

基于 A+X 模式新型星载数传调制器设计

孙哲煜,朱英玮,陈宇豪,章玉珠,徐 利
(上海航天电子技术研究所,上海 201109)

摘要:近年来我国卫星发射量激增,对星载数传调制器需求量也成倍增加。为了应对高密度发射的新常态,相较于传统调制器一对一研制、不便于开展组批调试、测试的缺点,文章基于 A+X 模式开发设计了一种新型星载数传调制器,其采用模块化设计,将常用的状态已固定模块用 A 表示,参数、状态可配置模块用 X 表示,将 A+X 组合装配,使新设计的调制器可通过调整配置项来适应不同型号的技术要求。同时此种设计能将星载数传调制器的研发周期缩短 20%以上,研制成本减少 10%以上,且具备快速投产、批量生产、可组批研制的优点。

关键词:星载;A+X;模块化;数传;调制器

中图分类号:TP391

文献标识码:B

文章编号:2096-9759(2023)06-0047-04

0 引言

星载数据传输调制器是卫星数据传输系统的重要组成部分,其主要功能是正确接收数传基带设备输出的时钟、数据信号,并对基带数据进行位宽变换、组帧加扰、信道编码、幅度调整、带限滤波等处理,通过采用相应调制方式将数据信号搬移到载频上,来实现各类型数据的空间信道传输。一般情况下,星载数传调制器产品还具备与编码调制相关的基础功能,包括电源变换、遥控遥测、载波生成、信号放大等。

传统星载数传调制器采用确定载波频点的上变频和确定编码调制方式的低中频调制的方案。这种设计方案很大的限制了调制器产品的可配置性和扩展性,产品需根据不同型号的要求定制方案研制,浪费了设计生产资源,增加了质量管控难度,不利于星载数传调制产品的通用化和批量化应用。

采用模块化结构设计新型 A+X 模式星载数传调制器,相比于传统方案可以将设计元素下降到功能模块层面。通过对典型产品进行信息流研究,得出其中几个通用模块可以进行状态固化,而另一些模块则仅需调节几个参数、状态变化量就可以完成型号需求上的一一对应多应用。

基于此情况开发出来的 A+X 产品设计实现了产品信息流优化、使得配置项管理更加精细、调试难度大大降低,适用于一种产品类型对应多个型号的新型产研模式,可以实现每年 30 台/套的组批研制交付。升级后新单机的研制模式有利于加速生产,减少产品交付时间和降低单台产品成本,产量可以满足每年各种军用、商用通信、遥感、气象卫星的数据传输需求。

优化设计后的数据传输调制器的产品原理框图见图 1:

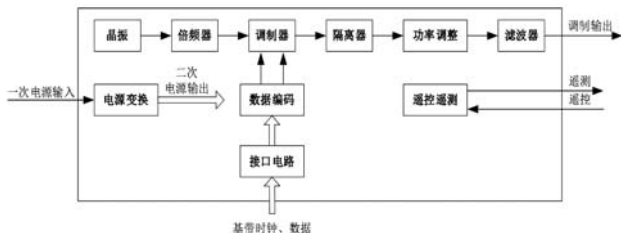


图 1 新型星载数传调制器产品原理框图

更新设计的星载数传调制器,增加了对包含 LDPC 编码方式等多种编码调制方式的支持。可以通过进行硬件配置项设置满足全球开机和境内工作两种任务需求。且升级后的调

制器输出功率可在-3~3dbm 范围内配置,具有体积小,重量轻、成本低等特点,能有效满足未来军用、民用、商业航天对快速化、小型化、低成本和灵活化数传产品的需求。

1 新型星载数传调制器方案设计

基于 A+X 模式新型星载数传调制器设计方案如下:

产品内部采用 A+X(A:固定,X:可配置)模块化设计,共包含 12 个硬件模块和 7 个软件模块,其中硬件模块中含有固化模块 5 个,可配置模块 7 个。软件模块中的 2 个为可配置模块,5 个为固化模块,可根据任务配置需求进行组合选用。调制器的软、硬件模块的种类、数量及可配置项目包络清晰明确,状态受控,可通过 A+X 的配置方式满足不同型号的应用需求。

1.1 硬件 A+X 模块化设计

星载数传调制器硬件由电源本振模块和编码调制模块两个模块组成,其中电源本振模块下有电源变换和本振源两个子模块,电源变换包括一次电源、二次电源及加电控制电路;本振源包括恒温晶振、65 次倍频器。

编码调制模块包括调制电路和编码电路两部分,其中调制电路包括调制单元、输出隔离、输出幅度调整、输出限带滤波单元;编码电路包括 LVDS 电路、FPGA 电路、时钟倍频电路。

新设计以传统调制器产品为基线,整合型号需求进行统型设计升级,先根据功能性能要求对产品软、硬件进行模块划分,之后按照“A+X”的模块化思路,将各个模块分为“A”固化模块和“X”可配置模块。X 模块的可配置特性能使产品在调制方式、编码方式、工作频点、输出带宽、输出功率等指标均可通过配置参数调整,适应不同型号的技术要求。

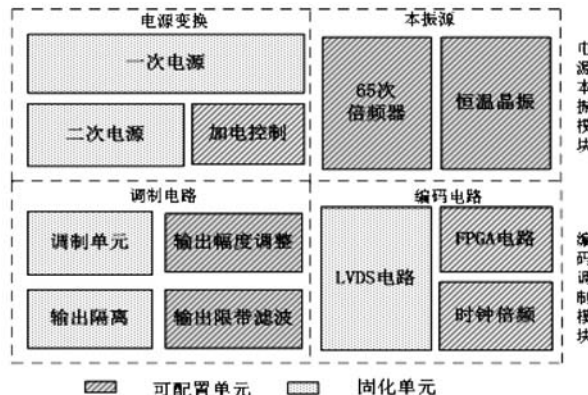
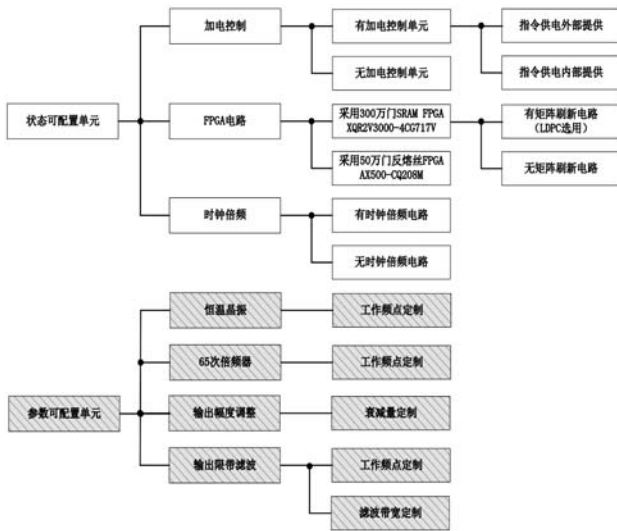


图 2 星载数传调制器“A+X”的硬件模块化示意图

收稿日期:2023-03-12

作者简介:孙哲煜(1991-),男,硕士,助理工程师,主要研究方向:卫星通信方向。

图3 星载数传调制器“ $A+X$ ”的硬件可配置情况

其中本正源中的晶振、倍频器、调制电路中高端滤波器等频率器件为整机中参数可配置的部分，调节这些器件的频点可以实现应对不同载波速率的型号；编码电路中的FPGA电路和时钟倍频电路、调制电路中的功率调整模块为状态可配置模块调节这些模块中的配置设计可以实现不同编码调制方式和不同输出功率的功能。

1.2 软件 $A+X$ 模块化设计

星载数传调制器包含一套数传FPGA处理软件，该软件整体架构已固化由输入接口模块、输出接口模块、位宽转换模块、自主选择单元、差分编码模块、纠错编码模块、时钟管理单元等七个模块组成，如图4所示。



图4 星载数传调制器软件组成框图

星载数传调制器FPGA处理软件按模块化设计，整体软件架构已固化，七个软件模块中实现五个模块的固化复用，差分编码和纠错编码可为可配置项，可按用户需求进行配置。调制器软件模块具体可配置情况如图5所示。

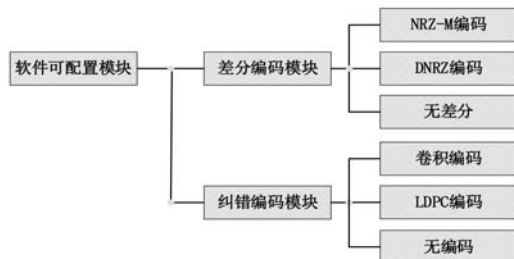


图5 星载数传调制器软件可配置情况

进行 $A+X$ 模块化设计后FPGA软件工作流程如下：FPGA内部软件的输入接口模块完成对基带信号输入时钟、数据的采集，自主选择单元通过判断输入时钟的有效性完成交叉备份通道或工作模式的自主选择，之后再将有效时钟信号送入锁相环电路进行倍频，倍频后的时钟信号经FPGA内部时钟管理单元处理后分配给其他模块使用，差分和纠错编码模块对有效数据进行差分编码（NRZ-M/DNRZ可配置）、纠错编码（CONV/LDPC可配置）处理，最后经输出接口模块将I、Q两路的输出时钟、数据送入调制单元进行调制。

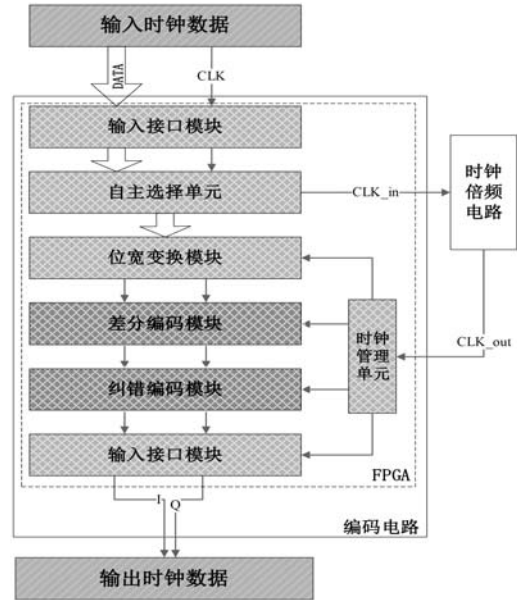


图6 星载数传调制器软件模块化工作流程

2 $A+X$ 模式配置方式应用设计

星载数传调制器通过详细的需求分析和规划，在详细设计阶段形成了12个硬件模块和7个软件模块。12个硬件模块中3个模块状态可配置，4个模块参数可配置，其余模块状态固化。7个软件模块中5个固化2个可配置。硬件、软件模块可配置情况分别如图3、图5所示。组成星载数传调制器的软、硬件模块的种类、数量和可配置项已完全固定，后续无需再进行设计更改，只需通过软、硬件配置后即可满足不同型号的任务需求。

调制器各模块的状态和功能如表1所示：

表1 调制器各模块的可配置状态及功能

模块名称	状态	功能
电源本振模块	一次电源	固化
	二次电源	固化
	加电控制	状态可配置
	65次倍频器	参数可配置
	恒温晶振	参数可配置
编码调制模块	调制单元	固化
	输出隔离	固化
	输出幅度调整	参数可配置
	输出限带滤波	参数可配置
	LVDS电路	固化
编码电路	FPGA电路	状态可配置
	时钟倍频	状态可配置

2.1 调制器各模块参数可配置实现方式

在整合需求和设计提升的基础上,按照模块化思路设计的新型调制器产品,可以在实现产品最大技术状态包络和对外接口设计定型的同时,通过配置文件对图纸中的 BOM 和元器件等可配置项进行选配,通过通用协议+补充协议的方式对外协组件进行技术状态管控,从而实现对产品工作频率、带宽、编码方式、码速率等关键参数的配置管理,以满足不同型号的需求。

根据设计分析,星载数传调制器硬件参数可配置模块划的配置项如下所示。

参数可配置的 65 次倍频器 NC5809M(XX)具有 X1、X2、X3、X5、X6、X7、X8、X9 等 8 个频点。参数可配置的恒温晶振 OCXO(XX)具有 X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8、X9 等 8 个频点。参数可配置的腔体滤波器 7FD10(XX)具有 X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8、X9 等 9 个选配(X2、X4 同频点,带宽不同)。这些频点的硬件组合配对能适应不同型号的不同需求,体现了 A+X 模块化设计在产品适应性上的优越性。

编码调制模块中的参数可配置模块如输出幅度调整模块可选配 2-6dBm 衰减的温补衰减器,对整机的输出功率进行调整,使其满足不同指标要求,而 FPGA 电路和时钟倍频电路等状态可配置单元则可以通过选用不同类型的 FPGA 和锁相环来实现不同码速率的数据传输以应对全球开机或者短时开机的任务需求。

2.2 编码调制模块组合配置实现方式

2.2.1 可选编码方式分析

(1)Conv 卷积编码分析:

Conv 卷积码是在指编码过程中,一个码组中 r 个监督码与信息元的关联性不仅与现码组相关,还可扩展到以前若干个码组,在译码时不仅从现码组中提取译码信息,还可从与监督码相关的各码组中提取有用的译码信息。一般使用的译码法是维特比于 1967 年提出了卷积码的译码算法。维特比是一种基于码的网图的最大似然译码,是最佳的概率译码法。

(2)LDPC 纠错编码分析:

LDPC 低密度奇偶校验(Low Density Parity Check)码是加拉格尔在 1962 年提出的一种前向纠错编码,具有译码速度快、误码性能接近香农极限、无错误平层等优点。经常使用的 QC-LDPC 码则是一种基于几何构造的 LDPC 码,在继承 LDPC 码的全部有点同时有效降低了编译码的复杂度。

表 2 不同编码方式性能汇总表

信道编码	RS 码(参考)	卷积码	LDPC 码
检、纠错能力	强	强	强
反向信道	不需要	不需要	不需要
编码增益	低	较高	高
编码效率	中	中	高
适合纠错类型	突发性误码	突发性误码 随机性误码	突发性误码 随机性误码
实时性	最好	好	好
译码复杂度	最简单	简单	较复杂
成本	低	低	高

2.2.2 可选调制方式分析

QPSK/OQPSK 调制方式分析:

PSK 相移键控是一种基于转换固定频率的载波相位来表

示想要传输信号的数字调制方式。

比起用相差 180° 相位的载波信号进行调制的 BPSK 调制方式来说, QPSK 四相绝对相移键控(Quadrature Phase Shift Keying),是一种用一对数字比特对(数元)代替一系列数字流来代表一个信号元素进行调制的调制技术。

QPSK 可以看做由经过串并变换、经过极性转换后分成的两个速率为原来一半的双极性序列, $I(t)$ 和 $Q(t)$ 拼接而成。QPSK 用载波的四个不同相位(00, 01, 10, 11)来表示数字信息,其抗干扰能力强,频带利用率比 ASK、BPSK、FSK 等更高。

而 OQPSK 偏移正交相移键控(Offset Quadrature Phase Shift Keying)则是改进型 QPSK 调制。与 QPSK 的不同点在于 OQPSK 在同相和正交 90° 支路的码流错开了二分之一周期($2/T$)。这样的话 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 路的码元相位相差了半个周期,就不会出现有一路以上的码元同时发生极性翻转的情况。所以 OQPSK 信号的相位只可能出现 0° 、 $\pi/2$ 的而不会出现 π 相位的跳变。OQPSK 调制的恒包络特性,克服了 QPSK 的缺点,使其受非线性特性影响很小,通过带通滤波器后包络起伏小,能支持更高效率的放大器。

2.2.3 配置组合设计

通过上述针对编码方式和调制方式的分析,可见为了让星载数传调制器能够实现多种编码和调制方式可配置,同时提高 FPGA 软件的复用率,应通过 FPGA 实现各种不同的编码和调制功能单元,再将这些单元以一定形式组织和串联起来,通过数据流向的切换,使星上数据经过不同的功能单元,最终实现不同编码调制方式的组合。针对这一设计,首先需明确编码调制的各类组合方式,并形成配置真值表,再针对这一逻辑关系,开展 FPGA 软件架构的设计。可选配置方式的真值表见下表。

表 3 可选配置方式的真值表

输入		编码方式输出				调制方式输出	
配置信号		无	LDPC	Conv (2, 1, 7)	Conv (4, 3, 7)	QPSK	OQPSK
00	0	1	0	0	0	1	0
00	1	1	0	0	0	0	1
01	0	0	1	0	0	1	0
01	1	0	1	0	0	0	1
10	0	0	0	1	0	1	0
10	1	0	0	1	0	0	1
11	0	0	0	0	1	1	0
11	1	0	0	0	1	0	1

根据前文分析,目前主流的编码方式有卷积和 LDPC 编码两种,相比前者,LDPC 具有更高的编码增益,在极限误码性能、无错误平层和译码速度等方面更具有优势,但是资源占用率较高,从设计上说,调制器 FPGA 的资源应保证大于各类编码所需资源的总和,同时还应具备较为充裕的时钟和 RAM 资源用于数据处理。这一需求为 FPGA 的选型提供了输入条件。

后续配置方式的实现方式是在 FPGA 中实现多种编码调制方式的基本架构,通过 FPGA 外部引脚接高低电平的方式,切换数据开关,实现如上表所示的配置模式。

2.3 A+X 可配置模式的具体实现方式

为实现星载数传调制器的通用化设计,在实现多种编码方式和调制方式的同时,还需要通过 FPGA 模块的复用和状态量的配置,使产品在软硬件技术状态固化的情况下,实现多种编码调制方式的切换。

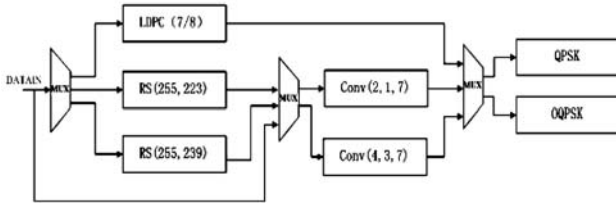


图 6 多种编码调制方式配置的实现

通过引入数据开关和时钟管理单元,在完成数据流规划的基础上,形成如图所示的编码调制固定架构,通过硬件上 FPGA 的配置引脚信号,确定选择何种编码调制方式的组合实现调制器功能。采用此种方式,对单机对外接口、内部接口、FPGA 产品等技术状态均无影响,有利于实现硬件平台的统型设计,同时也提升了 FPGA 产品的复用率。

3 新型星载数传调制器测试与验证

采用该种方案,新设计的星载数传调制器减少了研制过程中的重复设计,使用通用设计文件提高了产品可靠性,利用灵活配置的方式实现了单机快速生产调试、测试。在单机机械尺寸及对外接口不变的情况下电性能测试指标满足型号通用指标要求。在单机验收测试过程中数据接收发送正常,星座图正常,误码率及幅相不平衡等关键指标正常。详细测试图片如表 4 所示。

表 4 新型星载数传调制器测试指标一致性

测试项目	单位	设计指标	测试指标	指标一致性
载波频率精度	/	2×10^{-6}	4.5×10^{-7}	符合
传输码速率	Mbps	450	450	符合
编码方式	/	NRZ-L	NRZ-L	符合
调制方式	/	QPSK	QPSK	符合
加噪误码率	/	0	0	符合
幅度不平衡度	dB	<1.0	0.1	符合
相位不平衡度	°	<4.0	1.0	符合
输出功率	dBm	-2~2	0.81	符合
工作电压	V	28	28	符合
功耗	W	<12	8.12	符合
工作稳定性	/	无故障	无故障	符合
热环境适应性	/	性能指标满足	性能指标满足	符合

(上接第 46 页)

参考文献:

- [1] 张微微,杨海宁.改进人工鱼群算法的无线传感器网络节点覆盖优化[J].电子技术与软件工程,2020,(12):24-25.
- [2] 神显豪,马雪皎,牛少华,等.基于改进狮群算法的管道传感器网络覆盖优化[J].传感技术学报,2022,35(09):1268-1276.
- [3] 贾鹤鸣,孟彬,魏元昊,等.改进算术优化算法的无线传感器网

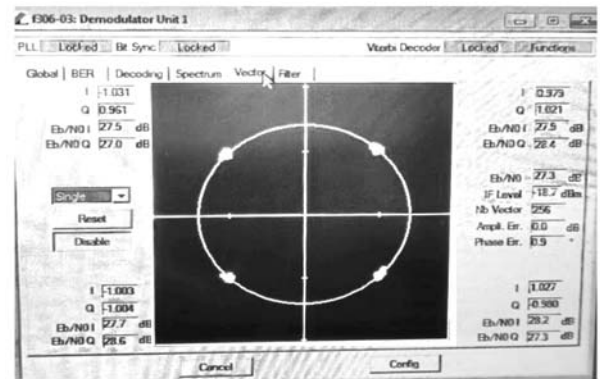


图 7 星载数传调制器测试星座图

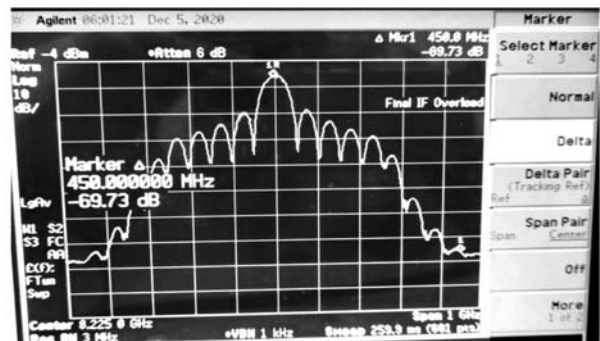


图 8 星载数传调制器测试频谱图

4 结语

本文结合工程实际和总体需求,设计研制了一种基于 A+X 模式新型星载数传调制器,实现了同类型产品的最大包络涵盖,实现小批量组批研制,能满足最新型号任务的同时符合现阶段交付数量,做到小型化、通用化的同时减少成本和研制周期。具有极大的军事和民用航天应用价值。

参考文献:

- [1] 姜亚祥,王平连,郭丽莉,沈明. X 波段发射机本振源设计[C]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第十七次学术会议论文集,2004:431-436.
- [2] 沈林平.超小型锁相测发射机模块化研制[J].上海航天,1996(03):27-31.DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.1996.03.006.
- [3] 张倩,李刚,唐浩.高速数传 X 波段发射机的设计与实现[J].空间电子技术,2003(04):52-57.
- [4] 王晓涛,刘振华.基于 CCSDS(8176,7154)LDPC 码的缩短码性能研究[J].信息通信,2015(02):45-46.
- [5] 刘宝军,王中训,娄阳,张珉,钟强.基于 FPGA 实现的 QPSK 调制器的设计[J].空间电子技术,2016,13(04):61-63.
- [6] 高韵淇,钟俊森,张仕忠,张立立.模块化无线通信射频接收系统的设计与实现[J].教育教学论坛,2020(35):390-392.
- [7] 贾鹤鸣,李玉海,文昌盛,等.改进白骨顶鸡优化算法的 WSN 网络覆盖[J].福建工程学院学报,2022,20(06):561-566.
- [8] 王振东,刘燧桃,胡中栋,等.改进差分进化算法下的无线传感器网络覆盖优化[J].小型微型计算机系统,2020,41(05):1041-1046.
- [9] 张清国,张勇,张伟,等.基于蜂窝结构的改进混合无线传感器网络覆盖优化算法[J].计算机工程,2022,48(12):172-179.