

时间-幅度变换器

张轩，复旦大学核科学与技术系

摘要：本实验旨在验证时间-幅度变换器（TAC）的性能和工作情况。我们使用 DG4102 信号发生器和 MSO2202 示波器来观察 TAC 的输出波形，测量时-幅变换系数，并分析 TAC 的积分非线性。实验结果显示，TAC 表现出良好的性能，并提供了可靠的时间测量。这个实验有助于深入了解 TAC 的工作原理和应用。

关键词： TAC, 时-幅变换, 时间测量

一、引言

时间-幅度变换器（TAC）是一种常见的仪器，用于物理实验中的时间测量和信号处理。它的工作原理涉及将时间间隔转换为脉冲幅度，因此在物理研究中具有广泛的应用。本实验旨在验证 TAC 的工作原理和性能参数，特别关注时-幅变换系数和积分非线性。通过这项实验，我们将深入了解 TAC 在时间测量中的应用，以及如何有效地使用它进行实验和测量。

二、实验目的

1. 深入了解时-幅变换器（TAC）的工作原理；
2. 掌握时-幅变换器的使用方法及测量积分非线性的方法。

三、实验原理

本实验使用的是启停式时-幅变换，其原理是在需要测量的时间间隔上，使用恒定电流对电容充电，然后将电容上的电荷转化为幅度进行测量。

如图1，两个开关 S_1, S_2 都处于闭合状态，起始信号到来时， S_1 断开，电流源 I 对电容充电，当终止信号到来时， S_2 断开，充电停止。时间间隔为

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

，充电完成后，电容上的电荷量是 $Q = I\Delta t$ ，电压为

$$U_C = \frac{I\Delta t}{C}$$

接下来只需利用幅度测量方法测量电压值 U_C 即可。

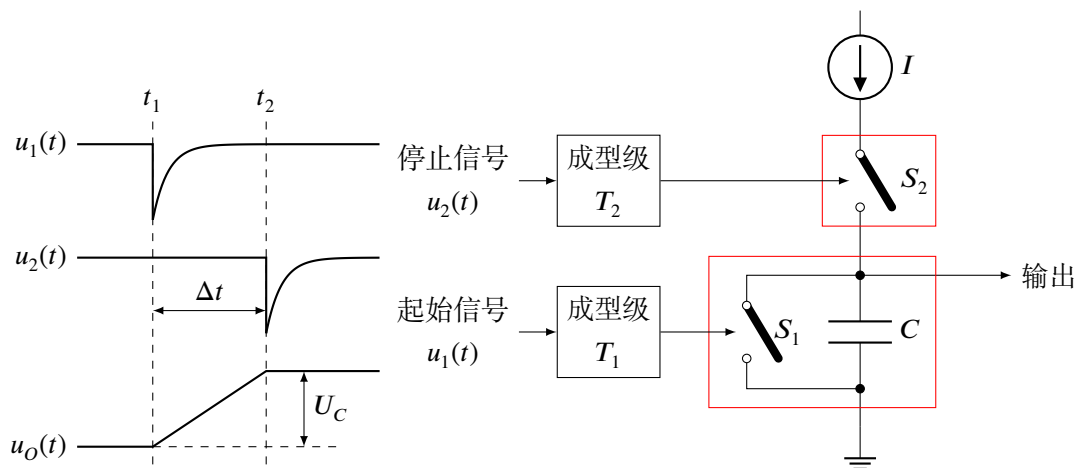


图 1 起停型时-幅变换工作原理

四、实验装置

1. MSO2202 数字示波器 1 台
2. 567 型时-幅变换器 1 台
3. DG4102 信号发生器 1 台
4. CAKE211 定标器 1 台
5. CAKE550 单道分析器 1 台
6. 同轴高频信号线若干

五、实验过程

5.1 检验时-幅变换器的工作情况

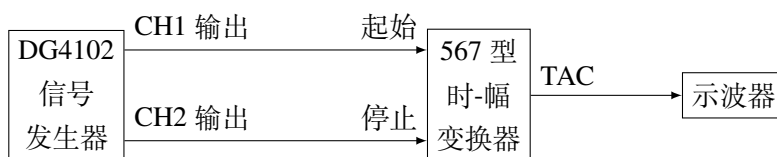


图 2 观察时间-幅度变换器工作情况的电路图

按照图2连接电路。各仪器的工作条件为

信号发生器	将 CH1 和 CH2 均设置为占空比为 50% 方波，周期为 $18\mu\text{s}$ ，负极性，输出幅度为 5 V。设置它们的相对延迟为 1000 ns。
时-幅变换器	量程设置为 $200 \times 10\text{ ns}$ ，选通模式选择内选通 (INT)，起始、停止模式选择反符合 (ANTI)；输出则选择 TAC 输出，TAC 抑制 (TAC INHIBIT) 选择 OUT。

完成上述参数设置后，依次进行以下内容

1. 调节示波器，观察并记录输出波形及其与输入波形的相对时间关系
2. 断开停止脉冲，观察有起无停时有无变换输出，并分析原因。
3. 断开起始脉冲，观察无起有停时有无变换输出，并分析原因。
4. 567 时-幅变换器工作条件不变，调节停止信号相对开始信号相对延迟时间分别取 10, 50, 1000, 1500, 2000 (ns)，观察并记录输出幅度。
5. 设置两路信号相对延迟时间 200 ns，时-幅变换器量程取 $50 \times 1, 100 \times 1, 200 \times 1, 50 \times 10, 100 \times 10, 50 \times 100$ (ns)，观察输出波形的变化，并记录。

5.2 半计数测量法测量时-幅变换系数



图 3 半计数法测量时间-幅度变换系数

按照图3连接电路。各仪器的工作条件为

信号发生器	将 CH1 和 CH2 均设置为占空比为 10% 方波，周期为 18 μs，负极性，输出幅度为 5 V。设置它们的相对延迟为 1000 ns。
时-幅变换器	量程设置为 200×10 ns，选通模式选择内选通 (INT)，起始、停止模式选择反符合 (ANTI)；输出则选择 TAC 输出，TAC 抑制 (TAC INHIBIT) 选择 OUT。
单道分析器	微分工作方式，道宽 50 mV
自动定标器	自行选择

将单道分析器阈值由小到大调节，观察定标器计数，开始时定标器没有计数调至定标器有稳定计数（反复计数三次，计数值相同），继续调节，定标器又再次没有计数。绘制计数与阈值曲线并拟合获得半计数值，从而获得输出脉冲幅度值。

5.3 用示波器测量时-幅变换系数和积分非线性性

电路图链接和参数设置按照第5.1节设置，分别设置相对延迟为 100 ~ 2000 ns，间隔为 100 ns，记录输出幅度并拟合直线得到。

$$A = kT + A_0 \quad (1)$$

其中 k 就是时间-幅度变换系数。

积分非线性性则是

$$\text{INT} = \frac{\Delta A_{\max}}{A_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

其中 ΔA_{\max} 是拟合结果中的最大残差， A_{\max} 是满量程幅度，即 $T = 2000 \text{ ns}$ 时的幅度测量结果。

由于在靠近零点时的线性性不是很好，可以进一步精确测量，以 10 ns 为间隔测量 $10 \sim 50 \text{ ns}$ 范围内测量时-幅转换关系，拟合求出时-幅变换系数和时-幅变换零点 A_0 。

六、实验结果和分析

6.1 时-幅变换器的工作情况

设置时-幅变换器的量程为 $200 \times 10 \text{ ns}$ ，起始信号和终止信号的相对延迟为 1000 ns 。利用示波器同时观察起始信号和时-幅变换器的波形如图4所示。

6.1.1 时-幅变换器的输入输出波形

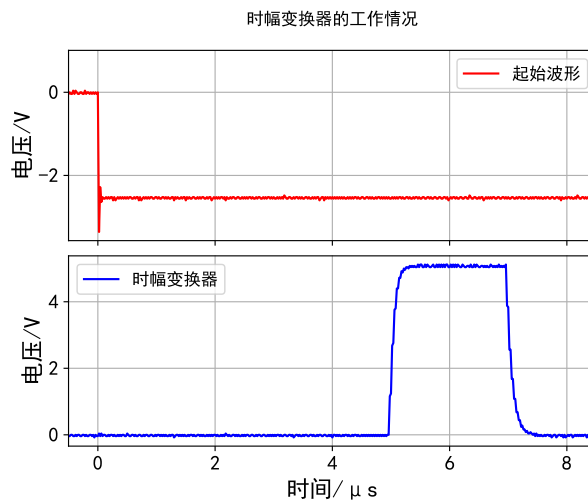


图4 时-幅变换器的工作情况

可以看到在起始波形下降沿到来约 $5 \mu\text{s}$ 后，时-幅变换器产生了一个方波信号，使用示波器的光标读取得到时-幅变换器的上升沿相对于起始波形滞后了 $4.960 \mu\text{s}$ ，波形幅度为 5.08 V 。

6.1.2 关于示波器观察到的起始波形的阻抗不匹配的讨论

不难发现用示波器读取得到的起始波形存在阻抗不匹配的情况，我们整理实验记录本发现这是由于我们使用三通适配器的方法存在缺陷。

我们的连接方法如图5a所示。信号发生器的输出阻抗为 $50\ \Omega$ ，通过三通适配器链接两根同轴电缆传输给时-幅变换器和示波器。两根同轴电缆处于并联状态，故他们的输入阻抗为 $25\ \Omega$ 。这造成了阻抗不匹配，也导致了示波器上观测到的波形存在失真。

参考制造厂商的建议¹，正确的连接方式如图5b。将三通适配器中间的接口连接到示波器上。这样输入信号是 $50\ \Omega$ ，同时两路输出的阻抗分别是 $50\ \Omega$ 和 $1\ \text{M}\Omega$ ，并联阻抗仍然是 $50\ \Omega$ 。

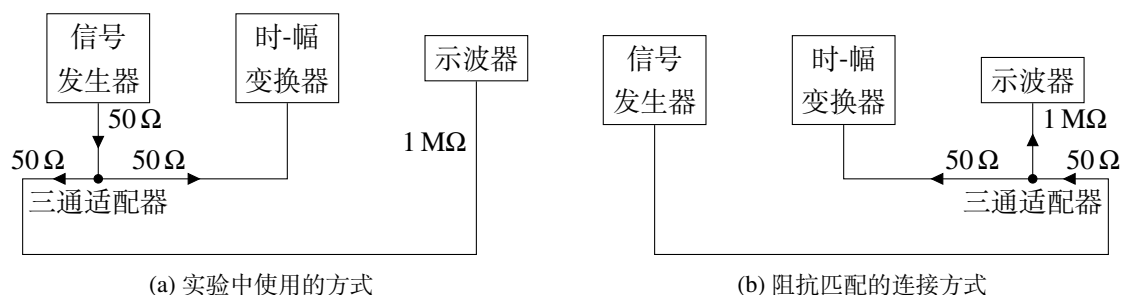


图 5 三通适配器的正确使用方式，图中三通适配器处连线的几何关系直接对应实际的三通适配器的连线方式

但幸运的是阻抗不匹配并不影响时-幅变换器只关注上升沿，这个缺陷并不影响时-幅变换器的实验结果，这也是我们实验中尽管发现了这个缺陷但综合考虑时间和精力成本后并没有修补的原因。

6.1.3 起始信号或停止信号缺失的情况

当只有起始信号而无停止信号的情况下，观察到输出恒为低电平。放大观察时发现起始信号下降沿到来的时存在一个正极性的小尖峰，在下降沿后约 $2.2\ \mu\text{s}$ 时存在一个负极性的小尖峰。

当只有停止信号而无起始信号时，观察到输出信号是小幅度的杂乱的噪声。

6.1.4 停止信号不同相对延迟条件对时-幅变换器输出的影响

保持量程为 $200 \times 10\ \text{ns}$ ，调整停止信号相对起始信号的延迟为不同值，粗略测量得到输出信号的时间和幅度如表1所示。

表 1 不同延迟条件下输出波形的延迟时间和幅度

$\Delta t/\text{ns}$	10	500	1000	1500	2000
幅度/ns	0.03400	2.520	5.080	7.680	10.200
延迟/ns	3.920	4.480	4.960	5.400	5.880

不难发现，输出信号的幅度和延迟时间都随着停止信号的延迟时间增加而增加，下面图7是我们对输出信号的相对延迟随停止信号的相对延迟的分析。相对延迟均指上升

¹<https://www.digikey.cn/zh/articles/understand-the-fundamentals-of-coaxial-adapters>

沿相对于起始信号下降沿的延迟。通过线性拟合的结果我们发现输出延迟时间总是保持在结束信号后约 $3.95\ \mu\text{s}$ 出现，这是时-幅变换器的内置功能。

关于幅度随停止信号的相对延迟的分析将会在第6.3节进行更精细的分析。

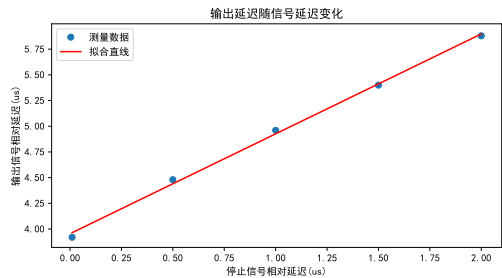


图 6 输出信号的相对延迟随停止信号的相对延迟的变化

表 2 线性拟合结果

拟合参数	拟合结果
斜率 k	0.97 ± 0.03
截距 b	3.95 ± 0.03
决定系数 b	0.997

6.1.5 不同量程对时-幅变换器输出的影响

固定起始信号和停止信号的相对延迟为 $200\ \text{ns}$ ，选择不同的量程，观察到的输出如表3所示。

表 3 不同量程下的输出情况

量程选择	$50 \times 1\ \text{ns}$	$100 \times 1\ \text{ns}$	$200 \times 1\ \text{ns}$	$50 \times 10\ \text{ns}$	$100 \times 10\ \text{ns}$	$50 \times 100\ \text{ns}$
输出相对延迟 (μs)	无输出	无输出	4.12	4.12	4.12	4.12
输出幅度 (V)	无输出	无输出	9.920	4.080	2.020	0.4160

可以观察到当时间超过量程时，和有起无停类似，输出信号持续为低电平。

在不超量程的条件下，观察到输出相对延迟只和启停信号相对延迟有关，而和量程选择无关。

输出幅度随着量程的增大而减小，它们的乘积近似不变。我们计算了后四个量程和输出幅度的乘积的平均值和样本标准差分别为 2031.0 和 40.05，从而得到相对偏差为 1.9%。我们也对这四个数据做了反比例函数拟合，得到的结果为

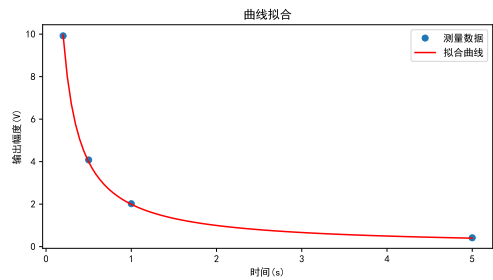


图 7 量程和输出幅度的变化

表 4 函数 $y = \frac{a}{x}$ 拟合结果， y 是输出幅度， x 是量程

拟合参数	拟合结果
参数 a	1.993 ± 0.011

6.2 半计数法测量时-幅变换系数

选择起始信号和停止信号的相对延时为 1000 ns，量程为 $200 \times 10 \text{ ns}$ 。将时-幅变换器输出到单道分析器和定标器上，调节单道分析器阈值得到计数-阈值曲线如图

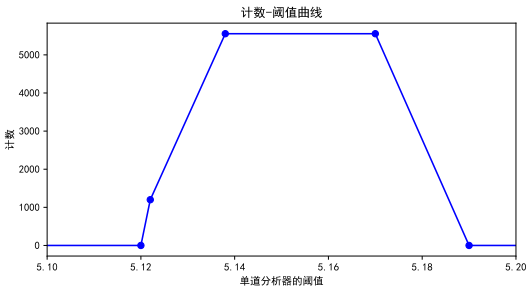


图 8 计数阈值曲线

由于曲线的精度较高，对曲线采用线性插值求得曲线右侧的半计数值为 5.180 V。采用半计数法测量得到的幅度比相同参数条件下使用示波器测得的 5.08 V 接近但略偏高。用这两个值计算时-幅变换系数分别为

示波器测量的时-幅变换系数	$5.08 \times 10^{-3} \text{ V/ns}$
半计数法测量的时-幅变换系数	$5.180 \times 10^{-3} \text{ V/ns}$

6.3 用示波器测量时-幅变换系数和积分非线性性

6.3.1 在 100 ~ 2000 ns 中测量时-幅变换系数和积分非线性性

固定量程为 $200 \times 10 \text{ ns}$ ，对不同的启停信号相对延迟分别测量输出信号幅度，绘制幅度-延迟曲线。得到的结果如图9所示，图中使用“+”号标出的点是残差最大的点，它反映了积分非线性性。

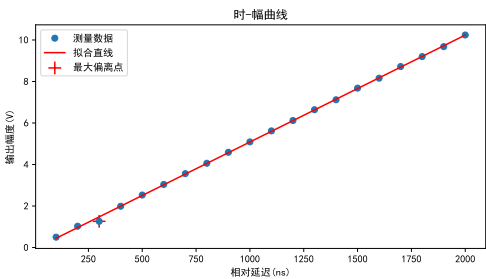


图 9 时-幅变化曲线 100 ~ 2000 ns

表 5 线性拟合结果

拟合参数	拟合结果
斜率 k	$(5.15 \pm 0.02) \times 10^{-3}$
截距 b	$(-7 \pm 3) \times 10^{-2}$
决定系数 b	0.99966

在 $200 \times 10 \text{ ns}$ 范围内，测得时-幅变换系数为 $5.15 \pm 0.02 \times 10^{-3} \text{ V/ns}$ ，最大偏移发生在 $t = 300 \text{ ns}$ ，积分非线性性为 2.088%。

但不难发现， $t = 300 \text{ ns}$ 时的数据点明显偏离其它数据点，似乎是测量错误所致，在试验记录本中暂时无法找出其原因。由于无法进一步实验，考虑将该点剔除后的结果也

给出，剔除该点后再次测量时幅变换系数和积分非线性项如图10所示，测得时-幅变换系数为 $5.125 \pm 0.08 \times 10^{-3} \text{ V/ns}$ ，最大偏移发生在 $t = 1700 \text{ ns}$ ，积分非线性为 0.340%。

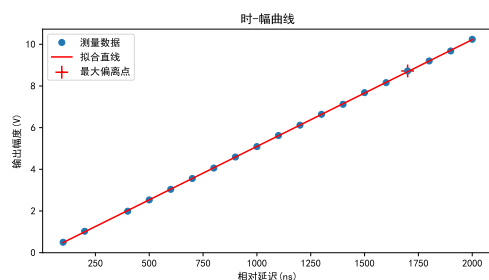


图 10 剔除 300ns 点后的时-幅变化曲线 100 ~ 2000 ns

表 6 线性拟合结果

拟合参数	拟合结果
斜率 k	$(5.125 \pm 0.008) \times 10^{-3}$
截距 b	$(-2.7 \pm 1.0) \times 10^{-2}$
决定系数 b	0.999960

6.3.2 在 0 ~ 50 ns 范围内测量延迟为 0 的输出值

保持量程不变，在 0 ~ 50 ns 范围内进一步测量，在该范围内绘制幅度-延迟曲线。得到的结果如图11所示。

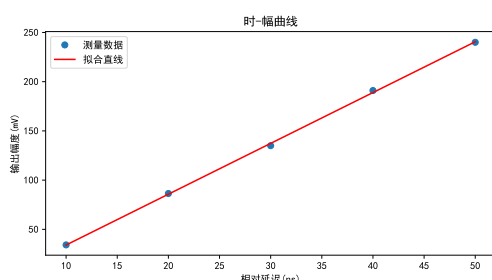


图 11 时-幅变化曲线 0 ~ 50 ns

表 7 线性拟合结果

拟合参数	拟合结果
斜率 k	5.16 ± 0.06
截距 b	-17.5 ± 2.0
决定系数 b	0.99961

在接近 0 的范围内测得延迟为 0 是的输出值为 $-17.5 \pm 2.0 \text{ mV}$ 。

七、实验结论

- 通过使用示波器观察输出波形，验证了时-幅变换器的工作原理。
 - 当只有起始信号而无停止信号以及只有停止信号而无起始信号时，时-幅变换器的输出都为零噪声。
 - 输出信号的似乎保持和停止信号相距 3.95 ns 的延迟。
 - 不同量程不改变输出信号的延迟，但会使得幅度和量程成反比例变化。
- 使用半计数法测得时-幅变换系数为 $5.180 \times 10^{-3} \text{ V/ns}$ ，比直接使用示波器定点测量的结果略偏大。

-
- 使用示波器记录输出幅度，在 $100 \sim 2000 \text{ ns}$ 范围内测得时-幅变换系数为 $5.15 \pm 0.02 \times 10^{-3} \text{ V/ns}$ ，以及积分非线性性为 2.088% ，数据中存在一个明显偏离曲线的数据点，尚不清楚该数据点的原因，这里报道的结果并未剔除该点的影响，剔除该点的结果可以在文中第6.3节找到。
 - 在 $0 \sim 50 \text{ ns}$ 范围内测得延迟为 0 时的输出幅度为 $-17.5 \pm 2.0 \text{ mV}$ 。