

航天箭载无线收发机遥测参数设计

陈伟, 赵锦瑾, 李大全, 宁高利

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 箭载无线收发系统由于涉及的产品和环节较多, 且天线属于结构件又不便于状态监测, 导致故障定位的难度通常较大; 若能在进行箭载无线收发机设计时就设置全面、合理的遥测参数, 作为划清与外部设备接口界面的依据, 则可为系统故障定位提供更多有力支撑; 基于对历次飞行试验中因遥测参数设置不合理造成故障难以定位案例的研究, 从利于故障定位的角度出发提出了在接收机中设置“灵敏度遥测”、“锁定指示遥测”参数和在发射机中设置“功率遥测”参数的建议; 对于能够设置更多遥测参数的无线收发机, 可以进一步考虑设置“电压监测”参数、“本振锁定”和“信噪比 SNR”等参数; 结合具体案例, 分析了遥测参数设置不合理对故障定位造成的不良影响以及遥测参数改进设计的具体方法, 供后续开展设计时参考。

关键词: 无线收发机; 遥测参数; 故障定位

Design of Telemetry Parameters for Aerospace Wireless Transceiver

Chen Wei, Zhao Jinjin, Li Daquan, Ning Gaoli

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: It is usually difficult for fault locating of the aerospace wireless transceiver system, due to it involves so many products and the antenna are not convenient for state monitoring. With reasonable telemetry parameters setted in the design of aerospace wireless transceiver, the problem of fault location of wireless transceiver system can be solved by distinguishing the interface between the wireless transceiver and other devices. Based on case studies of difficulty in fault locating caused by unreasonable telemetry parameter setting in previous flight experiments, the suggestions of setting sensitivity telemetry parameters and locking indicating telemetry parameters in the receiver, setting power telemetry parameters in the transmitter are put forward from the perspective of facilitating fault location. For wireless transceivers that can set more telemetry parameters, parameters such as voltage monitoring parameters, local vibration locking parameters and signal-to-noise ratio parameters can be further considered. Combined with a specific case, this paper analyzed the bad influence of unreasonable telemetry parameter setting on fault location and the specific method of improving telemetry parameter design for future design reference.

Keywords: wireless transceiver; telemetry parameters; problem positioning

0 引言

箭载无线收发系统是运载火箭的组成部分, 同时也是航区测控系统的重要组成部分。箭载无线收发系统的故障定位除了涉及箭载无线收发设备、天馈设备、低噪放/功放单元及其连接状态外, 还涉及到地面站、无线信道、伺服跟踪的工作状态。由于涉及的产品、环节和部门较多, 天线因属于结构件又不便于状态监测, 导致故障定位的难度通常较大。

遥测参数是地面人员在火箭起飞后有效判断箭载设备工作状态的主要信息源, 也是出现问题时开展故障排查的重要依据。若能在进行箭载无线收发机设计时就设置全面、合理的遥测参数, 作为划清与外部设备接口界面的依据, 则可为系统故障定位提供更多有力支撑。本文从利于故障定位的角度, 提出了遥测参数设置建议及原则, 供后续开展设计时参考。

1 箭载无线收发机结构

按照功能划分, 航天箭载无线收发机主要包括安全指令接收机、遥测发射机、外测应答机和转发器等产品。从设备实现原理和无线电架构角度讲, 箭载接收机主要为超外差接收机; 遥测发射机有零中频和二次变频(又称中频调制变换)发射机两种形式; 应答机分为相参应答、非相参应答和混合型连续波应答机(同时包含相参应答和非相参应答形式)3种形式; 转发器的结构和非相参应答机类似, 在其基础上取消了基带部分。为了后文阐述方便, 本文以超外差接收机、二次变频及零中频发射机、混合型连续波应答机为例进行论述。

1.1 超外差接收机结构

超外差结构接收机将接收的射频信号与设备内部的本振信号(local oscillator, LO)混频得到中频信号, 并在中频链路进行信道选择、完成接收链路的大部分增益, 再将中频信号下变频到基带进行后续处理。采用超外差结构的

收稿日期: 2020-07-25; 修回日期: 2020-09-02。

作者简介: 陈伟(1984-), 男, 湖北天门人, 高级工程师, 硕士, 主要从事飞行器无线测控通信系统总体设计方向的研究。

引用格式: 陈伟, 赵锦瑾, 李大全, 等. 航天箭载无线收发机遥测参数设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 32-36, 41.

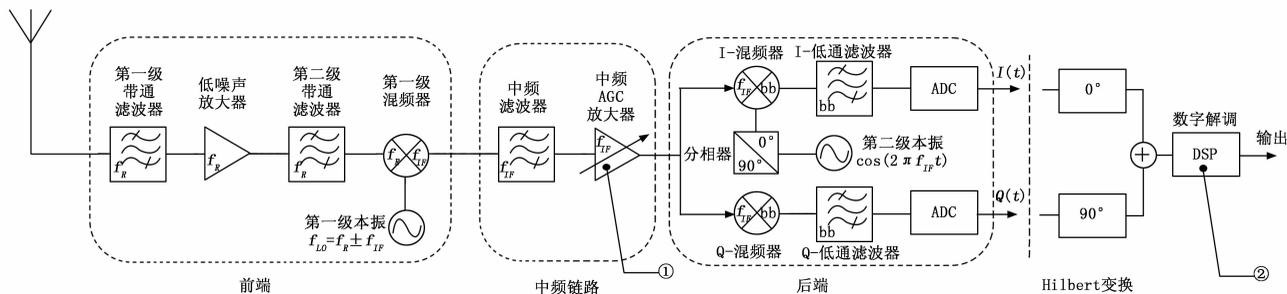


图1 超外差接收机结构框图

接收机具有良好的接收灵敏度、选择性和可靠性, 抗干扰能力强, 是当前航天箭载接收机的主流接收机形式。

图1为超外差接收机的典型结构示意图。信道部分按照工作频率, 分为前端、中频链路和后端三部分。其中前端的两级带通滤波器用于抑制远离有用信号的各种寄生干扰效应, 第一级混频器将射频信号下变频至中频; 中频链路中的滤波器滤除第一级混频产生的干扰信号, 并完成信号的大幅度放大; 后端实现正交解调和基带处理。信道信号经过采样后生成数字信号, 再经过希尔伯特变换(Hilbert变换)进入通用数字处理器件内进行数字解调, 输出数字基带信号^[1]。

1.2 二次变频和零中频发射机结构

二次变频发射机通过第一混频器得到数百兆赫兹的中频信号, 再经过带通滤波器滤除本振信号后进入第二混频器和功率放大器, 得到最终的输出信号。由于该结构有效解决了两级本振牵引、镜频抑制等问题, 且降低了中频带通滤波器高Q值的压力, 成为传统遥测发射机首选的结构形式。

图2为二次变频发射机的典型结构框图, 基带信号 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 经过调制器, 输出一个位于中频的组合信号 $S(t)$; 带通滤波器1用于抑制中频发射带宽以外的所有干扰信号, 如本振谐波、镜像噪声等; 混频器将中频信号转换成最终发射频率的信号; 带通滤波器2用于滤除上变频变换所产生的无用镜像信号; 功率放大器完成射频信号的功率放大; 低通滤波器用于抑制功率放大器的谐波; 最后, 射频信号通过功分器和发射天线辐射到自由空间。

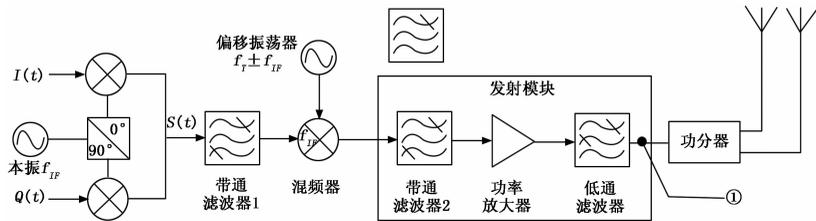


图2 二次变频发射机结构框图

随着半导体工艺技术的进步以及对无线测控设备小型化、集成化需求的不断增强, 基于正交调制的直接正交上变频(direct quadrature up-conversion, DQUC)技术得到了迅速发展。通过采用IQ校准等方法, 解决了零中频发射机无用边带和本振泄露的难题, 使零中频发射机展现了良

好的应用前景。近年来, 部分航天箭载发射机开始采用零中频发射机, 图3为其典型结构框图。基带信号 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 与正交本振信号作用后直接变频到最终的发射频率 f_r , 在调制器输出端组合成信号 $S(t)$, 再经过功率放大器和带通滤波器完成功率放大和谐波抑制; 最后通过功分器和发射天线辐射到自由空间。

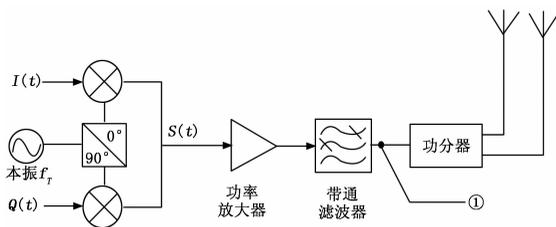


图3 零中频发射机结构框图

与二次变频方案相比, 该发射机的电路结构更简洁, 省去了中频和射频本振源电路、中频和射频混频器以及中频滤波器电路等, 大幅降低了发射机系统的复杂度、体积、重量和功耗。

1.3 混合型连续波应答机结构

图4为混合型连续波应答机的典型结构示意图。接收信号中有一路工作于相参状态, 该路接收信号经过两次下变频后进入中放单元进行滤波和中频放大处理, 接着进入锁相环完成载波锁定和侧音解调, 其转发的已调信号与接收信号是相位相干的; 另有两路信号工作于非相参状态, 在中频段与相参信号提取的载波信号进行第三次混频, 并传输至发射模块的相加器, 这两路信号与接收信号的相位是不相干的。^[2]接收单元主要对天线接收的微弱射频信号进行低噪放大、混频, 输出中频信号; 中放单元对信号进行放大、AGC控制, 压缩动态范围使其输出电平基本恒定; 锁相解调单元完成侧音信号解调放大, 送发射单元重新调制; 发射单元进行微波调制并对已调信号功率放大输出。

2 主要遥测参数设计

2.1 接收设备遥测参数

2.1.1 灵敏度遥测

箭载接收机(或接收模块)与其天馈的物理接口界面

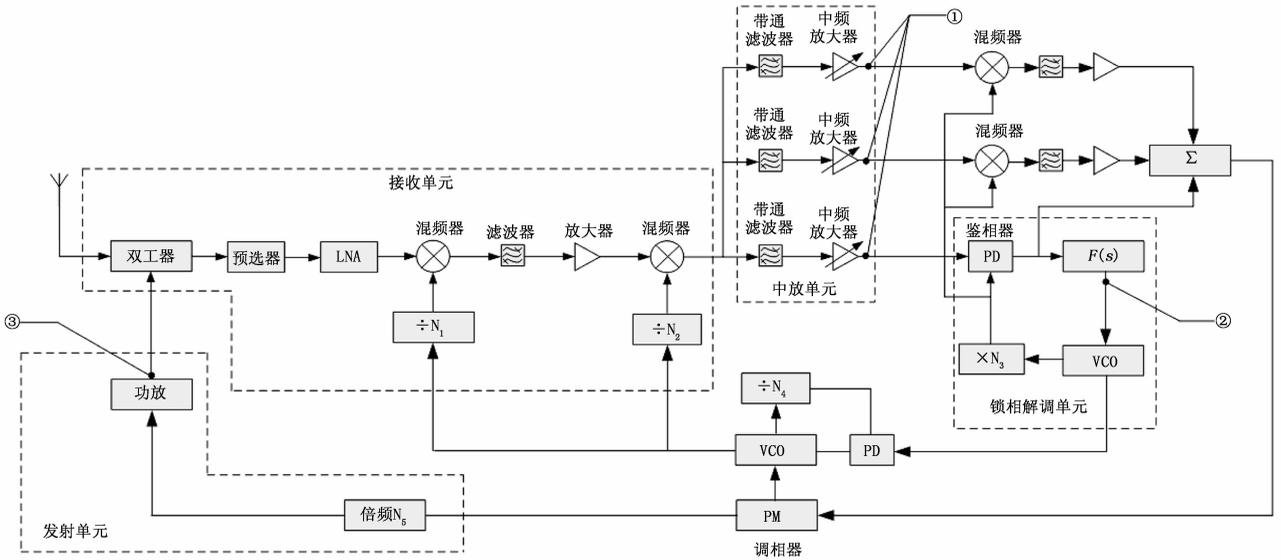


图 4 混合型应答机结构框图

是连接两者的 TNC 馈电座。为了分清接收设备和天馈的责任界面，理想情况下，应该在该 TNC 馈电座处设置一个遥测参数用以判定射频信号电平强度是否满足预定指标要求。但在此处设置遥测参数，存在电路实现上的困难：一是接收机的灵敏度通常都在 -100 dBW 以下，对如此微弱的信号难以进行直接检测；二是由于滤波器器件的 Q 值限制，在射频频段上难以将信号带宽外的噪声滤除干净，从而会影响判定的正确性。退而求其次，一般在中频链路中进行输入信号强度检测。由于射频端对信号的放大倍数是固定值，射频输入信号的电平强度与中频链路输入信号的电平强度成正比，通过对中频信号电平强度进行检测一定程度上也能反映射频输入信号电平强度是否合格。

为了适应不同的通信距离及通信环境中的信号衰落，设备接收射频信号的电平范围通常在 60 dB 以上。考虑到后端基带电路需要稳定的电平输入，通常在中频链路进行自动增益控制 (AGC)。AGC 放大器对输入的中频信号进行信号强度检测，并将表征信号强度的“AGC 信号强度指示”参数送入到比较器中。当输入中频信号强度高于设备灵敏度时，比较器输出高电平；当中频信号强度低于设备灵敏度时，比较器输出低电平，从而实现了输入信号电平的强度检测。习惯上，将这种表征输入信号是否高于设备灵敏度的遥测参数称为“灵敏度遥测”。参数设置的位置见图 1、图 4 中的序号①。

图 5 为某接收设备灵敏度遥测电路示意图。通过对中频 AGC 放大器电路中的输入信号进行检波、放大，生成表征输入信号电平强度的“AGC 信号强度指示”参数，该电数值输入到灵敏度遥测参数电路，并与运算放大器 N19 预先设定的“比较电压”进行比较。当“AGC 信号强度指示”大于“比较电压”时，灵敏度遥测参数电路输出高电平，表示输入的射频信号电平强度超过设备的灵敏度；反之，灵敏度遥测参数电路输出低电平，表示输入的射频信号电

平强度不满足设备灵敏度要求。

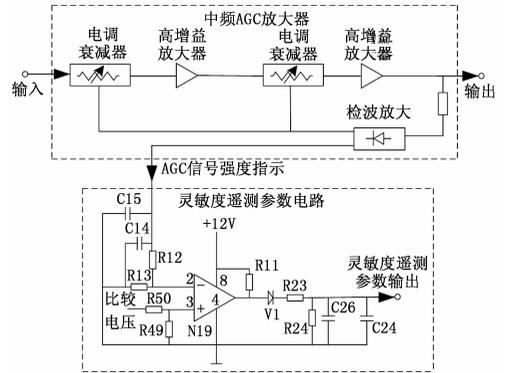


图 5 灵敏度遥测参数电路示意图

2.1.2 锁定指示遥测

灵敏度遥测是从能量的角度对输入信号电平强度进行检测，该参数对于所有的接收设备都适用；对于存在数据解调环节的接收设备，还常用“锁定指示遥测”参数来反馈设备接收射频信号状态。利用锁相环在中频链路产生与发射信号同频同相的载波信号是所有接收设备进行相干解调中的必要环节，由于环路处于锁定状态和非锁定状态时，环路中的控制电压数值存在差别，因此通过将环路中的控制电压引出并进行调理、隔离和分压，便得到表征主环锁定状态的“锁定指示遥测”参数。

与“灵敏度遥测”参数容易受到中心频率附近的强噪声信号干扰而出现虚假指示不同，“锁定指示遥测”参数表征接收设备锁相环已经完成了对射频信号的载波锁定，其虚假指示概率极低。对于存在数据解调环节的接收设备，可以采用“锁定指示遥测”替代“灵敏度遥测”。该参数设置的位置见图 1、图 4 中的序号②。对于采用射频捷变收发芯片的新型数字接收设备而言，这些射频捷变芯片大多提供载波锁定状态，设计人员可以直接将该参数引出，对其

进行数据处理即可得到“锁定指示遥测”参数。

图 6 为某接收设备锁定指示遥测电路示意图。当锁相环路处于锁定状态时, 环路控制电压为 $X_i \pm 2.5$ (V), 双比较器集成电路 LM193 对其处理后输出锁定指示遥测参数, 数值为 4 V, 表示输入的射频信号正常; 当锁相环路未锁定时, 由于控制电压在 $X_i \pm 2.5$ (V) 范围外, 比较器输出 0 V, 表示输入的射频信号异常, 或者信道、锁相模块异常。

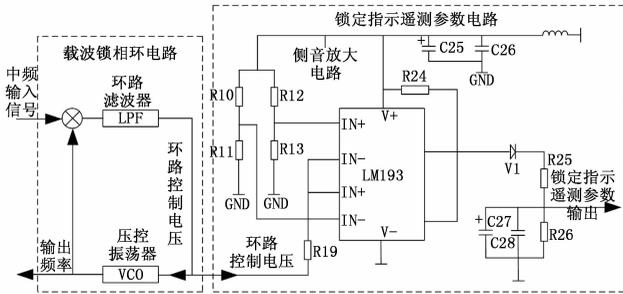


图 6 锁定指示遥测参数电路示意图

2.2 发射设备遥测参数

发射机(或发射模块)与其天馈的物理接口界面是连接两者的 TNC 馈电座。在发射设备的射频输出口进行发射信号的电平强度检测, 设置表征设备输出功率电平的“功率遥测参数”, 可以有效判定发射设备与天馈的工作状态是否正常。参数设置位置见图 2 和图 3 中的序号①, 以及图 4 中的序号③。

图 7 是某发射设备功率遥测参数设置位置及信号耦合示意图。通过将耦合器和检波电路设置在射频信号输出口, 功率遥测参数可以真实反映设备输出口的功率。当地面站接收下行信号幅值电平异常时, 若遥测参数可信且“功率遥测参数”异常, 则问题出现在发射单元射频信号输出之前, 可以排除发射天馈故障模式; 若“功率遥测参数”正常, 但地面站接收信号信噪比低且频谱幅值异常, 则可以排除发射设备故障模式。

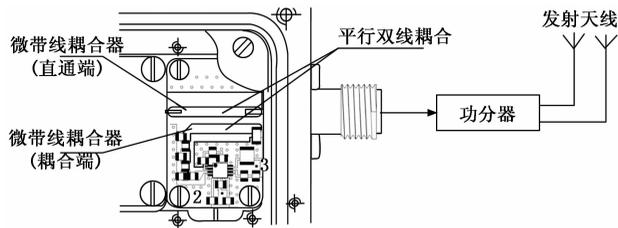


图 7 功率遥测参数设置位置及信号耦合示意图

图 8 为“功率遥测参数”电路示意图。耦合线耦合的射频信号通过 4R2~4R4 组成的 π 型网络, 进入由 4C1、4C2 及 4L1 组成的高通滤波器, 用于降低从射频输出口馈入的低频段射频信号的影响, 射频信号进入检波器后转换为电压信号完成射频信号的功率检测。

2.3 电压监测参数

一次电源及二次电源电压正常是无线收发设备正常工作的外部条件。在遥测传输设备信道容量允许的情况下,

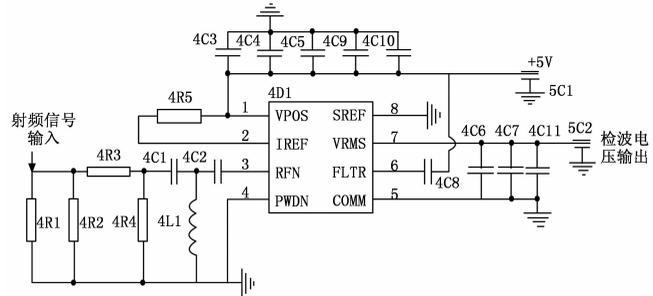


图 8 某发射机功率遥测参数电路示意图

有必要对无线收发设备电源模块的一次电源电压和二次电压监测参数进行采集并通过遥测设备进行下传。当箭载无线收发设备出现问题时, 可以利用上述电压监测参数对设备供电环节的情况进行判定。

2.4 其它参数

除上述参数外, 无线收发设备所用的芯片也具备提供一些自身工作状态参数的功能, 设计人员可以根据需要对其进行采集。

对于接收设备, 比较常用的有:

- 1) 各模块中表征芯片频综工作状态是否正常的“本振锁定”参数;
- 2) 中频模块中, 表征接收信号电平强度的“AGC 控制电压”参数;
- 3) 解调模块中, 表征载波恢复锁相环状态的“载波锁定”参数;
- 4) 解调模块中, 表征接收信号质量的“信噪比 SNR”参数。

对于发射设备, 比较常用的为各模块中表征芯片频综工作状态是否正常的“本振锁定”参数。为了使地面人员更加全面、详细地掌握箭载收发设备工作情况, 在遥测传输设备信道容量允许的情况下, 设计人员可将以上参数通过遥测设备下传。^[4-12]

3 遥测参数不合理案例

图 9 为某箭载转发器结构框图及遥测参数设置情况。地面上行信号通过接收天线进入转发器, 经过低噪声放大、滤波、放大、变频、AGC 等环节后, 在分路器中被分为两路, 其中一路信号经过功放单元等环节后作为转发信号发射至地面站。另一路通过检波电路和运算放大器后得到两个数值, “AGC 放大器控制电压”与射频输入信号成正比, 用于控制 AGC 放大器的增益; “AGC 功率检测电压”与检波得到的信道功率电平成正比, 作为转发器唯一的遥测参数发送至地面站。

根据“AGC 功率检测电压”遥测参数的设计原理, 该路参数表征该单机中分路器输出信号的功率强度。由于该转发器设计时的目标接收信号为低于噪声门限的扩频信号, 所以在没有收到输入信号的情况下, 接收信道亦能将噪声能量放大到预定值附近, 因此该参数的数值不能反映输入信号的是否正常; 此外, 由于该参数表征的是功放模块前

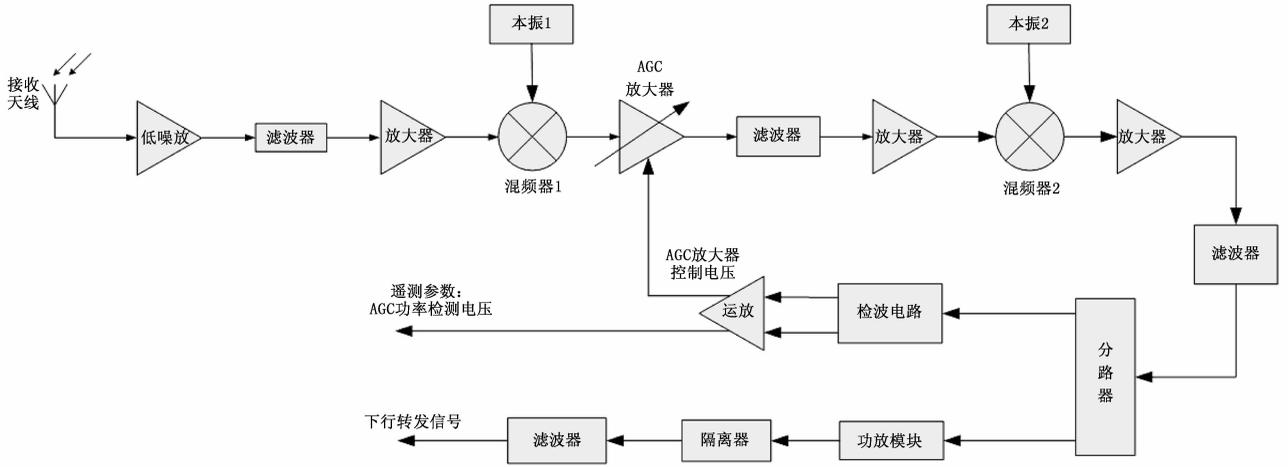


图 9 转发器信号流向及遥测参数设置点

的信道功率强度，因而亦不能表征功放单元或设备射频输出出口的功率。某次试验中，地面站接收的下行数据信噪比异常，数据获取时段显著短于规定值，但是该转发器“AGC 功率检测电压”遥测参数数值一直显示正常，无法为故障定位有效信息支撑，对故障定位的工作量和准确性带来了很大的挑战。

4 遥测参数重新设计及实验结果分析

对前述转发器进行遥测参数重新设计：1) 中频链路中“AGC 放大器控制电压”与输入射频信号电平强度正相关，将其引出作为表征输入信号电平强度的“灵敏度遥测”参数；2) 在射频信号输出处，接入“耦合器”，将功放模块输出的信号中分出一部分射频信号，经检波器检波后变成直流信号，该信号与设备最终输出的转发信号大小线性相关，将其作为“功率遥测参数”。经过遥测参数重新设计后的转发器原理图见图 10 所示。

对重新设计后的转发器开展转发器“工作状态与遥测参数对应关系”实验。实验数据如表 1 所示。

表 1 转发器设备工作状态与遥测参数数值对应关系

序号	设备状态	灵敏度遥测参数/V	功率遥测参数/V	备注
1	输入动态范围内的中强电平	3.47	2.00	正常状态
2	接收信道串接 15 dB 衰减	3.15	2.00	/
3	接收信道串接 80 dB 衰减	0.02	2.00	/
4	在耦合器和检波器间串接 15 dB 衰减	3.47	1.80	/
5	在耦合器和检波器间串接 80 dB 衰减	3.47	0.02	/

根据表 1 可见，“灵敏度遥测”参数表征了接收信号的电平强度，当接收的射频信号强度下降时该参数也会有所下降；当射频信号强度下降至超出输入动态范围时，“灵敏度遥测”参数下降至 0 附近，此时表征地面站上行信号 EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power, 等效各向同性

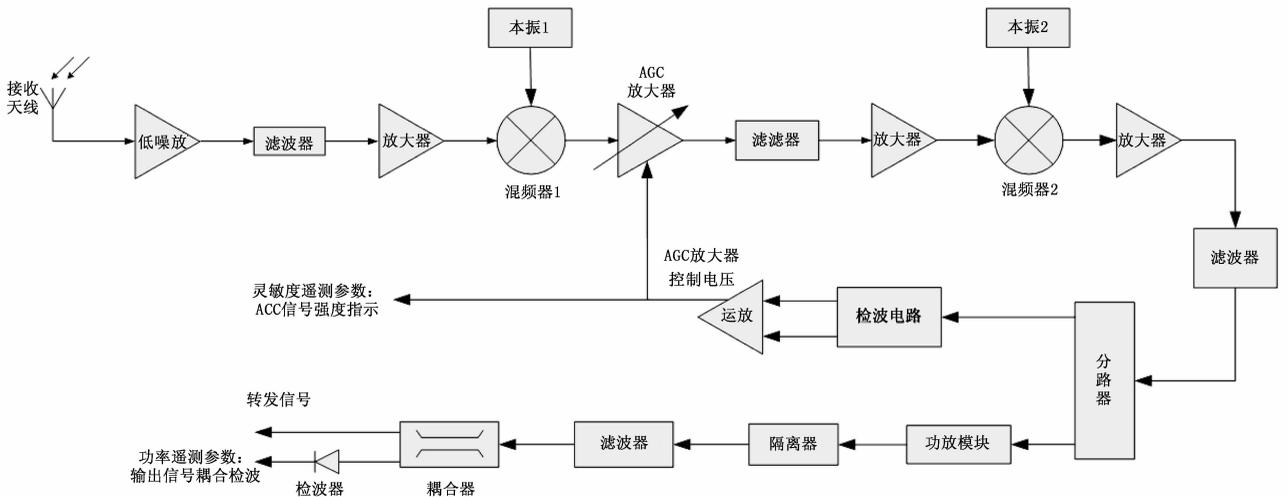


图 10 转发器信号流向及遥测参数设置点

(下转第 41 页)