

新一代相位校准单元样机研制进展

王锦清¹, 李 炜^{1,2}, 马茂丽¹, 薛祝和¹

(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)

摘 要: 首先论述了相位校准单元当前的发展情况, 接着阐述了上海天文台设计的新一代相位校准单元的特点, 给出了相位校准单元样机的测试方法和测试结果, 并与旧的相位校准单元比较, 最后提出设计改进。

关 键 词: 相位校准; 测试; 相位; 幅度

中图分类号: P228.6, TN78

1 前 言

在测地和深空测量方面, VLBI 技术具有独特的优势, 可以达到很高的精度, 精度的高低首先依赖于 VLBI 测站接收系统的相位准确性和稳定性 (当然, 测站与测站之间满足时间同步是必需的条件)。而任何系统都有相位误差, 关键就是如何准确地标定这个系统误差, 在数据处理中补偿这个误差, 从而提高测量的精度, 这在卫星实时精密测定轨任务中尤为重要。这个技术的关键就是相位校准^[1]。

当前世界各国的相位校准单元基本都是 20 世纪 70 年代美国 Haystack 天文台设计的。由于当时半导体技术的限制, 设计都基于模拟器件, 对温度比较敏感; 另外, 经过多年的使用, 由于器件老化, 整体的可靠性和各项指标都已明显降低, 而且很多器件都已停产, 维护使用很困难。20 世纪 80 年代以来, 有不少关于如何改善相位校准的方法, 其中有如何提高频带覆盖的方法。文献 [2] 中的方法是以 Haystack 的模拟设计为基础, 只是改善了电路所处电磁环境, 从而提升性能。文献 [3] 中采用了微波延迟线和谐波发生器的方法, 使频带覆盖达到了 40 GHz, 但它的输入要求国内的台站无法满足, 而且在 10 GHz 以上其性能并不理想。此外还有一些关于如何有效利用现有的相位校准信号的方法, 如文献 [4]、[5], 但其中并没有提到如何从相位校准单元自身的设计上做改进。在此期间, 相位校准单元方面主要的工作也只是停留在完全翻抄或很有限的改进状态, 现在由于器件停产, 连翻抄都变得异常艰难。美国的 VLBI2010 计划中, 相位校准单元将改头换面: 完全采用当前顶级超高速数字电子器件, 加以完善的设计, 使之更稳定更准确^[6]。

2 新一代相位校准单元的特点

为了同时满足 VLBI 天文观测 (宽带) 和 VLBI 深空探测 (窄带) 的高精度需要, 新一代相位校准单元必须具有更好的性能和更强的功能。其主要具有以下优点:

(1) 梳状谱间隔可调, 可以兼顾窄带和宽带相位校准, 而以往的相位校准单元只有 1 MHz 间隔固定模式, 无法满足窄带相位校准;

(2) 具有实时跟踪基带转换器相频特性的能力，并以此为基础提高测量精度；

(3) 基于全数字超高速集成电路设计，比模拟器件具有更好的稳定性、抗干扰性以及低廉的成本，电路分布也更加合理。

为了观测卫星或航天器窄带信号时，能获得接收系统的相频特性，必须改进现有的相位校准单元。图 1 是相位校准单元的核心——梳状谱发生器的基本原理框图。为了获得覆盖至 10 GHz 以上、间隔可调的梳状谱，时域脉冲宽度必须达到 50 ps 左右，为此必须采用一系列超高速电路手段。

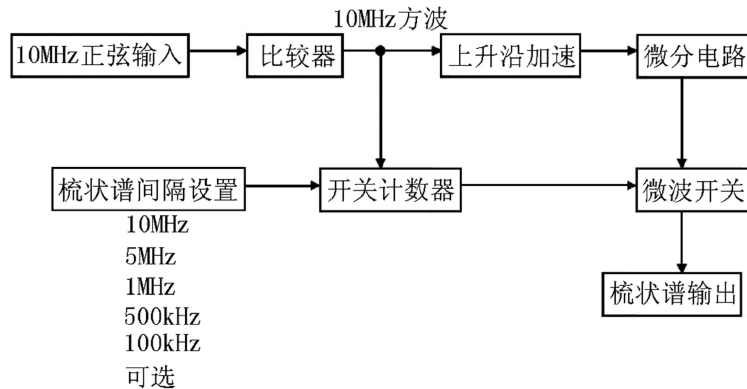


图 1 可变间隔梳状谱发生器

借鉴以往的相位校准单元的设计优点，依托现有高水平半导体技术，综合利用超高速数字集成电路和可编程器件，上海天文台设计实现了功能更强、性能更优、体形更小的新一代相位校准单元，并且有望在上海 65 m 射电望远镜上得到实际应用。

3 新一代相位校准单元样机测试

上海天文台立足自身，并参考国外相关设备的先进设计经验，开发了一台新的相位校准单元，图 2 其是实际电路，箱体尺寸为 68 mm×55 mm×16 mm。以下内容主要围绕测试方法和测试结论展开。首先讨论在实验室中的测试结果，然后介绍在佘山 25 m 射电望远镜上的测试情况。

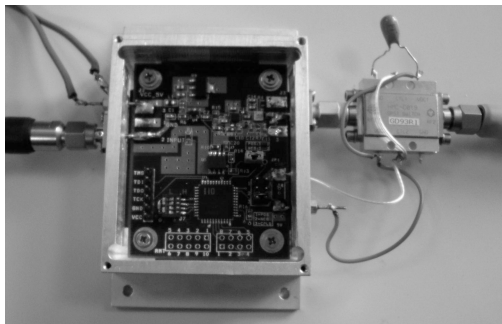


图 2 相位校准电路

3.1 实验室测试

图 3 是测试设备的连接示意图，测试仪器有稳压电源、信号发生器、示波器、频谱仪。信号发生器产生 10 MHz (或 20 MHz)，13 dBm 正弦信号输入。主要测试统计信息为：不同频点上的梳状谱线功率和谱线信噪比。

图 4 是中心频率为 2.5 GHz 时，1 MHz 间隔梳状谱情况；图 5 是中心频率为 8.0 GHz 时，1 MHz 间隔梳状谱情况；图 6 详细给出了不同梳状谱间隔模式下梳状谱的功率和信噪比变化规律。

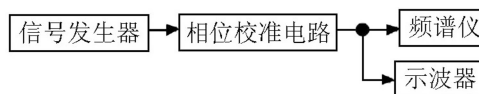


图 3 测试设备

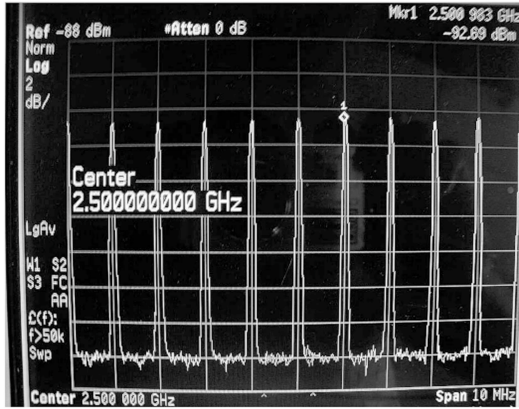


图4 中心频率 2.5 GHz, 带宽 10 MHz

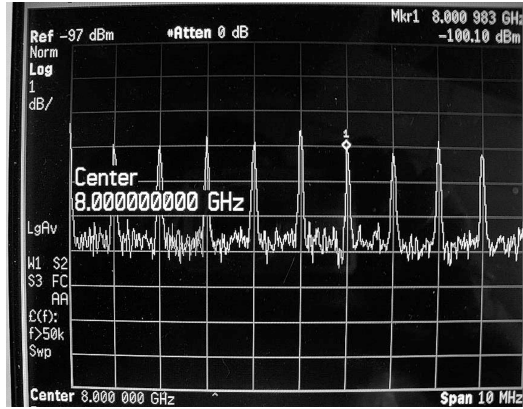


图5 中心频率 8.0 GHz, 带宽 10 MHz

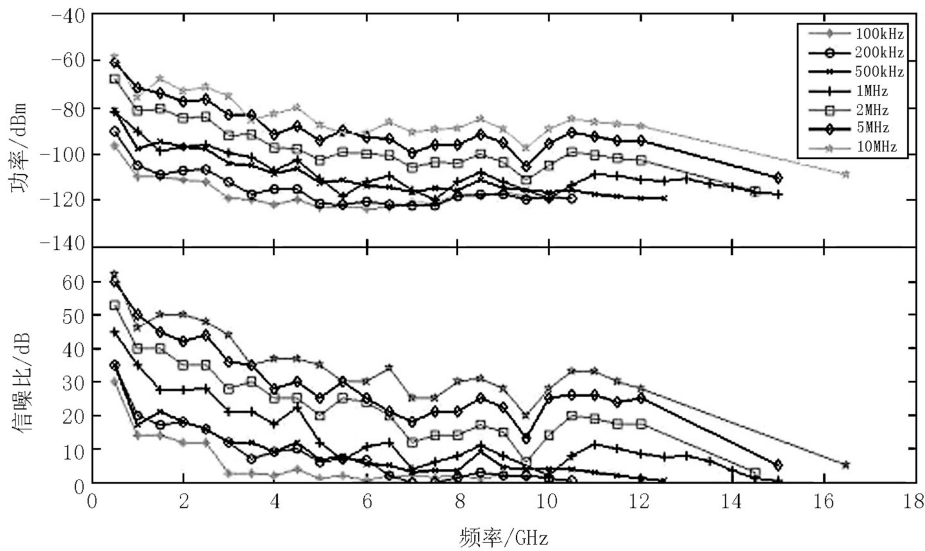


图6 各种间隔模式全频段功率和信噪比情况

从全频段来看, 1 MHz、2 MHz、5 MHz、10 MHz 模式的相位校正信号都能覆盖到 15 GHz 左右, 500 kHz 模式时可以覆盖到 12 GHz, 而 200 kHz、100 kHz 模式下信号只能覆盖到 6 GHz, 6 GHz 以上时其信噪比已经很低。这符合周期脉冲的规律, 在时域上间隔越密 (比如 10 MHz 周期) 的脉冲信号, 单位时间内总能量越强; 因为在时域上的周期脉冲在频域上同样表现出周期的特性^[1], 所以脉冲信号在频域上显示的特征为间隔越疏, 频带覆盖越宽。在 9.5 GHz 左右有一个明显的驻波凹坑, 这可能是因为电路的输出匹配不够宽。

上面 10 MHz、5 MHz 间隔的模式是为以后宽带天文观测带通校准准备的, 1 MHz 间隔是当前天体测量和大地测量采用的常规校准信号, 小于 1 MHz 间隔的模式一般用在卫星注入的窄带观测中, 用于校准 1 MHz 以内带通的相位变化。

图 7 详细地描述了 S 和 X 两个波段的梳状谱情况, 这两个波段是天文和深空探测极为重要的波段。从图 7 可以看出, 在 S/X 波段, 各种间隔模式的梳状谱功率和信噪比比较平坦, 驻波情况不明显。

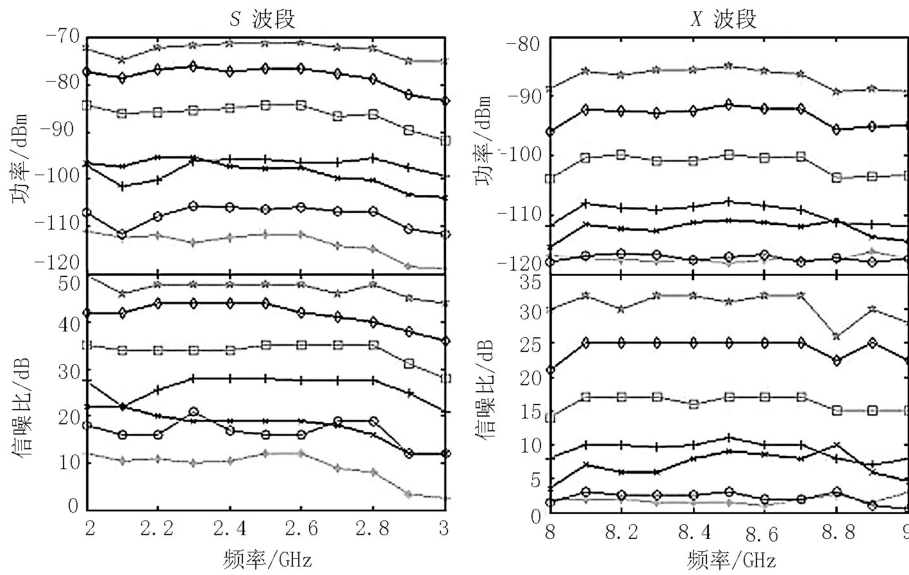


图 7 S/X波段各种模式梳状谱功率和信噪比情况
各线型表示的间隔模式与图 6 相同

3.2 佘山 25 m 现场测试

图 8 是佘山 25 m 射电望远镜接收终端简图，虚线框内为基带转换器。相位校准单元在 1 MHz 间隔的工作模式，基带转换器设置为 4 MHz 带宽，这样在输出中就可以看到 4 根谱线，如图 9 所示。在实际测试时采用了 4 个基带转换器并且设置都一样。

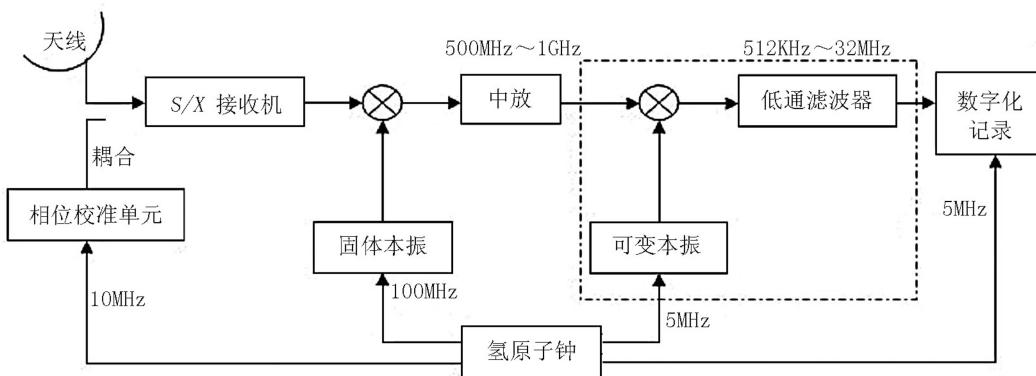


图 8 佘山 25 m 射电望远镜接收终端框图

监视 5 h 左右的短时间内相位校正信号幅度和相位的变化稳定性。图 10、图 11 是由 1 号基带转换器输出的 4 根谱线解出的幅度和相位。图 12、13、14 分别是由 2、3、4 号基带转换器输出的 4 根谱线解出的幅度和相位。

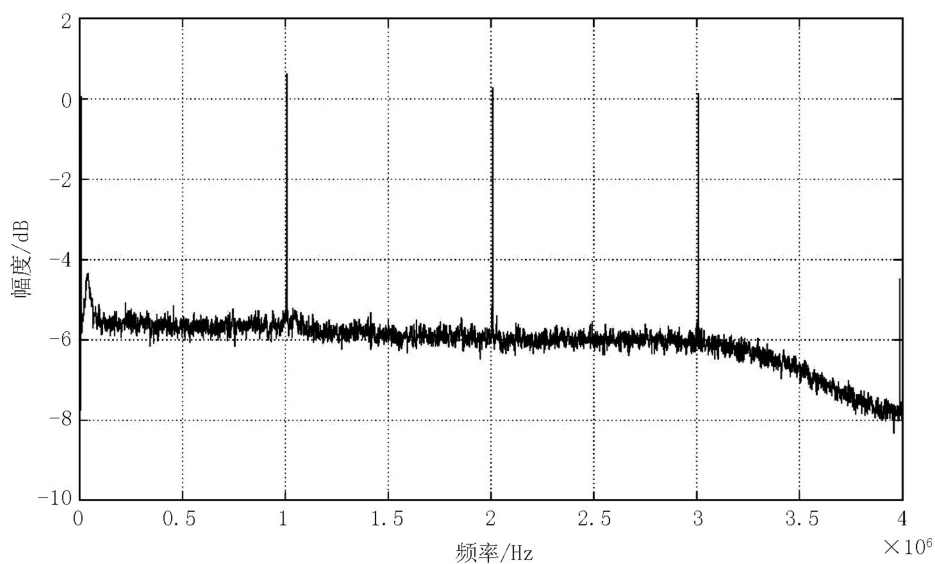


图9 4 MHz 基带输出时的相位校准信号

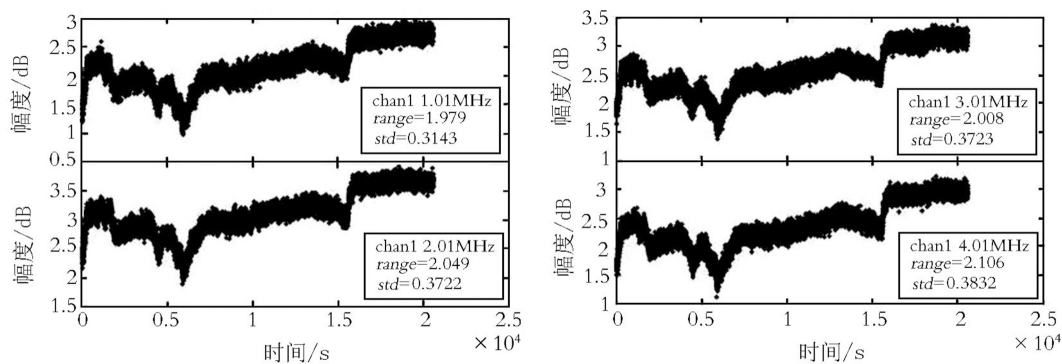


图10 1号基带转换器输出的4根谱线解出的幅度

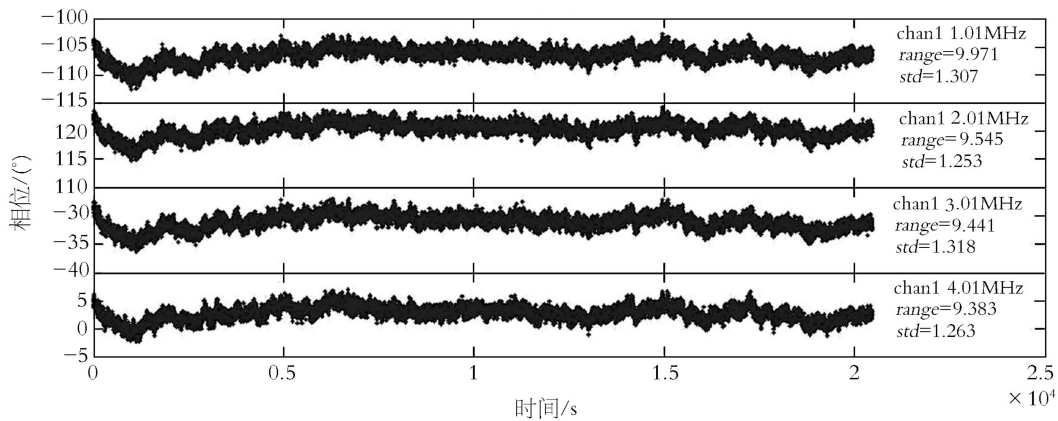


图11 1号基带转换器输出的4根谱线解出的相位

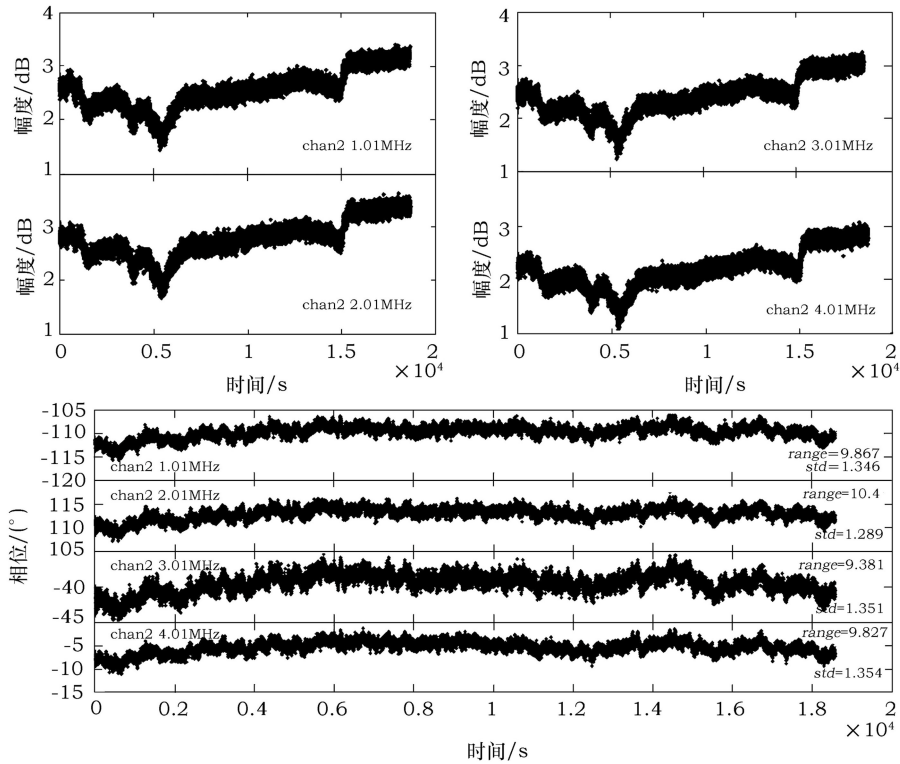


图 12 2 号基带转换器输出的 4 根谱线解出的幅度、相位

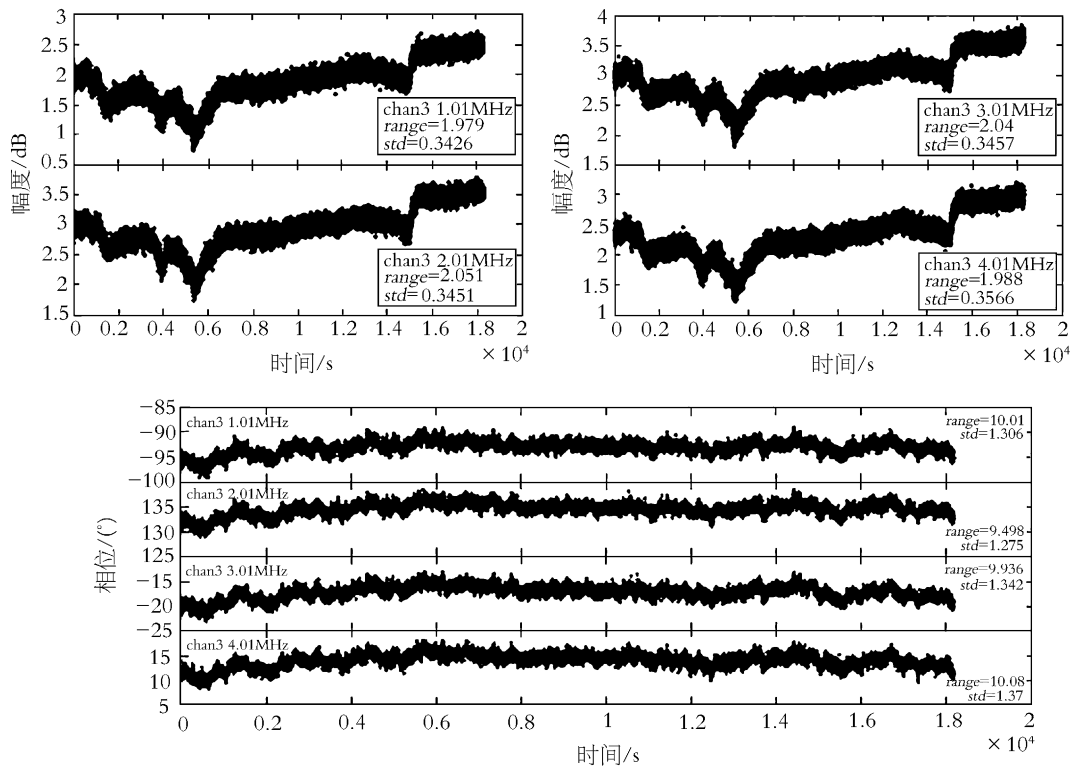


图 13 3 号基带转换器输出的 4 根谱线解出的幅度、相位

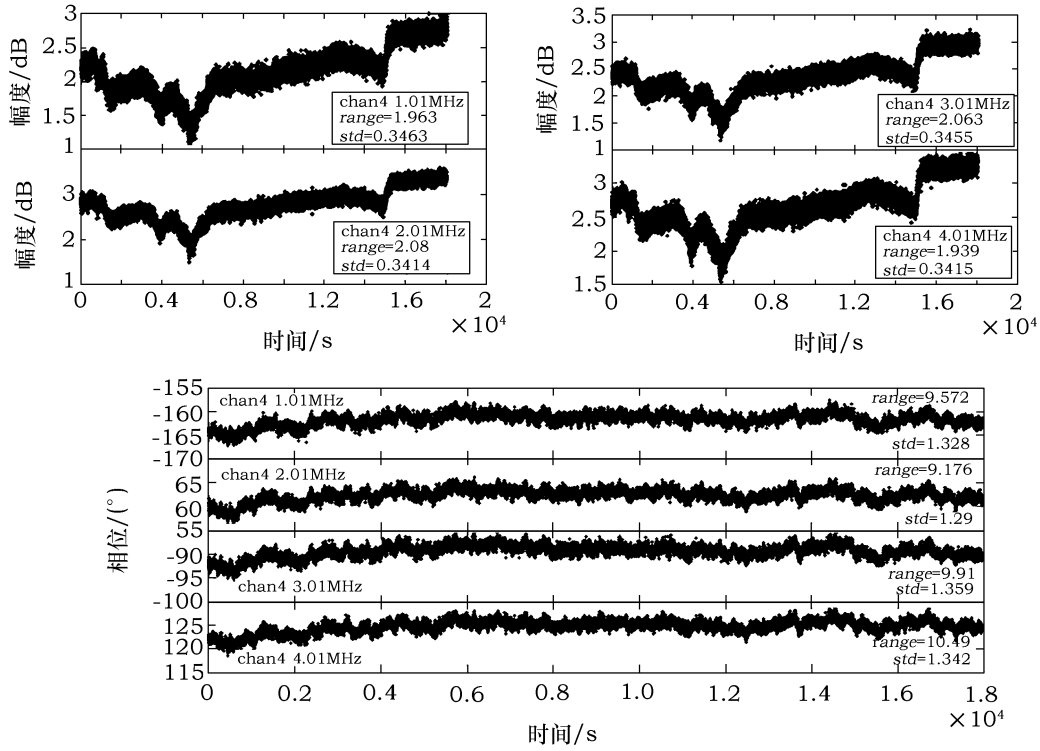


图 14 4 号基带转换器输出的 4 根谱线解出的幅度、相位

为了对比,把相位校准单元换回旧的,然后重复上面的测试。图 15、图 16 给出了某个基带转换器的测试结果,其余三个的情况可以参考表 2。

可以用相位校准信号的幅度、信噪比以及相位实测参数,分析信号的质量。在数据处理中,幅度影响不大,而相位短小时内(几分钟)的大尺度变化(10°以上)是不可容忍的。

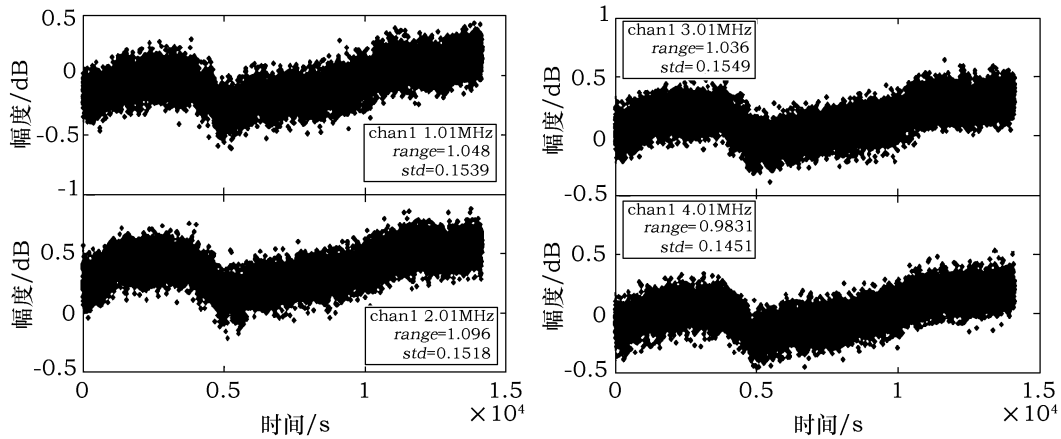


图 15 4 根谱线解出的幅度

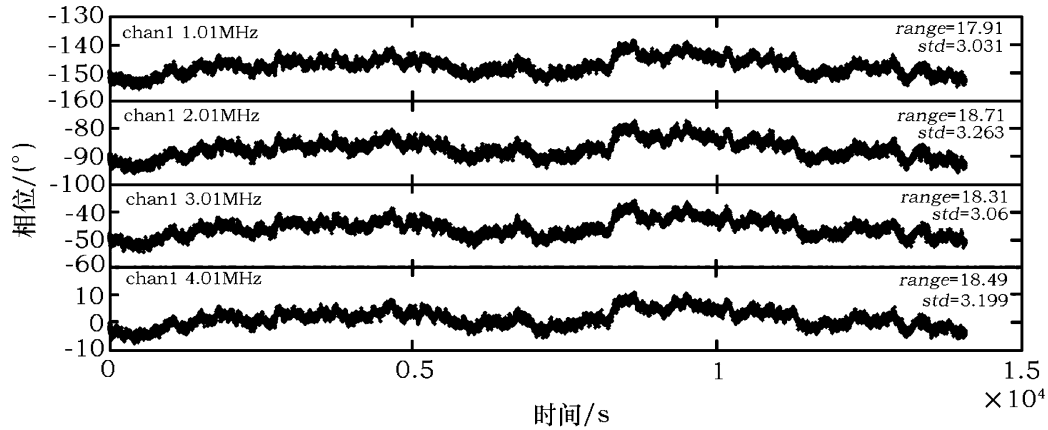


图 16 4 根谱线解出的相位

从表 1 和表 2 中可以看出，在 5h 内，新相位校准信号同一谐波分量的幅度最大变化为 2 dB，相位最大变化为 10°；而旧相位校正信号同一谐波分量的幅度最大变化为 1 dB，相位最大变化为 18°。从幅度谱来看，新相位校正信号的自相关谱功率比旧相位校正信号的自相关谱大 2 个 dB。

表 1 新相位校准单元测试性能

BBC 序号	幅度		相位	
	谱线 /Mhz	范围 /dB	范围 /(°)	标准差 /(°)
01	1.01	1.939	9.971	1.307
	2.01	2.049	9.545	1.253
	3.01	2.008	9.441	1.318
	4.01	2.106	9.383	1.263
02	1.01	1.971	9.867	1.348
	2.01	1.976	10.4	1.289
	3.01	2.015	9.381	1.351
	4.01	1.999	9.827	1.354
03	1.01	1.979	10.01	1.306
	2.01	2.051	9.498	1.275
	3.01	2.04	9.936	1.342
	4.01	1.988	10.08	1.37
04	1.01	1.963	9.572	1.328
	2.01	2.08	9.176	1.29
	3.01	2.063	9.91	1.359
	4.01	1.939	10.49	1.342

4 下一步工作

从样机的测试结果可以看到，新相位校准单元尚存在一些不足之处。下一步工作的重

表 2 旧相位校准单元测试性能

BBC 序号	幅度			相位	
	谱线 /Mhz	范围 /dB	标准差 /dB	范围 /(°)	标准差 /(°)
01	1.01	1.048	0.153 9	17.91	3.031
	2.01	1.096	0.151 8	18.71	3.263
	3.01	1.036	0.154 9	18.31	3.06
	4.01	0.9831	0.145 1	18.49	3.199
02	1.01	1.098	0.153 3	18.29	3.002
	2.01	1.114	0.153 7	18.19	3.208
	3.01	0.866 3	0.145 2	18.98	3.046
	4.01	1.011	0.145 3	18.55	3.088
03	1.01	1.023	0.156 3	17.49	2.994
	2.01	0.993 1	0.151 6	18.37	3.218
	3.01	1.009	0.151 5	17.81	3.034
	4.01	0.993	0.147 7	18.18	3.102
04	1.01	1.031	0.147 2	18.95	3.086
	2.01	1.048	0.159	18.72	3.216
	3.01	0.909 6	0.139 8	19.12	3.17
	4.01	0.963 9	0.148 8	19.17	3.158

点:

- (1) 进行电路负载匹配, 改善和克服在全带宽上的驻波特性;
- (2) 改进电路设计, 提高抗电磁干扰能力, 以满足不同环境要求;
- (3) 进行相位校准单元半导体致冷恒温实验, 使梳状谱相位稳定性得到进一步提高;
- (4) 测试并改善 500 kHz、200 kHz和100 kHz间隔的梳状谱特征和频谱覆盖, 最终满足窄带校准的更高精度需求。

参考文献:

- [1] 王锦清, 韦文仁. 中国科学院上海天文台年刊, 2006, 27: 83
- [2] Hamell R, Tucker B, Calhoun M. IPN Progress Report, August 15 2003: 42
- [3] Thomas Wayne, Smith R Clayton, Schoen Kipp. Comb Generator with Excellent Harmonic Flatness to >40 GHz, Picosecond Pulse Lab
- [4] Thomas J B. DSN Progress Report, January and February 1978: 42
- [5] Jacobs C S. TMO Progress Report, August 15 1998: 42
- [6] http://www.haystack.mit.edu/tech/vlbi/mark5/mark5_memos/075.pdf

The Process of the New Phase Calibrator Development

WANG Jin-qing¹, LI Wei^{1, 2}, MA Mao-li¹, XUE Zhu-he¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract: The development of the current phase calibrator is described at the beginning of the article. The characters for the new phase calibrator are listed. The test methods and results are supplied along with the comparison with the old phase calibrator. At last, the ways to improve the performance of the design is listed.

Key words: phase calibrator; test; phase; amplitude