

相关箝位采样保持(CCSH)电路 特性的测量与分析

刘 颖 王俊麟

(北京理工大学工程光学系, 北京)

摘要——简述了 CCD 复位噪声产生的机理, 并从理论上分析了 CCSH 电路对输入的两种不同信号(采样信号和非采样信号)的传递特性, 建立了 CCSH-LPF (低通滤波器)系统, 对其特性进行了测试, 实验结果与理论分析有较好的一致性。

关键词——箝位, 采样, 传递函数。

1. 引 言

为了降低 CCD 的输出噪声, 对 CCSH 电路的分析和研究甚为重要^[1~4]。为此, 本文从理论上分析了 CCSH 电路对两种不同输入信号(采样信号和非采样信号)的固有传递特性, 建立了 CCSH 电路特性测试系统, 对 CCSH 电路的传递特性进行了实验测量, 并与理论分析进行了比较。

2. 复位噪声的产生机理^[4,6,11]

采用浮置扩散机构输出的 CCD, 其输出电路和波形如图 1(a)所示。其中 T_1 是复位 MOSFET; T_2 是输出 MOSFET; V_{RD} 为直流电压; ϕ_R 为复位脉冲; C 是浮置扩散区对地电容; 图 1(b)是 A 点的电压波形。

复位 MOSFET 工作时, 其导通电阻 R_{on} 与截止电阻 R_{off} 均可能产生贡献于电容 C 上的热噪声。理论分析表明: 由于复位 MOSFET 截止时, 场效应管的漏源电阻 R_{off} 很大, 在复位管截止期间, 电容 C 上存在的噪声基本上等于复位过程中导通电阻 R_{on} 产生的 kTC 噪声, 故亦称为复位噪声^[4]。

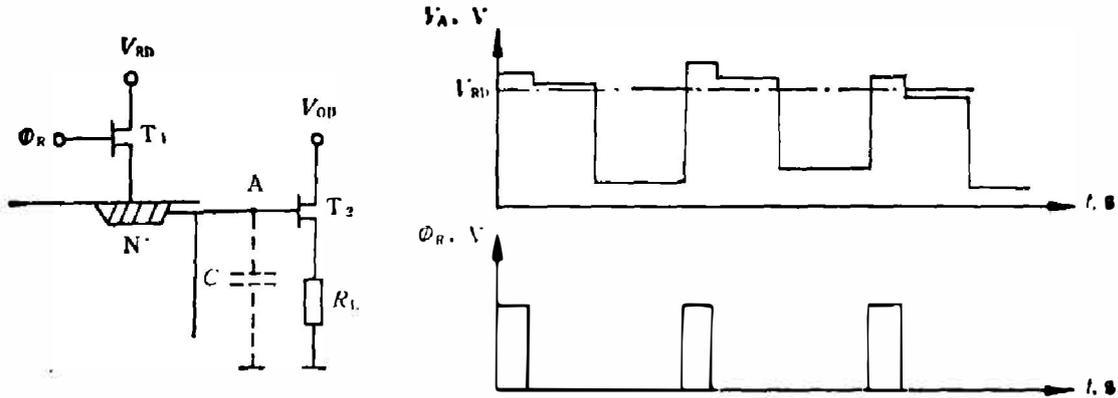


图 1 输出电路与波形

Fig. 1 Output circuit and wave form.

3. CCSH 电路的原理 [5, 8]

CCSH 电路的原理图及工作脉冲波形如图 2 所示^[5]。图中 S_1 是由箝位脉冲 ϕ_{S1} 控制的箝位开关; S_2 是由采样脉冲 ϕ_{S2} 控制的采样开关; C_0 是箝位电容; C_{SH} 是采样电容; t_1 为箝位时刻; t_2 为采样时刻。

该电路利用复位噪声在 t_1 和 t_2 两时刻完全相关, 分别箝位、采样并取其差值来抑制复位噪声, 但是该电路对迭加在 CCD 输出信号上的电压涨落, 如注入噪声, 转移噪声等无抑制作用。

在实际应用中, 必须研究 CCSH 电路对被采样信号的频率响应特性。另外, 也要研究 CCSH 电路对非采样信号的传递特性。

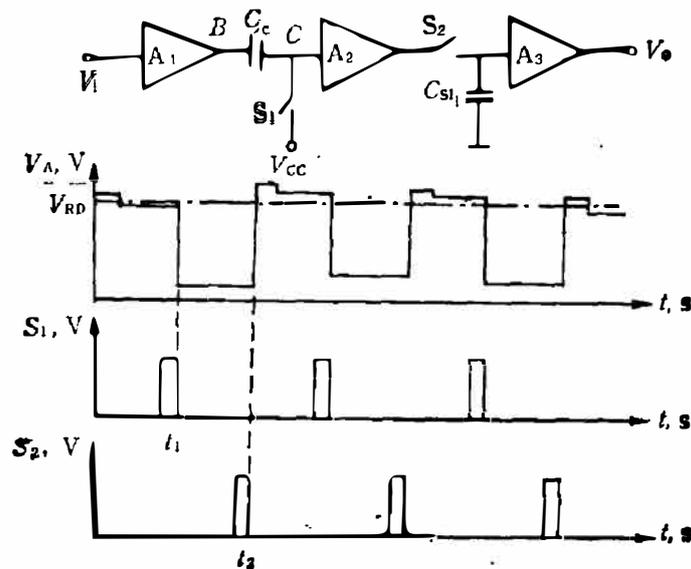


图 2 CCSH 原理电路

Fig. 2 Principle of CCSH circuit

4. CCSH 电路传递特性

CCSH 电路作为一种特殊的采样电路, 对输入的两种不同信号有着不同的传递特性^[2, 3],

下面分别予以讨论.

4.1 CCSH 电路对非采样信号的传递特性

CCSH 电路包含两个机构,一个是放大机构,另一个是箝位采样保持机构.

放大器部分(通常采用直流放大器)具有低通滤波特性,类似于一个 RC 回路,其传递函数 $T_1(f)$ 的形式为

$$T_1(f) = 1/[1 + (f/f_0)]; \quad (1)$$

式中, f_0 为该回路低通特性的带宽.

箝位采样保持部分的传递函数讨论如下: 设输入信号为 $V_i(t)$, $F_i(f)$ 是其频谱, 即

$$V_i(t) = \int F_i(f) e^{j2\pi ft} df; \quad (2)$$

$$F_i(f) = \int V_i(t) e^{-j2\pi ft} dt; \quad (3)$$

$V_i(t)$ 经过 COSH 电路之后, 其输出 $V_o(t)$ 应是箝位采样之差的保持信号, 为:

$$V_o(t) = \left\{ \sum_n [V_i(t) - V_i(t - \tau)] \delta(t - nT_c) \right\} * \text{rect} \left(\frac{t}{T_c} \right); \quad (4)$$

式中, $V_i(t) - V_i(t - \tau)$ 是箝位与采样两时刻信号的差值; τ 是箝位与采样的时间间隔; T_c 是箝位与采样脉冲的周期; $\{ \}$ 括号内是箝位采样获得的脉冲信号; rect 函数是保持作用产生的结果. 式(4)的频谱可求得为:

$$F_o(f) = \{ [V_i(t) - V_i(t - \tau)] e^{-j2\pi ft} dt * \sum_n \delta(t - nT_c) e^{-j2\pi ft} dt \} \\ \cdot T_c \int \text{rect} \left(\frac{t}{T_c} \right) e^{-j2\pi ft} dt; \quad (5)$$

根据平移法则有:

$$\int [V_i(t) - V_i(t - \tau)] e^{-j2\pi ft} dt = F_i(f) [1 - e^{-j2\pi f\tau}]; \quad (6)$$

另外,

$$\int \text{rect}(t/T_c) e^{-j2\pi ft} dt = \text{sinc}(fT_c); \quad (7)$$

$$\sum_n \delta(t - nT_c) e^{-j2\pi ft} dt = (1/T_c) \sum_n \delta(f - nf_c); \quad (8)$$

将式(6~8)代入式(5), 得:

$$F_o(f) = \sum_n F_i(f - nf_c) [1 - e^{-j2\pi f\tau}] \text{sinc}(fT_c); \quad (9)$$

其中, \sum_n 项说明信号在经过 CCSH 电路后出现的混淆现象, 即此电路不是线性电路. 但是, 由上式可以看出, 如果在该电路后加一个截止频率为 $1/2f_c$ 的理想低通滤波器 LPF, 则输出信号为:

$$F'_o(f) = F_o(f) \cdot \text{rect}(2f/f_c); \quad (10)$$

若输入信号频率小于尼奎斯频率 $f_c/2$, 则

$$F'_o(f) = F_i(f) (1 - e^{-j2\pi f\tau}) \text{sinc}(fT_c); \quad (11)$$

即可消除混淆现象. 说明若输入信号频率小于尼奎斯频率, 则带有理想 LPF 的 CCSH-LPF 系统是线性系统, 其传递函数为:

$$T_2(f) = F'_o(f) / F_i(f) = (1 - e^{-j2\pi f\tau}) \text{sinc}(fT_c); \quad (12)$$

如考虑到放大部分,可得 COSH 电路对非采样信号的总传递函数为:

$$T(f) = T_0 \cdot T_1(f) \cdot T_2(f) \\ = T_0 \cdot \frac{1}{1+f/f_0} (1 - e^{-j2\pi f \tau}) \text{sinc}(fT_0); \quad (13)$$

其中, T_0 是系统的总增益. 对 $T_2(f)$ 讨论如下: 令

$$T'_2(f) = (1 - e^{-j2\pi f \tau}), \quad (14)$$

则式(12)可改写为

$$T_2(f) = V'_2(f) \text{sinc}(fT_0); \quad (15)$$

由式(14)、(15)可得:

$$|T'_2(f)| = \sqrt{2[1 - \cos(2\pi f \tau)]}; \quad (16)$$

$$|T_2(f)| = \sqrt{2[1 - \cos(2\pi f \tau)]} \left| \frac{\sin(\pi f T_0)}{\pi f T_0} \right|; \quad (17)$$

将 $f_0 = 250 \text{ kHz}$, $\tau = 1/2f_0$ 分别代入式(16)、(17), 可得 $|T'_2(f)|$ 、 $|T_2(f)|$ 的理论曲线如图 7 中实线所示. 由图可以看出:

(1) COSH-LPF 电路对非采样低频信号有抑制作用, 即对 OCD 输出电路中 MOSFET 的 $1/f$ 噪声有抑制作用.

(2) 传递函数中 sinc 函数, 是由采样保持(S/H)电路产生的, 它对低频信号影响很小, 但对高频信号影响较大.

4.2 COSH 电路对采样信号的传递特性

OCD 的输出信号是和时钟周期相同的采样信号, 该信号可利用幅值调制的时钟信号来模拟. 用公式表示为

$$V_1(t) = [V_{cc2} + V_i(t)] \sum_m \text{rect}\left(\frac{t + mT_0}{T_0/2}\right); \quad (18)$$

式中, V_{cc2} 是直流分量, 其中输入交流信号 $V_i(t)$ 的频谱为

$$F_i(f) = \int V_i(t) e^{-j2\pi f t} dt. \quad (19)$$

考虑输入采样信号的周期与箝位脉冲, 采样脉冲的周期均为 T_0 , 箝位与采样时间间隔为 $\tau = T_0/2$ 采样信号 $V_1(t)$ 输入到 COSH 电路后, 输出信号为 t_1 箝位和 t_2 采样两时刻的差值. 即

$$V'_0(t) = \left\{ \sum_n [V_i(t) + V_{cc2}] \delta(t - nT_0) \right\} * \text{rect}\left(\frac{t}{T_0}\right); \quad (20)$$

其交流成分为

$$V_0(t) = \left\{ \sum_n V_i(t) \delta(t - nT_0) \right\} * \text{rect}\left(\frac{t}{T_0}\right); \quad (21)$$

频谱为

$$F_0(f) = \{F_i(f) * \sum_n \delta(f - nf_0)\} \cdot \text{sinc}(fT_0); \quad (22)$$

由此可知, 该系统对输入被采样信号不是线性系统. 如果加以截止频率为 $f_0/2$ 的理想 LPF, 则对输入低于尼奎斯频率的被采样信号, COSH-LPF 是线性系统, 其输出信号的频谱为

$$F'_0(f) = F_i(f) \text{sinc}(fT_0), \quad (23)$$

即对频率小于尼奎斯频率的输入被采样信号; COSH-LPF 系统的传递函数为

$$T(f) = \text{sinc}(f T_0). \tag{24}$$

5. CCSH 电路特性测试系统

5.1 测试系统方框图

CCSH 电路特性测试系统的方框图如图 3 所示。图中信号发生器提供非采样信号，模拟电路模拟 CCD 输出的采样信号，并给 CCSH 电路提供箱位脉冲 S_1 和采样脉冲 S_2 ，LPF 电路保证了整个系统为线性系统，用示波器观察信号经 CCSH 电路后的传递特性，rms 电压表用来测量信号经过 CCSH 电路后的传递特性，开关 K 用来选择被测信号。

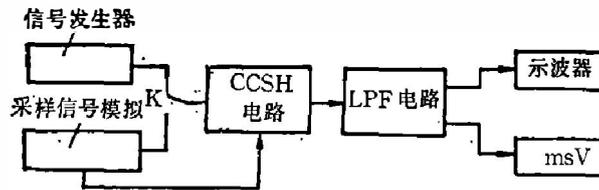


图 3 测试系统框图

Fig. 3 Block diagram of measurement system.

5.2 CCSH 电路的实现^[7, 8, 9]

CCSH 电路如图 4 所示，其中 C_O 是箱位电容， C_{SH} 是 S/H 电容， T_1 、 T_3 、 T_5 是源极输出器， T_2 、 T_4 分别用做箱位开关和采样开关。电容 C_O 和 C_{SH} 的选择应满足：

$$(1) \quad R_{on}C_O \ll T_c, \quad R_{on}C_{SH} \ll T_c; \tag{25}$$

$$(2) \quad R_{off}C_O \gg T_c, \quad R_{off}C_{SH} \gg T_c; \tag{26}$$

(3) C_O 、 C_{SH} 产生的 kTC 噪声可忽略不计。 R_{on} 是开关管的导通电阻， R_{off} 是开关管的截止电阻。

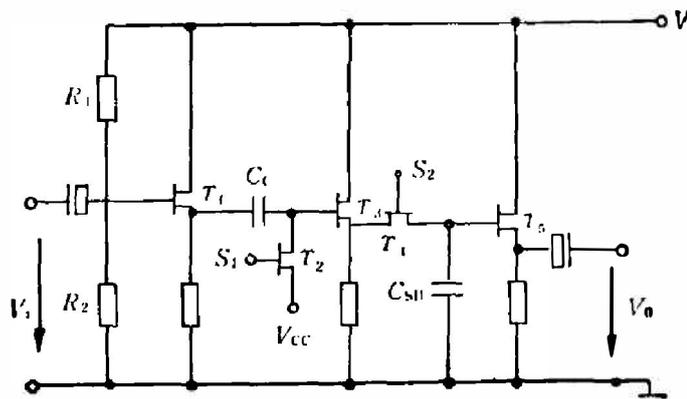


图 4 CCSH 电路

Fig. 4 CCSH circuit.

5.3 LPF 电路的实现^[10]

如前所述，为了在测试中得到复原的信号，需要一个理想的截止频率为 $f_c/2$ 的 LPF，其中 f_c 为时钟频率。根据设计要求：通带带宽为 $0 \sim 100 \text{ kHz}$ ，通带最大衰减 A_{max} 为 0.1 dB ，阻带大于 200 kHz ，阻带最小衰减 A_{min} 为 40 dB ，通带截止频率为 100 kHz ，阻带截止频率为 200 kHz 。本设计选取了具有较好幅频特性的切比雪夫滤波器。其幅频特性曲线如图 5 所

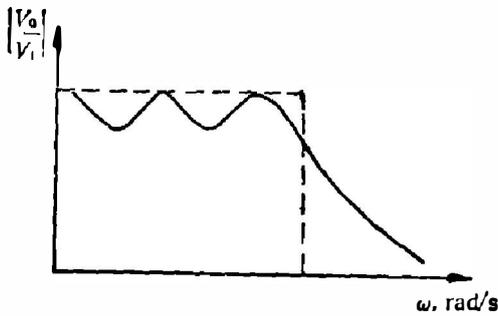


图 5 幅频特性曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic.

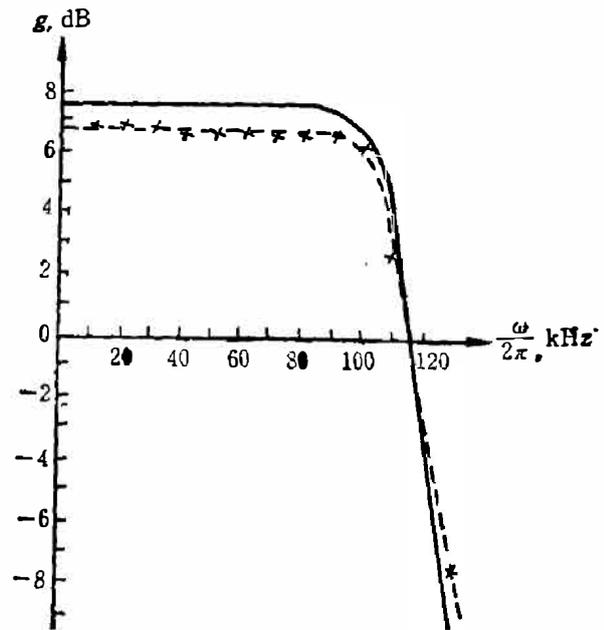


图 6 LPF 的幅频特性

Fig. 6 Amplitude-frequency curve of LPF.

示. 在通带范围内只有几个点与要求值相同, 但整个曲线在 A_{max} 附近, 均在规范偏差内波动.

按滤波器设计原理和要求, 至少需要六阶切比雪夫 LPF, 其传递函数为

$$T(s) = T_1(s)T_2(s)T_3(s); \quad (27)$$

其中,

$$T_1(s) = \frac{1}{0.58544s^2 + 0.20311s + 1}; \quad (28)$$

$$T_2(s) = \frac{1}{1.43601s^2 + 0.89994s + 1}; \quad (29)$$

$$T_3(s) = \frac{1}{3.79706s^2 + 3.2506s + 1}; \quad (30)$$

$s = j\Omega$, $\Omega = \omega/\omega_p$; ω_p 是通带截止频率. $T_1(s)$ 、 $T_2(s)$ 、 $T_3(s)$ 各为一个基本节. 由此得到的 LPF 的幅频特性曲线如图 6 所示. 其中实线为理论曲线, 虚线为测量曲线. g 是用 dB 表示的增益.

6. CESH 电路特性的测试

6.1 CESH 电路对非采样信号传递函数的测试

给该系统输入正弦信号, 利用 rms 电压表进行测量, 其结果如图 7 中虚线所示.

可以看出, 测量曲线与理论分析结果基本一致, 而且测量结果更接近于考虑了 sinc 函数后的传递函数曲线.

6.2 CESH 电路对采样信号传递特性的测试

理论分析指出, CESH 电路对采样信号的传递特性符合 sinc 函数规律. 图 8 中给出了理论曲线(实线)与实验曲线(虚线). 由图可以看出, 该电路对采样信号的传递函数基本上符合 sinc 函数的规律.

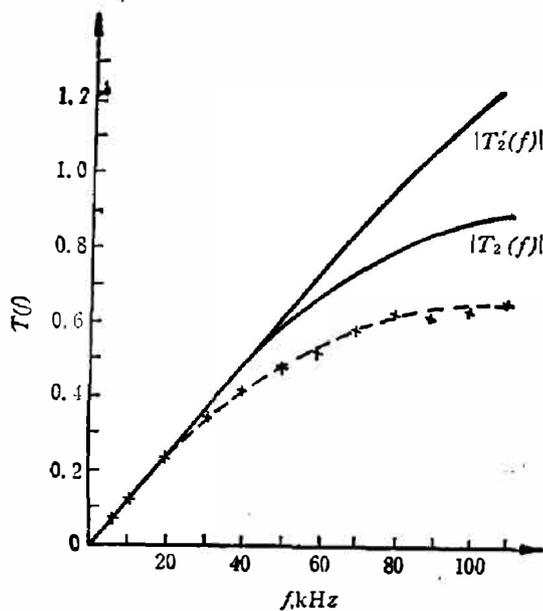


图7 CCSH 对非采样信号的传递特性
Fig.7 MTF of CCSH circuit for nonsampled signal.

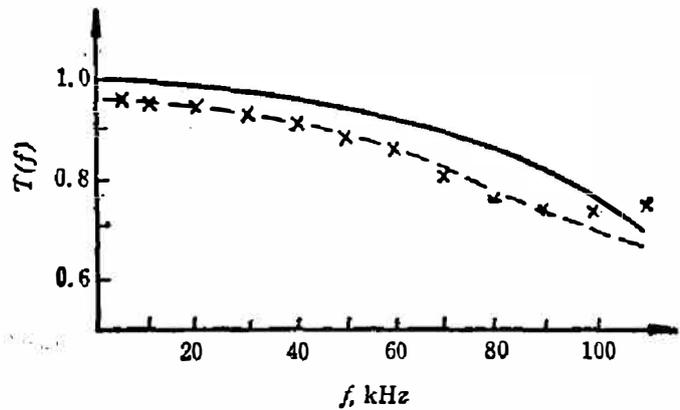


图8 CCSH 电路对采样信号的传递特性
Fig.8 MTF of CCSH circuit for sampled signal.

7. 结 论

根据上述理论分析和实验测量的结果,可得如下结论:

- (1) CCSH 电路不仅能抑制 CCD 输出的复位噪声,而且还能抑制输出 MOSFET 的 $1/f$ 噪声.正是这种性质使 CCSH 电路成为重要的 CCD 的低噪声输出信号处理电路.
- (2) 采样保持电路会产生 sinc 函数的传递特性,对高频信号的传递产生一定的影响.
- (3) CCSH 电路的应用对降低 CCD 的噪声,扩大 CCD 的动态范围,促进 CCD 在弱光下的应用有重要的作用.

参 考 文 献

- [1] 刘颖,卢汉生,红外技术,7(1985),1: 27~34.
- [2] 刘颖,卢汉生,光电技术与系统学术会议论文集,1984, p24~35
- [3] 张赫钢,华中工学院学报,10(1982), p 115~120.
- [4] 陈汝钧,华中工学院学报,10(1982), p55~59.
- [5] 张新耕,华中工学院学报,10(1982), p109~114
- [6] Howes H. J. and Morven D. V., *Charged-Coupled Devices and System*, Copyright c 1979 by John Wiley and Sons Ltd., Chapter 1.
- [7] Barbe D. F., *Proceeding of the IEEE*, 63(1975), 1: 38~67.
- [8] Hyncek J., *IEEE*, ED33(1986), p850~863.
- [9] White W. H. et al., *IEEE*, SC9(1974), p 1~14.
- [10] 北方交通大学电信系统,有源滤波器,北京:人民铁道出版社,1979,第四章.
- [11] Carnes J. E. and Kosoncky W. F., *BCA review*, 33(1972), 327~343.

ANALYSIS AND MEASUREMENT OF CHARACTERISTICS OF CORRELATED CLAMP SAMPLE AND HOLD CIRCUIT

LIU YING, WANG JUNLIN

(Beijing Institute of Technology, Department of Optical Engineering, Beijing, China)

ABSTRACT

The mechanism of reset noise is described briefly. The transferring characteristics of CCSI circuit for two different input signals—sampled and non-sampled signals are deduced theoretically. A CCSI-LPF system is set up and the characteristics of CCSI system are measured. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis.