

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.06.003

引用格式:肖小兵,胡建平.测控通信系统射频资源可重组技术[J].电讯技术,2014,54(6):707-712. [XIAO Xiao-bing, HU Jian-ping. RF Resources Reconstruction in TT&C Communication System[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(6):707-712.]

测控通信系统射频资源可重组技术*

肖小兵**,胡建平

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:测控通信系统的资源重组将是飞行器测控通信系统的发展方向。在中频实现测控终端重组的基础上,通过对射频重组构架的分析,得出了射频交换网络的性能和射频远距离传输的性能直接影响射频重组的可行性,提出了一种可行的全系统资源重组的测控体系构架,即采用微光电子射频交换网络与射频光波传输技术实现射频信号大规模交换及远距离传输,再结合中频重组以实现全系统资源重组,并对相关性能进行了分析。所提出的设计思路可供测控通信系统实现全体系的资源重组借鉴及参考。

关键词:测控通信系统;射频资源;动态重组;微光电子;测量精度;距离零值

中图分类号:V556 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)06-0707-06

RF Resources Reconstruction in TT&C Communication System

XIAO Xiao-bing, HU Jian-ping

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

Abstract: Resources reconstruction is the development direction of TT&C communication system for aerial vehicles. Based on the TT&C terminal reconstruction in the intermediate frequency and analysis of the architecture of the RF resources reconstruction, it is concluded that the performance of RF switching network and RF remote transmission directly affects the feasibility of RF resources reconstruction. This paper proposes a feasible TT&C architecture of the entire system reconstruction. According to the architecture, micro-optoelectronic RF switching network and the RF optical transmission technology are adopted to realize large-scale exchange and remote transmission of RF signal, and then the entire system reconstruction in combination with the TT&C terminal reconstruction. The system performance is analyzed. The idea proposed by this paper can be used for reference in the entire system resources reconstruction of TT&C communication system.

Key words: TT&C communication system; RF resources communication system; dynamic reconstruction; micro-optoelectronic; accuracy of measurement; range zero value

1 引言

随着我国航天技术及空间科学活动需求的快速发展,航天器发射的密集程度不断增加,地面测控通信网中一个个相对独立的测控系统资源已难以满足日益增长的航天器测控需求,通过对测控资源的动态重组是有效的解决方案^[1-2]。

为提高设备运行效益及系统设备冗余备份能力,未来的测控站必将按照测控资源动态重组技术总体思路进行建设。在中频上实现测控系统的资源重组^[1-2]已在工程中逐步实现,一定程度上解决了某些大型测控站内测控终端的共享和重组,但离整个测控通信系统资源重组还有一定差距。

* 收稿日期:2014-03-26;修回日期:2014-05-27 Received date:2014-03-26;Revised date:2014-05-27

** 通讯作者:xzf0882@sina.com Corresponding author:xzf0882@sina.com

从射频频段就实现资源的可分配与利用是实现整个测控通信系统体系内的资源重组更有效的解决方案。通过射频资源的重组分配,再结合中频测控终端资源的可重组,即可构成真正意义上的资源可重组测控资源池,在这个大的资源池内,通过具有可重组资源管理能力的集中监控设备的管理与监控、调度,即可实现异地、异构、射频、中频相结合的测控资源调度和系统重构应用。

本文对射频资源重组关键环节进行了分析,结合当前技术基础,提出了一种可行性的测控体系构架,即微光电子射频交换网、射频光波传输及中频重组相结合的全系统资源重组的测控体系构架,并对系统相关性能进行了分析。

2 测控资源全系统重组的构架

从实质来讲,测控资源的全系统重组就是针对每一次或多次航天测控任务,通过一定的策略和调度手段将所能使用的测控资源(同一测控站内或不同测控站内所有测控系统从天线、信道到终端)进行合理有效的利用。

按照资源可重组模式建设的多系统测控站或不同站内的多个系统相当于一个共同的“资源池”。为了实现后续系统的接入以及资源重组,池内的首套系统设备量可能比传统模式建设的系统设备量略多,首套系统除自身的“最低配置”设备外,其他设备可作为新增系统的共用或可调用资源,后续增加的系统可以不再考虑过多的冗余量,在整个资源池内形成 $n:m(m < n)$ 的备份模式就可满足系统应用及可靠性要求^[2],可大大减少整个资源池内的设备总量。

通过资源重组设计,建设相同数量 n 的系统时,可实现资源重组的资源池内总设备量 N 与传统模式所需设备量 M 的关系应满足 $N < n \times M$ 。资源池内每套系统可参与重组和共用设备的数量越多,离这一目标就越近。因此,系统内硬件可重组设计和监控系统管理能力是资源可重组系统设计的关键。

图 1 所示是一个理想化的全系统资源可重组的拓扑结构,所有不同频段的天线、信道以及终端可以是一个站内的,也可以是在不同站内不同系统的设备;天线可以是单频段的,也可以是多频段的;站集中监控可以对同一站内所有系统设备进行多任务的监控与管理,也可以管理其他站内某系统被调用的

天线、信道及终端设备资源。

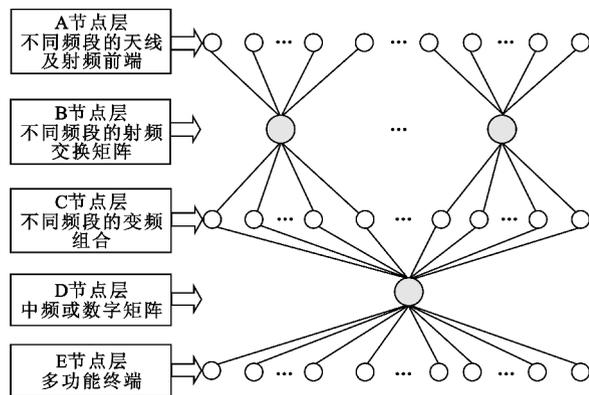


图 1 全系统资源可重组系统的拓扑结构
Fig. 1 The topology architecture of the system in which all the resources can be reconstructed

由图 1 可见,通过 B 节点层的射频交换网络和 D 节点层的中频开关矩阵的交换,A 节点层的天线及射频前端与 E 节点层的所有终端节点可以形成多种连接组合,有效地实现了全系统从射频端到终端的资源重组关系。

射频前端与射频交换矩阵之间的连接需要根据频段、带宽、距离等条件来选择不同的传输方案。

(1)对于高频段、宽带以及远距离射频资源重组时,需要射频远距离传输及微光电子交换技术来实现,即采用无损、高稳定的射频光传输设备,配合微光电子交换技术来实现射频链路的交换及与后端射频变换设备的互联。接收端的交换在光波信号上直接进行交换后,再转换成射频输出到下一级设备的接口,发射端的交换先将发射射频输入到微光电子交换设备,在交换设备内转换成光波信号后再进行交换。通过微光电子交换设备,实现天线及前端设备与射频链路的全交换连接。

(2)在对近距离、低频段射频资源重组时,采用低损耗电缆以及射频开关矩阵来实现也可满足要求。但鉴于系统应用的灵活性,建议射频传输也采用光波传输,同样可采用微光电子交换设备来实现射频全交换。

测控系统除了要完成较低信噪比信号的接收与解调,还有测距、测速等功能,并有较高的测量精度要求,这是测控系统与其他无线电通信系统最主要的区别,也是在系统设计以及资源重组设计中需要考虑的重要因素之一,需要在设备配置、资源调度策略以及信号传输等方面进行有针对性地设计。

3 射频资源重组总体设计

在射频段就实现资源重组是实现全系统资源可重组的设计重点。目前我国测控通信系统主要工作在 S、C、X 以及 Ka 频段,在射频上实现资源可重组主要就是考虑这些频段的天线、信道与后端的综合基带(终端)等设备资源的灵活分配与调用。从系统性能角度分析,为了减小收、发前端的插入损耗,射频前端的场放以及功放与天线馈源应该是

很紧密的连接关系,不宜拆分开(即射频前端的资源应与天线捆绑)。天线口径的大小主要与任务需求及能力相关,在射频段的资源重组主要以频段划分,可暂不考虑天线口径大小的因素(对于不同口径的天线,在任务调度及资源分配时,根据任务需求及系统能力进行调配)。典型的系统重组构成如图 2 所示,其中包含了射频资源与终端资源的重组。

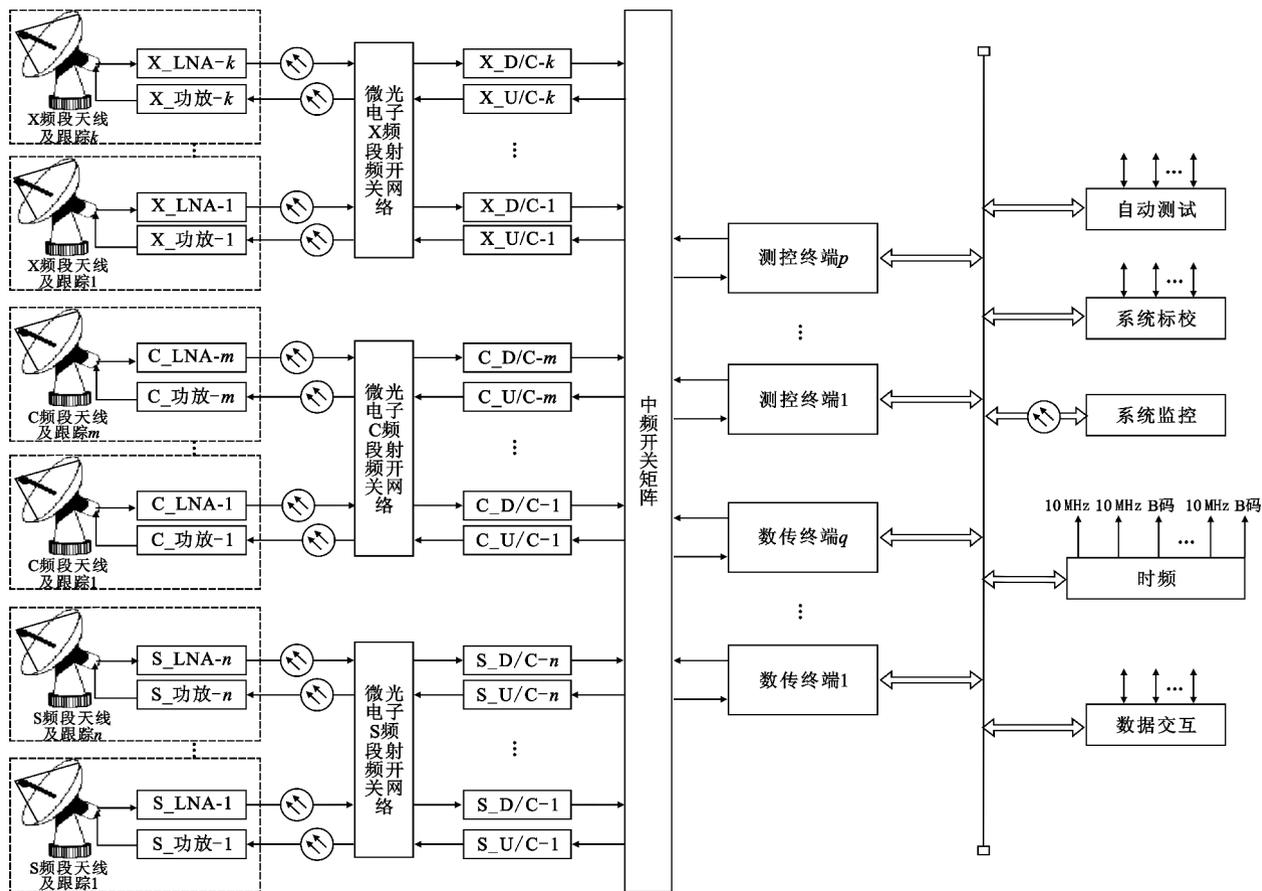


图 2 典型的射频资源重组系统构成示意

Fig. 2 The typical composition frame of RF resources reconstruction system

目前,S 频段、C 频段以及 X 频段的远距离射频光波传输技术已经在测控通信系统中得到了部分应用,可扩展应用到射频重组的系统之中。Ka 频段射频远距离光波传输后的相位、时延的变化较大,对系统捕获性能及测量精度会产生的影响不可忽略(特别是对于具有高精度测距、测速需求的系统影响更大),在技术突破前,可采取先将 Ka 频段变频至 C 频段或 S 频段再进行远距离传输,这一方法虽然对射频资源的重组多了一些限制,但在一定程度上支持测控系统的 Ka 频段射频链路直接参与到资源池

序列之中。

3.1 中频开关矩阵

当前测控通信系统主要以测控中频 70 MHz 和数传中频 1.2 GHz 为主,这两种中频上的中、大规模开关矩阵技术已比较成熟,如 16×16、32×32 等规模的全交换中频开关矩阵等已有成熟产品,并可通过相应的扩展技术实现 64×64、128×128 等超大规模矩阵,可满足测控多系统的测控终端重组需求。此外,测控终端重组后续有两个发展方向。

(1) 数字化交换方向

在宽带数字化交换网络技术成熟的前提下,接收支路下变频之后直接进行数字化处理,将接收信号转换成数字信号,通过接收端宽带数字化交换网络进行接收信号的全交换,实现与数字化接口的综合基带接收机的连接;对于发射支路,综合基带产生的数字化发射信号送到发射端宽带数字化交换网络进行接收信号的全交换,送到对应的上变频器 D/A 变换接口,再经上变频至射频发射信号。

(2) 射频直接处理方向

在综合基带射频处理技术成熟的前提下,将综合基带能够处理的中频频率前移至 S 频段、C 频段甚至 X 频段,后端的综合基带直接与微光电子射频开关网络接口,全系统在射频上实现资源的重组,系统中 X 频段以下的变频设备以及中频开关矩阵等环节都将在系统中删除掉。

目前这两个发展方向还受到一些设备性能和硬件资源的限制,但随着科技的发展,有望在未来 10 年或更短时间内得以实现。

3.2 射频开关网络

射频开关网络的性能与规模直接关系到测控系统射频重组的可行性和可靠性。在射频上进行点对点的全交换,目前已可采用芯片电路实现,与采用同轴或波导切换方案相比,较大规模的射频开关网络在体积、重量等方面大大减小,已能满足较大规模射频资源重组的切换需求。但直接在射频上进行交换还存在以下不利因素:

(1) 随着工作频段的提高及射频开关网络的规模增大引入的射频插入损耗会大大增加(为了补偿插入损耗,通常采用多级放大电路,会引入更多的性能不稳定环节),使射频开关网络不可能做得太大,限制了可交换的射频路数;

(2) 射频交换开关、放大器随温度变化会引入相位和群时延的不稳定性;

(3) 随着交换规模的增大,高频段多路交换设备内的同频隔离与干扰问题会越来越突出;

(4) 远距离传输采用了光波传输方案,如果要在射频上进行开关切换,就需要将光波信号转换成电信号后再进入射频矩阵进行交换,多了一个光电转换的环境。

有效的途径就是直接在光波上进行交换^[3],采用微光电子技术^[4]结合的微光电子射频交换网络设备来实现射频链路的全交换是解决方案之一。

微光电子射频交换网络设备不但具有射频信号切换的功能,还需要具备灵活的交换能力和路由能力。因此在设计时采用类似网络层次的概念,将射频交换网络划分为应用层、协议层、解析层、控制层和功能层,不同层内划分为多个域,通过标准的接口进行控制与分配。各层分别完成的功能如图 3 所示。

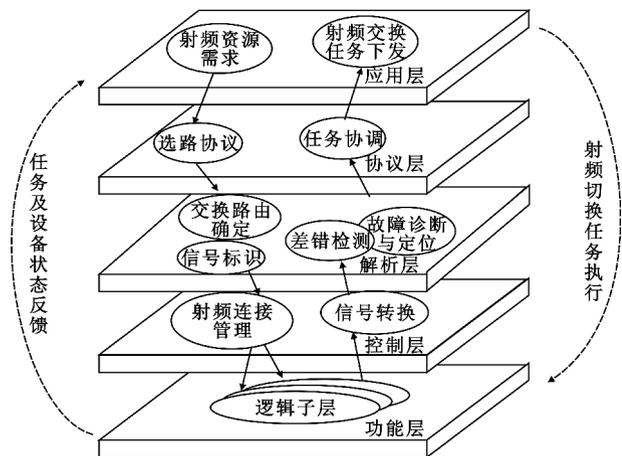


图 3 微光电子交换网络体系结构示意图

Fig.3 The architecture of micro-optoelectronic switching network

微光电子射频交换网络设备作为测控系统射频资源重组的核心组成部分,要求具备接收和发射双向处理能力。对于系统接收链路,其主要作用是将接收链路光缆送来的光波信号进行选择性分配,经增益补偿、幅相校正等处理后,根据需要分配到微光电子射频交换网络设备的输出射频端口,再送到相应的下变频链路。对于系统发射链路,将上变频后射频信号进行光电转换、幅相校正后,根据任务需求送到相应的光波传输支路,输出到对应的功放及天线发射出去。微光电子射频交换网络设备参考方案如图 4 所示。

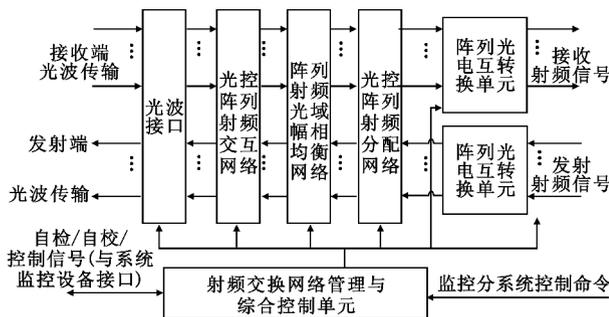


图 4 微光电子射频交换网络设备方案

Fig.4 The equipment design of micro-optoelectronic RF switching network

4 射频光传输相关性能分析

测控通信系统既要满足数据传输的需求,又要满足测速、测距、测角等的较高精度的指标要求。

在系统中跟踪部分通常与天线捆绑在一起,不参与系统的资源重组^[2],因此,测角精度基本不受射频远距离传输及射频交换的影响。而测速和测距的处理都是在综合基带内完成,这两个测量元素又与信号的相位、时延稳定性等因素密切相关,射频信号远距离传输后引入的相位和时延的变化将会直接引入到系统的测量误差之中。要保证系统的测量精度,首先必须严格控制射频远距离传输引入的不稳定性,选择合理、适用的射频远距离传输方案。

就目前的技术现状而言,采用光波传输是实现射频远距离传输最有效的方案。采用光波来进行测控系统的射频信号远距离传输,需要关注以下几个环节或参数的选择与设计。

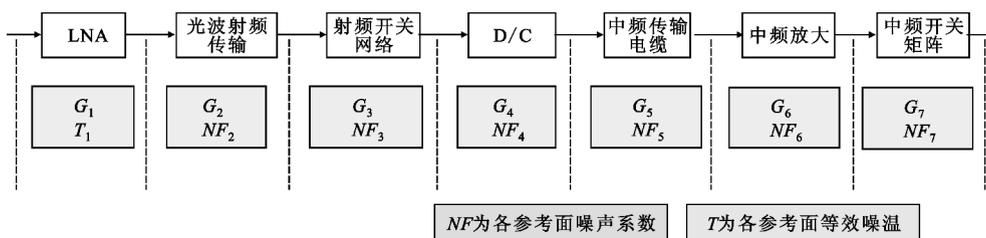


图5 接收机等效噪声温度示意图

Fig. 5 Equal effect noise temperature in receiver

场放输入端等效噪声温度计算如下式:

$$T_e = T_1 + [(NF_2 - 1)/G_1 + (NF_3 - 1)/G_1 G_2 + (NF_4 - 1)/G_1 G_2 G_3 + (NF_5 - 1)/G_1 G_2 G_3 G_4 + (NF_6 - 1)/G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 + (NF_7 - 1)/G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 G_6] \times T_0 + \dots \quad (1)$$

式中, T_e 为等效噪声温度, T_1 为场放噪声温度, T_0 为常温290 k, G_i 为各级的增益, NF_i 为各参考面等效噪声系数的真值。

由以上公式可见,对接收链路噪声温度贡献最大的是场放和光波射频传输部分,为了尽量减少场放以后环节引入的噪声影响,可以采取尽量提高 G_1 增益、尽量降低后端 NF_2 等数值的措施,当 NF_2 比 G_1 低一个数量级以上时,后端环节引入的噪声影响程度就会大大降低,如场放总增益取为50 dB时, NF_2 控制在35 dB以内,接收链路的噪声特性就主要由场放起决定作用了。

4.1 射频插入损耗及电磁兼容性

采用光波来实现射频信号的远距离传输,最明显的优势就在于能够获得系统可接受的最小插入损耗甚至无插入损耗的高频段射频信号传输性能,以及具有良好的电磁兼容性和防雷特性。

通过合理选用激光器件及电路补偿器件,使光调制器及解调器的光插入损耗控制在最小范围,在光端机接收端转换成电信号后再对射频信号进行电平补偿,可保证通过光波传输后的射频信号插入损耗最小化。

4.2 噪声系数

对于接收系统,在场放之后的射频信号就采用光波来进行传输,光波传输引入的插入损耗和噪声性能将直接对接收系统的整体噪声特性产生影响。

接收系统的噪声温度常用场放输入端等效噪声温度表示,其组成框图如图5所示。

4.3 相位稳定性

输出信号的相位与其时延成正比,即 $\phi = \omega_{rf} \tau_g$,

其中 $\tau_g = \frac{Ln_g}{c}$, ω_{rf} 为射频角频率, τ_g 为时延, L 为光纤长度, n_g 为光纤的群折射率, c 为光速。该值的大小和许多因素相关,比如入射波长、光纤结构以及环境温度等,在这些因素中前两个随着发射机和光纤介质的确定随之确定,但环境温度的随机起伏变化将强烈影响 n_g 参数,导致信号的时延漂移,进而产生相位波动,信号频率越高,其相位波动就越严重。

若射频信号的相位波动太大,将会导致系统不能正常捕获或影响信号捕获的稳定性,并对相应的测量精度产生不良影响。为了解决光波传输引入的射频相位变化的问题,一方面尽量不要在较高频段(如 Ku、Ka 及以上频段)进行射频传输,并尽量使光纤处于近似恒温的环境;另一方面可在光波传输设备中采取相应的稳相控制电路(如反馈式控制法、

导频信号法、可调谐滤波器等)。

4.4 时延稳定性

在光端机中设计相应的光延时调整与控制设备,能够使光端机的时延保持稳定。但即使在光延时设备正常工作时,延时量还会受到环境温度的影响。温度变化一方面会使光纤产生热胀冷缩使光纤长度发生变化,但这个影响非常小;另一方面温度变化会使光纤的有效折射率发生变化,从而改变了有效光程,这个影响是主要因素。

$$\frac{d\tau_g}{dT} = \frac{L}{c} \left(\frac{dn_g}{dT} + \frac{n_g}{L} \frac{dL}{dT} \right) = \frac{L}{c} (\alpha + n_g \beta) \equiv LK_f \quad (2)$$

其中, τ_g 为时延; L 为光纤长度(传输距离); c 为光速; n_g 为光纤的群折射率,室温 27°C 下约为 1.45; $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 为光纤线性热膨胀系数; $\beta = 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 为光纤的热光系数,即群折射率随温度的变化系数; K_f 为光纤温度时延漂移常数,约为 0.05 ps/m/°C。例如,在系统要求的全温度范围(如 -40°C ~ +70°C)内,通过 1 km 长度的光纤传输后,温度变化 110°C 的范围时,时延的变化量约为 5.5 ns,这一时延变化必然会对系统距离零值产生不稳定的因素,从而影响系统的测距精度。但如果对光缆的铺设采取一定的措施,如深埋在冻土层以下后(如南方地区在地面 1 m 以下时),昼夜 24 h 的温度变化几乎为零^[5],时延变化量可以控制在 0.055 ns 的范围内,对于米级测距精度的测控系统,这一时延变化是可以接受的。

5 结束语

本文简述了测控通信系统资源重组的架构以及基本的拓扑结构形式,明确了射频重组是测控通信系统实现全系统资源的重要环节,提出了射频重组的总体设计思路,对其中的射频交换、射频远距离传输等关键环节进行了分析,提出了相应的解决方案,可为测控通信系统全系统资源重组的工程设计提供参考。随着科学技术的不断发展,射频资源重组也将会有更多的解决方案,如超大容量数字化交换和射频直接处理方法,对于这些技术的可实现性值得

进一步探讨与研究。

参考文献:

- [1] 郭琦,刘敏. 我国未来测控设备资源重组系统建设构想[J]. 电讯技术,2010,50(2):111-114.
GUO Qi, LIU Min. System Construction Conception for Future China's TT&C Equipment Reconstruction[J]. Telecommunication Engineering, 2010,50(2):111-114. (in Chinese)
- [2] 洪宇,张宏,李娜. 适于资源动态重组的测控体系结构[J]. 电讯技术,2013,53(6):683-687.
HONG Yu, ZHANG Hong, LI Na. Monitoring and Control Equipment Architecture for Resources Dynamic Reconstruction[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(6):683-687. (in Chinese)
- [3] 白杉. 光交换技术发展综述[J]. 有线电视技术, 2003(24):63-67.
BAI Shan. Development Review of Optical Switching Technology[J]. CATV Technology, 2003(24):63-67. (in Chinese)
- [4] 陈弘达. 微光电子集成芯片及其应用[J]. 中国集成电路,2003(2):45-47.
CHEN Hong-da. Integrated Circuits of Micro-optoelectronic and Its Applications[J]. China Integrated Circuit, 2003(2):45-47. (in Chinese)
- [5] 宋加成. 有线电视干线地下埋设中的实践[J]. 现代电视技术,2003(5):99.
SONG Jia-cheng. The Practice of Burying CATV Optical Cable Underground[J]. Advanced Television Engineering, 2003(5):99. (in Chinese)

作者简介:



肖小兵(1979—),男,江西吉水人,2002年获学士学位,现为工程师,主要从事航天测控通信系统总体技术方面的研究;

XIAO Xiao-bing was born in Jishui, Jiangxi Province, in 1979. He received the B. S. degree in 2002. He is now an engineer. His research concerns aerospace TT&C technology.

Email: xzf0882@sina.com

胡建平(1963—),男,四川汉源人,研究员,主要从事飞行器测控通信系统的研究工作。

HU Jian-ping was born in Hanyuan, Sichuan Province, in 1963. He is now a senior engineer of professor. His research concerns TT&C communication system for aerial vehicles.

Email: jphu63@sina.com