

70 GHz 取样示波器上升时间与频响的校准

马红梅 邓明纫 苏水金 王公森
(北京无线电计量测试研究所,北京 100039)

摘要 根据 Nose-to-Nose 校准原理,利用两台 50 GHz 取样示波器与一台 70 GHz 取样示波器两两对接,实现了 70 GHz 取样示波器上升时间与频响的校准,并与传统的扫频法和先进的光电脉冲法进行了比较。详述了 70 GHz 取样示波器上升时间与频响的校准原理、校准过程及校准结果。

关键词 取样示波器 校准 Nose-to-Nose

The Calibration for Risetime and Frequency Response of 70 GHz Sampling Oscilloscope

MA Hong-mei DENG Ming-ren SU Shui-jin WANG Gong-sen
(Beijing Institute of Radio Metrology & Measurement, Beijing 100039)

Abstract According to nose-to-nose calibration principle, using two 50 GHz sampling oscilloscopes and a 70 GHz sampling oscilloscope, the calibration for risetime and frequency response of 70 GHz sampling oscilloscope is performed, the calibration result is compared with the corresponding results of swept-sine measurement method and optoelectronic measurement method. Gives the calibration principle, process and result for risetime and frequency response of 70 GHz sampling oscilloscope.

Key words Sampling oscilloscope Calibration Nose-to-Nose

1 引言

脉冲技术广泛应用于当今的军事、民用、通信等各个领域。窄脉冲由于其发射功率强,穿透性强、分辨力高、抗干扰能力强等优点,在军事和民用方面都有很大的应用潜力。随着电子技术的发展,窄脉冲技术已经进入了皮秒时代,皮秒量级波形的测试成为非常重要的问题。

要对皮秒数量级的波形进行测量,需要带宽几

十吉赫兹的示波器。目前取样示波器的带宽可以到达 70 GHz 甚至更高的频率,上升时间为 5 ps 左右,其上升时间和频响特性的校准面临严峻挑战。利用标准快沿产生器在时域上校准示波器是最常用的方法,但目前国内可得到的最快的电脉冲产生器的上升时间是 25 ps,无法校准宽带取样示波器的上升时间;扫频法是测量示波器频响特性的常用方法,但这需要 70 GHz 以上的信号源和功率计,成本非常高。目前宽带取样示波器上升时间和频响特性的校准是我国脉冲参数计量领域的一个难题。

宽带取样示波器的设计者 K. Rush 等人提出了一个设想,即不使用任何其它仪器,只是将两台性能完全一样的取样示波器的输入通道直接对接,利用产生的“Kick-out”脉冲对取样示波器进行校准,这种校准方法称为“Nose to Nose”^[1]。现在国际上美国 NIST、英国 NPL、比利时、匈牙利等国家都在研究和应用“Nose to Nose”技术,中国国家计量院也利用两台完全相同的 50 GHz 示波器进行了研究。北京无线电计量测试研究所利用不同带宽的示波器进行“Nose to Nose”技术研究,成功校准了带宽为 70 GHz 的取样示波器的上升时间和频响。

2 “Nose to Nose”校准法的基本原理

“Nose to Nose”法校准取样示波器的实质就是利用取样示波器的冲激响应来推算出上升时间和幅频特性。其基本原理为:将两台性能完全一样的取样示波器的输入端直接对接起来,一台取样示波器当接收到触发信号进行取样时,其内部直流偏置信号不为零时,会向示波器的输入端发出一个脉冲信号,把这个信号称为“Kick-out”脉冲。另一台取样示波器接收“Kick-out”脉冲并采集数据,该数据应该是发射“Kick-out”脉冲示波器与接收“Kick-out”脉冲示波器的冲激响应的卷积,通过数据处理可得到取样示波器的上升时间和幅频特性^[2]。

由于输入网络的互易性,示波器发射的“Kick-out”脉冲与其冲激响应成正比。因此利用性能完全一样的取样示波器直接对接,通过计算机采集“Kick-out”脉冲在接收示波器上的响应波形,然后对采集到的波形进行反卷积分离就可以得到每台取样示波器的冲激响应,最后由冲激响应可以求出该取样示波器的幅频响应和上升时间。由于现实中没有两台完全一样的取样示波器,因此可以利用三台取样示波器,两两对接,进行三次测量,通过联立方程求解以及反卷积分离法分别提取这三台取样示波器的冲激响应,利用每台取样示波器的冲激响应求出每台取样示波器的幅频响应和上升时间。

如果用 A, B, C 表示三台取样示波器, $k_A(t)$, $k_B(t)$, $k_C(t)$ 分别表示 A, B, C 三台取样示波器发出的“Kick-out”脉冲, L_A , L_B , L_C 分别表示 A, B, C 发出的“Kick-out”脉冲与 A, B, C 的冲激响应之间的比例系数, $m_{AB}(t)$ 表示 B 接收到的 A 发出的

“Kick-out”脉冲的响应波形, $m_{BC}(t)$ 表示 C 接收到的 B 发出的“Kick-out”脉冲的响应波形, $m_{CA}(t)$ 表示 A 接收到的 C 发出的“Kick-out”脉冲的响应波形,那么有

$$\begin{cases} m_{AB}(t) = L_A h_A(t) \cdot h_B(t) \\ m_{BC}(t) = L_B h_B(t) \cdot h_C(t) \\ m_{CA}(t) = L_C h_C(t) \cdot h_A(t) \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)进行傅立叶变换,得到频域表达式

$$\begin{cases} M_{AB}(\omega) = L_A H_A(\omega) H_B(\omega) \\ M_{BC}(\omega) = L_B H_B(\omega) H_C(\omega) \\ M_{CA}(\omega) = L_C H_C(\omega) H_A(\omega) \end{cases} \quad (2)$$

通过解式(2)的方程,得到 A, B, C 三台取样示波器的冲激响应的频域表达式

$$H_A(\omega) = \sqrt{\frac{M_{CA}(\omega) \cdot M_{AB}(\omega)}{M_{BC}(\omega)}} \cdot \frac{L_B}{L_C \cdot L_A} \quad (3)$$

$$H_B(\omega) = \sqrt{\frac{M_{AB}(\omega) \cdot M_{BC}(\omega)}{M_{CA}(\omega)}} \cdot \frac{L_C}{L_A \cdot L_B} \quad (4)$$

$$H_C(\omega) = \sqrt{\frac{M_{BC}(\omega) \cdot M_{CA}(\omega)}{M_{AB}(\omega)}} \cdot \frac{L_A}{L_B \cdot L_C} \quad (5)$$

最后进行逆傅立叶变换分别求出每台取样示波器的冲激响应 $h_A(t)$, $h_B(t)$, $h_C(t)$, 把各台取样示波器的 $H_A(\omega)$, $H_B(\omega)$, $H_C(\omega)$ 分别求模,再求正平方根就得到每台取样示波器的幅频响应。只要分别对 $h_A(t)$, $h_B(t)$, $h_C(t)$ 积分就可求出每台取样示波器的阶跃响应,从而得到每台取样示波器的上升时间^[3]。

3 三台取样示波器对接实验及结果分析

在三台取样示波器对接实验中,选用了美国 Agilent 公司的数字取样示波器,主机型号都为 DCJ-86100C,模块选用了两个带宽为 50 GHz 的 86117A 和一个带宽为 70 GHz 的 86118A,分别把它们称为取样示波器 A, B, C。三台实验对接的框图如图 1 所示。三台取样示波器两两对接,采集每两台取样示波器对接后的“Kick-out”脉冲响应波形数据,通过数据处理可分别得到三台取样示波器的上升时间和带宽,校准结果如表 1 所示。

表 1 三台不同带宽取样示波器的上升时间和带宽校准结果

取样示波器	上升时间校准结果	上升时间指标	带宽校准结果	带宽指标
A	6.4 ps	≤ 7 ps	56.7 GHz	≥ 50 GHz
B	6.9 ps	≤ 7 ps	57.2 GHz	≥ 50 GHz
C	5.6 ps	≤ 5 ps	73.6 GHz	≥ 70 GHz

带宽为 70 GHz 的取样示波器 86118A 的上升时间如图 2 所示,从图 2 可以得出其上升时间校

准结果为 5.6 ps。德国 PTB 用上升时间为 1 ps 的光电脉冲校准取样示波器 86118A 的上升时间,校准结果为 4.8 ps,校准不确定度为 1.2 ps ($k=2$)。可以看出,用三台不同带宽的取样示波器通过“Nose to Nose”法校准 70 GHz 的取样示波器的上升时间与用光电脉冲法校准比较,结果的一致性较好。用“Nose to Nose”法校准的值虽然偏大,但是差值 0.8 ps 还是在 PTB 的校准不确定度 1.2 ps 之内。

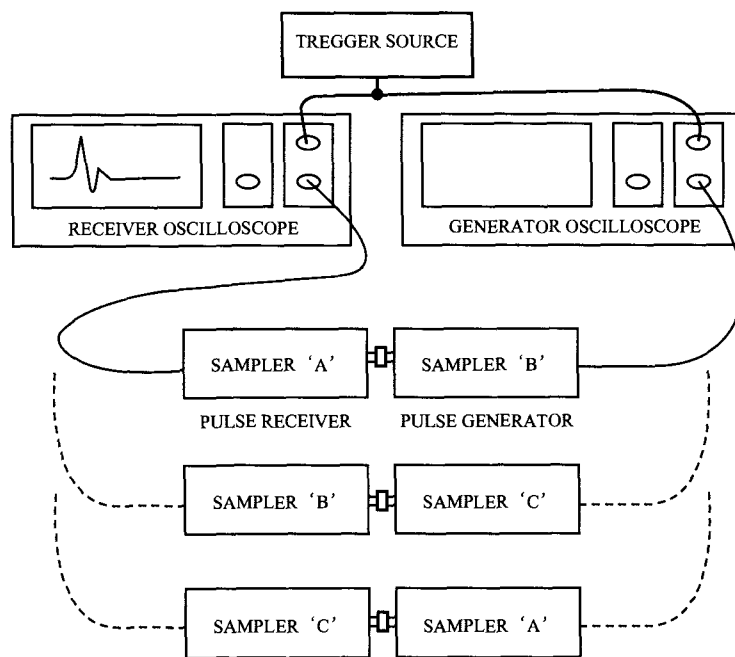


图 1 三台取样示波器对接实验框图

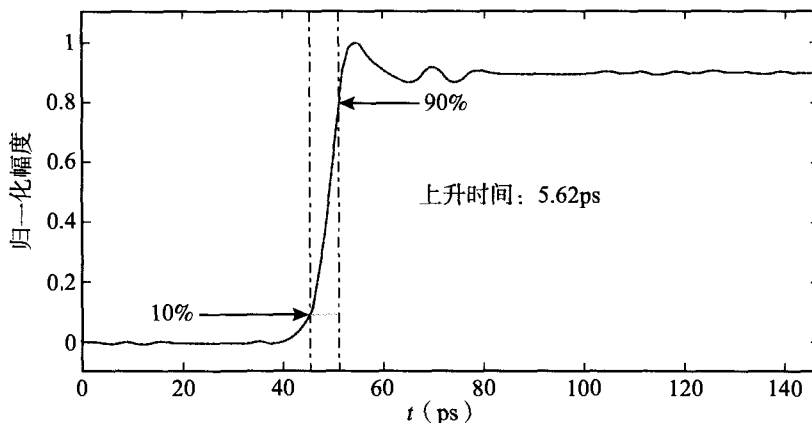


图 2 70 GHz 取样示波器的阶跃响应图

带宽为 70 GHz 取样示波器的幅频响应曲线如图 3 所示,从图 3 可以得出其带宽校准结果为 73.6 GHz。图 4 为分别用“Nose to Nose”法与扫频

法校准带宽 70 GHz 的取样示波器频响曲线的比较图,受限于微波信号源和功率计的带宽,扫频法只做到了 50 GHz。从图 4 可以看出,两种方法校准频

响的结果一致性很好,在 50 GHz 内最大偏差为 0.5 dB 左右,未超出不确定度的允许范围。

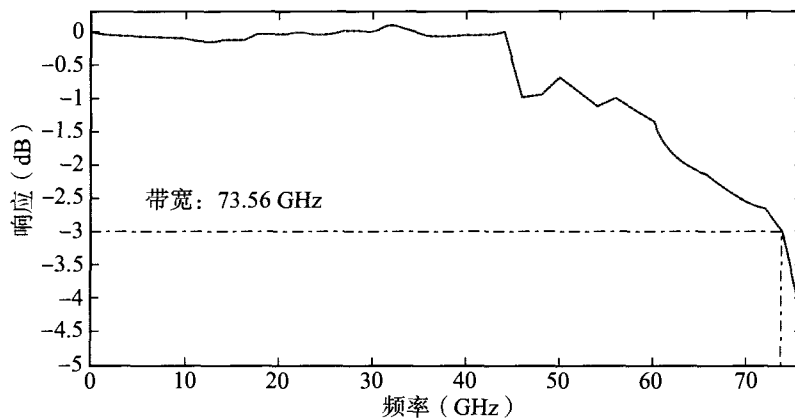


图 3 70 GHz 取样示波器的幅频响应特性图

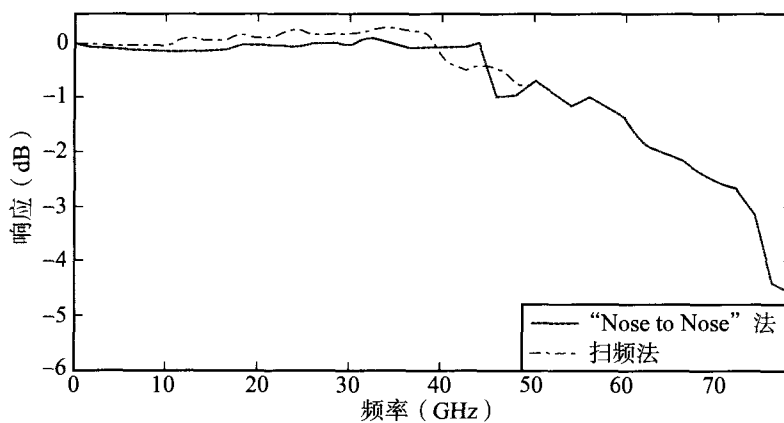


图 4 “Nose to Nose”法与扫频法校准带宽 70 GHz 的取样示波器频响曲线图

4 结束语

北京无线电计量测试研究所根据 Nose-to-Nose 校准原理,利用两台 50 GHz 取样示波器与一台 70 GHz 取样示波器两两对接,实现了 50 GHz, 70 GHz 取样示波器上升时间与频响的校准,校准结果用扫频法和光电脉冲法进行了验证,用不同方法得到的结果的差值在不确定度允许范围内。这不仅解决了国内带宽大于 50 GHz 的取样示波器的上升时间和带宽校准的难题,而且成功实现了不同带宽的取样示波器的“Nose to Nose”法校准,成功校准了带宽为 70 GHz 的取样示波器的上升时间和频响,目前在国内外未见到相关公开报道。

参考文献

- [1] J. Verspecht. Broadband Sampling Oscilloscope Characterization with the Nose to Nose Calibration Procedure: A Theoretical and Practical Analysis[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 1995, 44 (6): 991 ~ 997
- [2] J. Verspecht and K. Rush. Individual Characterization of Broadband Sampling Oscilloscopes with a Nose to Nose Calibration Procedure [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 1994, 43(2): 347 ~ 354
- [3] 苏水金,杨春涛,邓明纫,马红梅. 宽带取样示波器一种新校准方法研究[J]. 宇航计测技术, 2006(1): 6 ~ 11