

对地观测小卫星数据传输和通信分系统技术研究

余 超*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

1 小卫星概述及其发展状况

所谓小卫星,是指卫星重量在 1000 kg 以下,具有技术先进、体积小、功率小、专用性强、研制周期短、系统投资少、发射成本低、风险小等特点的卫星。质量在 100 kg 以下的称为微小卫星。

早在 20 世纪 80 年代初,美国军方就提出了现代小卫星的概念,随后欧空局 (ESA)、俄罗斯、日本等许多国家也开始发展小卫星。小卫星以其自身特点,广泛应用于军事侦察、民用卫星通信、遥感以及空间技术演示和科学实验等领域。

从 20 世纪 70 年代后期至 90 年代初,小卫星的发展还处于探索应用和科学实验阶段,进入 90 年代后,小卫星则作为卫星的一种类型和大卫星的一个重要补充部分,在太空领域占据着重要的地位。

随着科技的进步,小卫星技术也取得了长足的发展。现代小卫星不仅是就重量而言的,更重要的是要看功能密度。20 世纪 80 年代以来发展起来的小卫星,由于功能密度高,技术性能强,被誉为现代高性能小卫星。小卫星的研制周期短,从立项研制到发射,一般仅需一至两年。

据估计,进入新的世纪,每年将发射 70~80 颗小卫星,约占整个卫星发射数量的一半以上。而大量高新技术和先进管理方法的使用以及崭新设计概念的出现,必然会促使小卫星研制技

术和卫星应用的不断进步,由此将引起卫星研制和应用领域的一场革命,一批功能更强、体积更小、价钱更低、在技术和经济上可与大卫星竞争的小卫星将会不断出现。

2 数据传输和通信分系统的作用和要求

2.1 对地观测小卫星星务管理系统简介

对地观测小卫星由姿控系统、有效载荷系统(包括图像系统)、通信系统、电源系统、热控系统以及星务管理系统等模块组成。星务管理分系统是小卫星电子系统的核心,它将卫星上各个分散独立的功能模块有机地连接在一起,通过星务管理分系统的合理调度实现各个功能系统的协调工作,实现多系统之间的信息交换,进行卫星整体的运行管理和状态监控,完成对图像数据的获取、存储、处理和转发。数传及通信分系统作为对地观测小卫星有效载荷的重要组成部分,其作用可以分如下几部分来介绍。

2.2 数传及通信分系统的作用

整个数传及通信分系统按工作模式可分为:

模式 1: 图像数据的传输

模式 2: 数据存储转发

模式 3: 测控(遥测与遥控)

2.2.1 模式 1: 图像数据的传输

通信分系统数传发射机用来发送图像数据。星上 CCD 相机在指定地区进行摄像并采

* 1999 级硕士研究生

样数据, 经过数据压缩处理, 生成图像数据, 存储于固态存储器, 当卫星飞临到业务站作用区时, 数传发射机由卫星星务管理系统控制向业务站发送图像数据。对于轨道高度在 800 多公里的小卫星来讲, 如果相机摄取 2 分钟的图像, 则数据量将近 6 Gb, 为扩大对地观测能力, 星上图像数据应用压缩编码技术, 以保障接收的质量, 采用图像无损压缩, 压缩比为 2:1。经压缩后数据量为 3 Gb, 需在 10 分钟以内传完, 则下传速率至少应大于 5 Mbps。

2.2.2 模式 2: 数据存储转发

卫星在不影响对地观测的前提下, 地面将需要分发到用户终端的数据由业务站以一定的速率发送到卫星, 卫星解调后将数据存入到星上 RAM, 当卫星飞临某用户终端上空时, 在星上星务管理系统控制下, 将应分发到该终端的数据通过存储转发发射机发送, 由用户终端接收, 达到数据分发的目的。为节省卫星的发射功率和提高抗干扰性能, 数据存储转发下行信道采用扩频、纠错编码等技术。

2.2.3 模式 3: 测控

对地观测小卫星的测控主要包括两部分: 遥测和遥控。

遥测的含义是“近测远传”, 即将卫星内部的工作状态、工作参数以及环境数据转换为电信号, 通过媒介远距离地传输到地面测控站的接收站的接收设备, 再进行解调处理, 还原出原参数数据, 并进行记录和显示的过程。完成上述功能的设备组合称为遥测系统, 它是卫星通信系统的重要组成部分。

遥测在卫星中的作用概括为以下几方面:

a. 为卫星性能评定和设计改进提供依据。
b. 为故障分析提供数据。对地观测小卫星在实验过程中, 出现故障的原因是多样的, 一旦发生故障, 借助遥测数据可分析和查明故障的部位及原因, 以便采取补救措施。

c. 为小卫星遥控提供反馈信息。小卫星在飞行过程中, 遥控系统发送的控制指令的接收和执行情况, 通过遥测信道反馈到地面进行分析判断。

d. 为小卫星上其它系统, 如控制系统、测控分系统等提供工作状态信息, 供地面站监视用。

卫星的遥测数据分两种: 一种是卫星工程遥测数据, 通过存储转发下行信道传输到业务站。另一种是图像数据处理需要的实时性强的遥测数据, 如卫星姿态角及时间等。这种遥测数据由 CCD 相机图像数据编码系统实时采集, 并将这种遥测数据编排到图像数据格式中, 随图像数据传到地面, 供图像数据处理时应用。

遥控就是对被控对象进行远距离控制。通常所说的遥控是指指令遥控, 即在控制端产生并发出指令信号, 利用无线信道将其传送到执行端, 使被控对象完成预定的动作。卫星遥控系统包括地面遥控分系统和星上遥控分系统两大部分。

卫星遥控系统的作用有:

a. 在卫星入轨运行段, 对卫星姿态、运行轨道及星载设备进行控制和调整, 如星上天线波束指向等控制、星载设备的开机与关机、备份机的切换控制、有效载荷操作控制等。

b. 小卫星在轨运行期间, 通过遥控系统提供的上行链路进行星—地时钟比对、星上计算机指令、程序和数据注入等, 确保卫星正常业务运行。卫星的运行控制常采用以星上程序控制为主、地面遥控为辅的方法。遥控采用分包遥控体制, 分包遥控的工作原理稍后将作介绍。

2.3 数传及通信分系统的技术要求

数传及通信分系统技术要求主要有: 对于图像信息传输, 由于图像信息量很大, 因而需要有很高的数传速率, 通常在 Mbps 量级。为达到这一要求, 所需的发射载波频率一般也较高, 通常使用 S 波段; 要求有较低的误码率, 在 1×10^{-6} 级以上, 这可通过提高 EIRP 和选择合适的调制体制来实现。

对于数据存储转发及测控, 一般上下链路常使用 U 段频率, 但是要求有很高的安全性和可靠性, 尤其是遥控, 误码率要求在 10^{-8} 量级。这就对信道编码、差错控制、调制体制提出了较高要求。

3 数传及通信分系统的技术现状和发展趋势

3.1 技术现状

3.1.1 图像数据传输

图像传输包括星上图像数据的编码、调制、二次变频、滤波、放大,最后经天线发射;地面接收到图像信号后,经过上述的反过程得到图像数据。常用的技术主要是:

a. 图像压缩编码

由于星上观测到的数据量很大,要满足有限的存储容量和传输时间,便于远程信道传输,就要进行数据压缩。压缩编码有熵编码和非信息保持编码。目前的压缩标准有: JPEG 标准、MPEG 标准、H.261 标准等。

b. 调制体制

调制体制的选择主要取决于频带宽度利用率、误码率、以及技术上相对复杂程度等因素,国内外在图像传输的调制方式的选择上广泛采用 BPSK(二进制相移键控),如 PCM/BCPSK 和 DBPSK。PSK 调制方式有较好的频带利用率与较小的误码率,也是极轨气象卫星和静止气象卫星的图像传输的成熟技术。

c. 频段和频率选择

图像数据需要高速传送,较低的载频无法达到技术要求,通常选择 S 波段进行图像数据传送。频点选择根据具体任务而定。

d. 二次变频

图像信号经 PSK 调制后,一般频率在中频段约几十兆赫兹,而 S 段的频点在几个 GHz 左右,采用一次变频会对本振、滤波器的设计带来较高的要求,而且容易引入噪声和干扰,一般需经过二次变频,二次上变频后调制到 S 段后,经低噪声放大器输送到天线发射。

3.1.2 数据转发和测控

数据转发过程基本与测控相同,以下只介绍遥测和遥控的常用技术。

3.1.2.1 遥测部分

a. 遥测系统的分类

遥测系统的分类方法很多,按多路复用调制划分,有频分、时分、码分制遥测系统。我国、美国 NASA 和欧空局 (ESA) 的遥测标准建议由使用频分制向使用时分制转换。

b. 遥测信息传输的体制

以数字信号对载波进行调制,称为数字调制。遥测中常用的基本数字调制方式有频移键控 (FSK) 和相移键控 (PSK)。PSK 方式又有 BPSK、DBPSK 和 QPSK 几种形式。BPSK 是以载波的绝对相位变化来分别代表码元 0(或 1) 和 1(或 0) 的;而 DBPSK 是以载波相位的相对变化来传输数据的。由于 BPSK 信号在接收解调时容易产生相位模糊问题,所以现在均采用 DPSK 方式来克服这一缺陷。另一个被广泛应用的是 QPSK 方式,即四相相移键控体制,该体制的好处是所需带宽为 BPSK 的一半,且在理想信道条件下 QPSK 的误码率、抗白噪声干扰性能与 BPSK 相同。

c. 遥测信道编码

由于受对地观测小卫星体积的限制,遥测系统的设计应尽量降低星上的发射功率,最有效的途径之一是采用信道编码方法。遥测信道编码技术已经成熟,卫星遥测中广泛采用两种信道编码:卷积编码-维特比译码和里德-索诺蒙码(R-S 码)。卷积编码-软判决维特比译码以及以这种码为内码和 R-S 码为外码的级联码的性能远优于分组码,且编码增益较高。CCSDS(国际空间数据系统咨询委员会)国际标准中和我国遥测信道编码标准中对它的使用规范都有规定。一般采用以约束长度 $K=7$ 、编码率为 $1/2$ 或 $1/3$ 、8 电平软判决方式,维特比最大似然译码的卷积码为内码,以最大码组长度为 255 符号数的 $(255, 223)$ R-S 码为外码的级联码。

d. 遥测信息的发送和接收

遥测发射机和接收机的基本功能和结构同其它无线系统的发射机没有区别,这里不做叙述。只涉及主要电气指标。

工作频率:我国以前遥测发射机的工作频段曾使用 80-90MHz、380-410MHz、3700-4200MHz,但与我国及国际遥测标准不符,已停

止使用, 20 世纪 80 年代后期开始研制的发射机均在 S 频段 (2200.5-2400.5MHz) 内选取, 各点频间隔为 1MHz。

中心频率稳定度: 遥测发射机中心频率稳定度的选取决定于工作频段、系统功能、对系统质量的要求以及接收机捕获带宽等。对于标准带宽而言, S 频段发射机的频率容差为正负 0.002%。

输出功率: 遥测发射机的输出功率根据工作频段、接收机灵敏度、发 / 收天线增益、电波传播特性、通信容量、作用距离、馈线损耗、系统裕量等因素决定。

3.1.2.2 遥控部分

遥控部分包括地面发射和星上接收两部分。星上遥控部分的基本任务是: 解调接收到的 PSK 信号; 译码输出遥控指令; 接收、解包和校验注入数据, 并将恢复的数据送往星载计算机。地面遥控部分主要向卫星发送遥控指令和注入数据。

星上遥控部分的设备由 PSK 解调器、指令译码器、数据译码器组成。PSK 解调采用相干解调方法提取码元同步信息、恢复遥控 PCM 码流。解调所需的同频同相载波用平方环电路或 COSTAS 环电路提取。指令译码器识别地址同步字, 检出指令方式字, 译码输出指令并保证不会同时执行多个不同的遥控指令。数据译码器对遥控注入数据帧进行解装, 识别方式字, 用软件识别地址同步字, 确保接收数据的正确性。遥控指令和遥控注入数据帧格式都有相应的规定, 我国实行的是 GJS1198.1 标准。

地面遥测部分由指令 / 数据形成、数字调制、差错控制和多路选择等几大块组成。

a. 调制体制。遥控部分常用三重调制体制, 即 PCM(脉冲编码调制)、二次调制和载波调制。二次调制的目的是为了提高遥控的保密性和抗干扰性, 二次调制有三大类: 副载波调制、主字母调制和扩频调制。PCM 和载波调制不再叙述, 只对主字母调制和扩频调制作介绍。

主字母调制是国外遥控系统常用的一种二次调制, 它在每个码元内同时填充两个载波。

用多个副载波中每两个频率组合对应一个主用字母, 然后再在多个字母中选取几个字母的排列组成不同的码字, 由于组成的字母远远大于二进制及其它多进制的元, 所以在相同指令长度的情况下可选指令码比二进制或其它多元码多的多, 极大地提高了这种码字的保密性和抗干扰性。

扩频调制适合遥控系统使用的扩频方法是直接序列扩频(DS-SS)。直接序列扩频利用一种码速率比指令码速率高很多倍的伪随机码序列(PN 码)代替副载频, 将指令码调制到伪随机码上得到一个与伪随机码速率相同、携带着指令码信息的高速二进制序列, 再将此信号调制到载波上。这一射频信号的带宽要比指令码带宽几千到几十万倍, 使得指令码信号的能量分散在很宽的频谱中。在接收端利用相关接收技术, 将有用信号能量汇聚, 而无用信号进一步展宽。因而扩频调制具有很强的保密性和抗干扰性能, 成为未来遥控指令调制技术的发展方向。

b. 差错控制技术。由于外部干扰以及系统内部起伏噪声的存在, 在接收端解调后的数据存在一定的误码率。遥控传输信道本身能达到的误码率一般为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 量级, 而卫星遥控指令的误码率一般要求在 10^{-8} 量级以下, 所以必须采用差错控制技术以降低误码率。差错控制的基本形式有两种: 前向防错和大回路反馈校验法。前向防错就是地面遥控系统将遥控指令编成具有一定防错能力的码字, 星上遥控接收设备根据约定的规则进行译码并自动防错。大回路反馈校验体制的工作过程如下: 在发送端, 将遥控指令控制动作的内容(预令)和动令分开, 首先将指令信息码发送至受控端。受控端对接收的指令信息进行存储, 并产生校验码, 通过遥测通道回送至控制端。控制端将接收的反馈校验码与所发的指令信息码进行对比, 由此判断受控端是否正确接收指令信息。当判定受控端已正确接收指令信息后再发“执行码”。

受控端接受到执行码后,将存储指令输出门打开,使该指令输出,产生预定的控制动作。如没有正确接收指令,控制端先发“清除指令”,清除已存储的指令,然后再发该控制指令的信息码。直到比对正确为止。由于前向防错所用时间较反馈校验方式少得多,所以在中、低轨道的卫星遥控中都采用这种体制。

3.2 数传及通信技术的发展趋势

就目前所用技术来看,存在的不足有,图像数据压缩率不高,信道资源使用效率和数传速率有待提高,需进一步提高数传的抗干扰性、可靠性和安全性;我国在制订小卫星的有关标准时应考虑同国际上通用的技术规范 and 标准相一致。小卫星技术的发展趋势主要表现在:

1. 频段选择。随着小卫星的发展,应用于对地观测的小卫星日益增多,数据量越来越大,图像数据率可达到每秒几十兆比特,较低频段由于受带宽的限制,无法满足更高的数据传输率,因而利用更高频段传输图像成为发展的一个趋势。例如法国的 SPOT 卫星和美国的 LANDSAT 卫星,就是利用 X 频段传输图像的。同时,为了降低小卫星的重量、体积和成本,简化测控和管理系统设备,提高数传速率和 G/T 值,逐渐采用 K 频段进行卫星数传。美国 NASA 研制的第四代卫星上的应答机就用了 Ku 段,并向 Ka 段发展。遥测和遥控也向使用更高的 S 频段发展,以减少干扰,提高可靠性。

2. 调制体制。随着高速数字传输和卫星通信系统的发展,为了充分而有效地利用信道资源,压缩传输频谱宽度,减少码间干扰,新的调制体制将逐渐得到应用。CCSDS 所建议的、将来可能成为遥控和遥测调制体制的标准有: OQPSK(偏移四相相移键控)或 SQPSK(参差四相相移键控)、MSK(最小频移键控)、GMSK(高斯 MSK)。OQPSK 的频谱宽度比 QPSK 小,最大相位突变值为正负 90 度;MPSK 的码元为半正弦波形脉冲,其合成信号不发生相位跃变,因而频谱分布更窄,且它的调制指数比 FSK 还小一半;GMSK 的码元为高斯函数形脉冲。

3. 分包遥测。分包遥测是 CCSDS 制定的遥测标准的关键技术之一,它是一种遥测数据流的数据结构。它和我国目前广泛采用的“IRIG”、“ESA”等遥测数据流结构一样,是空间数据传输结构的一种,在国外空间任务中被广泛应用。由于我国的技术水平限制,目前还处于推广应用阶段,但逐渐和国际通用的标准一致应是我国遥测标准的发展趋势。分包遥测定义了两种数据结构:源包和传送帧。应用基础是允许空间飞行器上同时运行多个应用过程,这些应用过程都被看作是数据源。不同数据源的数据经打包后形成源包,插入到传送帧中。源包由两个主要域组成:长为 48 比特的包主导头和可变长度的包数据域。传送帧位于源包的上层,由源包、闲置数据和专门定义数据组成,包含几个主要域:传送帧主导头、传送帧副导头、传送帧数据域、操作控制域和帧差错控制域。

4. 分包遥控。自 20 世纪 80 年代起,国际上逐步推行新的分包遥控体制,CCSDS 制定了相应的分包遥控建议书。分包遥控就是把遥控信源的命令数据打成包之后经上行信道送到卫星或其它航天器,实现对航天器上过程和设备的高可靠遥控。CCSDS 标准规定了分包遥控系统的七层信息处理结构,提供三种业务。七层结构包括:应用过程层、系统管理层、分包层、分段层、传送层、信道编码层和物理层;三种业务是:信道业务、数据路由业务和数据管理业务。信道业务包含物理层和信道编码层,在星地之间提供一个可靠的数据传输物理信道;数据路由业务包含了传送层和分段层,一方面提供多路径传输能力,另一方面通过实施 ARQ 等机制确保遥控数据传输的可靠性;数据管理业务面向遥控应用过程,包含分包层、系统管理层和应用过程层,提供数据包装及其管理服务,实现过程与物理系统的接口。

总的来讲,随着航天和通信技术的发展,越来越多的新技术将相继应用(下转第 37 页)