

◎ 研发、设计、测试 ◎

频率可调带宽可选的 VLBI 多相数字基带转换器

陈 岚^{1,2}, 罗近涛^{1,2}, 项 英¹, 张秀忠¹CHEN Lan^{1,2}, LUO Jin-tao^{1,2}, XIANG Ying¹, ZHANG Xiu-zhong¹

1.中国科学院 上海天文台, 上海 200030

2.中国科学院 研究生院, 北京 100049

1.Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

E-mail: chenlan@shao.ac.cn

CHEN Lan, LUO Jin-tao, XIANG Ying, et al. Polyphase based VLBI digital baseband converter with adjustable IF center frequency and bandwidth. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(2): 55-59.

Abstract: The VLBI (Very Long Baseline Interferometry) data acquisition backend plays an important role in the VLBI station. Recently, based on advances in digital hardware like ADC (Analog-to-Digital Conversion), DSP (Digital Signal Processing), FPGA (Field Programmable Gate Arrays) and so on, it has become practical to sample and digitally process the intermediate frequency signal directly. DBBC (Digital Base-Band Converters) will replace ABBC (Analog Base Band Converters) in the VLBI data acquisition backend. A VLBI digital backend using poly-phase filter banks exits blind frequency zone inevitably. Moreover, the frequency and the band width are not adjustable in this method. This paper analyzes this limitation and presents a sequence of simple modifications to sampled data structures based on the analog prototype system to obtain the poly-phase structure in the VLBI data acquisition backend which can eliminate the blind frequency zone. The theoretical principles of digital SSB (Single Side Band) converters are discussed in detail. The approach adopts multi-rate signal processing for the designed filters in a digital SSB converter which is carried out by virtex-4 FPGA chips. The result of hardware VLBI experiments indicate that it can receive random IF band-pass in and bandwidth can be selected. Meanwhile, a conclusion is reached from the experiment that the VLBI DBBC has a better band pass performance than the ABBC.

Key words: Very Long Baseline Interferometry (VLBI); digital base-band converter; Single Side Band (SSB); poly-phase filter banks; blind frequency zone; Field Programmable Gate Arrays (FPGA)

摘 要: VLBI 数据采集终端是 VLBI 台站的重要设备, 近年来随着数字硬件设备例如 ADC、DSP、FPGA 的快速发展, 数字基带转换器代替模拟基带转换器成为现实。现有采用多相滤波器实现 DBBC 的方法不可避免存在盲区, 且频率、带宽均不可调。提出一种通用的基于多相结构的宽带数字下变频方法, 将多速率信号处理和并行处理方法应用在其中, 成功实现了 VLBI 多个通道的单边带数字基带转换, 且能实现中频中心频率可调、带宽可选。硬件测试结果表明 VLBI 数字基带转换器频率设置正确, 带宽选择正确, 且数字基带转换器带通特性好于模拟基带转换器。

关键词: 甚长基线干涉测量; 数字基带转换器; 单边带; 多相滤波器组; 盲带; 现场可编程门阵列

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.02.018 文章编号: 1002-8331(2010)02-0055-05 文献标识码: A 中图分类号: TN911.7

1 引言

甚长基线干涉测量 (VLBI) 是一种重要的射电天文技术。它采用无线电干涉法, 将多个位于距离数百乃至数千公里长度基线两端的口径较小的射电望远镜, 合成为巨大的综合孔径望远镜, 其最大等效直径为望远镜之间的最长基线长度。VLBI 通过延长基线和提高观测频率可获得极高空间分辨率和基线测

量精度, 已能获得好于亚毫角秒的极高分辨率, 也能够以毫米的精度测量上千公里的基线长度。VLBI 是目前分辨率最高的天文观测技术^[1-2], VLBI 系统原理如图 1^[3]。

VLBI 以高稳定的氢原子钟信号作为独立频率标准, 以观测站的射电望远镜接收无线电信号, 将其变换为 0 至数 MHz 的基频带信号, 并被分离成上、下边带 (如图 2^[4]) 后, 进行数字化

基金项目: 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.10503009, No.10978024)。

作者简介: 陈岚 (1968-), 女, 博士生, 主要研究领域: 实时高速数字信号处理; 罗近涛 (1982-), 男, 博士生, 主要研究领域: 天文技术与方法; 张秀忠 (1947-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域: 天文技术与方法、计算技术应用、实时高速数字信号处理。

收稿日期: 2009-09-14 修回日期: 2009-10-16

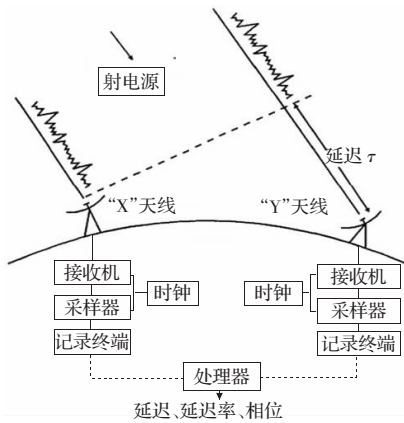


图1 VLBI 系统原理

采样、记录或传输。在传统的 VLBI 技术中,观测站获得的海量数字化数据先记录在磁带上,再传送到数据处理中心的相关处理机进行事后相关处理,近年来发展迅速的 e-VLBI 采用硬盘记录,并通过网络将观测数据传输到数据处理中心的相关处理机进行处理。实时 VLBI,在作为 e-VLBI 高级阶段,采集数据后无需记录,直接传送到相关处理机,可做到边观测、边传送、边相关处理^[9]。

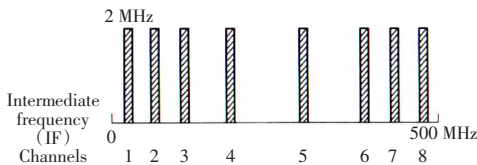


图2 中频信号和基频带信号

VLBI 记录终端核心部件是基带转换器。目前国际上常使用的是模拟基带转换器(ABBC),ABBC 特别昂贵,而且维护极为困难,现已不生产。世界上正在发展宽带数字记录终端—数字基带转换器(DBBC),以取代模拟记录终端。

随着 A/D 采样芯片的速度越来越快,人们可以在更高的频率(1~2 GHz)上将模拟信号转化为数字信号。软件无线电的基本思想是:通过将 A/D 和 D/A 向 RF 端靠近,在数字式硬件平台上用软件实现尽可能多的无线电功能,从而使系统具有良好的灵活性和可扩展性^[6]。

实时处理 A/D 输出的高速数据流与后端 DSP 的低速处理速率的差异,成为电子系统软件化的瓶颈。VLBI 数字基带转换器是运算复杂度很高的信号处理单元,研究其高效的处理结构对于缓解 DSP 瓶颈,降低 A/D 的数据速率,同时尽量保证信号不失真,真正实现宽带处理具有重要意义。

降低数据速率有两种基本实现方法,一种是带通滤波后对信号进行抽取;另一种是数字下变频法,基本过程是对信号进行下变频,经低通滤波器后进行抽取。前者对信号抽取前的带通滤波器提出了很高的要求,如工作速率以及带通滤波器的中频可变性等;数字下变频方法对下变频乘法器提出了很高要求(其工作速率与前端高速 A/D 工作速率相同),现有乘法器无论是专用或是高速 FPGA 器件均无法实现 A/D 变换器 1~2 GHz 这么高的速率。一般采用两种方法进行下变频,一是对频谱进行均匀划分,采用多相结构的低通滤波器组降低数据率实现,文献[7-8]采用这种架构的滤波器组实现的数字基带转换器,这种架构只能实现单边带的变换,且不具备中频可变性。二是利

用文献[9]中提出的并行处理的方法降低数据率,采用低通滤波器实现一个通道的数字基带转换。

论文提出一种通用的基于多相结构的宽带数字下变频方法,将多速率信号处理方法和并行算法应用在其中,成功实现了 VLBI 多个通道的单边带数字基带转换,且能实现中频频率可调、带宽可选。

2 多相数字基带转换器的实现方法

2.1 信道的划分

文献[6]只推导了以下两种情况下的数字下变频的高效结构:(1)临界抽样条件下信号频带的划分^[6,10],其频谱划分方式如图3。(2)抽取因子 $D=2K$ (K 为信道个数)条件下信号频带划分^[6]。由于低通滤波器原型不可能为理想,所以不可避免存在盲带。

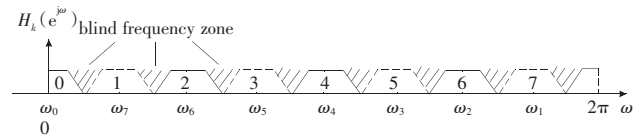


图3 一种实信号的信道划分

式(1)表示了一个理想低通滤波器原型的幅频特性,实际的滤波器往往存在过渡带,理想低通滤波器与实际低通滤波器的幅频特性如图4。实现图4(b)滤波器所需要的资源比实现图4(a)滤波器大大减少。

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \frac{\pi}{D} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

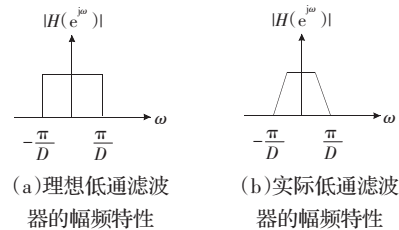


图4 理想低通滤波器与实际低通滤波器的频率特性

实际上,根据实际应用不同,常常需要不同的频带划分方式,决定不同的数字下变频的高效结构。为建立无盲带信号多信道基带转换的数学模型,首先,对信号的数字谱做如下的信道划分:

$$\omega_k = \frac{2\pi}{K}k + \frac{\pi}{2K} \quad k=0, 1, 2, \dots, D-1 \quad (2)$$

式(2)中, ω_k 为第 k 信道的归一化中心角频率。

图5为对应 K 信道信号的频谱分配图。采用幅频特性如图4(b)实际的原型低通滤波器原型,使滤波器的过渡带与通带相等,且相邻两个通道重叠 50%。

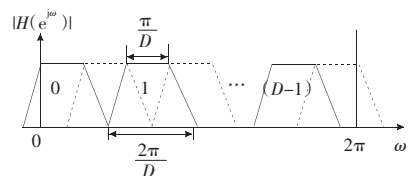


图5 信号的信道划分示意图

2.2 数字基带转换器的高效结构模型

一个带抽取器的均匀数字滤波器组其原理类似信道化接收机。设滤波器个数(即信道个数)为 K , 抽取因子 D , 两者满足 $K=FD(F>0)$ 的关系。滤波器组信道化接收机结构如图 6 所示。其中 $\omega_k, k=0, 1, \dots, K-1$, 是各信道的中心频率, 其值取决于信号频带划分方式。

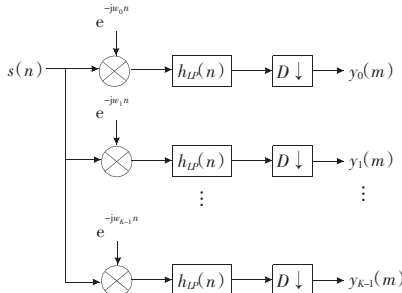


图 6 滤波器组信道化接收机结构图

2.2.1 普遍意义上的基于 DFT 多相滤波器高效结构的模型推导

图 6 所示的低通滤波器组实现的数字基带转换器当信道数多, D 值很大时, 各信道带宽较窄时, 低通滤波器所需要的阶数非常大, 且每个信道配一个这样的滤波器, 实现效率非常低。因此有必要研究其高效的实现方法。

由图 6 可得第 k 信道的输出为:

$$y_k(n) = \{ [s(n)e^{-j\omega_k n}] * h(n) \} \Big|_{n=mD} = \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} s(n-i)e^{-j\omega_k(n-i)} h(i) \right\} \Big|_{n=mD} =$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} s(mD-i)e^{-j\omega_k(mD-i)} h(i) = \sum_{p=0}^{K-1} \sum_{i=0}^{\frac{N}{K}-1} s(mD-iK-p)e^{-j\omega_k(mD-iK-p)} h(iK+p) \quad (3)$$

令: $s_p(m) = s(mD-p), h_p(m) = h_{LP}(mK+p), p=0, 1, \dots, K-1, K=DF, L=N/K$, 则有:

$$y_k(m) = \sum_{p=0}^{K-1} \left[\sum_{i=0}^{L-1} s_p(m-iF)e^{-j\omega_k(m-iF)D} h_p(i) \right] e^{j\omega_k p} = \sum_{p=0}^{K-1} \left[\sum_{l=0}^{(L-1)F} s_p(m-l)e^{-j\omega_k(m-l)D} h_p\left(\frac{l}{F}\right) \right] e^{j\omega_k p} \quad (4)$$

定义: $h_p'(l) = h_p\left(\frac{l}{F}\right)$ 为 $h_p(l)$ 经 F 倍内插的结果:

$$y_k(m) = \sum_{p=0}^{K-1} [s_p(m)e^{-j\omega_k mD} \times h_p'(m)] e^{j\omega_k p} \quad (5)$$

$$s_p'(m) = [s_p(m)e^{-j\omega_k mD}] \times h_p'(m)$$

$$\therefore y_k(m) = \sum_{p=0}^{K-1} s_p'(m) e^{-j\omega_k p} \quad (6)$$

由式(5), 只要相邻信道间隔为 $2\pi/K$, 无论是否满足临界抽样条件, 无论信道采用怎样形式进行排列, 都可以方便地得到数字基带转换器的高效结构。

2.2.2 多相滤波器组模型

因为 $\omega_k = (2\pi/D)k + (\pi/2D)$, 根据上述分析, 式(5)、式(6)可以写成式(7)、式(8)。

$$s_p'(m) = s_p(m) e^{j\omega_k mD} \times h_p'(m) = x(mD-p) \cdot e^{j\left(\frac{2\pi}{K} \cdot k + \frac{\pi}{2K}\right) \cdot m \cdot D} \times h_p'(m) =$$

$$(x(mD-p) \cdot e^{j\frac{\pi}{2}m}) \times h_p(m) \quad (7)$$

$$y_k(m) = \sum_{p=0}^{D-1} x_p(m) e^{j\omega_k p} = e^{j\frac{\pi}{2D}p} IDFT[x_p(m)] \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可得无盲带数字基带转换器高效结构如图 7。

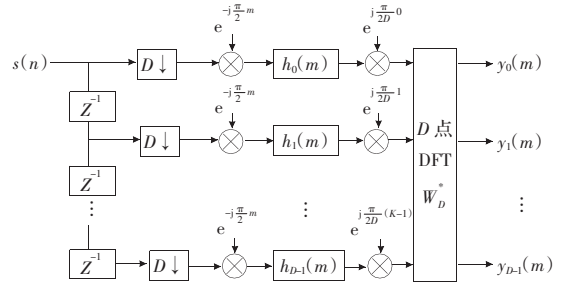


图 7 无盲带数字基带转换器的高效结构模型图

2.3 利用相移法实现从复数信号到单边带信号的输出

经过多相滤波器与 FFT 信道化以后, 信号的数据率已经下降为 A/D 数据率的 $1/D$, 在此信道内利用相移法实现任意频率的单边带基带信号的输出。其数学模型如图 8。

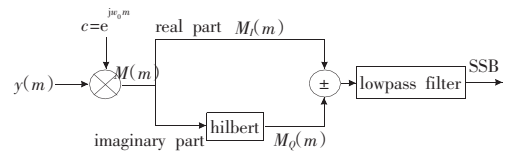


图 8 利用相移法实现单边带信号输出的模型图

这里: $M(m) = y_k(m) e^{-j\omega_c m}$ (9)

如果 $0 < \omega < \pi$

$$M(e^{j\omega}) = M_r(e^{j\omega}) + jM_i(e^{j\omega}) \quad (10)$$

$M_r(e^{j\omega})$ 和 $M_i(e^{j\omega})$ 是 $M(n)$ 的实部 $m_r(n)$ 和虚部 $m_i(n)$ 的傅里叶变换。

$M_r(e^{j\omega})$ 和 $M_i(e^{j\omega})$ 的关系可直接由式(11)和式(12)得到^[1]:

$$M_i(e^{j\omega}) = H(e^{j\omega}) M_r(e^{j\omega}) \quad (11)$$

或: $M_r(e^{j\omega}) = -H(e^{j\omega}) M_i(e^{j\omega}) \quad (12)$

这里: $H(e^{j\omega}) = \begin{cases} -j, & 0 < \omega < \pi \\ j, & -\pi < \omega < 0 \end{cases} \quad (13)$

$$f_{SSBU}(m) = M_r(e^{j\omega}) - H(e^{j\omega}) M_i(e^{j\omega}) = \begin{cases} 2M_r(e^{j\omega}), & 0 \leq \omega < \pi \\ 0, & -\pi \leq \omega < 0 \end{cases} \quad (14)$$

类似可得到下边带表达式:

$$f_{SSBU}(m) = M_r(e^{j\omega}) + H(e^{j\omega}) M_i(e^{j\omega})$$

2.4 多相 DBBC 的架构

经过合适选择接收频率 ω_0 及后面所跟的低通滤波器的带宽, 可以设计出 32 MHz、16 MHz、8 MHz、4 MHz、2 MHz、1 MHz、0.5 MHz 等不同带宽的数字基带信号输出。这样采用多相滤波器组与并行结构结合, 经过多级低通滤波器, 实现了一个带宽可选、频率可调的 VLBI 数字基带转换器。多相数字 SSB 下变频器的架构如图 9。多级低通滤波器的实现框图如图 10。

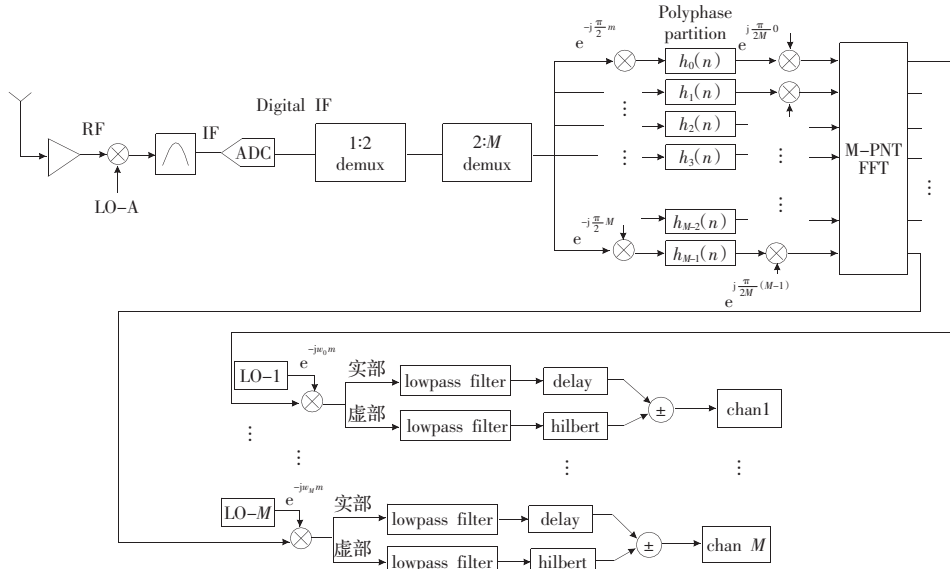


图9 基于DFT滤波器组和并行结构的多相DBBC架构图

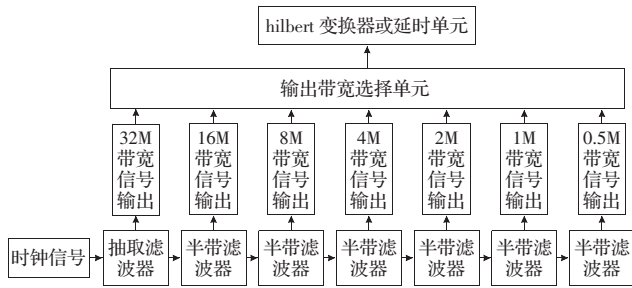


图10 多级低通滤波器实现框图

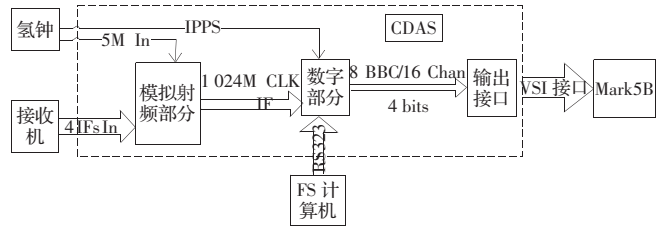


图11 CDAS框图

3 多相数字基带转换器的硬件实现

中国科学院上海天文台 VLBI 技术实验室从 2002 年开始研究数字滤波和数字基带转换器,于 2007 年正式启动 VLBI 数字基带转换器项目设计的数字采集系统(CDAS),其系统框图如图 11。数字部分的信号处理板如图 12^[12]。包括一块高速 A/D (Atmel AT84AD001B)、四块 Xilinx XC4VLX160 FPGA、一块 Xilinx XC4VFX60,其中 FX60 内嵌有 PowerPC405 硬核。在该电路板上实现数字部分控制功能和数字基带转换的功能即数字信号处理算法。



图12 VLBI 数字基带转换器信号处理板

4 测试结果

4.1 自相关测试

以上海天文台佘山观测基地的 X 波段接收机的信号作为 CDAS 的输入,输入中频频率 655.99 MHz,输出数据以 Mark5B 记录,记录模式为 1 bit,取上边带信号,用 Matlab 程序

处理,检测 CDAS 所有输出带宽的带通特性。不同带宽信号的自相关频谱如图 13 所示。其带通内的谱线为一列整数兆的梳状相位校正信号,为在图中的位置位于 0.01 MHz。由图 13 可以看出,DBBC 带通比较平坦,而且带通的有效利用率不小于 90%。

4.2 零基线测试

以上海天文台佘山观测基地的 X 波段接收机的信号作为模拟 BBC 和 CDAS 的输入,输入中频频率 655.99 MHz。模拟 BBC 的输出数据用 Mark_5A 系统记录,CDAS 的输出数据用 Mark_5B 系统记录,记录模式为 1 bit。得到 X1 波段 Mark_5A 与 Mark_5B 幅度相关谱和条纹如图 14,说明频率设置正确。ABBC 和 DBBC 相关输出条纹并不平坦,且在零频附近有一大拐,主要是由于 ABBC 中滤波器的非线性相位造成。

5 结论

针对 VLBI 的科学目标,讨论了基于多相滤波器和 FFT 构成的数字单边带基带转换器的原理与方法,采用一种具有普遍性的推导方法得到基于 DFT 多相滤波器组的数字信道化接收机的架构,在此基础上确定了基于多相滤波器的单边带数字基带转换器的实现方案,有效地克服了盲带,并且在 FPGA 中加以实现。实验结果表明,利用该方法不仅能使运算量大大减少,

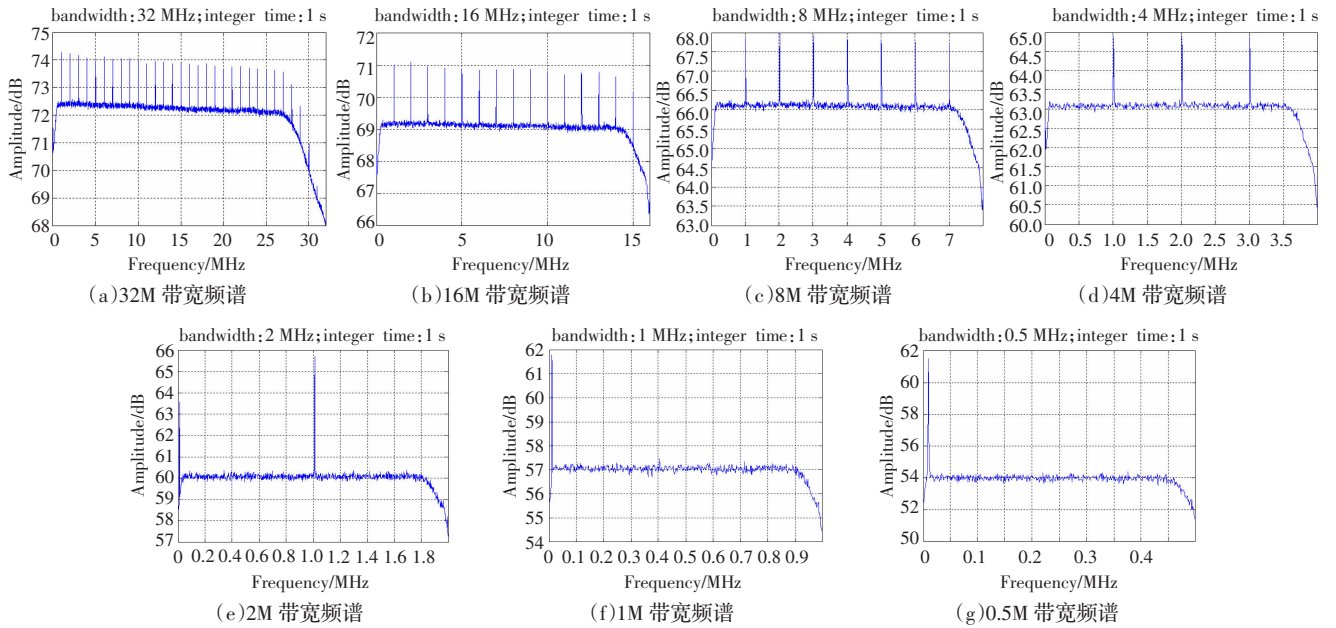


图 13 各带宽信号自相关频谱

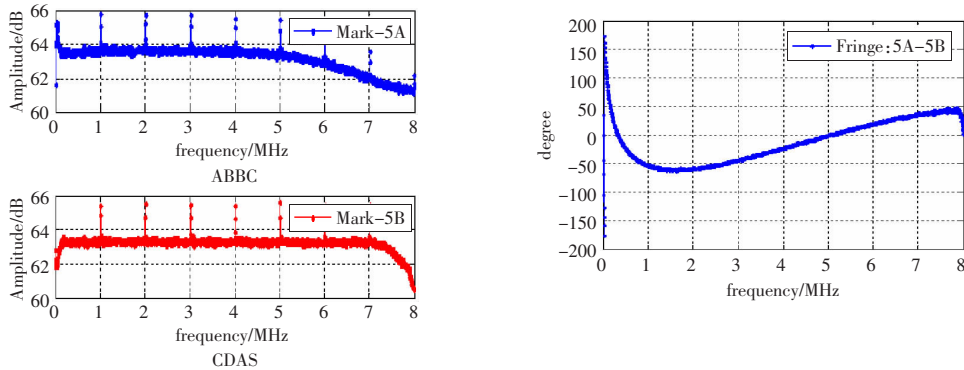


图 14 ABBC 和 DBBC 幅度互相关谱和条纹

而且能实现带宽可选、中心频率可调,且数字基带转换器带通特性优于模拟基带转换器。

参考文献:

- [1] Ulvestad J, Goss M. The very long baseline array, sky&telescope[J]. Radio Astronomy's Resolution Machine, 1999, 98(4): 36-41.
- [2] Koyama Y. Correlators in 2010 and beyond[C]//International VLBI Service For Geodesy and Astrometry, 2004 General Meeting Proceedings, Ottawa, Canada, 2004: 90-94.
- [3] Whitney A R. How do VLBI correlator work?[C]//Vandenberg N R, Baver K D. IVS 2000 General Meeting Proceedings, NASA, Maryland, 2000: 187-205.
- [4] Takahashi F, Kondo T, Takahashi Y, et al. Very long baseline interferometer[M]. [S.l.]: Ohmsha Press, 2000: 34-35.
- [5] 郑为民, 杨艳. VLBI 软件相关处理机研究进展及其在深空探测中的应用[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(5): 7-15.
- [6] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [7] Whitney A R. A wide-band VLBI digital backend system[C]//IVS 2006 General Meeting Proceedings, 2006: 72-76.
- [8] 陈岚, 张秀忠. 用于 VLBI 数字基带转换器的多滤波技术研究[J]. 天文学进展, 2008, 26(1): 87-94.
- [9] 项英, 朱人杰, Tuccari G. 宽带数字单边带下变频器[J]. 电子学报, 2006, 34(11): 1978-1980.
- [10] Harris F, Dick C, Rice M. Digital receivers and transmitters using polyphase filter banks for wireless communications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(4): 1395-1412.
- [11] Oppenheim A V, Schaffer R W, Buck J R. Discrete-time signal processing[M]. 2nd ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2005: 789-792.
- [12] Hong X Y, Zhang X Z. Progress of wideband VLBI digital system development at SHAO[C]//The 5th IVS General Meeting Proceedings, 2008: 381-385.