收机中插损较高的射频带通滤波器来滤除高频强干扰信号;低通滤波后射频信号再经过两级低噪放大,最大限度地降低了噪声系数,经过低噪放大后的信噪比基本固定,实测性能良好,对系统的高灵敏度实现起了关键作用;低噪放大后的信号再通过射频带通滤波器,进一步滤除带外杂散;再经下变频放大变为中频,通过滤波、限幅放大、鉴频完成FM解调,此环节主要针对多普勒频移增加了载频精确估计模块,以抵消多普勒频移的影响;最后进入AIS基带处理芯片,完成GMSK解调和NRZI/HDLC解码,按照NMEA 0183格式由串口输出AIS报文。

1.2 AIS天线和微波开关设计

AIS天线为1/4波长单极子天线,材质为钢卷尺。技术指标如下:

- 双单极子天线(垂直交叉, $\lambda/4$);
- 工作频率:161~163 MHz;
- 天线增益: $\geq 0\text{dBi}(\pm 65^\circ)$;
- 极化方式:垂直双极化;
- 驻波比(VSWR): ≤ 1.30 。

微波开关主要完成双天线的受控切换,技术指标如下:

- 供电电压:5V;
- 单IO线控制切换,高电平5V,低电平0V;
- 射频端口驻波比(VSWR): ≤ 1.50 ;
- 插微波损: $\leq 0.35\text{dB}$;
- 相邻通道间隔距离: $\geq 15\text{dB}$ 。

相对于传统的单根单极子天线,采用垂直交叉的双单极子天线切换分时工作方式可一定程度提高星载AIS的检测概率。

星载AIS检测概率的一般计算公式为^[2]:

$$P_d = 1 - \left[1 - \left(1 - \frac{N}{M} \frac{\tau}{\Delta t} \right)^{M-1} \right]^{T_{\text{obs}}/\Delta t} \quad (1)$$

式中, N 为覆盖范围内船舶总数量, M 为自组织子网络数量, τ 为单个时隙的持续时间, Δt 为AIS信号的平均报告周期, T_{obs} 为单轨的观测时间, P_d 为星载AIS的单轨检测概率。

由于两天线与卫星对地轴成 $\pm 45^\circ$ 前后安装,故相对于单根垂直对地天线而言,其每根天线的瞬时对地覆盖范围将会减小,相应的船舶总数量 N 和自组织子网络数量 M 都会减小,从而单根天线的检测概率会有一定程度提升。此外,由于采用了分时切换的工作方式,各天线独立工作,按照概率统计理论,总的检测概率可表示为:

$$P_d(2) = 1 - (1 - P_d(1))^2 \quad (2)$$

式中, $P_d(1)$ 为单根垂直单极子天线的检测概率, $P_d(2)$ 为所设计的垂直交叉双单极子天线的单轨检测概率。采用垂直交叉双天线之后,星载AIS的单轨检测概率相对单天线有很大程度的提高,同时,在双天线方式下,每根天线的瞬时覆盖范围有所减小(但总幅宽不变),检测概率将会有所提升,从而目标监测概率得到进一步的提高。结果对比如表2所示。

表2 两种天线方式的检测概率对比

Tab. 2 Detection probability comparisons of two kinds of antennas

单天线/ $P_d(1)$	20%	30%	40%	50%	60%
双天线/ $P_d(2)$	36%	51%	64%	75%	84%

2 星载AIS链路设计

星地链路的电平估算如表3所示。

表3 TT-1星载AIS星地链路电平估算

Tab. 3 Level estimation of satellite-ground link level of TT-1 satellite-based AIS

项目	参数	备注
发射功率 P	$\geq 10.9\text{dBW}$	$\geq 12.5\text{W}$, CLASS A 船只
发射天线增益 G_{pt}	$\geq -1\text{dBi}$	单极子天线,仰角 70° 以内
发射器传输损耗 L_t	1dB	
发射频率 f	162MHz	VHF 频段
传输距离 d	2025km	$H = 480\text{km}$, 仰角 5°
空间传播损耗 L_s	142.8dB	$L_s = 32.44 + 20\lg f + 20\lg d$
接收天线增益 G_{rp}	$> 0\text{dBi}$	
馈线+微波开关损耗 L_r	1dB	微波开关 0.35dB
极化损耗 L_p	$< 2\text{dB}$	线极化收发
接收机灵敏度 Sen	-140dBW	-110dBm
裕量	$\geq 3.1\text{dB}$	$P + G_{pt} - L_t - L_s + G_{rp} - L_r - L_p - Sen$

由表3可知,由于所设计的接收机灵敏度为-110dBm,高于传统的-107dBm,使得轨道高度480km的星载AIS链路裕量不小于3.1dB(仰角 5°),有效解决了由于空间链路衰减导致接收信号强度低的问题,可满足AIS信号的接收解调

要求。

3 测试和试验方法

基于效费比考虑, TT-1 的所有部组件包括 AIS 接收机均大量采用了商业现货 (Commercial off-the-shelf, COTS) 芯片。在完成 AIS 接收机的研制和调试后, 重点对在轨应用和环境特性进行针对性的性能测试和环境试验, 包括: 接收灵敏度测试、抗多普勒频移测试, 力学试验 (随机振动、正弦振动、冲击)、热试验 (热真空、热循环) 和辐照试验等。测试和试验流程如图 3 所示。

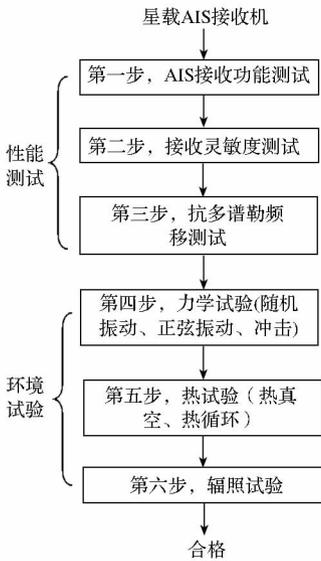


图 3 星载 AIS 接收机性能测试和环境试验流程图

Fig. 3 Performance testing and environmental test process of satellite-based AIS receiver

首先完成 AIS 接收功能测试。利用 AIS 发射机作为信号源, 发出各类 AIS 信号 (按照 GB/T20068-2006 要求, AIS 信号种类有 22 类), 待测试接收机接收解析后送往计算机。通过报文对比判断 AIS 接收机是否接收正常。

进一步地, 在射频链路中增加可调衰减器, 并将 AIS 发射机置于屏蔽笼中, 防止信号泄露, 通过调节衰减器值测试接收机灵敏度。过程如图 4 所示。

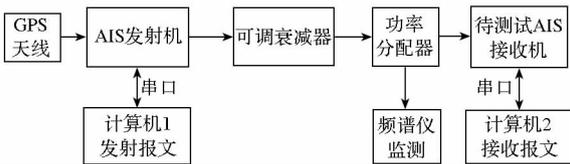


图 4 星载 AIS 接收机灵敏度测试

Fig. 4 Sensitivity test of satellite-based AIS receiver

再进一步地, 在射频链路中增加可调频移器, 调节频移值, 测试接收机能正常工作的最大频移

值。卫星在空间运行速度接近 7.9km/s, 而船只的速度与卫星相比可忽略不计, 故在星地链路中会产生较大的多普勒频移。该频移值取决于船只与卫星的连线 and 卫星运动方向的夹角余弦值, 卫星与星下船只之间链路的频移值最小, 与斜距最远的船只之间链路的频移值最大。对于轨道高度为 480km 的卫星, 5°仰角以上的多普勒频移在 ±3.75kHz 以内。可调频移器并没有现成的仪器或设备可用, 故利用两个混频器、双通道中频信号源、低通滤波器和 VHF 带通滤波器搭建, 抗多普勒频移测试原理框图如图 5 所示。

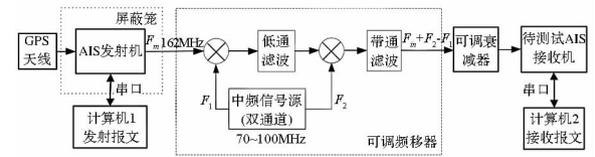


图 5 星载 AIS 接收机抗多普勒频移测试

Fig. 5 Anti-Doppler shift test of satellite-based AIS receiver

对待测试接收机进行热真空试验和热循环试验。此类试验按照卫星平台给定的环境试验参数和规定流程开展即可^[5]。

需要特别注意的是辐照试验。在已测的接收机中抽取试验件, 进行辐照试验。辐照源选取钴 60, 总剂量与卫星设计寿命成正比, 可按照 5krad/a 计算。在完成辐照试验后, 试验件作废。该试验件的辐照试验通过, 表明同批次的其他产品抗辐照能力达标。试验流程如图 6 所示。

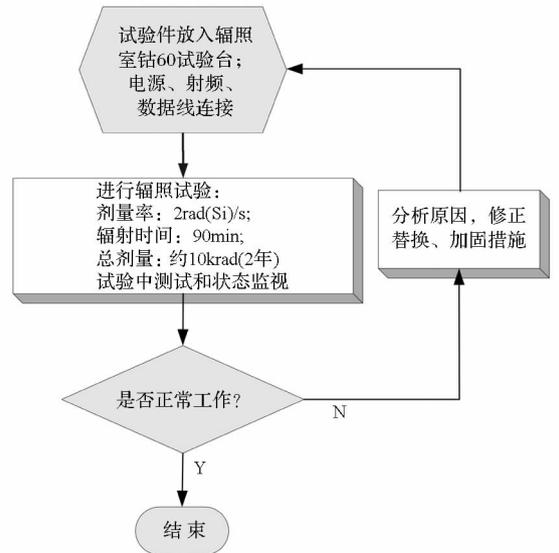


图 6 星载 AIS 接收机辐照试验

Fig. 6 Irradiation test process of satellite-based AIS receiver

若上述测试和试验项目合格, 则表明 AIS 接收机能达到空间应用性能指标并能适用于空间环境, 满足寿命要求。

4 在轨应用情况

经地面测试、试验合格后,TT-1 卫星于2012年5月10日发射,5月13日下午卫星成功展开 AIS 接收机天线,并随即开展 AIS 侦收试验,当轨即侦收到南美洲海域的船舶 AIS 信号。在随后一个月的在轨试验中,先后安排 AIS 接收机在热点地区侦收海面的 AIS 信息报文,如印度洋、亚丁湾、霍尔木兹海峡、中国东海、中国南海等。2012年6月10—16日,卫星为神舟9号飞船应急救援提供了信息支持服务;2012年6月18日以后,为10余家军民用户免费提供侦收的 AIS 数据。截至2014年8月,共下载到地面超过80MB(约160万条 AIS 报文)的数据。根据数据分析,星载 AIS 有效幅宽超过3500km,24h内全球船舶目标检测概率约30%,远海目标检测概率大于80%,总体指标与2008—2010年发射的 AIS 卫星相当^[6-8],在纳卫星级别中处于国际先进水平。

将在轨11月的 AIS 报文合并到电子海图上回放,可得出全球的船只分布图,如图7所示。

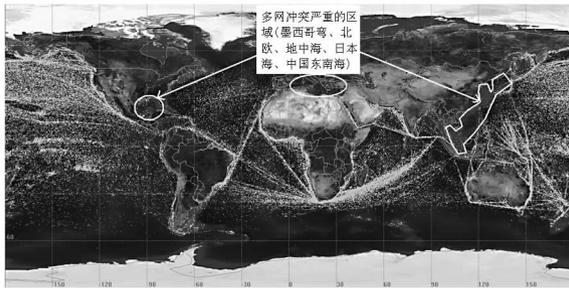


图7 TT-1 星载 AIS 在轨11月侦收数据组成的全球船只分布图

Fig. 7 Distribution map of ship AIS messages collected by TT-1 over the orbital 11 months

由图7可以清晰看到全球的航线、船舶分布动态。其中在墨西哥湾、北欧、地中海、中国沿海、日本海等船舶密集区域,船舶检测率仍然较低。多信号冲突问题将在后续研究中通过多星组网、信道化侦收、高增益天线等技术手段联合解决。

通过对累计的 AIS 报文进行分类、航线密度分析、重要港口吞吐量计算等,可以考察不同国家以及各经济体之间的联系紧密度和物流流量,为宏观经济部门分析世界经济发展态势和预知未来经济走向提供有益借鉴信息。图8为某一物流船舶一个月的航迹图。从图可看出,利用星载

AIS 可以实现全球范围内的船舶动态跟踪、海运物流监控等,对于航行安全、应急搜救、态势感知和监管等领域意义重大。

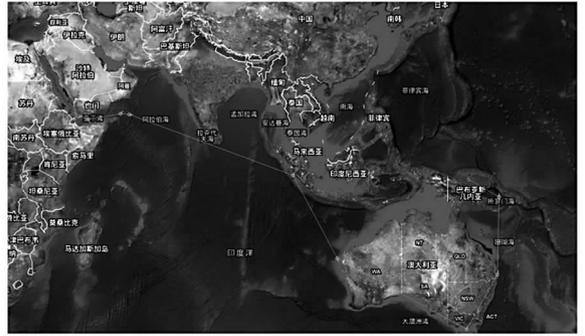


图8 TT-1 星载 AIS 侦收某物流船舶一个月内的航迹
Fig. 8 Track of one cargo ship intercepted by TT-1 satellite-based AIS in a month

5 结论

本文介绍了天拓一号卫星星载 AIS 的设计、测试、试验和在轨应用情况。天拓一号卫星的 AIS 在轨侦收试验成功,将为我国后续发展应用型 AIS 卫星奠定坚实基础。

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[R]. ITU-R M.1,2007.
- [2] International telecommunications union. satellite detection of automatic identification system messages[R]. ITU-R M.2084,2006.
- [3] International Telecommunications Union. Long range detection of automatic identification system (AIS) messages[R]. ITU-R M.2123, 2007
- [4] Wahl T. New possible roles of small satellites in maritime surveillance[C]//Proceedings of Fourth IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin, 2003.
- [5] GJB 1027-90. 卫星环境试验要求[S]. 1990. GJB 1027-90. Environmental test requirements for satellites [S]. 1990. (in Chinese)
- [6] Bjorn T N, Oystein O, Oystein H, et al. A norwegian satellite for space-based observations of ais in the high north [C]// Proceedings of 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2007.
- [7] Ian D'Souza, David M. Nano-satellite demonstration mission: the detection of maritime AIS signals from low earth orbit [C]// Proceedings of Small Satellite Systems and Services Symposium, Portugal, 2010.
- [8] Bjorn T N, Oystein H, Oystein O, et al. AISSAT-1 early results [C]// Proceedings of 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2011.