

並列 T 型 RC 選択回路における各素子の許容偏差について

柿 沼 隆 清 野 々 山 延 男

I. 緒 言

並列 T 型 RC 回路を用いた選択減衰器及び増幅器⁽¹⁾については近年その特性が充分に研究され、各方面に応用される様になった。併し回路の各部品に対する許容偏差については未だよく分っていない様である。一般の部品を用いて並列 T 型回路を製作する時、その電圧伝送量の変化を、又それを用いた増幅器の増幅度の変化を或範囲に収めるには各部品についてどの位の精度を要するかと云うことは重要なことである。又これを測定器の一部として用いる場合、夏と冬又は一日の気温変化に基づく部品の変化によって、その特性がどの位変化するかを知って置くことは特に精密な測定を行う場合必要なことである。

我々は最も簡単な対称型並列 T 型回路について、各素子の変化に対する電圧伝送量 β_T の変化を計算し、これをそのまま選択減衰器として用いる場合、並びに

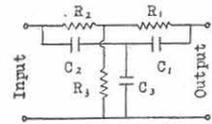
これを用いて選択増幅器を組立てる場合の各部品に要求される許容偏差を求めた。

II. 各部品に偏差がある場合の電圧伝送量 β_T

本計算では第 1 図に示す回路の中最も簡単な対称型で且 $R_1 \approx R_2 \approx 2R_3$, $C_1 \approx C_2 \approx C_3/2$ の場合を取扱う。

更に電源インピーダンスが 0、負荷インピーダンスが ∞ であると仮定する。この仮定は多くの場合近似的に成立させうる。

第 1 図 並列 T 型回路

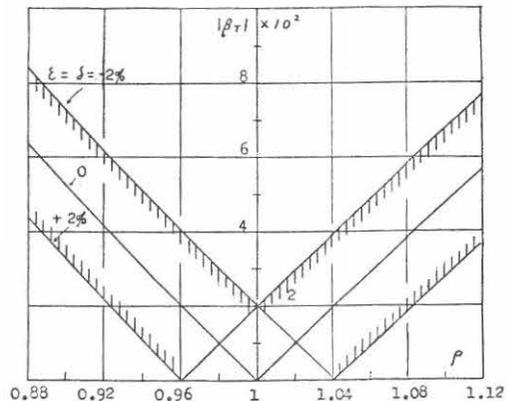


第 1 図において $R_1 = R(1 + \epsilon_1)$, $R_2 = R(1 + \epsilon_2)$, $R_3 = R(1 + \epsilon_3)/2$, $C_1 = C(1 + \delta_1)$, $C_2 = C(1 + \delta_2)$, $C_3 = 2C(1 + \delta_3)$ とおけば、 β_T の変化 $\Delta\beta_T$ は次の様になる。
 $\beta_T = \beta_{T_0} + \Delta\beta_T$, β_{T_0} は $\epsilon, \delta = 0$ のときの値とすれば

$$\Delta\beta_T = \frac{j\rho}{(1 + 4j\rho - \rho^2)^2(1 + j\rho)} \left[(-1 - 2j\rho - \rho^2 - 2j\rho^3) \cdot \epsilon_1 + (-3 - 4j\rho + \rho^2) \cdot \epsilon_2 + (2j\rho - 4\rho^2 - 2j\rho^3) \cdot \epsilon_3 \right. \\ \left. + (-2 - j\rho - 2\rho^2 - j\rho^3) \cdot \delta_1 + (j\rho - 4\rho^2 - 3j\rho^3) \cdot \delta_2 + (-2 - 4j\rho + 2\rho^2) \cdot \delta_3 \right] + (\epsilon, \delta \text{ の二次以上の項}) \quad (1)$$

ここで $\rho = f/f_0$ (f_0 は $\beta_{T_0} = 0$ となる周波数) である。
 ϵ, δ が数% 程度のものであれば二次以上の項は省略することが出来る。* (1) 式を $\Delta\beta_T = \Delta b_{\epsilon_1} \cdot \epsilon_1 + \Delta b_{\epsilon_2} \cdot \epsilon_2 + \dots$ とした時の ϵ_1 等の係数 Δb_{ϵ_1} 等を計算すると第 1 表の様になる。これから ϵ_1, δ_1 等が与えられた時直ちに $\Delta\beta_T$ を求めることが出来る。又この $\Delta\beta_T$ を与えられた ϵ, δ のあらゆる組合せに対し所要周波数範囲に亘って図示すれば $|\beta_T|$ の偏差の限界を求めることが出来る筈である。実際には加えるべき $\Delta\beta_T$ の各成分の位相関係が比較的簡単であるから、 ϵ, δ がすべて符号の等しいときに $|\beta_T|$ の変化が最大になることをベクトル図から容易に結論することが出来る。例えば R, C の偏差が $\pm 2\%$ の時は一方の限界は $\epsilon = \delta = 2\%$ の時、他方の限界は $\epsilon = \delta = -2\%$ の時であって、こ

第 2 図 $|\beta_T|$ の限界。 $\epsilon, \delta = \pm 2\%$ の場合



* 二次以上の項を省略した爲に生ずる $\Delta\beta_T$ の誤差は、例えば ϵ, δ が $\pm 2\%$ として絶対値で 1%, 位相角で約 1 度程度である。併し $\Delta\beta_T$ の誤差が小でもこれを用いて β_T を計算すると絶対値には殆ど影響はないが、位相角に大きな誤差を生ずることがあるから注意を要する。

第 1 表

ρ	Δb_{ε_1}		Δb_{ε_2}		Δb_{ε_3}		Δb_{δ_1}		Δb_{δ_2}		Δb_{δ_3}	
	$ \Delta b_{\varepsilon_1} $	$<\Delta b_{\varepsilon_1}$	$ \Delta b_{\varepsilon_2} $	$<\Delta b_{\varepsilon_2}$	$ \Delta b_{\varepsilon_3} $	$<\Delta b_{\varepsilon_3}$	$ \Delta b_{\delta_1} $	$<\Delta b_{\delta_1}$	$ \Delta b_{\delta_2} $	$<\Delta b_{\delta_2}$	$ \Delta b_{\delta_3} $	$<\Delta b_{\delta_3}$
0.88	0.1907	26°22.8'	0.2211	23°40.9'	0.1658	48°40.9'	0.2058	79°44.1'	0.1757	76°35.2'	0.1884	48°40.9'
0.90	0.1918	25°00.1'	0.2169	22°44.6'	0.1677	48°01.8'	0.2043	78°19.0'	0.1794	75°43.2'	0.1863	48°01.8'
0.92	0.1929	23°38.6'	0.2128	21°49.7'	0.1695	47°23.6'	0.2028	76°52.1'	0.1831	74°51.8'	0.1843	47°23.6'
0.94	0.1941	22°18.6'	0.2088	20°56.6'	0.1713	46°46.5'	0.2014	75°29.5'	0.1868	74°01.3'	0.1823	46°46.5'
0.96	0.1953	21°13.6'	0.2049	20°18.9'	0.1732	46°24.1'	0.2001	74°22.7'	0.1904	73°25.3'	0.1804	46°24.1'
0.98	0.1964	19°42.3'	0.2012	19°14.8'	0.1750	45°34.7'	0.1988	72°50.4'	0.1940	72°22.3'	0.1785	45°34.7'
1.00	0.1976	18°26.1'	0.1976	18°26.1'	0.1767	45°00.0'	0.1976	71°33.9'	0.1976	71°33.9'	0.1767	45°00.0'
1.02	0.1988	17°11.2'	0.1941	17°38.7'	0.1785	44°26.0'	0.1964	70°19.3'	0.2012	70°46.2'	0.1750	44°26.0'
1.04	0.2000	15°57.2'	0.1907	16°52.4'	0.1802	43°52.6'	0.1953	69°06.2'	0.2046	69°53.9'	0.1733	43°52.6'
1.06	0.2012	14°44.3'	0.1874	16°07.1'	0.1820	43°19.7'	0.1943	67°54.9'	0.2081	69°12.2'	0.1717	43°19.7'
1.08	0.2024	13°32.7'	0.1842	15°23.3'	0.1837	42°47.6'	0.1933	66°45.3'	0.2116	68°26.2'	0.1701	42°47.6'
1.10	0.2036	12°21.8'	0.1811	14°40.2'	0.1854	42°15.6'	0.1923	65°37.0'	0.2150	67°40.5'	0.1685	42°15.6'
1.12	0.2048	11°12.2'	0.1781	13°58.3'	0.1870	41°44.4'	0.1914	64°30.5'	0.2184	66°55.6'	0.1670	41°44.4'

れを図示すれば第 2 図の様になり $|\beta_T|$ が各周波数につきどの位変化するか容易に目安をつけることが出来る。中心周波数では $|\beta_T|$ の上限は ε, δ の許容値に等しいと考えてよい。即ち $\varepsilon, \delta = \pm 1\%$ のとき 1% になる。

III. 各素子の偏差に対する選択

増幅器増幅度の変化

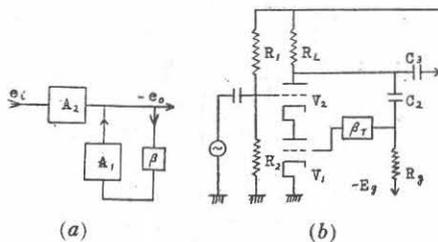
一例として第 3 図の様な選択増幅器⁽¹⁾の増幅度 G は $\beta=0$ のときの増幅度 A_2 とループ増幅度 A_1 によって $G = A_2 / (1 + A_1\beta)$ の様に表わされる。並列 T 型回路各素子に偏差がない場合の G, β を夫々 G_0, β_0 とすると増幅度の変化 ΔG は次の様になる。

$G = G_0 + \Delta G$ とすれば

$$\Delta G/G_0 = (\Delta A_2/A_2) - (\beta_0 A_1 / (1 + A_1\beta_0)) (\Delta A_1/A_1) - (A_1 / (1 + A_1\beta_0)) \Delta\beta + \text{高次項} \quad (2)$$

高次項は無視出来るものとして上式の各項の大きさについて吟味する。第 1 項及び第 2 項の $\Delta A_1, \Delta A_2$ は並列 T 型回路の入力インピーダンス Z_T の変化によって生ずるものであるが、 Z_T は通常負荷抵抗 R_L に比し充分大きいからその変化は A_1, A_2 に対して殆ど影響はない。従って問題になるのは第 3 項のみとなる。

第 3 図 選択増幅器



β は第 3 図の様な回路では並列 T 型回路の電圧伝送量 β_T と、 C_2 と R_g, Z_T による電圧分割を考慮した伝送量 β_c の積であるから、 $\Delta\beta = \beta_T \cdot \Delta\beta_c + \beta_c \cdot \Delta\beta_T$ となる。併し通常 C_2 は大きいから $\beta_c \approx 1$ と考えられ、 $\Delta\beta_c$ も無視出来る。結局 $\Delta G/G_0 \approx -(A_1 / (1 + A_1\beta_0)) \times \Delta\beta_T$ と考えてよい。

今 $\Delta G, G_0$ の絶対値を $\Delta g, g_0$ で表わし

$$\Delta G/G_0 = (\Delta g/g_0) \cdot e^{j\varphi} \quad (3)$$

とすれば

見掛けの増幅度変化率

$$\Delta g'/g_0 = (|G_0 + \Delta G| - g_0) / g_0 \approx (\Delta g/g_0) \cos \varphi + (\Delta g/g_0)^2 \cdot (\sin^2 \varphi) / 2 \quad (4.1)$$

位相のずれ

$$\alpha \approx (\Delta g/g_0) \sin \varphi - (\Delta g/g_0)^2 \cdot (\sin^2 2\varphi) / 2 \text{ rad.} \quad (4.2)$$

となる。第 1 項のみを考えれば増幅度の変化率は $\Delta G/G_0$ の実数部に等しく、位相のずれは虚数部に等しい。従って φ の値によっては、大きさには殆ど影響はないが、位相に大きな変化がある場合がある。

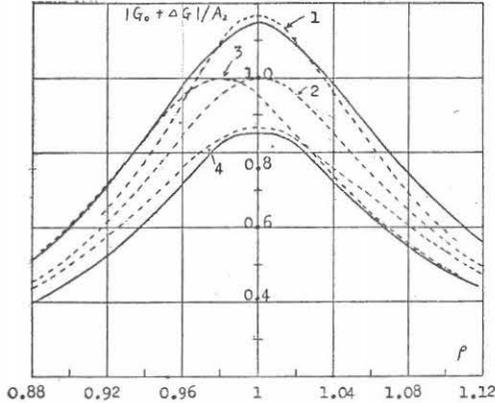
(4) 式の第 1 項のみを考え II の $\Delta\beta$ の計算値を用いると、 ε, δ が与えられた時の $\Delta g'/g_0$ の限界を求めることが出来る。即ち $\rho = 0.88-0.92$ 及び $1.08-1.12$ では ε_1, δ_1 等がすべて等符号のとき、 $\rho = 0.94-0.96$ では $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \delta_1, \delta_2, \delta_3$ がすべて等符号で ε_3 のみ逆符号のとき、 $\rho = 1.04-1.06$ では $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \delta_1, \delta_2$ が等符号で δ_3 のみ逆符号のとき、 $\rho = 0.98-1.02$ では $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \delta_3$ と $\delta_1, \delta_2, \varepsilon_3$ が互に逆符号のときに $\Delta g'/g_0$ は最大になる。

例えば $\varepsilon, \delta = \pm 1\%$ 、及び $\pm 2\%$ の場合について $\Delta g'/g_0$ から $|G_0 + \Delta G|/A_2$ を計算し、その限界を図

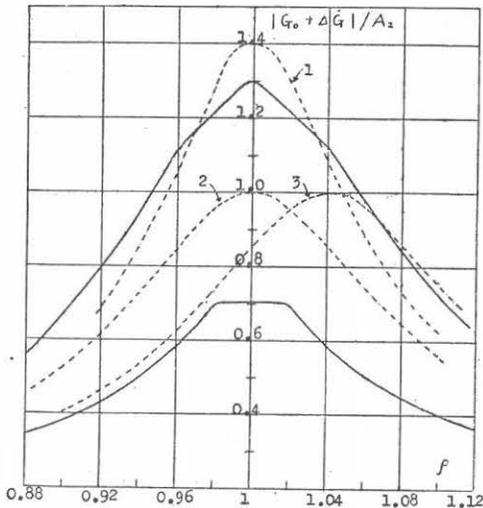
示すれば第4図の様になる。この時 $A_1 \approx 30$, 即ち $Q \approx 7.7$ として計算した。この計算では(2)式において $\Delta\beta T$ の二乗以上の項を無視し, 又(4)式においても省略を行っているので, ϵ, δ が $\pm 2\%$ のときは図に併記

第4図

実線は近似計算による $|G_0 + \Delta G|/A_2$ の限界
点線は近似を用いない計算



- (a) $\epsilon, \delta = \pm 1\%$ のとき
 点線 (1) $\epsilon_1, \epsilon_2, \delta_3 = +1\%$
 $\delta_1, \delta_2, \epsilon_3 = -1\%$
 (2) $\epsilon, \delta = 0$
 (3) $\epsilon, \delta = +1\%$
 (4) $\epsilon_1, \epsilon_2, \delta_3 = -1\%$
 $\delta_1, \delta_2, \epsilon_3 = +1\%$



- (b) $\epsilon, \delta = \pm 2\%$ のとき
 点線 (1) $\epsilon_1, \epsilon_2, \delta_3 = +2\%$
 $\delta_1, \delta_2, \epsilon_3 = -2\%$
 (2) $\epsilon, \delta = 0$
 (3) $\epsilon, \delta = -2\%$

してある詳細な計算と比較すれば分る様に相当の誤差を生ずる。併し ϵ, δ が $\pm 2\%$ では増幅度の変化は極めて大きく到底実用にならないことが分る。 ϵ, δ の範囲が 1% ならば比較的近似もよく第4図に示されている様に中心周波数で増幅度の変化は 15% 程度に拡大される。そして中心周波数附近では増幅度変化率 $\Delta g'/g_0$ の限界は ϵ, δ が 1% 程度以下のときは大体 ϵ, δ の許容値に比例して増大し, 又 A_1 即ち Q にも比例すると考えてよい。但し ϵ, δ が 1% のとき Q を上の計算の場合の2倍(約15)にすると, 2% の場合と同じく誤差が大きくなる。併し前に述べた様に変化率がこの様に大きくなっては実用上問題にならない。

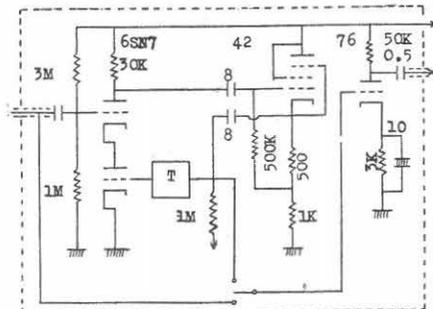
温度変化がある場合には, それによって各素子に偏差を生ずる。抵抗の温度係数は普通の炭素被膜固定抵抗の場合には約 $-2.5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,⁽²⁾ コンデンサーの温度係数も良質のものであれば抵抗のそれと同程度である。従って選択増幅器(又は減衰器)において, 各素子の許容偏差を求めるには使用条件を考えてこの温度変化によって生ずる偏差をも含めて考える必要がある。

1例として中心周波数で完全に調整した増幅器で 10°C の温度変化で増幅度がどの位変るかを求める。変化率が ϵ, δ の許容値及び Q の値に比例するから, 抵抗及びコンデンサーの温度係数が上記の値と同程度として中心周波数で最大約 $(15/7.7) \times Q \times (1/4)\%$, $Q=7.7$ のとき約 3.7% 程度になる。勿論温度変化による影響を考えると, 並列 T 型回路のみでなく他の部品の変化をも考える必要がある。これ等の部品の中増幅度変化に最も大きな影響を与えるのは R_L で(第3図参照), この変化によって A_1, A_2 が変わる。併しこれによる増幅度の変化は極めて小さい(抵抗温度係数 \times 温度変化の程度)から通常無視して差支えない。

IV. 実験

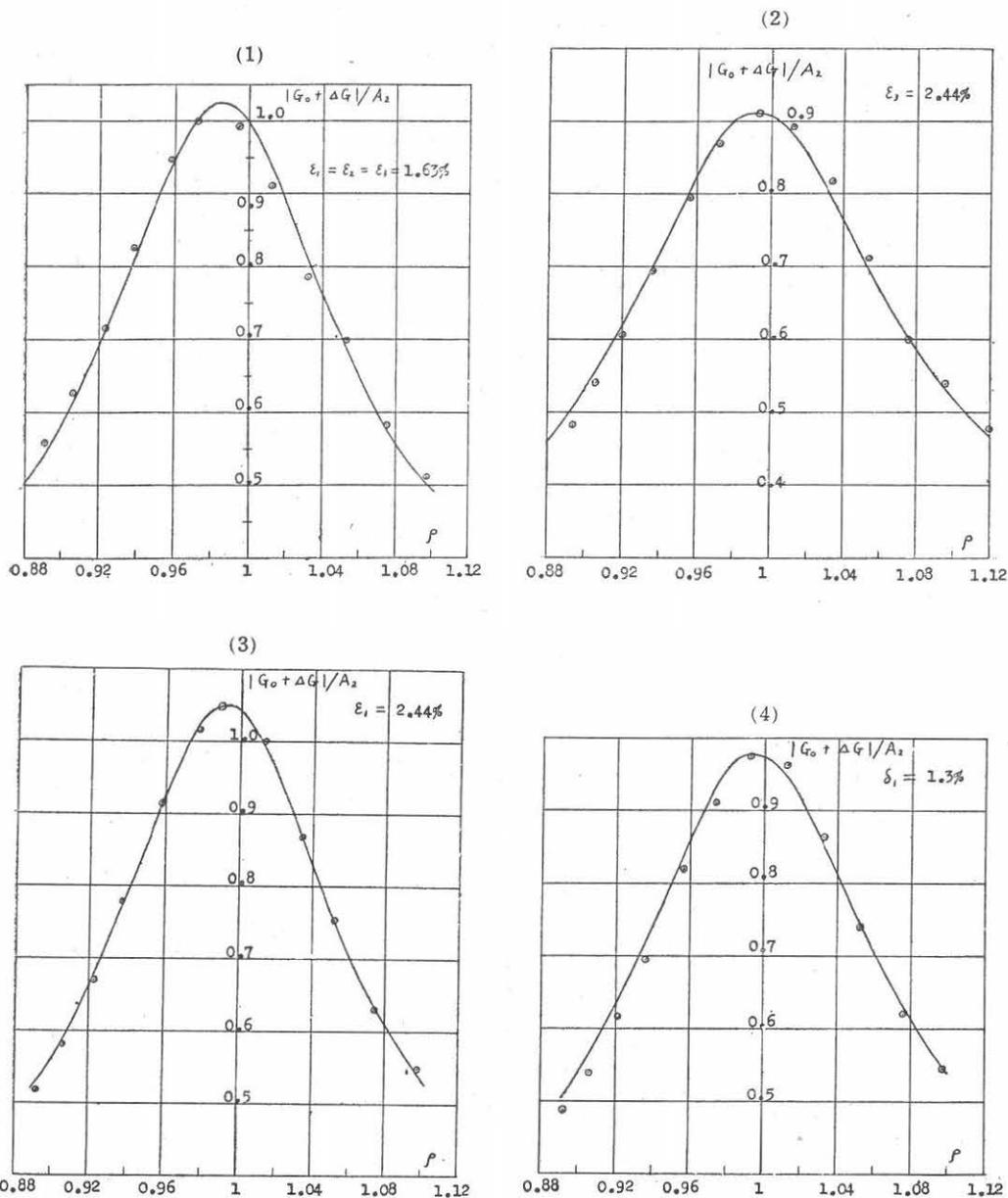
以上の計算を確める為に, 第5図の様な回路を用いて実験した。並列 T 型回路の各素子の偏差は可変抵抗

第5図 実験に用いた選択増幅器



第6図 計算値と実測値

○は実測値



器又は固定容量を附加することにより与えた。この場合中心周波数は 47.7 c/s, ループ増幅度 A_1 は 29.8 であった。第6図にその結果を示す。

計算値は III に述べた様な近似計算によったものである。計算に種々の省略を行っていること、及び測定誤差を考慮すれば以上の計算は大體信頼し得るものと考えることが出来るであろう。

V. 結 言

以上の計算結果を要約すると

(1) 選択減衰器として用いる場合

中心周波数で $|B_T|$ の上限は各部品の偏差 ϵ, δ の許容値に比例する。即ち、 $\epsilon, \delta = \pm 1\%$ のときは $|B_T|$ は最大約 1% になる。他の周波数も考えるときは $|B_{T0}|$ の曲線を平行移動し、 $|B_{T0}| = 0$ になる周波数から容易に

許容偏差を求めることが出来る(第2図参照).

(2) 選択増巾器に用いる場合

中心周波数で増幅度変化の限界値が15%程度以下のとき, ϵ, δ の許容値は近似的に次の関係から求めることが出来る.

$$\begin{aligned} & \text{増幅度変化率 } \Delta g'/g_0 \text{ の限界値\%} \\ & = (15/7.7) \times Q \times (\epsilon, \delta \text{ の許容値\%})\% \end{aligned}$$

特に選択増幅器に用いる場合には, 各部品品の僅かの偏差によっても増幅度に大きな変化を生ずるから精密

な測定に用いる場合にはこの点に充分注意しなければならない.

終りに終始御指導を頂いた田中春夫助教授に深く感謝する. 尙本研究は文部省科学研究助成費の補助を受けて行ったものである.

文 献

- (1) H. Fleisher: M. I. T. Series. Vol. 18. p. 385.
- (2) 浅石: 通研月報, May, 1951, No. 5.