

文章编号: 1000-8349(2011)02-207-11



我国新一代 VLBI 数字基带 转换器研制进展

朱人杰 张秀忠 韦文仁 项 英 李 斌 吴亚军 王锦清
赵融冰 舒逢春 薛祝和 凌权宝 罗近涛 陈 岚

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 数字化是目前设备研制发展的趋势, 介绍了中国科学院上海天文台利用超大规模集成电路结合软件无线电技术, 自主研发的我国新一代 VLBI 数字基带转换器 (Chinese Data Acquisition System, 简称 CDAS)。文中描述了设备的工作原理及其组成, 并以 VLBI 观测实验数据证明其可行性。与原有的模拟设备 (Analog Baseband Converter, 简称 ABBC) 相比, 新设备具有体积小, 可靠性高, 性能好, 可维护性强等优点。该设备作为 VLBI 台站终端系统的核心部分, 安装在上海、北京、昆明和乌鲁木齐等相关台站, 为我国 VLBI 技术用于天文观测、大地测量和航天器测轨服务。

关键词: VLBI; 射频; 中频; 基带; 下变频; DDS

中图分类号: P228.6 **文献标识码:** A

1 引 言

甚长基线干涉测量 (VLBI, Very Long Baseline Interferometry) 是一种重要的射电天文观测技术。在多个 VLBI 台站共同协作下, 通过延长基线和提高观测频率, 可获得优于亚毫角秒级的空间分辨率, 并能以毫米级的精度测量上千公里的基线长度, 是现代天文观测中分辨率最高的观测手段之一^[1,2]。对于 VLBI 台站, 除了天线系统、接收机系统、时频系统以外, 还有非常重要的终端系统, 其核心部件是基带转换器 (BBC, Base Band Converter), 参见图 1。

收稿日期: 2010-07-28; **修回日期:** 2010-12-13

资助项目: 探月工程二期科研 (0824361002)

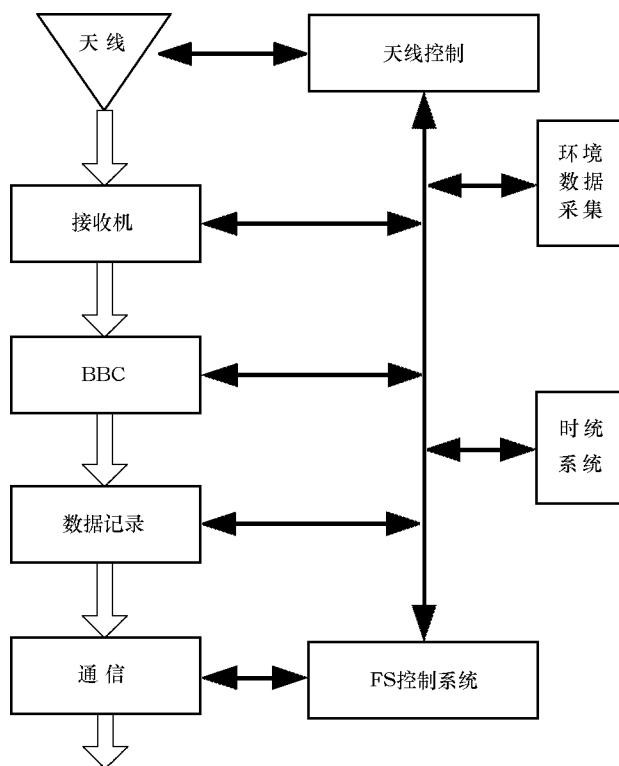


图 1 VLBI 观测站基本组成

国际上常规使用的是模拟基带转换器，通过分立元件，从宽带中频信号中提取所需要的窄带信号，并搬移到基频。国内上海佘山观测站和乌鲁木齐南山观测站以及新增的昆明站和北京密云站，目前所使用的均为模拟基带转换器。这些设备使用时间过久，一些元器件已经停产，使得设备维护极为困难，维护成本很高。随着超大规模集成电路和软件无线电技术的发展，数字化成为设备研制发展的一个方向。与模拟设备相比，数字基带转换器性价比高、带通特性好、稳定性和可靠性指标均优于模拟设备，但在其实现过程中，也会不可避免地遇到很多新问题。

目前包括上海天文台在内的一些国家的研究机构，都在致力研发新一代的数字化终端，用来替换模拟终端，如美国麻省理工大学 (MIT) 研发的 DBE (Digital BackEnd)，欧洲 VLBI 网 (EVN) 研发的 DBBC (Digital Base-Band Converter) 以及日本研发的 ADS3000+ 系列。这些设备都不约而同地采用了“高速 ADC (Analog-Digital Convert)+ 可编程器件 + 高速数字接口”的设计结构，以发挥软件无线电和数字信号处理的优势，在获得高性能的同时，最大限度地降低复杂性，提高可靠性和灵活性。

表 1 展示了以上各种数字化终端设备的性能指标。上海天文台的 CDAS，曾经在美国 Haystack 天文台与 DBE 以及 EVN 的 DBBC 进行兼容性测试，三台设备两两之间均获得零基线条纹。

表 1 数字终端性能比较

	CDAS	DBE [3]	DBBC [4]	ADS3000+ [5]
中频输入	4 路中频, 每路 10 ~ 512 MHz 或 512 ~ 1 024 MHz	4 路 500 MHz 带宽或 2 路 1 GHz 带宽	4 路中频, 每路 10 ~ 512 MHz 或 512 ~ 1 024 MHz	4 路中频, 每路带宽 2 GHz
采样率	1 024 MHz	1 024 MHz@500 MHz 或 2 048 MHz@1 GHz	1 024 MHz	4 096 MHz
输出子通道带宽	可选	32 MHz	可选	可选
最大子通道数	32	32	32	16
输出接口	VSI-H	VSI-H	VSI-H	VSI-H

2 CDAS 原理

CDAS 设备要求从带宽为 512 MHz 的中频, 在不同频点上按要求提取窄带信号, 并搬移至基带。与国外相应的终端设备设计类似, CDAS 也采用了“ADC + 可编程器件”的结构。如图 2 所示, 来自天线的射频 (RF) 信号经过射频接收机后, 变为中频 (IF); 中频信号再经抗混叠滤波器后, 由高速 ADC 数字化; 然后通过数字信号处理 (Digital Signal Process, 简称 DSP) 模块, 实现各种数字滤波 (Digital Filter)、直接数字频率合成 (Direct Digital Synthesizer, 简称 DDS)、数字下变频等算法处理, 并将处理后数据送至用户终端 [6]。根据采样定理, 对带宽为 512 MHz 的信号进行采样, 最低采样率应为 1 024 MHz, 这对 ADC 提出了很高的要求, 同时也对后端 DSP 单元的处理能力提出了很高的要求, 这些都是 CDAS 设备面临的挑战。

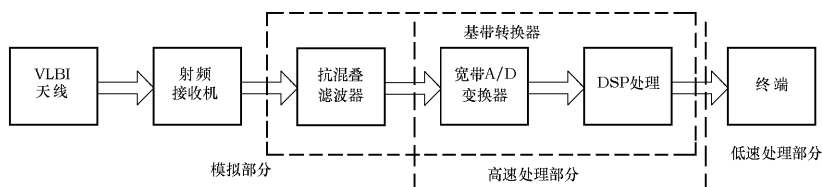


图 2 软件无线电典型结构图

DSP 处理单元的算法设计及其实现是 CDAS 设备的核心部分, 针对设备所要实现的功能, 有多种不同的算法。我们采用的是传统的相移法 [7], 由乘法器 (Multiplier)、低通滤波器 (Low-Pass Filter, 简称 LPF)、90° 移相网络和加法器 (Adder) 构成, 在 FPGA (Field Programmable Gate Array) 中实现上边带 (Upper Sideband, 简称 USB) 和下边带 (Lower Sideband, 简称 LSB) 的输出。

如图 3 所示, 假设

$$S_{\text{IF}} = \cos(\omega_1 t + \phi_1) + \cos(\omega_2 t + \phi_2) , \quad (1)$$

其中 ω_1 、 ω_2 为分别位于中心频率 ω_0 两侧的两个频率, 即 $\omega_1 < \omega_0 < \omega_2$, ϕ_1 、 ϕ_2 为其各自的初始相位。

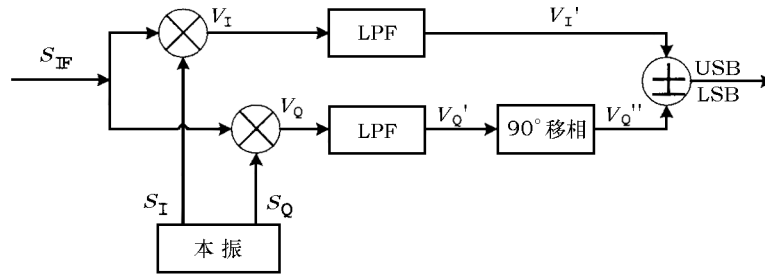


图 3 相移法原理

由本振产生的一对正交信号:

$$S_I = \cos \omega_0 t , \quad (2)$$

$$S_Q = \sin \omega_0 t , \quad (3)$$

分别与输入信号 S_{IF} 相乘, 得到 V_I 与 V_Q 分量:

$$\begin{aligned} V_I &= S_{\text{IF}} \times S_I = \\ & [\cos(\omega_1 t + \phi_1) + \cos(\omega_2 t + \phi_2)] \times \cos \omega_0 t = \\ & \frac{1}{2} \cos[(\omega_0 + \omega_1)t + \phi_1] + \frac{1}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_1)t - \phi_1] + \\ & \frac{1}{2} \cos[(\omega_2 + \omega_0)t + \phi_2] + \frac{1}{2} \cos[(\omega_2 - \omega_0)t + \phi_2] , \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_Q &= S_{\text{IF}} \times S_Q = \\ & [\cos(\omega_1 t + \phi_1) + \cos(\omega_2 t + \phi_2)] \times \sin \omega_0 t = \\ & \frac{1}{2} \sin[(\omega_0 + \omega_1)t + \phi_1] + \frac{1}{2} \sin[(\omega_0 - \omega_1)t - \phi_1] + \\ & \frac{1}{2} \sin[(\omega_2 + \omega_0)t + \phi_2] - \frac{1}{2} \sin[(\omega_2 - \omega_0)t + \phi_2] , \end{aligned} \quad (5)$$

经低通滤波器滤除高频分量后, 得:

$$V_I' = \frac{1}{2} \cos[(\omega_0 - \omega_1)t - \phi_1] + \frac{1}{2} \cos[(\omega_2 - \omega_0)t + \phi_2] , \quad (6)$$

$$V_Q'' = \frac{1}{2} \sin[(\omega_0 - \omega_1)t - \phi_1] - \frac{1}{2} \sin[(\omega_2 - \omega_0)t + \phi_2] , \quad (7)$$

其中 V_Q' 再经 90° 移项得:

$$\begin{aligned} V_Q'' &= \frac{1}{2} \sin \left[(\omega_0 - \omega_1)t - \phi_1 - \frac{\pi}{2} \right] - \frac{1}{2} \sin \left[(\omega_2 - \omega_0)t + \phi_2 - \frac{\pi}{2} \right] \\ &= -\frac{1}{2} \cos [(\omega_0 - \omega_1)t - \phi_1] + \frac{1}{2} \cos [(\omega_2 - \omega_0)t + \phi_2] , \end{aligned} \quad (8)$$

将 V_I' 与 V_Q'' 相加减, 就可以得到上下边带的输出, 即:

$$V_{\text{LSB}} = V_I' - V_Q'' = \cos [(\omega_0 - \omega_1)t - \phi_1] , \quad (9)$$

$$V_{\text{USB}} = V_I' + V_Q'' = \cos [(\omega_2 - \omega_0)t + \phi_2] . \quad (10)$$

3 CDAS 组成

3.1 系统架构

本文所涉及的基带转换器由模拟单元、数字单元两部分组成, 对输入的 512 MHz 宽带信号进行处理, 可以输出 8 路基带信号, 并可以扩展至 16 路基带信号。

模拟单元有 5 MHz 频标信号输入和中频信号输入, 其中 5 MHz 频标由原子钟产生, 经频率综合器后, 生成 1 024 MHz 正弦信号, 作为数字单元 ADC 的采样时钟。中频信号经中频 AGC 处理后, 提供给数字单元, 作为样本信号, 如图 4 所示, 在中频 AGC 单元内, 还整合了抗混叠滤波器。

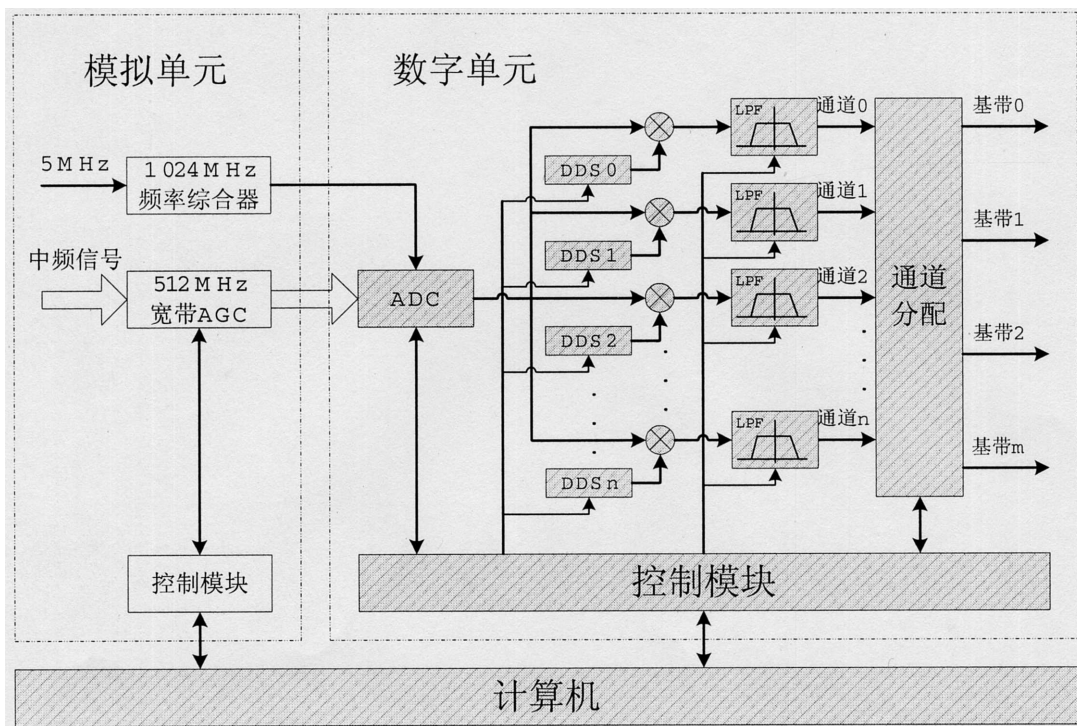


图 4 数字基带转换器框图

图中左框部分代表一个模拟单元,右框部分代表一个数字单元,两者共同构成一路中频处理单元。整个系统目前最多可同时对四路中频信号进行处理,每路中频处理单元可产生多个不同的基带信号数据流,由通道分配模块选择所需的基带信号输出,最多可输出 16 个基带信号(16 个基带信号 \times 1 bit),或 32 位数据流(16 个基带信号 \times 2 bit)。

模拟单元和数字单元通过各自的控制模块和计算机通信,计算机将设置的参数传递给相应模块,并监视各模块的状态。

3.2 模拟单元

模拟单元由频率综合器、中频 AGC 和 AGC 控制器三个模块组成。频率综合器模块的输入参考使用氢原子钟的 5 MHz 频标,输出高稳定 1 024 MHz 正弦波信号,作为数字单元高速 ADC 的采样时钟。

中频 AGC 模块由中频电路与控制电路组成,如图 5 所示,输入信号为接收机输出的中频信号,输出信号可以是频率范围 10~512 MHz 的低中频信号,也可以是频率范围 512~1 024 MHz 的高中频信号,信号功率 -34 dBm@512 MHz 带宽。来自接收机的中频信号首先进入第一个微波开关,该结构用于功率校准,当开关转换至 50Ω 匹配负载时,可测量射频 AGC 模块在零电平信号输入时的功率值。零电平功率值是计算 VLBI 系统温度的一个参数。然后信号进入第一个中频放大器,该放大器主要作用是降低系统噪声,因此采用低噪声放大器。经过放大的信号进入由两个微波开关和两个滤波器组成的选通结构,可以根据需要,对输出进行高中频/低中频的选择。

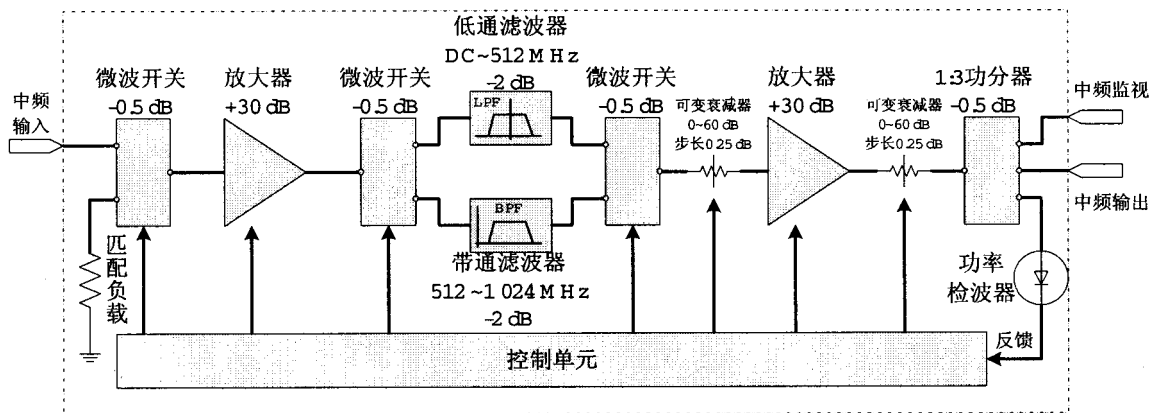


图 5 中频 AGC 模块结构框图

在中频 AGC 模块中设置了可变衰减器组,范围 0~60 dB,步长 0.25 dB,以适应卫星信号电平变动大的特点(局部频带内比射电源信号要高 40 dB),并满足 ADC 采样器输入信号电平变化 ± 0.5 dB 的要求。第二个中频放大器的作用是对信号进行放大,并具有较宽的动态范围,避免强信号引起饱和。经过选通和放大的中频信号最后由功分器分为 3 路:一路连接到面板的监视端口;另一路直接连接到数字单元的 ADC;第三路连接到射频功率检测器。控制模块对射频功率检测器进行功率数据采集并与预先设定功率阈值进行比较,通过控制可变衰减器组,最终形成自动增益控制的环路。

3.3 数字单元

数字单元由信号处理模块和通道分配模块以及接口电路组成, 如图 6 所示。信号处理模块采用高速 ADC 和超大规模 FPGA 结合软件无线电技术, 进行数字混频和数字滤波, 实现由中频到基带的转换, 再送至通道分配模块, 按实际需要选择所需的通道输出。在输出端还配有电平转换电路, 以适应不同的接口电平标准。

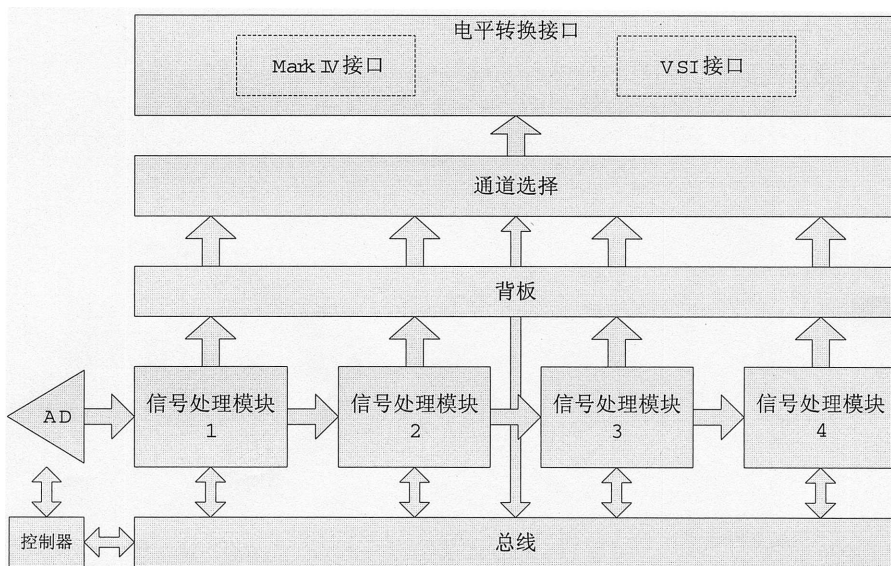


图 6 数字单元结构框图

根据带通采样定理, 对于 512 MHz 带宽的信号, 采样频率应为 1 024 MHz。该设备中, ADC 的采样时钟为 1 024 MHz, 输入电平动态范围为 ± 250 mV, 采样精度为 8 位字长。考虑到 ADC 芯片的驱动能力, 采样器和四个信号处理模块之间没有采用星型连接, 而是采用了菊花链型式, 逐级传递。这样做的好处是降低了电路板布线的难度, 但同时也引入了模块间的数据延迟。

采样后的中频信号, 在信号处理模块中完成混频和滤波。每个信号处理模块都有独立的数字本振, 由 DDS 产生, 频率可以设置, 步长为 10 kHz。混频后的低通滤波器可在 32 MHz、16 MHz、8 MHz、4 MHz、2 MHz 等不同带宽之间选择。最终的输出为以本振频率为中心, 某个固定带宽的上、下边带, 数据位长为 4 位。

每个数字单元包含 4 个信号处理模块, 而整个数字部分最多可容纳四个数字单元, 因此总共可以有 16 对上下边带的基带信号输出。在实际应用中, 往往需要对这些输出进行选择 and 分配, 因此, 在输出给物理接口之前, 插入了通道选择模块, 对基带信号进行边带和位长的取舍, 可以单边带输出, 也可以上下边带同时输出, 位长可以为 1 位、2 位或 4 位。

电平转换接口提供了两种接口形式, 分别适用于 MARK5A 记录终端和 MARK5B 记录终端。

4 CDAS 与 ABBC 的性能比较

4.1 实验方法

本文中的实验数据来源于项目组于 UTC 时间 2009 年 9 月 6 日进行的一次代码为 d0906p 的上海—昆明基线 VLBI 观测，观测对象是河外射电源 OJ287。

实验中，接收机输出的 S/X 波段信号经功分器分路后，同时送给 CDAS 和 ABBC，如图 7 所示，两套设备的输出数据分别由各自的 Mark5B 进行记录。对两台 Mark5B 记录的数据进行分析处理后，从带通特性、信噪比以及残余时延三个方面对 CDAS 和 ABBC 的性能进行比较。

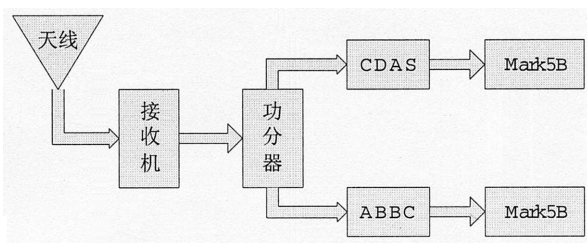


图 7 信号数据流

4.2 性能比较

4.2.1 带通特性

图 8 中 (a) 为 ABBC 的 8 MHz 带宽带通曲线，(b) 为 CDAS 的相应曲线。(a) 曲线约从 5.5 MHz 处开始下降，到 8 MHz 处衰减约为 2 dB，与 (b) 曲线相比，(a) 曲线在 5.5 MHz 到 7.5 MHz 内，依然平坦，7.5 MHz 之后开始下降，在 8 MHz 处已衰减接近了 3 dB，由此可见 CDAS 的带宽利用率高于 ABBC，且其衰减速度也更快。

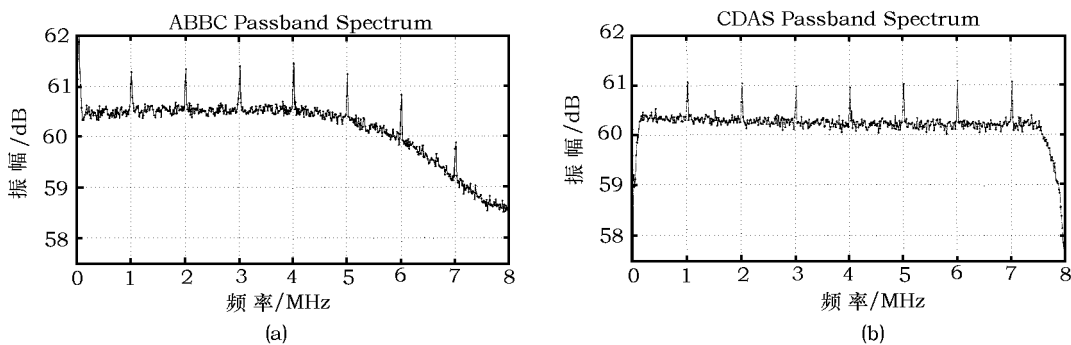


图 8 带通性能比较

4.2.2 信噪比

图 9 为经相关处理后，CDAS 和 ABBC 的信噪比对比， \diamond 为 CDAS 数据， $*$ 为 ABBC 数据。整个观测中，CDAS 信噪比的平均值约为 55.123 3 dB，比 ABBC 信噪比的均值

26.08 dB 高出约 30 dB。

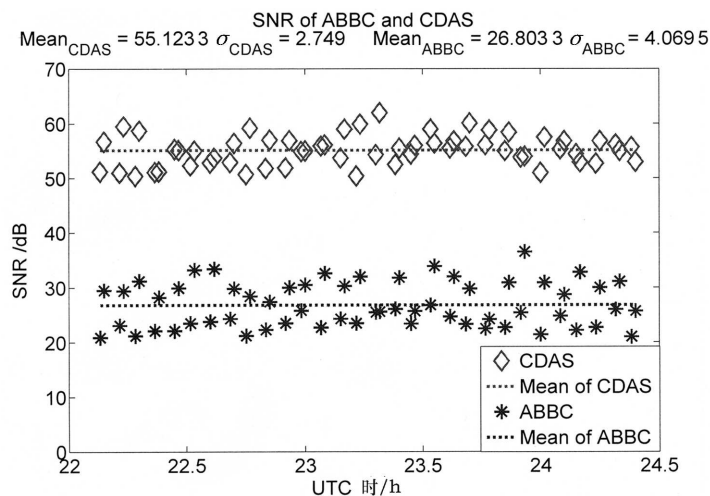


图 9 信噪比较

4.2.3 时延离散度

图 10 为残余时延的对比结果, 同样, \diamond 为 CDAS 数据, $*$ 为 ABBC 数据。虚线为对两组数据做最小二乘拟合后的结果, 两条直线的斜率相似, 而均方差分别为 1.2 和 4.1, 可见 CDAS 的时延离散度比要小于 ABBC 的时延离散度。

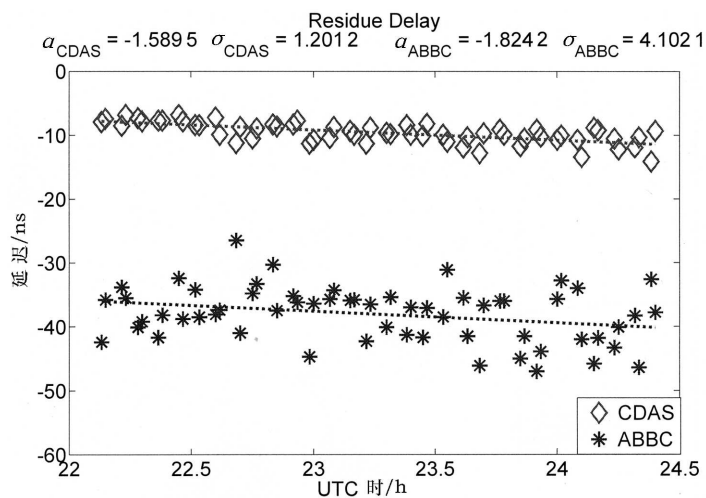


图 10 时延离散度比较

5 总 结

在项目组的共同努力下, 历经 3 a 时间, 完成了 CDAS 从硬件平台到核心算法的设计与

实现, 并且还与国际同类终端设备如美国的 DBE 和欧洲的 DBBC 进行了兼容性测试。相比而言, DBE 和 DBBC 主要应用于大地测量, 侧重点在时延测量, 而不关心信号幅度, 因此在算法上采用了多项滤波器组的设计; 这种设计对可编程器件的资源消耗相对较少, 使得硬件结构相对简单, 代价是通带内波动较大, 影响信号幅度。而 CDAS 采用“DDS+LPF”的算法结构, 以相对较大的资源消耗换取较小的带内波动, 使得终端既可用于大地测量, 也可用于天文观测, 代价则是硬件结构相对复杂, 功耗相对较高。

参考文献:

- [1] Ulvestad J, Goss M. *Sky & Telescope*, 1999, 98: 36
- [2] Koyama Y, Kondo T, Petrachenko W. *International VLBI Service For Geodesy and Astrometry-2004 General Meeting Proceedings*, 2004, 80: 94
- [3] Steven Durand. *Digital Implementation of the Pie Town Link*: <http://www.haystack.mit.edu/dech/vlbi/VLBI%20tech%20coord/2008.5.29%20US%20VLBI%20tech%20mtg/Durand-Digital%20implementation%20of%20Pietown%20link.pdf> Haystack-NRAO Technical Meeting, 2008: 9
- [4] Tuccari G. *The EVN DBBC Project*, http://www.radionet-eu.org/rda/archive/NA4-EN-SU-005-003_EVN%20DBBC%20Project_G.%20Tuccari.pdf2005: 5
- [5] Atsutoshi Ishii, Kazuhiro Takefuji, Hiroshi Takeuchi, et al. *Current Status of Developments of Digital Backend Systems at NICT Kashima*, http://www.fs.wetzell.de/veranstaltungen/vlbi/frff2009/DBE_DBBC/V2-C_DBE_correlation_Meeting_Ishii.pdf2009: 5
- [6] 张庆民. 博士论文, 合肥: 中国科学技术大学, 2000: 1
- [7] Comoretto G. *A digital BBC for the ALMA interferometer*, ALMA Memo #305, <http://www.alma.nrao.edu/memos/html-memos/alma305/memo305.pdf> 2000

The Progress of Modern Chinese Data Acquisition System

ZHU Ren-jie, ZHANG Xiu-zhong, WEI Wen-ren, XIANG Ying, LI Bin,
WU Ya-jun, WANG Jin-qing, XUE Zhu-he, ZHAO Rong-bing,
SHU Feng-chun, LING Quan-bao, LUO Jin-tao, CHEN Lan

(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

Abstract: With the development of software radio technologies, especially the using of programmable components, more and more equipments can be digitalized for its convenience, efficiency and reliability.

The Chinese Data Acquisition System (CDAS) independently designed by Shanghai Astronomical Observatory of CAS is a digitalized base band convertor for VLBI, which can take the place of traditional analog base band convertor. It consists of two parts. One is responsible for AGC (Automatic Gain Control) and anti-aliasing, which keeps the optimal quantization level for the ADC following. The other is responsible for data acquisition and process, which quantifies 512 MHz wideband signal by a high speed ADC and splits the broadband up to 32 baseband after calculating by FPGAs in real time. It also can be connected with either MK4 or MK5 recorder.

This article describes the principle of phase-shifting method applied, framework composed and experiment results obtained by CDAS. Compared to the traditional analog base-band converter, the experiment results obtained in terms of band-pass characteristics, SNR (signal-noise ratio) and delay dispersion for example, show the performance improvement of CDAS.

CDAS is not only smaller in size, but also higher performance. It will serve for geodesy, astrometry, and spacecraft orbit determination.

Key words: VLBI; radio; IF; base-band; down-convert; DDS