

文章编号: 1001 - 893X(2010)08 - 0018 - 04

# 星载侦察接收技术\*

熊小莉

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

**摘要:**信号情报侦察卫星用于侦收地面雷达、通信和测控等系统所辐射的电磁信号并对其定位, 是航天侦察的重要手段。介绍了信号情报侦察卫星的使命和分类, 通过对星载侦察接收设备的组成、主要性能要求和特点的分析, 对大型天线及在轨展开技术, 宽频段、高灵敏度、大动态范围的一体化信道技术, 星上信号处理技术和空间环境适应性等星载侦察接收关键技术进行了讨论, 并展望了其发展趋势。

**关键词:**航天侦察; 信号情报侦察卫星; 信号处理; 空间适应性

**中图分类号:** TN971; V474.2      **文献标识码:** A      doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.004

## Signal Interception Equipment Technology of SIGINT Satellite

XIONG Xiao - li

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** SIGINT (Signal Intelligence) satellite is used to detect, intercept and locate electromagnetic (EM) signals radiated by systems such as ground radar, communication and TT&C systems. It is an important means for space reconnaissance. The missions and classification of SIGINT satellites are introduced. The components, main specifications and features are analysed. The key signal interception and receiving technology is discussed, including large antenna and its deployment technology, integrated channel with wideband, high sensitivity and large dynamic range, onboard signal processing technology and space environment adaptability, etc. Finally the development trend is expected.

**Key words:** space reconnaissance; SIGINT satellite; signal processing; receiving; space environment adaptability

### 1 引言

航天侦察是从空间获取信息的强有力手段, 而且是目前唯一不受国界、地域限制的侦察手段, 可为国家军事斗争、外交斗争以及政治斗争提供强有力的情报保障, 起着其它侦察系统所不可替代的作用, 是确保信息优势的重要环节。与传统的陆基和空基侦察监视相比, 侦察卫星的突出优点是监视点高、范围大、速度快, 不受国界、地理、时间和气候条件的限制。采用卫星星座, 能实现全球范围的近实时的侦察与监视。通过航天侦察, 可长期、连续不断地对重

点地区的军事设施、兵力部署、作战装备等进行监视, 使敌方或潜在对手始终处于己方监视之下。现在, 美国已经建立了以卫星作为获取和传递信息的主要手段的军事信息结构, 在现代高技术战争中发挥了重要作用。世界各强国已充分认识到天基信号情报装备的独特优点与重要性, 都在竞相发展星载侦察接收技术, 采用多层、多领域、多手段的侦察部署, 逐步构成了卫星、机载、舰载与地面系统相配合的高效立体交叉侦察监视网。

星载侦察接收设备受特殊的空间环境限制, 除要求必须具有良好的侦收性能(即快速的信号截获能力、高灵敏度、大动态范围、在密集信号环境中的

\* 收稿日期: 2010 - 05 - 25; 修回日期: 2010 - 07 - 28

信号分选能力、适应不同体制辐射源信号、足够的定位精度等)外,还要求星载侦察接收设备体积小、重量轻、功耗低和可靠性高。

本文介绍了信号情报侦察卫星的分类、星载侦察接收设备的组成、主要性能要求和特点,讨论了其关键技术。

## 2 信号情报侦察卫星的分类

信号情报侦察<sup>[1]</sup>卫星是利用星上的电磁信号侦察系统侦收地面的雷达、通信、导航设备、敌我识别器、导弹制导设备和测控系统所辐射的电磁信号,通过对信号参数的测量和分析,确定其特性参数,并测定辐射源的地理位置的卫星。信号情报侦察卫星又可分为通信情报(COMINT)侦察卫星和电子情报(ELINT)侦察卫星。通信情报侦察卫星用于破译通信信号的信息内容,电子情报侦察卫星用于获取非通信电磁辐射源信号的情报参数。

按侦察目的不同,信号情报侦察卫星可分为普查型、详查型。普查型卫星能监视大面积地区,测定辐射源的位置,粗略测定电磁信号的工作频率等参数。详查型卫星能全面测量电磁信号的各种参数,并对辐射源定位。

按对辐射源定位体制的不同,信号情报侦察卫星可分为单星定位卫星和多星定位卫星。单星定位通过测向来对地面辐射源定位,测向方法有比幅测向、干涉仪测向、阵列测向、时差测向等,单星定位法可以快速定位,工作方式简单,但是星上必须有测向设备,并且对卫星的姿态测量精度有较高要求(常为 $0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ );多星定位通过提取时差、频差等信息对辐射源精确定位,其定位误差小、定位速度快,但对数据处理和卫星的轨道控制精度要求高,需严格保持星间距离。

按运行轨道的不同,信号情报侦察卫星可分为低轨道型、大椭圆轨道型和静止轨道型。低轨卫星侦收的信号相对较强,适于详查。但在低轨道上运行的卫星寿命较短;卫星相对于地面是运动的,它能够用于通信的时间短;卫星天线覆盖的区域小,并且地面天线必须随时跟踪卫星。可通过多颗卫星组网,来扩大覆盖区域。大椭圆轨道和静止轨道卫星能连续覆盖侦察区域,轨道高度36 000 km的静止轨道卫星的运行周期与地球自转一圈的时间相同,特点是覆盖照射面大,3颗卫星就可以覆盖地球的几乎全部面积,可以进行24 h的全天候侦察,但因距离远、信号传输衰减大,必须采用高灵敏度的接收机和高增益的大接收天线,如美国静止轨道的第5代电

子侦察卫星的“大酒瓶”卫星接收天线口径达150 m。

## 3 星载侦察接收设备的组成、主要性能要求和特点

星载侦察接收设备用于截获、分析和存储敌方电子设备的电磁信号,主要用于对雷达信号、通信信号、导弹卫星测控信号的侦测,通常由天线、侦察接收机和控制处理终端组成。

侦察接收机<sup>[2]</sup>有模拟接收机和数字接收机两种。模拟接收机技术相对较为成熟,常采用的技术体制有晶体视频接收机、超外差接收机、瞬时测频接收机(IFM)、信道化接收机、压缩接收机、布拉格盒接收机。随着数字化信号处理技术的发展,常选择超外差数字信道化接收机作为侦察接收机。

星载侦察接收设备根据其应用的特定要求,主要性能要求和特点如下:

### (1) 具有对特定辐射源目标高精度截获能力

星载侦察接收设备要求在高密集的电磁环境中,能准确地进行信号的截获、分析识别和分选,还要能够识别出微弱信号,这对星上的接收机和控制处理终端提出了很高的要求。当信号的密度很高时,如果仍要求保持较高的侦收概率,则需要采用高灵敏度、大动态范围、低相位噪声和宽瞬时带宽的侦收处理设备。

### (2) 具有对复杂环境和信号形式的适应能力

复杂的电磁环境具有不同的调制方式和速率的电磁信号,侦收设备要能保证在复杂的信号环境下对各种类型的信号都能实现高截获概率和高测向精度,常采用侦察、测向一体化的接收体制。

### (3) 具有一定的抗干扰、抗截获、抗摧毁能力

电子对抗技术的迅猛发展,对在轨工作的侦察设备安全构成了巨大的威胁,要求星载侦察接收设备必须具有一定的抗干扰、抗截获和抗摧毁能力。

### (4) 具有空间工作环境的适应能力

星载侦察设备除要求具有良好的侦收性能外,由于要经历卫星发射阶段所造成的声、振动、冲击和加速度等严酷的动力学环境,在轨工作时要适应真空、空间带电粒子辐射、地球电离层等各种恶劣的工作环境,因此还要求星载侦察接收设备具有空间环境适应能力。

## 4 星载侦察接收设备关键技术

星载侦察设备的关键技术和要求主要有以下几方面:

### (1)大型天线及在轨展开技术

不同轨道的侦察卫星采用不同的天线形式<sup>[3]</sup>。大椭圆轨道卫星一般采用伞状天线,技术难度在于肋条的展开精度。静止轨道卫星采用网格天线,在网格结点上装微型电机,保证天线的机械均匀性和表面精度。静止轨道侦察卫星所接收的地面信号电平比低轨卫星强得多,必须采用高增益的大型接收天线,又称为“大天线伞”,这种天线直径高达100 m左右,天线的收拢、展开、变形处理等技术难度很大。

为了截获微小功率的宽频带电磁信号,高轨信号情报侦察卫星的天线主要采用大型可展开空间天线,天线的口径越来越大,从最初的9 m发展到现在的150 m,最大重量约达1 400 kg,使信号情报侦察卫星的信号侦收能力不断增强。为了降低发射成本和延长卫星使用寿命,必须减轻天线重量,并缩小天线的收拢体积,随着侦收频段的不断提高,对天线反射面的精度要求越来越高。对高轨道卫星来说,信号情报侦察卫星天线应同时满足口径大、重量轻、收拢体积小和表面精度高等要求。

### (2)宽频段、高灵敏度、大动态范围的一体化信道技术

侦察接收机要完成对接收到的辐射源信号的变频、放大和滤波等处理<sup>[4-5]</sup>。侦察接收设备为了搜索、截获、分析和处理各种电磁信号,通常要求具有以下特点:

1)频段宽、频段内侦收频率连续可调。为了侦察日益扩展的工作频段和避免漏检信号,侦收设备的工作频率必须连续可调,且能自动搜索以提高截获信号的速度;

2)高灵敏度。由于被侦目标信号位置常常距离较远,功率较小,同时为了防止自己的信号被对方截获,在保证正常通信的前提下常降低发射功率,因此需要侦察接收机具有较高的灵敏度;

3)大动态范围。被侦目标的覆盖区域广,距离远近差异对侦察接收机的动态范围提出了更高的要求;

4)非线性性能好。复杂的电磁环境和宽开接收设备的应用,使两个以上信号进入接收机成为必然。当多个信号同时进入接收机时,其迭加电平使接收机某些部件进入非线性区,产生交调、互调分量,使噪声电平提高,输出产生虚假信号,导致接收机灵敏度降低和产生错误接收,弱信号漏检,这对侦察接收机是致命的,因此要求侦察接收机的非线性性能要好。

宽带接收机(一般频率覆盖范围大于几吉赫)常用信道化接收机解决宽带问题,但在星上使用信道化接收机设备量大,会影响整机的可靠性。由于在一个

侦察频段内强弱信号电平相差常为40~50 dB,最大达到80~90 dB,因此接收机动态范围要大、三阶交调要小。对接收机灵敏度的要求,限制了侦察时所能采用的最大瞬时带宽。同时,过窄的瞬时带宽与越来越宽的频率覆盖要求相矛盾。为兼顾两者,可以采用频率分区覆盖的多路接收技术,或采用频率搜索方式去覆盖所需的频率范围,前者是以增加设备的复杂性为代价的,后者是以降低截获概率为代价的。星载侦察接收机的灵敏度常要求大于-120 dBm。

双音无虚假动态是侦察接收机的重要指标,它是表征侦察接收机提取弱信号的能力。是指当两个同时到达信号处在这个范围内时,接收机不会产生任何虚假信号。其下限是最小可检测信号输入(输出功率),上限是以产生的三阶互调产物功率刚好等于最小可检测信号输出功率的等幅双音输入(输出功率)上限的动态范围。一般要求侦察接收机的双音无虚假动态大于50 dB。

对宽带接收,宽带噪声、干扰阻塞和虚假信号问题严重,可根据辐射源信号频率分布特征进行分段处理,避免由于放大链路非线性干扰所造成的虚假信号,采用多次变频加大对镜频和中频抑制,精心设计频率关系,合理分配各频段的增益,避免交调、互调信号落入带内。为了保证侦收步进和系统测频精度的要求,频综本振的频率精度要高,相噪要低,应根据实际情况选择不同的频综结构,全面兼顾宽频段、小步进、低相噪和捷变时间的综合要求。因此,涉及到的关键技术包括宽频段、高灵敏度、大动态范围,快速调谐、低相位噪声本振技术。

### (3)星上信号处理技术

控制处理终端通常由信号处理机和载荷管理计算机组成。其主要功能有,完成对辐射源信号的参数测量、识别、采样和定位,将处理结果送数传分系统;与卫星星务分系统通信,完成对地面指令和任务的解译与执行、软件上载等功能,还要对整个侦收系统进行监控和管理。

在星上进行参数测量、信号识别、定位等处理因受到器件选择的限制,尤其对低轨卫星还要受可持续侦察时间的约束,不宜采用过于复杂的算法。

为满足侦察任务多样化的需求,针对不同的信号类型、任务模式和处理算法,可采用软件重构技术增加星载侦察设备的灵活性,提高侦收设备对侦察使命、侦察环境的适应能力。软件重构的目标是根据任务需求和最新技术发展实现卫星以及地面站的配置实时更新和通信模式切换控制。可采用FPGA作主体,DSP辅助处理的架构,针对中低轨卫星在轨

运行特点和配置软件上载功能要求,可重构星地环路控制技术的可靠性设计是关键,低轨卫星多普勒频移大,以700 km轨道高度和天线120°俯仰角为例,当目标处于卫星侦察范围边缘的时候,频移最大,对于6 500 MHz的C频段信号,多普勒频移最大约为130 kHz以上,必须解决在大多普勒频偏、卫星过顶时间短等不利因素下,星地上下行链路的传输能力和可靠性技术。低轨卫星过境时间只有几分钟,而FPGA的配置数据常常有几兆比特,如何在有效通信时间内高速无误码的传输配置信息,对信号传输技术提出了更高的要求。

#### (4)空间环境适应性技术

星载设备的特点是高风险、高成本、高可靠,长寿命,产品需经历各种恶劣工作环境。卫星是一次性产品,一旦发射入轨就不能进行维修,同时为了降低发射成本,小体积,轻重量和低功耗是星载设备设计的重要原则。

卫星在发射时要承受运载火箭所造成的声、振动、冲击和加速度等严酷的动力学环境,入轨后又要承受真空、冷黑、空间带电粒子辐射、低重力、太阳电磁辐射及微流星体与空间碎片等恶劣的外层空间环境。因此,星载设备的环境适应性设计是关键。

空间辐射环境对星载设备的影响主要包括电离总剂量效应、位移损伤效应和单粒子效应。电离总剂量效应常造成集成电路漏电增加导致整个器件功耗急剧增加,器件失效,使逻辑电路逻辑功能出现错误,功能失效;使模拟电路性能出现漂移。

星载设备可选择有抗辐射加固指标的器件,设计中采取局部屏蔽措施,对关键器件、抗辐射能力不足的器件进行防护,应用容差设计,容许器件特性在一定辐射退化情况下,不影响系统整体性能;对于单粒子效应造成的软错误,优先选择具有抗单粒子加固指标的器件;在系统设计中,采取容错措施,保证系统在个别器件出现单粒子翻转时,能够自行恢复或由地面遥控加电/断电指令实现人工干预恢复,针对单粒子翻转,通过冗余电路设计、切机和断电来解决,软件采用看门狗控制技术,对重要程序采取程序和指令重复执行来确认,对重要参数按三取二进行表决等。

卫星在轨运行时处于真空环境,大多数航天器为非气密性结构,舱内没有空气,因此对流的散热方式不适用,常采用辐射和传导的散热方式,通过提高安装面之间的表面光洁度,采用器件倒装,在器件和安装板的结合面,通过填充导热填料,减少传导热阻,设备外表面利用黑色阳极氧化,提高整机表面辐

射率。

星载设备可通过合理布局,有效地散发耗散功率,提高抗冲击、振动和电磁兼容能力,在电路设计中,要加强CMOS电路防锁定、单粒子事件防护、电源母线的过流保护等电路可靠性设计技术的应用。

## 5 结束语

信号情报侦察卫星的发展趋势是部署由低轨向中高轨及静止轨道发展,由单星工作向多星组网发展,信息处理从地面向星上发展,卫星任务从单一型向综合型发展,这些发展要求更高的信息处理、数据压缩和数据的实时传输能力和发展超大型天线技术,对星载侦察设备的性能和技术提出了更高的挑战,需要我们积极探索,不懈努力。

## 参考文献:

- [1] 雷厉,石星,吕泽均,等. 侦察与监视[M]. 北京:国防工业出版社,2008.  
LEI Li, SHI Xing, LV Ze - jun, et al. Reconnaissance and Surveillance[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [2] James Tsui. Digital Techniques for Wideband Receivers[M]. 北京:电子工业出版社,2002.  
James Tsui. Digital Techniques for Wideband Receivers[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)
- [3] 王援朝. 大型星载电子侦察天线结构技术的发展[J]. 通信对抗, 2004(4): 44 - 48.  
WANG Yuan - chao. Development of Large Deployable Antenna Structure Technologies of SIGINT Satellites[J]. Communication Countermeasures, 2006(4): 44 - 48. (in Chinese)
- [4] 陈万强,邹振宁. 美军卫星侦察能力评析[J]. 飞航导弹, 2004(4): 6 - 11.  
CHEN Wan - qiang, ZHOU Zhen - ning. U. S. Military Satellite Reconnaissance Capability Review[J]. 2004(4): 6 - 11. (in Chinese)
- [5] 王景泉. 卫星技术的发展趋势与创新思路[J]. 国际太空, 2001(5): 24 - 29.  
WANG Jing - quan. Satellite Technology Development Trends and Innovation Ideas[J]. International Space, 2001(5): 24 - 29. (in Chinese)

## 作者简介:

熊小莉(1969 - ),女,贵州毕节人,高级工程师,主要从事航天外测和侦察载荷等研究。

XIONG Xiao - li was born in Bijie, Guizhou Province, in 1969. She is now a senior engineer. Her research concerns the development of aerospace TT&C and reconnaissance payloads.

Email: xlxiong. 2007@163. com