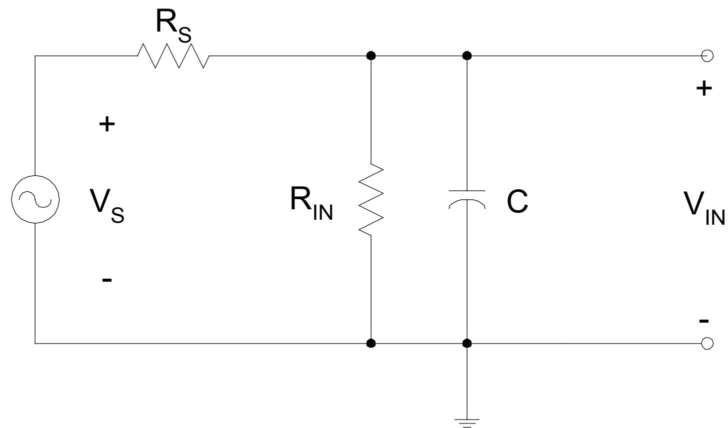
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA E INFORMÁTICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MASSACHUSETTS
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS 02139

Cálculos de corte de alta frecuencia

por Ron Roscoe



El esquema anterior representa una fuente que conduce una entrada a un amplificador. R_{IN} es la resistencia paralela de entrada relacionada con la entrada del amplificador y C representa la capacitancia paralela total que incluye la capacitancia de entrada y cualquier capacitancia paralela de cable de conexión. La ecuación para la transferencia del divisor de tensión de la fuente a la entrada es:

$$\frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{\dfrac{R_{IN} \times \dfrac{1}{sC}}{R_{IN} + \dfrac{1}{sC}}}{R_S + \dfrac{R_{IN} \times \dfrac{1}{sC}}{R_{IN} + \dfrac{1}{sC}}} = \frac{R_{IN} \times \dfrac{1}{sC}}{R_S \times R_{IN} + \dfrac{R_S}{sC} + \dfrac{R_{IN}}{sC}} = \frac{R_{IN}}{R_S + R_{IN} + R_S R_{IN} sC}$$

$$\frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{1}{\dfrac{R_S}{R_{IN}} + 1 + R_S sC} \qquad s = j\omega; \qquad \frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{1}{\dfrac{R_S}{R_{IN}} + 1 + j\omega\, R_S C} \qquad [1]$$

A frecuencias bajas, la impedancia capacitiva es muy grande y el divisor sencillo de tensión resistiva determina la transferencia o "ganancia" de tensión:

$$\frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{1}{\frac{R_S}{R_{IN}} + 1} = \frac{R_{IN}}{R_S + R_{IN}}; \qquad [2]$$

Tomemos como ejemplo al audiófilo que desea utilizar las salidas de su pre-amplificador para accionar otro amplificador integrado que se encuentra en otra habitación, utilizando un cable de audio conductor simple de 30 pies, modelo Belden 9264, que tiene una capacitancia nominal de 34 picofaradios por pie. Supongamos que el pre-amplificador tiene una impedancia de salida de 600 Ω y que el amplificador integrado tiene entradas de línea con una impedancia de entrada de 100 kΩ en paralelo con otros 50 pF de capacitancia de entrada. La impedancia de fuente es lo suficientemente pequeña como para ignorarla a frecuencias bajas, produciendo un ratio tensión-transferencia de 1 [ecuación 2]. La frecuencia audible más elevada para el humano joven medio es de 20 kHz. ¿Cuál es la respuesta en frecuencia relativa de la combinación de resistencia cable-fuente resistencia-entrada?

Solución: dado que el ratio R_S/R_{IN} es pequeño en comparación con 1, la ecuación 1 se simplifica:

$$\frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{1}{1 + j\omega R_S C};$$

Cuando $\omega R_s C$ = 1, la magnitud del denominador será igual a 1,414 y la expresión tendrá una magnitud de 0,707, que es -3dB en relación al valor 1 para el divisor puramente resistivo cuando se puede ignorar R_S. Para este ejemplo, la frecuencia -3dB es:

$$1 = 2\pi f R_S C; f = \frac{1}{2\pi R_S C} = \frac{1}{2\pi 600 \times 1070 pF} = \frac{1}{3{,}77 \times 10^3 \times 1070 \times 10^{-12}} = 248 kHz$$

que es diez veces superior a lo necesario. Por lo tanto, esta conexión es virtualmente plana a 20kHz.

Sin embargo, suponga que el pre-amplificador tiene una impedancia de fuente de 10.000 Ω. Ésta sigue siendo lo suficientemente pequeña como para que podamos ignorar el ratio R_S/R_{IN} en la ecuación 1, pero ahora el punto -3dB ha caído a unos 15kHz, lo suficiente para que muchos oyentes noten una diferencia.

A continuación, examinemos el caso para las radiofrecuencias [RF]. Digamos que queremos recibir el canal 13 VHF en el sistema de televisión por cable. Este sistema tiene una instalación eléctrica con cable de impedancia característico Belden 9248 de 75 Ω, con una capacitancia de 16,11 pF / pie. Si suponemos que el canal 13 es el de frecuencia más elevada utilizado en este sistema de cable, ¿cuántos pies de cable podemos ejecutar antes de que las pérdidas de alta frecuencia afecten al canal 13 [210-216 MHz]?. En las aplicaciones de radiofrecuencia, la impedancia de fuente DEBE ser igual que la impedancia de carga para prevenir la aparición de ondas estacionarias en la línea de transmisión. Por lo tanto, la ecuación [1] queda de la siguiente forma:

$$\frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{1}{\frac{R_S}{R_{IN}} + 1 + j\omega R_S C} = \frac{1}{2 + j\omega R_S C} \qquad [3]$$

Si fijamos que el término imaginario sea igual que el real, podremos hallar la capacitancia necesaria para la frecuencia de -3 dB [si desea comprobarlo, recuerde que empezamos con un divisor resistivo que proporciona una "ganancia" de tensión de 0,5, que es -6 dB].

$$2 = 2\pi\, f\, R_S C; \quad C = \frac{1}{\pi\, R_S f} = \frac{1}{\pi 75 \times 216 \times 10^6} = \frac{1}{236 \times 216 \times 10^6} = 19{,}6\, pF$$

Por lo tanto, 1,2 pies de este cable tienen una pérdida de 3 dB a 216 MHz. Es posible que se pregunte cómo puede funcionar un sistema de cable cuando las pérdidas son tan grandes. Bueno, utilizan muchos amplificadores, mucho empuje de alta frecuencia y, afortunadamente, los receptores de televisión están diseñados para proporcionar una buena imagen con entradas de varios niveles en un margen de 60 decibelios. De hecho, es un sistema bastante complejo. Tampoco es justo caracterizar un cable a estas frecuencias como si fuesen un elemento en serie de resistencia cero con una capacitancia paralela concentrada. De hecho, el cable es parecido a una serie de larga distribución de capacitancias en paralelo e inductancias en serie, y el análisis es algo más complicado que el anterior. ¡Pero usted se hace una idea!

A continuación, estudiemos otro ejemplo clásico de pérdidas de alta frecuencia debido a capacitancias en paralelo, la sonda 10:1 del osciloscopio. La mayoría de ustedes saben que la impedancia de entrada del amplificador vertical del osciloscopio es de 1 Megohmio comparado con una capacitancia paralela de entrada [está impresa en la placa de la cubierta del osciloscopio]. Si utilizásemos una sonda 1:1 en circuitos de alta impedancia, podríamos cargar estos circuitos con la impedancia de entrada del osciloscopio, o afectar la respuesta de alta frecuencia del circuito bajo prueba con la capacitancia de entrada de 20 pF, de forma que, la sonda 10:1 se ha convertido en el estándar de facto. Esto requiere que el valor de R_S sea de 9 Megohmios. Por lo tanto, la ecuación [1] es:

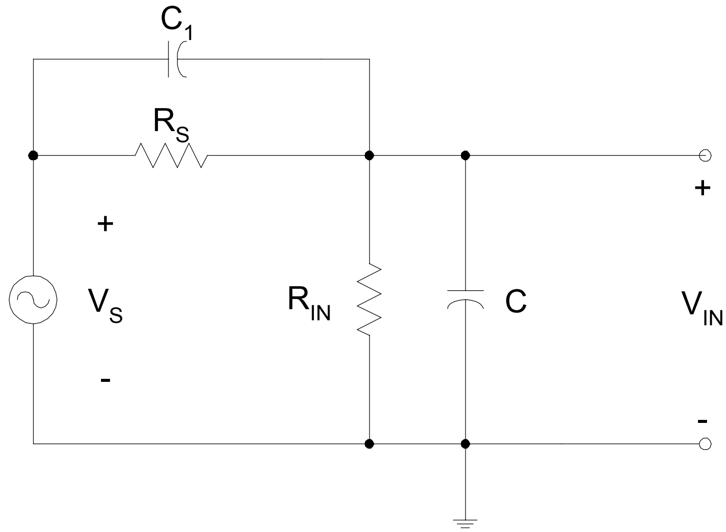
$$\frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{1}{\frac{R_S}{R_{IN}} + 1 + j\omega\, R_S C} = \frac{1}{9 + 1 + j\omega\, R_S C} = \frac{1}{10 + j2\pi f\, 9 \times 10^6 \times 20 \times 10^{-12}} \qquad [4]$$

De nuevo, se ajusta la parte real igual que la imaginaria y se resuelve para f:

$$10 = 2\pi f\, 9 \times 10^6 \times 20 \times 10^{-12}; \qquad f = \frac{10}{2\pi 9 \times 10^6 \times 20 \times 10^{-12}} = 8{,}4 kHz$$

Por consiguiente, la sonda 10:1 combinada con la capacitancia de entrada del osciloscopio se ve reducida 3 dB a 8,84 k Hz. Ya que esperamos utilizar nuestros osciloscopios para examinar frecuencias de hasta 150 MHz, ¡este es un desarrollo poco alentador!

Sin embargo, podemos compensar esta situación añadiendo un condensador de compensación C_1 en combinación con R_S, tal y como se muestra en la figura modificada de la página siguiente.



La ecuación para este divisor de tensión es:

$$\frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{\dfrac{R_{IN} \times \dfrac{1}{sC}}{R_{IN} + \dfrac{1}{sC}}}{\dfrac{R_S \times \dfrac{1}{sC_1}}{R_S + \dfrac{1}{sC_1}} + \dfrac{R_{IN} \times \dfrac{1}{sC}}{R_{IN} + \dfrac{1}{sC}}} \qquad [5]$$

La ecuación [5] se amplia de la siguiente forma:

$$\frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{R_{IN}\left(sC_1R_S + 1\right)}{R_S\left(sCR_{IN} + 1\right) + R_{IN}\left(sC_1R_S + 1\right)} \qquad [6]$$

Si elegimos: $C_1 R_S = CR_{IN};\ o\ \ C_1 = C\dfrac{R_{IN}}{R_S}; \quad C_1 = 20\,pF\,\dfrac{1\,M\Omega}{9\,M\Omega} = 2{,}22\,pF \qquad [7]$

la ecuación [6] queda reducida a la siguiente forma:

$$\frac{V_{IN}}{V_S} = \frac{R_{IN}}{R_S + R_{IN}} \qquad [8]$$

que es independiente de la frecuencia. En la vida real, C_1 normalmente es regulable para que se pueda ajustar y así compensar exactamente la capacitancia de entrada C. La sonda del osciloscopio está acoplada a una señal de calibración de onda cuadrada que genera el osciloscopio y el condensador regulable de la sonda está ajustado para producir una cubierta plana en la onda cuadrada.