

Ka 频段飞行器测控与通信系统设计

邱长泉, 袁延荣, 施睿, 李萌

(空间物理重点实验室, 北京 100076)

摘要: 传统基于 S 频段的统一载波测控通信系统受工作频率低、占用频带窄的特点限制, 无法满足现代及未来飞行器测控与通信系统对于高速数传、通信带宽、安装空间、克服“黑障”及抗干扰性等方面日益增长的需求, 提出一种 Ka 频段直接序列扩频体制的飞行器测控与通信系统以解决上述问题; 利用 Ka 频段频带宽、空间选择性好、减小“黑障”影响等特点, 同时采用直接序列扩频通信体制实现遥测、外测和遥控等不同功能点频统一和信道统一, 简化系统结构、减小设备体积; 介绍了系统架构及主要设备组成, 阐述了基带数据综合设备、Ka 频段一体化终端设备等单机的详细设计及天线的选择, 并给出了地面测试系统方案; 该系统具备体积小、频带宽、扩展性好等特点, 可满足未来飞行器测控与通信系统的设计与应用需求。

关键词: Ka 频段; 测控与通信; 直接序列扩频; 飞行器

Design of Ka Band TT&C and Communication System of Spacecraft

Qiu Changquan, Yuan Yanrong, Shi Rui, Li Meng

(Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing 100076, China)

Abstract: Traditional S-band-based unified carrier measurement control and communication system limited by the low working frequency and narrow bandwidth can not meet the increasing requirements of modern and future spacecraft measurement control and communication system for high-speed data transmission, communication bandwidth, installation space, overcoming blackout, anti-interference, etc. This paper put forward a Ka-band direct sequence spread spectrum system spacecraft control and communication system, which has the characteristics of narrow band, good space selecting and blackout overcoming, to solve the above problems by the point frequency and channel unity of telemetry, orbit measurement system and remote control, simplifying the system structure and reducing equipment size. The system architecture and the main equipment of the system are introduced, the detailed design of the data acquisition equipment, Ka-band integrated terminal equipment and the selection of the antenna feeder equipment are described, and the ground test system is presented. The system has the characteristics of small size, wide bandwidth and good expansibility, which can meet the requirements of the design and application of future spacecraft measurement control and communication system.

Keywords: Ka band; TT&C and communication; DSSS; spacecraft

0 引言

测控与通信系统是宇航系统各类运载器、飞行器信息保障的基础, 在信息传输、遥测遥控、测轨定位、监视侦察、预警探测等方面具有极其重要的战略意义和军事价值。随着现代飞行器技术的发展, 特别是着眼于未来, 传统的测控与通信系统如 S 频段统一载波测控通信系统, 越来越无法满足飞行器日益增长的对高速数传、通信带宽、安装空间、克服“黑障”及抗干扰性等方面的需求, 且受 ITU 分配的新型移动业务、固定业务影响, 如 IMT-4G (第四代移动电视)、FSS (固定卫星业务) 等都有可能对现有的遥测频段造成威胁, 提高工作频段、增大工作频带是必然的选择^[1-2]。近年来, 美国国家航空航天局 (NASA) 及欧空局 (ESA) 纷纷规划由 S 频段向更高频段如 X 频段、Ka 频段、Ku 频段转移的计划, 我国在载人航天空间试验室和空间站、深空探测、再入飞行等诸多领域需求的推动下, 也逐步向更高频段转移^[3], 以建立容量更大、频带更宽、天地互通、军民一体的测控通信网。

基于上述背景, 本文提出了一种基于 Ka 频段直接序列扩频 (DSSS) 体制的飞行器测控与通信系统, 介绍了系统架构及主要设备组成, 阐述了基带数据综合设备、Ka 频段一体化

终端设备等单机的详细设计及天线的选择, 介绍了采用的关键技术, 并给出了地面测试方案。

1 系统设计的考虑

1.1 频段选择

频段的选择主要考虑带宽、抗干扰及技术成熟度等方面。Ka 频段的特点包括: 相对传统 S 频段具有较宽的频带, 可提高飞行器测控与通信系统的数传能力; 具有波束窄、空间选择性好等特点, 可提高飞行器测控与通信系统抗干扰能力^[1]; Ka 频段通信相关器件如固态功放、低相噪频综等成熟度越来越高, 应用日益广泛; 结合互通互连的 Ka 频段天基、地基测控与通信网资源, 可有效增加飞行器测控与通信的可靠性和覆盖范围, 特别是利用天基中继卫星的情况下, 可实现全球飞行全过程监控。此外, Ka 频段通信还具有减小“黑障”影响、设备重量轻、电磁兼容性好等优点。

1.2 通信体制选择

传统飞行器测控与通信系统, 其通信体制常采用 PCM-FM 遥测、相参脉冲或连续波外测、PCM-DPSK-FM 或主字母遥控^[4-6], 或采用统一载波实现数传、遥测、外测等功能^[7], 随着飞行器小型化、轻质化发展的相关需求, 受飞行器上安装空间、整机质量等条件的约束, 要求测控与通信设备实现小型化、轻质化, 必须采用统一的通信体制。扩频通信具有多址通信、抗干扰性强、保密性好、抗衰落、抗多径等特点^[8], 特别是多址通信的特点, 可实现飞行器测控与通信系统

收稿日期: 2017-06-20; 修回日期: 2017-07-19。

作者简介: 邱长泉 (1984-), 男, 辽宁朝阳市人, 博士, 高级工程师, 主要从事飞行器测控与通信、航电综合、自动测试系统等方向的研究。

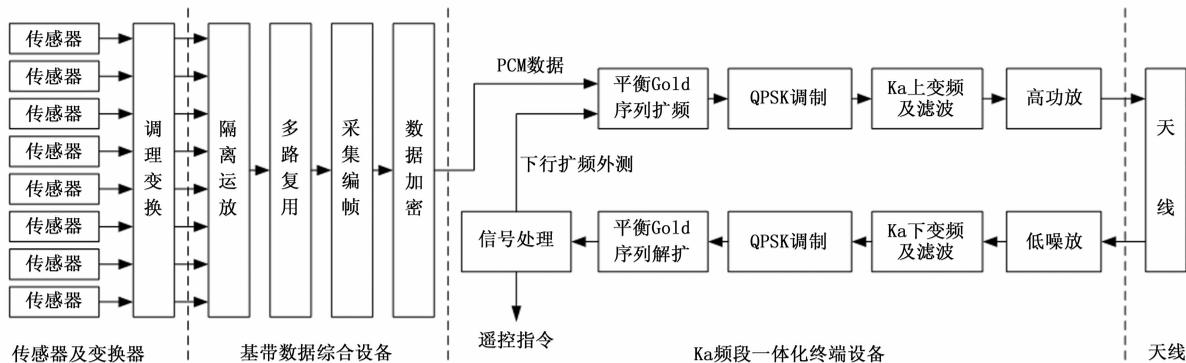


图 1 Ka 频段测控与通信系统架构图

多种功能点频统一、信道统一，大大简化设备结构、降低系统复杂度，同时考虑到相同技术指标下 QPSK 相对 BPSK，前者传输带宽仅为后者一半，因此选择基于 QPSK 的直接序列扩频系统作为通信体制。

2 飞行器测控与通信系统设计

2.1 总体方案

基于 Ka 频段直接序列扩频体制的飞行器测控与通信系统架构如图 1 所示，该系统具备遥测、外测、遥控等多种功能。其中，遥测功能将温度、压力等多种传感器参数采集、编帧、加密后形成 PCM 数据流，该数据流经扩频调制、QPSK 调制、Ka 频段上变频、高功率放大后传输至天线通过无线电波辐射；外测功能完成地面站上行测量帧的接收、解析并延迟转发至地面，地面站根据上行测量帧、下行测量帧间传播延迟的测量完成非相干测距、测速的计算；遥控功能通过外测上行测量帧中的特殊标识码实现，通过信号处理后形成遥控指令发送至飞行器中的执行机构。

与传统飞行器测控与通信系统相比，该系统的特点包括：a) 集成度高，设备数量少且设备体积小；b) 宽频带，采用基于 Ka 频段的 QPSK 体制理论上最高可获得上吉的传输容量；c) 采用直接序列扩频通信，保密性强；d) 采用 Ka 频段通信可减小“黑障”的影响；e) 扩展性好，兼容天基、地基通信网络，易于实现多目标测量并实现天地互通测控通信。

2.2 设备组成

Ka 频段测控与通信系统设备采用集成化、一体化设计原则，以减小设备体积。如图 1 所示，具体设备包括传感器、变换器、基带数据综合设备、Ka 频段一体化终端设备、天线等。

2.2.1 传感器及变换器

传感器类型包括温度、压力、振动、冲击、过载、噪声、应变、行程等，变换器完成传感器输出信号放大（或缩小）、非线性特性线性化后形成规范化、统一化的电平信号，信号范围 0~10 V。由于不同类型传感器的原理、特性不同，因此变换器必须选择与传感器特性相匹配的电路，常用变换器有小信号放大器、低漂移直流放大器、高输入阻抗放大器、电荷放大器、光电转换放大器等。经变换器调理后的信号，传输、汇流于基带数据综合设备。

2.2.2 基带数据综合设备

基带数据综合设备如图 2 所示，该设备具备信号隔离、阻抗变换、数据编帧、数据加密、平行延迟等功能，同时具备 RS422、CAN 及 1553B 总线接口。传感器输出的模拟量信号

经调理、变换进入数据综合采集设备，通过隔离运放、多路复用开关后，利用 1:1 电压跟随器完成阻抗变换，并经高精度 AD 采集编码送至数据综合 FPGA；另外，对于某些高精度传感器、远置采编单元设备，在本地完成数据采集后可以通过总线接口直接送至数据综合 FPGA。数据综合 FPGA 支持多种采样率，对模拟量参数、CAN 总线、RS422 总线和 1553B 总线参数进行挑路、编帧后形成遥测数据帧，遥测数据帧字长支持 8bit、12bit 和 16bit，具备主帧同步、副帧同步和帧计数等功能。全帧数据生成后以串行码流方式送至数据加密 FPGA，完成数据加密后形成串行差分 PCM 数据送至 Ka 频段一体化终端设备。

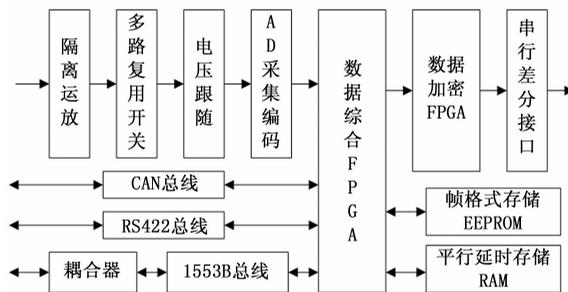


图 2 基带数据综合设备构成

此外，基带数据综合设备支持平行延迟存储功能，通过专用平行延迟存储 RAM 实现，对于同时采用实时传输、平行延时传输的重要数据，数据综合 FPGA 可通过平行延时存储 RAM 完成遥测帧中平行延迟波道数据的存储、延时编帧，通过延时波道提高重要遥测数据获取的可靠性。

2.2.3 Ka 频段一体化终端设备

Ka 频段一体化终端设备基于中频带通采样数字化架构，通过软件无线电实现，如图 3 所示，具有架构简单、使用灵活的特点，且大大降低了对 AD 采样速率、工作带宽、采样精度、动态范围等要求，工程上易于实现。

地面上行信号经天线接收后，通过射频前端的预滤波、低噪放（LNA）、下变频、宽带滤波后，变换为中心频率为 140 MHz、带宽适中的中频信号，中频信号经高速 AD 采样，由高速 DSP 模块进行信号捕获、跟踪、解扩、解调等数字化处理，同时完成载波同步、码元同步、位同步、帧同步，将解调后的数据发送 FPGA 进行处理。若上行信号为外测信号，经 FPGA 判断处理后，形成新的外测下行帧数据，发送至高速 DSP 进

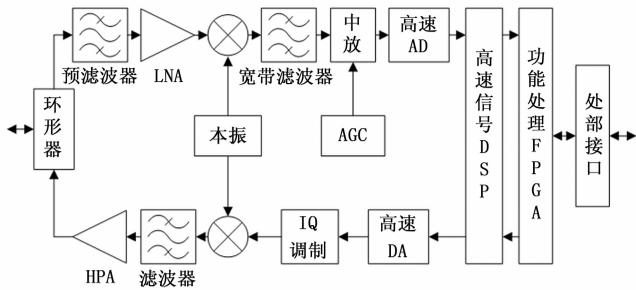


图 3 Ka 频段一体化终端设备构成

行扩频并经正交 (IQ) 调制; 若上行信号为遥控信号, 经 FPGA 判断处理后, 形成遥控指令经外部接口发送至飞行器上的执行机构, 控制飞行器执行相应的动作。

飞行器下行信号除了上行外测信号的返回数据帧外, 还包括基带数据综合设备发出的串行遥测数据, 这些数据通过高速 DSP 进行扩频后, 经高速 DA、IQ 调制、上变频、滤波、高功率放大后送至天线辐射出去。为降低载波泄露、具有更好的频谱特性, 直接序列扩频选用平衡 Gold 码作为伪码。

2.2.4 天线

飞行器上常用的 Ka 频段天线类型包括波导天线、微带天线和介质天线等。通常低速飞行器可选择微带天线、介质天线, 而高速飞行器受飞行器上力、热环境限制, 可选择基于全金属结构的波导天线, 波导天线的特点是没有焊点, 且可通过波导或波同转换器件完成微波器件的连接。该系统选择波导天线, 由于天线与终端设备间距离较短, 在波导天线与 Ka 频段一体化终端设备之间选择同轴电缆作为传输线, 同时为避免大雨期间 Ka 频段无线圆极化波的退极化现象, 波导天线选择线极化方式。

2.3 关键技术

2.3.1 设备小型化

根据系统架构, 分解、组合设备功能, 主要划分为基带数据综合设备和 Ka 频段一体化终端设备。对于基带数据综合设备, 采用单片 SOC 实现 FPGA、ADC、电压跟随放大器、多路复用开关、总线接口等集成, 同时采用软硬结合 PCB 板 (Rigid-Flex PCB) 进行电路的板级设计, 将电路划分为硬板和柔板, 硬板上布置主要芯片、外围接口、供电等器件, 硬板与硬板之间通过柔板进行连接。对于 Ka 频段一体化终端设备, 进行遥测、外测和遥控收发信道一体化设计, 通过三维电磁仿真、上/下行点频组合分析确认一体化后杂散对接收灵敏度无影响, 同时对链路的放大、滤波、混频及本振功率进行合理分配、合理布置, 保证一体化后设备的高线性及大动态能力。

2.3.2 功率动态控制

为实现飞行器上能源的高效利用, 对系统中功耗较高的设备采用动态管理减小能量消耗。根据上行外测信号, 终端直接获取接收信号的信噪比, 在已知地面站有效全向辐射功率 (EIRP) 等参数的情况下, 终端可以估计出上行链路传输衰减, 包括自由空间损耗、大气损耗、等离子体衰减、大气折射损耗等。利用估计出的链路衰减值, 结合飞行器自身 EIRP、地面站接收 G/T (品质因数) 值及接收灵敏度, 并预留一定的链路余量, 即可计算出一定传输速率下实际需要的发射机输出功率, 据此控制线性功放电路输出功率, 达到功率动态控制、节省能源的目的。

2.3.3 信号快速捕获跟踪

为具备大动态信号的快速捕获和跟踪, 同时降低对 DSP 芯片处理资源的占用, 采用多通道并行部分相关和快速傅里叶变换 (FFT) 结合的捕获方法。大动态信号具有较快的多普勒频率, 将多普勒频率范围划分为若干个宽度相同的频率槽, 依次遍历所有频率槽和伪码相位, 获取相关峰, 再在相关峰所在频率槽及相邻频率槽重新搜索, 在每个频率槽内将输入伪码采用多路并行相关得到各组数据序列, 分别进行快速傅里叶变换 (FFT) 计算, 若 FFT 幅值最大值超过门限值, 则捕获完成, 否则调整码 NCO (数控振荡器) 使本地伪码滑动半个码片, 重复上述过程, 直到捕获完成, 开始进行信号跟踪。

伪码跟踪采用全时间超前滞后非相干码跟踪环, 环路由鉴相器、环路滤波器、压控振荡器和扩频码生成器构成, 同时使用载波环辅助码环跟踪, 将载波环的频率误差控制信号按照一定比例附加到码 NCO 上, 实现码相位的精确跟踪。载波跟踪采用 DLL (锁相环) 和 FLL (锁频环) 相结合的方式, 先以 FLL 跟踪残留的多普勒频差并将其控制在一定的范围内, 在 FLL 输出保持不变的情况下, 转入 DLL 跟踪, 由 DLL 维持对动态和残留频差、相差的跟踪, 以适应信号高动态变化的情况。

3 地面测试系统

Ka 频段直接序列扩频测控与通信系统地面测试系统架构如图 4 所示。该地面系统在实现对飞行器上测控与通信系统进行测试、试验的同时, 具备自检联试功能。其中, Ka 频段天线组合用于遥测及外测信号接收、遥控及外测信号发送; 自动增益控制 (AGC) 组合对信号电平进行自动跟踪及调整, 使其保持在特定的范围内; Ka 频段变频组合将 Ka 频段信号下变频至 S 频段信号或将 S 频段信号上变频至 Ka 频段信号; 光调制解调组合完成射频信号光调制或光解调, 用于远距离测试场合; 射频耦合网络实现 S 频段射频信号的分路及合路; 扩频综合基带产生上行遥控信号及外测信号, 接收处理下行遥测信号及外测信号。Ka 频段标校天线、联试自检基带等由于系统测试前的自检测。

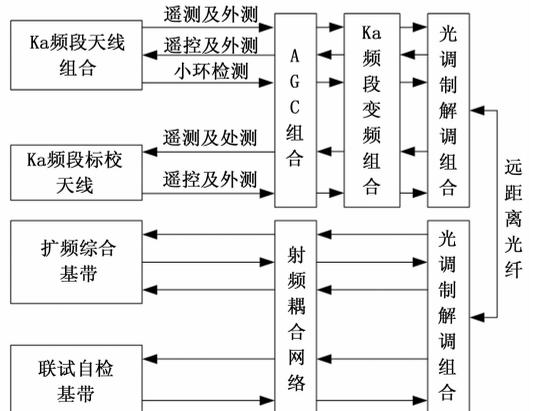


图 4 地面测试系统架构

4 总结

测控与通信技术是飞行器信息保障的基础, 未来测控与通信技术将向更高频段转移, 以增加频带宽度、提升系统容量。本文提出了一种基于 Ka 频段直接序列扩频体制的飞行器测控

(下转第 277 页)

由表 2 可知，在不等的监控数据下，文献 [9] 所提方法监控图像数据占系统存储空间，明显要比本文所提方法监控图像数据所占系统存储空间大。文献 [9] 所提方法对图像监控数据库进行设计时，没有设置数据库建设的具体指标，导致监控数据所占系统存储空间较大。本文所提方法监控管理主系统构造中，监控数据采集模块发挥了重要作用，它将采集到的监控数据进行了处理，将冗余监控数据进行了过滤，减少了监控数据所占系统存储空间。图 7 是不同方法监控信号处理所用能耗 (ϵ) 对比。设该能耗单位为 ϵ 。

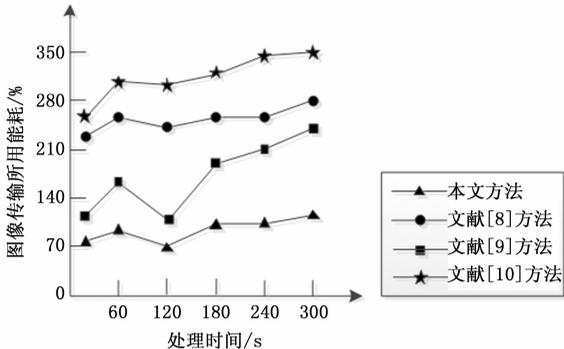


图 7 不同方法监控图像传输所用能耗对比

分析图 7 可知，图像传输所用能耗应随着，监控处理所用时间的增加而增加，本文所提方法监控信号处理所用能耗，要远少于文献所提方法监控图像信号处理所用能耗。本文所提方法利用了小波变换中的软硬阈值消噪法不同的特点，并加入了 α 因子，提出了一种折中的软硬阈值方法实现监控信号的处理，减少了监控信号处理所用能耗。进一步证明了本文所提方法的可靠性。图 8 是在不同信噪比 (dB) 下，不同方法监控图像传输的率 (%) 对比。下式为误码率 (%) 计算公式：

$$\tau = \frac{(\omega_{j,k}) \sum_{t=1}^j \tilde{m}(t)}{G_r(P_1, \dots, P_9)G(u, v)} \times 100\% \quad (7)$$

由图 8 可知，本文所提方法监控图像传输的遗漏率，相比文献所提方法的图像传输遗漏率较低。因为本文方法将信噪比作为目标函数，对 α 因子和分解尺度的选择进行优化，获取最优 α 值和最优分解尺度，最佳去噪效果和最高信噪比增益，大大减少图像传输的遗漏率，增加本文所提方法的可信度。

实验证明，本文所提方法对远程实时监控图像系统的设计具有适用性，最大程度地减少软件开发时出现的各种意外状况，有利于提高软件开发系统的运行效果，具有较高实际意义。

(上接第 273 页)

与通信系统及地面测试方案，实现了遥测、外测、遥控等功能，采用了设备小型化、功率动态控制、信号快速捕获跟踪等关键技术，该系统具备体积小、频带宽、保密性强、扩展性好等特点，可以满足未来飞行器尤其是小型化飞行器测控与通信的应用需求。随着各类飞行器的研制和部署，测控与通信技术也将不断更新、发展，并将促进 Ka 频段测控与通信系统及相关技术的不断发展和广泛部署。

参考文献：

[1] 刘嘉兴. 再论发展 Ka 频段测控通信网的思考 [J]. 电讯技术, 2008, 12: 90-97.

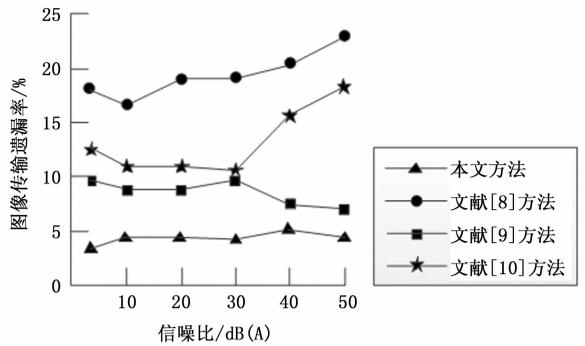


图 8 不同方法监控图像传输遗漏率对比

4 结束语

针对当前嵌入式远程实时监控图像传输控制系统容易出现传输速度慢、信息遗漏的现象，提出一种基于 STM32 模式的嵌入式远程实时监控图像传输控制系统，该系统能够有效避免当前方法的漏洞。经真实实验证明，所提方法系统设计具有图像信息传递完整、耗时少的优点，为未来嵌入式远程实时监控图像传输控制系统开发提供帮助。

参考文献：

[1] 方文宗, 梁寿愚. 基于 Zigbee 的智能变电站实时监控系... 高频数据传输 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (23): 139-142.
 [2] 吴建锋, 罗小文. 基于 Web 图像监控系统的设计与实现 [J]. 微型机与应用, 2016, 35 (16): 83-84.
 [3] 梅海海. 一种 3G 网络移动流媒体监控系统的图像处理及传输设计 [J]. 电讯技术, 2013, 53 (5): 613-618.
 [4] 黄兴, 王小涛. 基于嵌入式 Linux 的图像监控系统无线图像传输部分的设计与实现 [J]. 信息化研究, 2011, 37 (1): 42-45.
 [5] 曹新伟, 董鹏曙, 金加根. 数字化雷达图像传输设备中视频监控系统的的设计 [J]. 空军预警学院学报, 2004, 18 (4): 34-36.
 [6] 齐连众, 喻武龙, 黄相杰. 基于单片机的远程图像监控系统设计 [J]. 计算机与现代化, 2013 (1): 98-101.
 [7] 崔满, 刘明兰, 刘英仙. 现代化大型工厂远程监控系统设计与实现 [J]. 中国水运: 学术版, 2008, 8 (1): 164-165.
 [8] 刘明, 方娇莉, 尹业华, 等. 嵌入式监控系统中断点续传的设计与实现 [J]. 计算机技术与发展, 2012, 22 (2): 192-194.
 [9] 金亮, 刘文霞. 电力设备远程监控系统的设计与实现 [J]. 中国电力教育, 2007 (S3): 168-171.
 [10] 孙建华, 孙铁, 姜静, 等. 基于无线 VPN 的网络图像传输控制系统 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (s1): 637-638.
 [2] 郭凯. 航天遥测技术现状及发展思考 [J]. 遥测遥控, 2015, 9: 7-15
 [3] 胡建平, 孙德福, 等. Ka 频段宽带测控通信与抗干扰技术探讨 [J]. 飞行器测控学报, 2009, 2: 27-31.
 [4] 孙雪峰, 王志有, 等. 新型航天遥测信号调制解调技术 [J]. 测试技术学报, 2016, 30 (1): 34-39.
 [5] 吴立勋. 外测与安全系统 [M]. 2005: 8-10.
 [6] 刘胜利, 徐杨, 等. 主字母体制调制系数的选择 [J]. 飞行器测控学报, 2016, 35 (2): 112-116.
 [7] 朱泽锋, 张伟. 遥测技术发展现状与关键技术展望 [J]. 自动化技术与应用, 2016, 35 (12): 57-60.
 [8] 韦惠民. 扩频通信技术及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.