

# 一种低功耗卫星全双工终端基带结构

田宇, 刘亚欢, 杨根庆

(中科院微小卫星联合重点实验室, 上海 200050)

**摘要:** 描述了一种低功耗扩频全双工卫星收发机通用基带处理结构。此构架采用了一系列针对低功耗卫星通信的优化, 包括频域抗干扰算法、插值技术、频域并行捕获算法和双级 AGC 技术, 可以满足常用卫星通信地面设备的需求。

**关键词:** 低功耗; 扩频收发机; 插值

**中图分类号:** TN927+.21

**文献标识码:** A

## A low-power-consuming baseband architecture for satellite trans-receiver

TIAN Yu, LIU Ya Huan, YANG Gen Qing

(Shanghai Micro-Sat Joint Key Laboratory, Chinese Academy of sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Satellite communication is an important part of emergency communication. A low-power-consuming baseband architecture for satellite spread-spectrum trans-receiver is given. The architecture is optimized for general purpose compact satellite trans-receiver. Combined with anti-jamming, interpolation, frequency domain parallel signal detection and double AGC technology, this architecture can fulfill the demands of commonly used satellite ground system.

**Key words:** low-power-consuming; spread-spectrum trans-receiver; interpolation

卫星地面终端是通信卫星应用系统的重要组成部分, 在通信卫星的支持下, 通过地面终端, 能够实现全球任意时间、任意地点的无线通信。在军事、抢险救灾、科学考察、无线监控等领域均有广阔的应用前景。信息技术、集成电路技术的发展为地面终端的小型化奠定了坚实的基础。本文着眼于我国通信卫星网络建设对地面终端小型化的迫切需求, 根据实际的工程经验, 对一种已获得国家专利的低功耗小型化卫星地面终端基带模块的关键技术进行论述。

### 1 硬件组成

全双工终端应具有以下功能: 灵活的上下变频模块、一定通用处理能力的基带算法模块以及可扩展的操作系统平台。为了满足这些要求, 考虑采用 MCU+DSP+FPGA 的硬件平台, 其中 DSP 采用低功耗的 TI55x 系列, FPGA 采用不大于 100 万门的小规模器件。基带主要硬件框图和功能模块划分如图 1 所示。

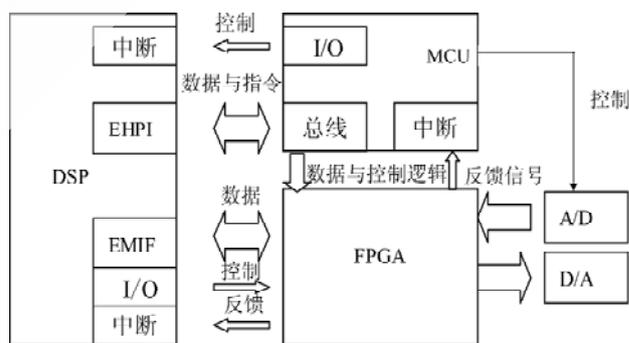


图 1 硬件组成结构

其中, 发射数据流原理框图如图 2 所示。MCU 通过相应 FPGA 的中断, 经数据总线将数据送至 FPGA, 数据在 FPGA 中完成扩频、成形、正交调制后至 D/A。

接收数据流如图 3 所示。A/D 数据经 FPGA 采样并处理后, 通过中断, 以 DMA 的方式进入 DSP, 经处理后, 通过 EHPI 口进入 MCU。

除了上述最基本的数据交互通道以外, 基带还设计

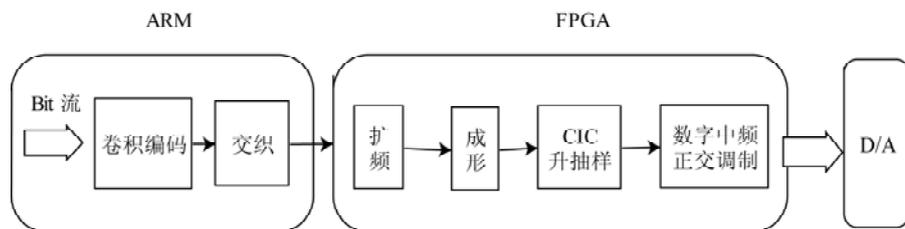


图2 发射流组成

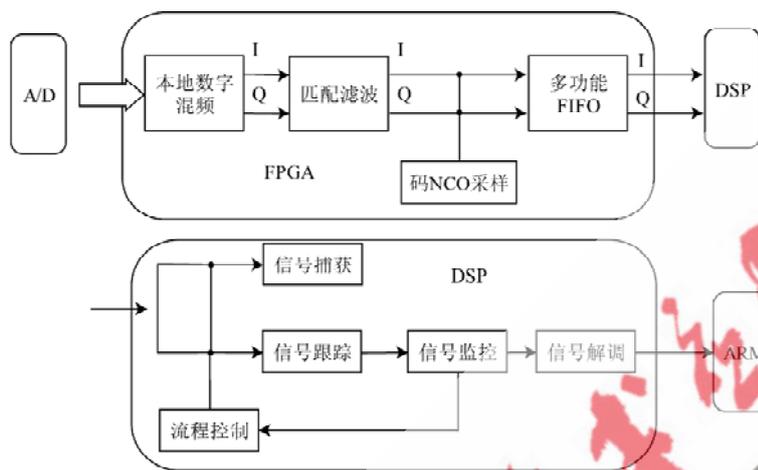


图3 接收流组成

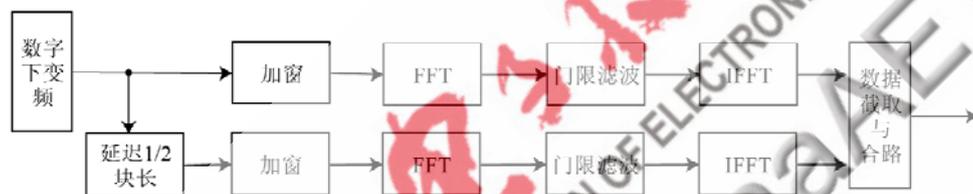


图4 频域抗干扰算法图

了MCU与DSP的命令交互，增加了中断控制、DSP与FPGA之间的控制接口、FPGA到MCU的反馈回路，提高了基带系统的稳定性。另外，为了简化控制流程，A/D与D/A芯片的上电控制也由MCU直接执行。

## 2 软件算法组成

### 2.1 频域抗干扰算法

卫星通信往往受到地面有意或无意干扰，作为卫星通信终端，抗干扰能力是衡量其性能的一个重要方面。本节在上一节所描述的单倍采样的基础之上，利用频域特性对其进行抗干扰处理<sup>[1]</sup>。

本算法针对最常见的窄带干扰。窄带干扰高于噪声电平，在频域上，体现为超过平均电平的一个或多个高峰。通过DFT，识别出干扰信号，即可进行干扰消除。之所以加窗，是由于DFT假设了一个长度为有限序列的周期延拓，如果输入序列的各样点在DFT的观察窗口内不是周期性的，那么在DFT块的边沿间产生不连续性，这样就会造成频谱泄漏。为了减小频谱泄漏效应，对输入信号进行加窗，以平滑在块边缘的不连续，减小频谱

泄漏。然而加窗将对时域信号造成扭曲失真。为了减小加窗产生的信号扭曲，采用重叠技术，增加一路信号处理通道，其中第二路延迟1/2 FFT长，每一路进行IFFT后，把前后各1/4 FFT长的样点抛弃，只保留中间样点，以减少失真，如图4所示。

### 2.2 单倍采样技术

采用单倍速采样主要是为了降低抗干扰的计算量，将需要进行抗干扰处理的数据速率降至最低，即单倍速率。同时，为了满足扩频通信上所需要的迟早们运算，通过半码片MMSE插值滤波器<sup>[2]</sup>，得到双倍速数据，从而进行扩频码的跟踪。其实现原理如下：

码片插值器 $hc$ 把码片数据进行插值，得到延时 $T_c/2$ 的码片数据流。理想的码片插值器 $hc_1$ 的频率响应为<sup>[3]</sup>：

$$H_I(e^{j\omega T_c}, \mu T_c) = \frac{1}{T_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_I(\omega - \frac{2\pi}{T_c} n, \mu T_c) \quad (1)$$

其中，

$$H_I(\omega, \mu T_c) = \begin{cases} T_c \exp(j\omega \mu T_c) & |\omega/2\pi| < 1/2T_c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

相应的脉冲响应是 $\text{sinc}(x)$ 函数的采样：

$$\begin{aligned} h_I(nT_c, \mu T_c) &= \text{sinc}[\frac{\pi}{T_c}(nT_c + \mu T_c)] \\ &= \frac{\text{sinc}[\frac{\pi}{T_c}(nT_c + \mu T_c)]}{\frac{\pi}{T_c}(nT_c + \mu T_c)} \quad (n = \dots, -1, 0, 1, \dots) \end{aligned} \quad (3)$$

理论上码片插值器可看作是一个有无限抽头的FIR滤波器，

$$\begin{aligned} hc_1(nT_c, \mu T_c) &= h_I(nT_c, \mu T_c) \\ &= \text{sinc}[\frac{\pi}{T_c}(nT_c + \mu T_c)] \quad (n = \dots, -1, 0, 1, \dots) \end{aligned} \quad (4)$$

实际实现的解调器中插值器用一个截短的有限阶数的FIR滤波器来近似。

而在信号搜索阶段,整码片间隔搜索所带来的扩频增益损失是无法接受的。为了适应单倍采样,在FPGA内部专门针对扩频信号搜索而设计了多功能FIFO。除了最基础的FIFO功能,还具有半码片精度/任意码片数量的数据滑动功能。

### 2.3 高速复合捕获算法

由于利用FFT进行时域并行搜索计算量大,在低功耗平台上实现比较困难。考虑到卫星通信的高多普勒特性,利用FFT进行频域并行搜索可以在计算量和搜索效率上进行良好的折中。载波NCO(数控振荡器)设置为中心频率在整个捕获过程中保持不变),由DSP通过FPGA设置输入信号的码相偏移,把输入的采样点与本地的IQ扩频序列共轭相乘,再对序列进行分段累加,最后进行FFT,通过对FFT后各频点功率的并行统计分析,确定信号是否捕获。如果输入信号码相位与本地扩频序列相位没有对齐,则载波淹没在噪声下,不能恢复,FFT输出噪声电平。改变输入信号码相位,继续遍历其他码相单元。如果信号已经捕获,即相位对齐,载波可以恢复,FFT输出应在频偏点有极大值,同时给出多普勒频移的估计值。

按恒虚警原则,为达到检测概率99%,虚警率 $10^{-3}$ ,则要求检测前的信噪比大于14.7 dB<sup>[4]</sup>,这一般是通信系统所不能达到的。经过比较,决定对FFT结果采用非相干续贯检测<sup>[5]</sup>的方法提高检测效率。续贯检测用于扩频系统的快速捕获已经得到了广泛的应用,本设计方案采用非相干续贯检测。并行搜索加续贯检测的系统模型如图5所示。

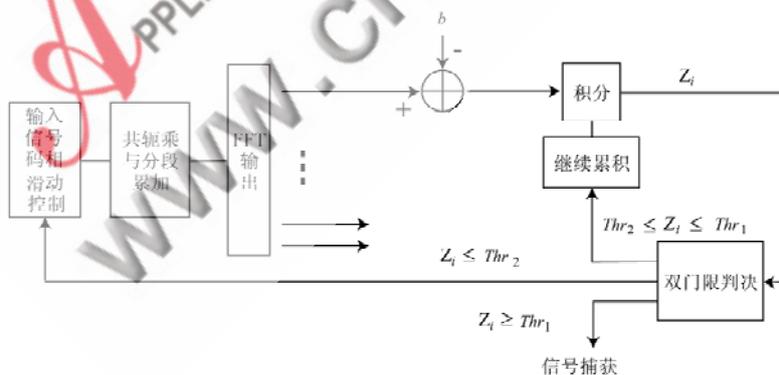


图5 捕获算法图

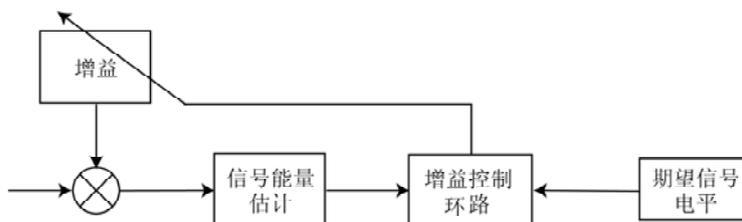


图6 数字AGC

### 2.4 数字AGC技术

为了解决卫星信号在整个过境过程中幅度变化较大的问题,设计中采用了数字AGC,其结构本质上仍是一个反馈环路<sup>[6]</sup>,基本框架如图6所示。

在实际应用中,单级AGC往往不能满足需求,尤其在干扰环境下,由于射频模拟部分的模拟AGC响应于干扰信号,需要在抗干扰之后、解扩之前先进行一次增益控制以防止信噪比恶化,如图7所示。考虑到解扩前的数据速率,为了降低运算量,第一级AGC采用粗略的非反馈结构。

本文针对卫星通信的需求,从硬件组成和算法组成两个方面给出了一种获得专利的、适于小型化实现的基带平台。硬件平台上,采用小规模器件保证低功耗特性,采用数字扩频及数字上下变频模块又保证了灵活性。算法组成则针对卫星扩频通信的特殊应用,采用了单倍采样技术降低计算量和功耗,采用抗干扰算法消除地面的窄带干扰,采用高速复合捕获算法提高信号捕获速度,采用数字AGC应对衰落和卫星仰角变化带来的信号能量变化。此方案从硬件和软件两个方面,均给出了较为成熟的卫星通信终端解决手段。

#### 参考文献

- [1] 蒋毅凯.CX-1低轨小卫星地面手持终端扩频软件解调器的体系结构及关键算法研究[D].中科院上海微系统所.2005.
- [2] JEFFREY A Y, JAMES S LEHNERT. Analysis of DFT-based frequency excision algorithms for direct-sequence spread-spectrum communications. IEEE Transactions on Communications,1998, 46(8):1076-1086.

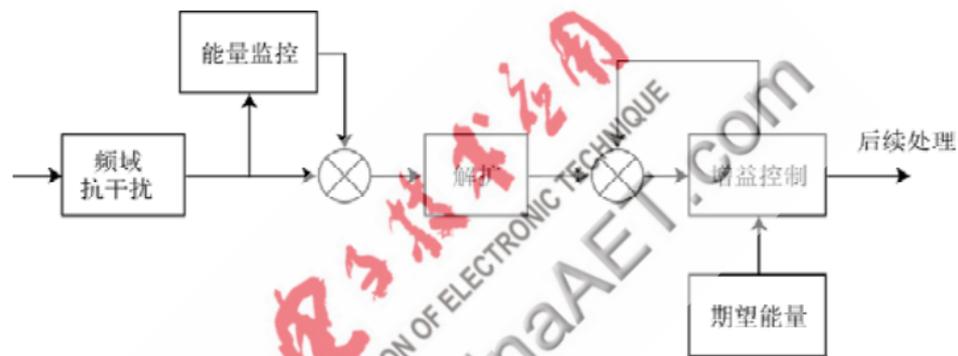


图7 双级 AGC 结构

- [3] HEINRICH M. Digital communication receivers: synchronization, channel estimation, and signal processing. John Wiley & Sons, 1998.
- [4] STEVEN M K. 统计信号处理基础——估计与检测理论[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [5] MARVIN K.S. Spread spectrum communications handbook, McGraw Hill.

- [6] SZU Lin Su, NAN Yang Yen. Performance of combined DDLL and AGC loop for direct\_sequence spread\_spectrum systems. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(9): 1455-1458.

(收稿日期: 2009-03-06)