

WANG Zhugang, XIONG Weiming, QU Chenyang, CHEN Qiaoyan. Physical layer design of microwave communication link for quantum science experiment satellite (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(4): 490-498. DOI:10.11728/cjss2017.04.490

量子科学实验卫星射频信道物理层设计

王竹刚^{1,2,3} 熊蔚明^{2,3} 屈晨阳¹ 陈巧艳¹

1(中国科学院大学 北京 100190)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100049)

3(中国科学院复杂航天系统电子信息技术重点实验室 北京 100190)

摘要 量子科学卫星有效载荷激光链路需要有一条上下行射频高速通信链路作为激光链路的量子密钥分发途径。构建了量子科学卫星上下行射频链路的物理层硬件和算法,该链路采用符合 CCSDS 频谱规范的 SRRC-OQPSK 作为上行调制类型,上行速率达到 $1.024 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$,下行采用 SRRC-OQPSK 和 GMSK 调制,速率达到 $4 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 。经过与多个地面站的对接试验测试,结果表明数传通信机的载波捕获灵敏度优于 -100 dBm ,数据解调灵敏度优于 -98 dBm ,AGC (自动增益控制)能力大于 43 dB ,在 -96 dBm 接收信号电平条件下的实际传输误码率优于 1×10^{-9} 。在轨试验验证证明,射频信道物理层设计方案满足量子科学实验任务要求。

关键词 卫星通信,高速上行链路,平方根升余弦-偏移四相相移键控,高斯频移键控

中图分类号 V 443

Physical Layer Design of Microwave Communication Link for Quantum Science Experiment Satellite

WANG Zhugang^{1,2,3} XIONG Weiming^{1,3} QU Chenyang¹ CHEN Qiaoyan¹

1(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

2(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

3(*Laboratory of Electronic and Information Technology for Space Systems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

Abstract In order to ensure quantum science experiments can be developed smoothly, a high data rate two-way link for Space-Ground microwave communication must be established. By following the study on Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) and taking into account the scientific requirements of microwave communication link for quantum science experiment satellite, the physical layer hardware architecture and modulation/demodulation algorithm of microwave communication link for the satellite are presented. The uplink modulation type of the microwave communication link is SRRC-OQPSK, which is accordance with CCSDS spectrum standard. The specification of uplink data rate is $1.024 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$. The downlink modulation type of the microwave

communication link is SRRC-OQPSK/GMSK, and the data rate is $4\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$. By compatible tests with several ground stations, it is found that the sensitivity of carrier acquisition is superior to -100dBm , and AGC (Automatic Gain Control) ability is greater than 43dB . Moreover, the bit error rate of actual transmission is superior to 1×10^{-9} as the received signal level is equal to -96dBm . The in-orbit verification indicates that the physical layer design scheme of microwave communication link meets the requirements of space quantum science experiments.

Key words Satellite communication, High data rate uplink, SRRC-OQPSK, GMSK

0 引言

量子科学实验卫星数传通信机是量子科学实验卫星有效载荷的配套设备, 其通过在天地之间建立一条射频通信链路, 作为量子密钥分发的途径, 并验证量子通信实验数据的正确性和有效性^[1]. 在传统的卫星上下行链路设计中, 卫星平台应答机可以完成上行遥测和下行遥测数据传输, 但其速率都只是 $\text{kbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 级别. 而常规探测及对地观测载荷只有高速数据下行的需求, 因此常规载荷数据传输设备只是完成下行数据的调制和放大, 没有接收高速上行数据的功能.

量子科学实验卫星的数传通信机除可以完成常规数传设备的高速数据下行工作外, 还具有高速上行数据的接收、解调以及上下行数据链路层的编解码和下行数据的大容量存储等功能. 数传通信机上下行链路的物理层和数据链路层的指标符合 CCS-DS 标准^[2], 即上下行均为 S 波段. 上行信道数据速率 1.024Mbps , SRRC-OQPSK 调制体制 (滚降系数为 0.5), 误码率优于 10^{-9} , 上行信道编码方式 RS(255, 223), 无交织; 下行信道速率 $4\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$, SRRC-OQPSK 调制体制 (滚降系数为 0.5), GMSK 调制体制 (带宽时间积为 0.5), 下行信道编码 RS(255, 223), 两级交织. 输出平均功率大于 36dBm (4W), EVM 优于 10%.

本文介绍了量子科学试验卫星数传通信机除功

放外的物理层设计, 包括射频收发模块的构架, 调制、解调算法及硬件实现载体等.

1 射频模块设计

1.1 射频模块总体构架

量子通信机射频模块采用超外差式结构, 将 S 波段的射频信号下变频到基带处理单元 (主要包括 ADC 和 FPGA) 可以接受的频率, 并将基带信号上变频到 S 波段.

量子科学试验卫星数传通信机采用发射与接收总体优化的设计, 共用一个本振, 本振的两路输出同时送给接收的下变频器和发射的上变频器. 射频模块总体构架如图 1 所示. 图 1 中 LNA 为低噪声放大器, BPF1 为接收带通滤波器, BPF2 为中频滤波器, AGC 为自动增益控制放大器, LO 为本振, LPF 为 DAC 输出的镜频抑制低通滤波器, AMP 为发射中频放大器, BPF3 为发射频率带通滤波器, PA 为功放. 中间带箭头的模块代表隔离器. 基带处理单元的主要芯片是 FPGA (Field-Programmable Gate Array). TCXO 代表温度补偿晶体振荡器, 在图 1 中其输出直接连接到 DAC, 实际电路中是经过 FPGA 内部的倍频再输出到 DAC 的.

为避免发射信号对接收信号的干扰, 在图 1 所示的架构中, 本振输出到发射混频器的隔离器, 起到了收发隔离的作用.

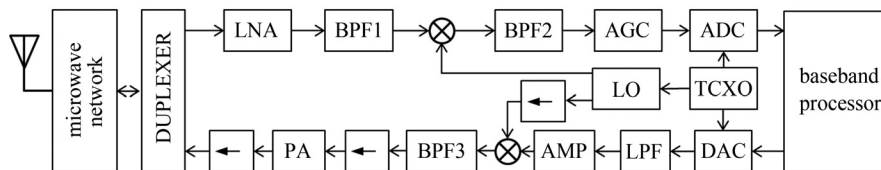


图 1 射频模块总体构架

Fig. 1 RF module architecture

1.2 各组件参数选择与设计

根据收发共享本振的设计要求, 本振频率和收发中频的选择需要考虑如下因素.

- (1) -40 dBc 镜频抑制发射滤波器, 阻带距离中心频率 ≥ 40 MHz.
- (2) DAC 器件的刷新率 ≤ 400 Msps (Mega samples per symbol).
- (3) 基带处理单元 (FPGA) 的可处理输出速率 ≤ 150 MHz.
- (4) 接收端 ADC 的模拟带宽 ≤ 475 MHz.
- (5) 接收端 ADC 的采样率 ≤ 100 Msps.

根据以上设计要求, 选择参考源频率和收发中频频率等参数, 本振频率 22xx MHz, 接收中频频率 134 MHz, 中频滤波器 3 dB 带宽 7 MHz, 晶振参考源频率 64 MHz, ADC 采样频率 64 MHz, 发射中频刷新率 144 MHz, 中心频率 47 MHz.

接收中频滤波器 3 dB 带宽为 7 MHz, 远大于信号带宽 (上行信号基带速率 $1.024 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$, -30 dBc 信号带宽为 768 kHz), 因此上行信号和大量带外噪声将同时进入 ADC, 后续的数字信号处理完成对带外噪声的滤波.

分配各组件的增益等参数, 代入系统设计软件, 射频模块整体的噪声系数和三阶交调计算结果如

图 2 所示. 仿真计算得到的系统整体性能参数为: 系统噪声系数 ≤ 2 dB, SNR ≥ 7.5 dB, 三阶交调大小为 -38 dBm, SFDR 为 17.8 dB.

测试所用信号为单载波时, 中频信号经过滤波器和 AGC, 输出到中频处理板之前的频谱如图 3 所示. 通过对中频信号 C/N_0 的测试, 验证了微波仿真软件计算结果.

2 调制算法

OQPSK 信号调制原理与 QPSK 信号调制原理基本相同, 唯一区别是在 Q 支路上增加了一个半个码片周期的延时电路, 其实现原理如图 4 所示.

成型滤波器如果采用常规 FIR 滤波器的实现形式, 需要使用上采样结构, 并消耗大量的乘法器等 FPGA 片内资源. 对于直接形式的 FIR 滤波器, 任何一条支路的乘法器消耗等于本支路 FIR 滤波器的阶数. 在本数传通信机设计中将 I/Q 支路多个符号缓冲存储起来, 与上采样的时钟一起, 作为查找表的下标, 查找预先存储起来的多符号波形数据. 调制算法的实现如图 5 所示.

量子科学卫星是中国较早采用 GMSK 作为下行数传调制体制的卫星. GMSK 是 CCSDS 推荐的下行

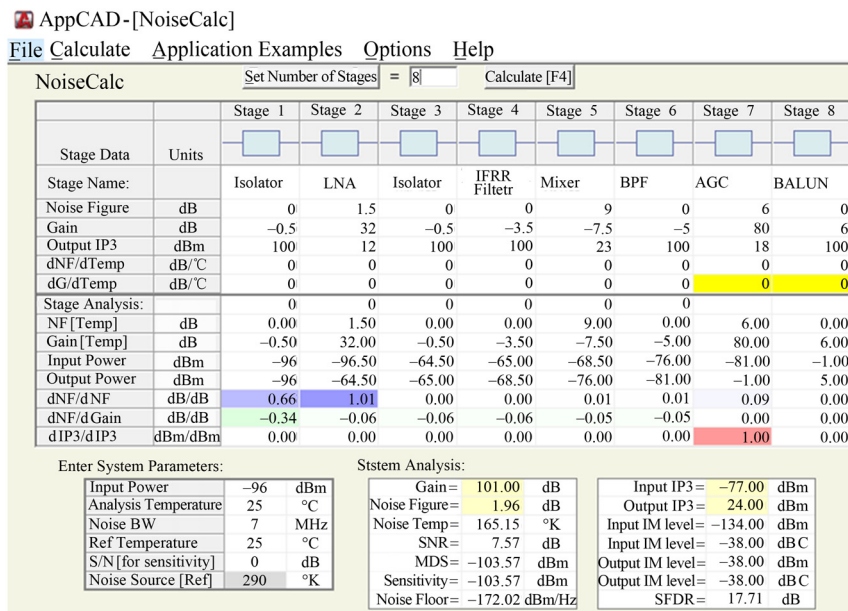


图 2 系统噪声系数和三阶交调计算

Fig. 2 Noise figure and 3rd order intermodulation

调制体制之一, 具有恒包络、适应饱和功放以及快速频谱滚降等特点. GMSK 原理是在对载波进行调制前, 用调制指数为 0.5 的高斯冲击响应滤波器对 MSK 的矩形频率脉冲进行滤波的. 其实现结构采用与 SRRC-OQPSK 信号多符号查找表类似的构架. 下

行调制信号的最终结果如图 6 和图 7 所示. 从图 6 和图 7 可见, 两种信号的频谱边带都是单调下降的, 相比没有成型的 QPSK 信号, 有较快的滚降速率.

3 解调算法

3.1 解调算法设计工具与流程

解调算法的设计利用了 Matlab 的 Simulink 工具, 对不同结构和参数的算法模块通过 Simulink 工具仿真其性能, 具体流程为: 首先验证浮点算法的性能, 然后按照经验流程, 完成手工定点化设计, 最终验证定点算法性能. 经过验证的定点算法, 其每个模块都有相应的 FPGA 模块或 IP 核对应. 该算法手工翻译映射为 VHDL 代码后, 其性能和仿真结果是完全相同的.

3.2 模拟中频的数字频谱

射频模块输出到中频处理单元信号中心的频率为 134MHz, 而 ADC 的采样频率为 64MHz. 按照带通采样原理, 经过 ADC 采样得到的数字中频中心频率为 6MHz ($134\text{MHz} - 64\text{MHz} \times 2 = 6\text{MHz}$). 仿真得到的数字中频信号频谱如图 8 所示. 由图 8 可见,

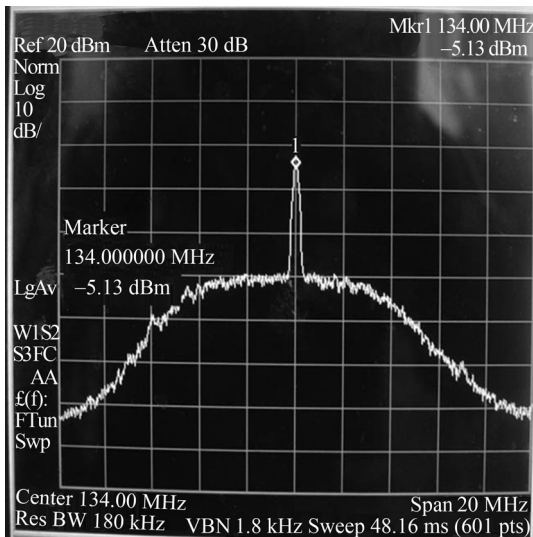


图 3 接收中频信号和噪声频谱
Fig. 3 Intermediate frequency signal and noise spectrum

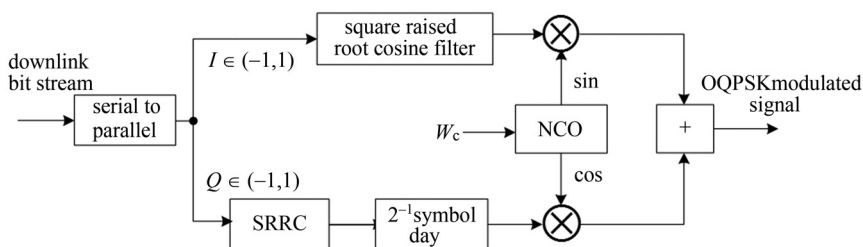


图 4 SRRC-OQPSK 调制原理
Fig. 4 SRRC-OQPSK modulation principle

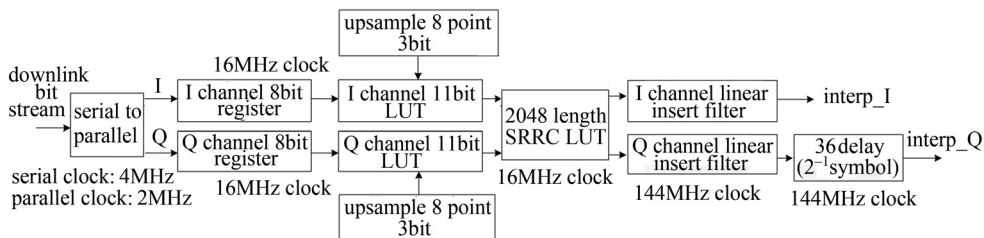


图 5 SRRC-OQPSK 调制实现结构
Fig. 5 SRRC-OQPSK modulation architecture

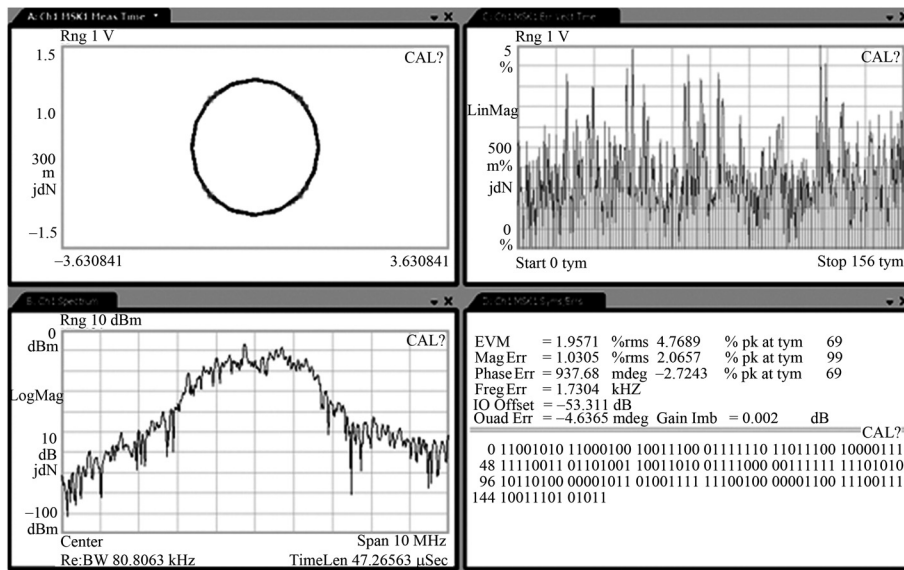


图 6 功放输出的 SRRC-OQPSK 调制频谱及星座
Fig. 6 Constellation and power amplifier spectrum of SRRC-OQPSK signal

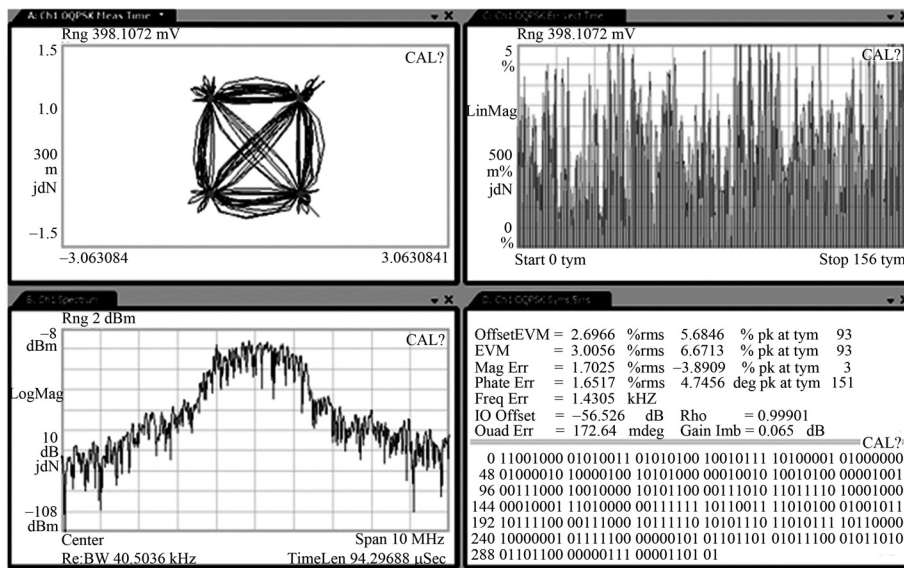


图 7 功放输出的 GMSK 调制频谱及星座
Fig. 7 Constellation and power amplifier spectrum of GMSK signal

带通采样导致在零频处的噪声发生了混叠。信号叠加噪声的幅度会有小概率超过 ADC 量程, 因此数字中频的噪声边带发生抬升。

3.3 算法框架结构

中频信号处理算法的构架如图 9 所示。图 9 最上面一排是接收部分的算法, 按照从左至右的顺序依次执行, 下面是调制算法。接收和发射算法都有若干状态参数和中间的状态监测模块进行交互。

在接收部分, 从适应上行信号捕获模式和降低资源消耗两个角度出发, 取消频偏检测和跟踪模块。因此, 位同步无法在有较大频偏的状态下工作, 必须置于载波同步之后。虽然载波跟踪和位同步的联合形式可以得到更好的误码率效果, 但有可能在极端状态下大量增加环路入锁的时间。因此量子星通信机的上行接收采用先载波同步再位同步的构架, 并独立运行。

根据射频模块设计和计算结果, 中频滤波器后的信噪比在最低电平输入条件下 ≥ 7.5 dB, 模拟 AGC 可以有效控制输入信号的功率. 测试结果表明, 在输入射频信号 40 dB 动态范围和全温度范围内, 中频信号的动态为 2 dB. 控制结果使得中频信号的动态对捕获跟踪性能影响不大. 因此在中频信号处理中省略数字 AGC.

3.4 上行信号的捕获

量子科学卫星的轨道为近地圆轨道, 入境和出境

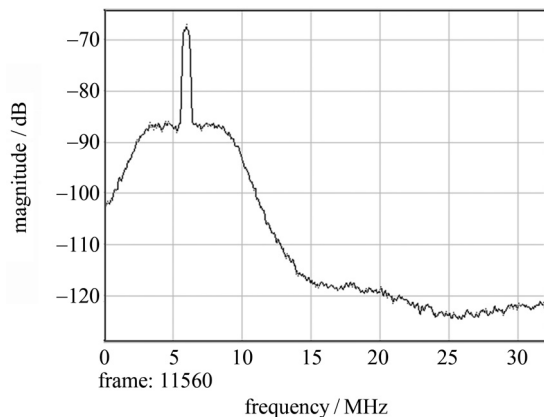


图 8 仿真数字中频频谱

Fig. 8 Digital intermediate frequency simulation

时会分别产生约 ± 50 kHz 的多普勒频移. 为简化量子星通信机捕获包含多普勒频移上行信号的设计, 星地间约定了与卫星平台应答机类似的单载波扫频和双捕模式. 其扫频信号的特性如图 10 所示.

地面站给出扫频信号的频偏叠加在多普勒频偏上之后, 将产生相对于接收机中心频率 ($-115 \sim +115$ kHz) 的频偏. 当地面站通过下行遥测或下行数传检测到量子星通信机给出锁定指示有效信号时, 即回到中心频率. 此时, 上行信号的频偏将只包含多普勒频偏.

量子星通信机采用守候策略来实现对包含多普勒的扫频信号的捕获. 该策略可以描述为, 未锁定时限幅载波跟踪锁相环的振荡频率在 ± 6 kHz 内, 这个范围是上行包含多普勒的扫频信号每个扫频周期都可以覆盖的. 当量子通信机锁定上行后, 解除限幅. 该策略对应的锁相环带宽需满足捕获 $\pm 32 \text{ kHz}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫频信号的要求, 同时需要在远小于 0.3 s ($12 \text{ kHz}/(32 \text{ kHz}\cdot\text{s}^{-1}) \approx 0.3 \text{ s}$) 的时间内, 锁定指示变成有效. 该策略避免了无信号输入时, 载波跟踪环漂移导致的加大扫频范围而无法锁定等情况的发生. 此外, 实现该策略只需载波跟踪环滤波器的积分支路增加一个可控限幅器, 资源消耗非常小.

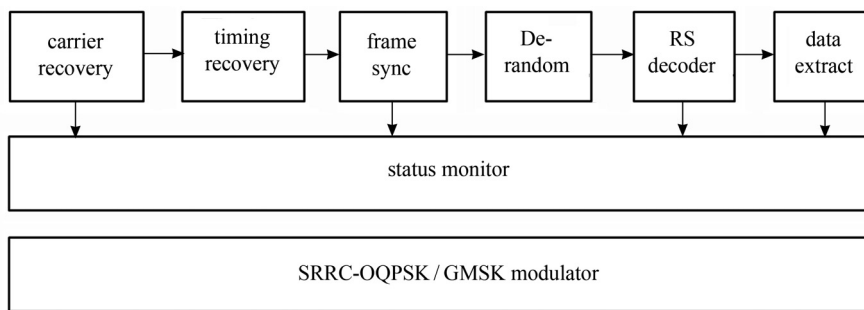


图 9 中频信号处理包括的算法构架

Fig. 9 Digital signal process architecture

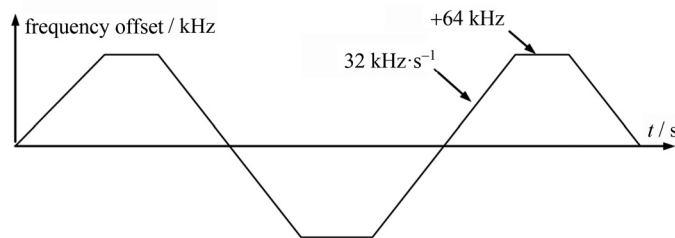


图 10 上行单载波信号扫频特性

Fig. 10 Uplink signal frequency scan characteristic

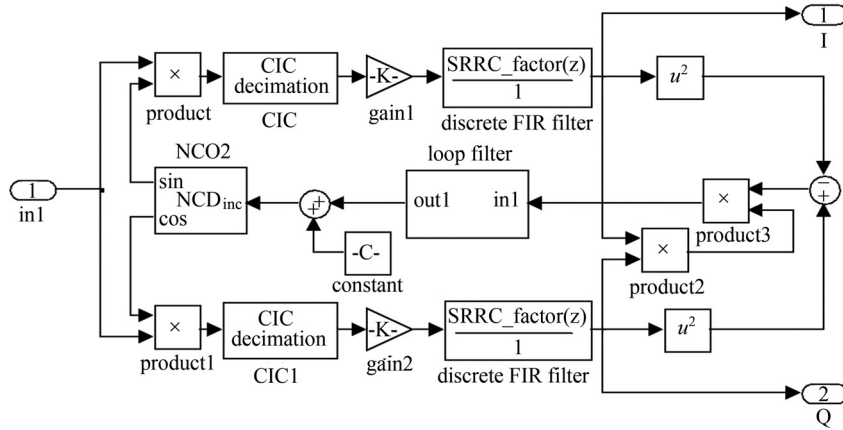


图 11 载波跟踪环结构
Fig. 11 Carrier track loop architecture

3.5 载波跟踪

载波跟踪环采用经典的 Costas 环结构, 如图 11 所示. 高阶匹配滤波器将占用大量 FPGA 的 DSP 和 Slice 资源. 本文通过两种方法大幅度降低了匹配滤波器的资源占用. 一是通过 CIC 滤波器将原始 64 MHz 的采样率下降低到 4 MHz, 二是只利用部分 (截断部分的能量, 占据 SRRC 匹配滤波器总能量的 99%) SRRC 匹配滤波器长度, 将 SRRC 滤波器的阶数降低到 21. SPAN 为 6 时的 SRRC 匹配滤波器以及本设计采用的 SPAN 为 2.8 时的截断区间如图 12 所示.

设带相偏信号为 $(I + jQ)e^{j\theta}$, 其中 I/Q 为基带符号, θ 为相偏, $I = Q \approx \pm 1$.

该复信号的实表达式为

$$(I + jQ)e^{j\theta} = (I \cos \theta - Q \sin \theta) + j(I \sin \theta + Q \cos \theta) = I' + jQ'. \quad (1)$$

其中,

$$I' = I \cos \theta - Q \sin \theta, \\ Q' = I \sin \theta + Q \cos \theta.$$

这里 I', Q' 为 Costas 环两臂的信号, 鉴相器的形式为

$$(Q'^2 - I'^2)(I'Q') = (2IQ \sin 2\theta)(IQ \cos 2\theta) = \sin 4\theta \approx 4\theta. \quad (2)$$

从式 (2) 可知, 经过鉴相器后 I/Q 符号消失, 得到鉴

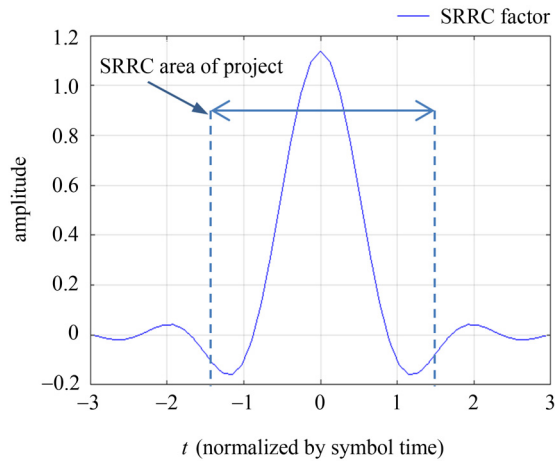


图 12 SRRC 匹配滤波器
Fig. 12 SRRC match filter

相误差.

锁定检测器的表达式为 [4]

$$(Q'^2 - I'^2 + 2I'Q')(Q'^2 - I'^2 - 2I'Q') = -4 \cos 4\theta. \quad (3)$$

锁定检测器也可表达为带相偏的中频信号 4 次方后的实部. 当相偏趋近于 0 即锁定时, OQPSK 信号任意星座点的 4 次方均位于复空间的实轴上. 该实部的绝对值约将超过锁定门限. 从式 (3) 可知, 该检测器可以适应调制信号, 也可以适应单载波信号的锁定检测. 因为锁定检测和鉴相都是在位同步之前, 所以大量的采样点只是近似 $I = Q \approx \pm 1$.

锁定检测器和鉴相器都有大量的自噪声, 需要经过滤波处理才能用于锁相和判决. 载波跟踪锁相环的环路带宽考虑了满足扫频速率及环路稳定性等约束条件. 最终设计环路带宽为 600 Hz.

3.6 位同步

位同步与载波同步一样, 采用了锁相环形式的反馈结构, 如图 13 所示. 其基本结构类似于 Gardner 形式的位同步模块, 一些适应性的修改如下: 因为位同步时的采样率比较高, 约 7.8 sps (samples per symbol), 所以取消了插值滤波器; 定时误差检测 (TED) 模块采用了 ZE-TED 形式, 这是因为已经过载波同步, 无需 Gardner-TED 的旋转不变性; ZE-TED 乘法器的实现无 DSP 单元, 降低了资源消耗; TED 模块只检测了一个支路的定时误差, 定时输出的结果同时输出给 I/Q 支路使用.

3.7 帧同步及解扰

量子星通信机的上行传输帧采用符合 CCSDS 标准的 32 bit 帧头 [5], 帧同步设计为考虑 1 bit 的帧头容错, 1 帧的锁定确认和 0 帧的失锁确认. 解扰模块采用符合 CCSDS 标准的伪随机多项式 $h(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x^3 + 1$. 该多项式每 255 bit 循环.

3.8 性能

在没有 RS 译码纠错的情况下, 经过定点化后的仿真性能和实测性能如图 14 所示.

从图 14 可见, 量子星通信机的仿真解调损耗约 0.2~0.3 dB, 实测解调损耗约 1.2~1.5 dB. 仿真与实测之间的差异主要是因为仿真中没有考虑相位噪声、采样抖动、放大器非线性导致的三阶交调等因素. 这些因素比较难建模, 即便建模也难以确定模型参数, 所有工程实践中, 实测性能下降不超过 2 dB, 一般是可以接受的.

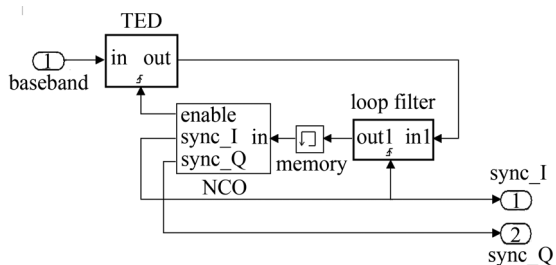


图 13 位同步环结构

Fig. 13 Timing recovery loop architecture

4 中频信号处理硬件

中频信号处理硬件的载体为 Xilinx 公司的 FPGA, 型号为 XQR2V3000-4CG717V, 主系统时钟频率 64 MHz, 核心电压 1.5V, I/O 电压 3.3V. 适应空间辐照和单粒子效应的措施为三模冗余和过境重加载设计. 经过部分三模冗余, FPGA 的 slices 占用率为 87%, 其余资源的占用率小于 80%. 系统时钟频率为 64 MHz, 在最坏情况下最大时钟频率为 85.070 MHz, 满足时钟 80% 的降额要求.

5 测试验证结果

对地面模拟发送装置与研制的星载接收机电性件样机进行实际对接测试. 通过对接收信号电平进行测试, 发现载波捕获灵敏度优于 -100 dBm, 数据解调灵敏度优于 -98 dBm, AGC 能力大于 43 dB, 满足技术指标要求. 通过对链路误码情况进行测试, 发现在 -96 dBm 接收信号电平条件下, 持续 3.5 h 传输大于 10^{10} bit 的数据量无误码, 表明实际传输误码率优于 1×10^{-9} . 实测结果表明高速上行链路设计方案满足量子科学实验任务要求.

6 结论

构建了量子科学试验卫星数传通信机除功放外的物理层设计, 包括射频收发模块的构架, 调制、解

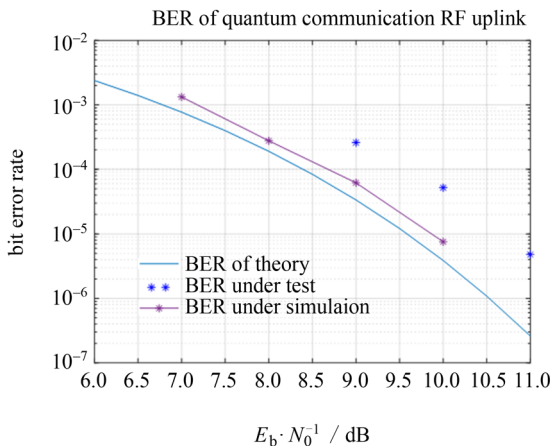


图 14 量子星通信机误码率曲线

Fig. 14 BER curve of the RF quantum communication uplink receiver

调算法和硬件实现载体.

射频模块采用发射与接收总体优化的设计, 共用一个本振, 本振的两路输出同时送给接收的下变频器和发射的上变频器.

调制算法采用符合 CCSDS 技术规范的 SRRC-OQPSK/GMSK 高效调制技术. OQPSK 信号调制原理是在 QPSK 信号调制的 Q 支路上增加一个半个码片周期的延时电路, 其实现结构采用与 SRRC-OQPSK 信号多符号查找表类似的构架, 相比于没有成型的 QPSK 信号, 有较快的滚降速率.

中频信号处理硬件选用 FPGA, 适应空间辐照和单粒子效应的措施为三模冗余和过境重加载设计. 经过部分三模冗余, FPGA 的 slices 占用率为 87%, 其余资源的占用率小于 80%.

综上所述, 本文采用符合 CCSDS 技术规范的 SRRC-OQPSK/GMSK 高效调制技术、RS(255, 223) 信道编码方式及 AOS 位流业务传输协议, 给出了一种传输速率为 $1024\text{ kbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 、信道误码率优于 1×10^{-9} 的高速上行链路和 $4\text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的下行链路. 该方案满足量子科学卫星科学实验任务要求, 为

中国高速上行数据传输链路的工程实现奠定了基础.

量子科学试验卫星已于 2016 年 8 月成功发射, 经过 4 个月的在轨试验验证, 于 2017 年 1 月正式交付用户单位使用. 卫星数传通信机在在轨试验验证期间运行很好, 通过了天地一体化链路测试.

参考文献

- [1] XIONG Weiming, WANG Zhugang, QU Chenyang, *et al.* Design of a high rate uplink for a science experiment satellite [J]. *J. Spacecr. TT&C Tech.*, 2013, **32**(6): 518-523 (熊蔚明, 王竹刚, 屈晨阳, 等. 科学实验卫星高速上行链路设计. 飞行器测控学报, 2013, **32**(6): 518-523)
- [2] CCSDS 401.0-B. Radio Frequency and Modulation Systems - Part 1: Earth Stations and Spacecraft, Blue Book [S]. Washington D.C., CCSDS: 2011
- [3] JANINE SULLIVAN LOVE. RF Front-End World Class Designs [M]. Netherlands, Elsevier: 2009
- [4] PETER W. KINMAN, JEFF B. BEMER. Carrier Synchronization of Offset QPSK for deep Space Telemetry [C]//IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana: IEEE, 2002: 1327-1336
- [5] CCSDS 231.0-B-2. TC Synchronization and Channel Coding, Blue Book [M]. Washington DC: CCSDS: 2010



第四届中国成像光谱技术与应用研讨会

由国际数字地球学会成像光谱对地观测专委会与中国空间科学学会空间遥感专业委员会联合主办的第四届中国成像光谱技术与应用研讨会将于 2017 年 9 月 10 日至 13 日在哈尔滨举办. 会议旨在持续推动中国成像光谱技术与应用的发展, 促进学术交流. 会议主题包括: 成像光谱遥感机理与光谱成像技术, 成像光谱数据处理与分析技术, 成像光谱对地观测前沿科学问题研究和成像光谱遥感与系统应用技术等.

会议网站: <http://www.whrs2017.com/>

会议邮箱: whrs2017@126.com

联系人: 杨一德研究员 (中国科学院上海技术物理研究所)

倪丽博士 (中国科学院遥感与数字地球研究所)

谷延锋教授 (哈尔滨工业大学)

王伞博士 (哈尔滨工程大学)

联系电话: 13684625835