テレビ信号の低周波波形ひずみ

NHK 技術研究所 安 広 輝 夫

テレビジョン伝送系の低周波特性に欠陥がある場合、この系の単位応答にはクランプした後もサグが残る。本文では系の特性からこのサグの量を評価する方法を解析し、簡単な場合についての計算例を示した後、同一の時定数をもつ多段のCR結合回路の応答を調べた結果、従来知られていなかった振幅特性歪の問題を解析し、CR結合が10段までの場合について増幅器に必要な動作範囲の幅を求めている。

筆者等は本誌57年11巻9号に「TV伝送系の線形ひずみ」(木下, 安広)の表題で、TV伝送系の高周波特性に着目してその理想特性、振幅、位相ひずみの影響について述べたが、本文では低周波特性に着目し、クランプを含む場合の残存サグ量を一般的に解析してその評価量を求め、次にこれに関連して計算した同一時定数の多段CR結合回路の応答から、クランプを含まない多段増幅器の内部で起きるクリッピングの問題を解析して、必要とする直線動作域の幅を求めた。

本文後半の数値計算は当研究室の電子計算機を用いて行なったが、計算方法の説明は誌面の都合で割愛し、結果のみを述べることにした。

周波数特性とサグの関係

1. ひずみの形態

第1図に示すような同期信号を含む単位信号がテレビ伝送系に加えられた場合、もし系の低周波特性が減衰していればこの応答は第2図のようになり、クランプすると第3図の波形となる。図中の Δ はサグの最大量を示す。

2. サグの評価量

簡単のため次の仮定をおく。

- 1) クランプは完全である。

- 2) 系の高域特性には欠陥がない。
- 3) 振幅特性は周波数の偶関数である。
- 4) 位相特性は周波数の奇関数である。
- 5) 非直線ひずみは存在しない。
- 6) 伝送特性の欠陥は水平周波数より充分低い領域にある。

系の伝送特性(第4図a)を $A(\omega)e^{j\varphi_A}$ とするとこの特性は理想特性(第4図b) $B(\omega)e^{j\varphi_B}$ と、欠陥に相当する特性(第4図c) $C(\omega)e^{j\varphi_C}$ との差で表わすことができる。 $B(\omega)=1$, $\varphi_B=-\omega\tau$, および $\omega>\omega_H$ に対しては $\varphi_A=\varphi_B=-\omega\tau$ であるから、 $\psi(\omega)=\varphi_C(\omega)+\omega\tau$ とおくと、系の特性は次式で表わせる。

$$A(\omega)e^{j\varphi_A}=[1-C(\omega)e^{j\psi(\omega)}]e^{-j\omega\tau}$$

次に F_a , F_b , F_c をそれぞれ $A(\omega)e^{j\varphi_A}$, $B(\omega)e^{j\varphi_B}$, $C(\omega)e^{j\varphi_C}$ の単位応答とすれば、仮定5により任意の時間 T に対して次式が成立する。

$$\begin{aligned} F_a(T) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} [1-C(\omega)e^{j\psi(\omega)}] e^{j\omega(\theta-\tau)} d\omega \\ &= F_b(T) - F_c(T) \end{aligned}$$

第1図 入力波形

第2図 出力波形クランプ前

第3図 出力波形クランプ後

筆者紹介

やすひろ てるお 昭和25年3月東京工業大学卒業後、広島中央放送局原放送所に勤務、同27年9月NHK技術研究所に移りテレビ用フィルムカメラ、光学系、伝送系の研究を行なった後、電子計算機の研究に従事。同35年11月より36年5月までフランス放送協会技研研究所に留学、テレビ伝送系の研究を行ない帰国後引き続き電子計算機の研究に従事し現在に至る。正会員

"Distortion of a TV Signal due to the low frequency Characteristics" by Teruo Yasuhiro

t_H を水平周期, t_m を $\Delta_{\max}$ の位置とすれば, 第5図からサグ量は次式で与えられる. 以後, 時間 T は基準化して $t = T - \tau$ で表わすことにする. 上式を用いて

$$\begin{aligned}\Delta &= F_a(t_m) - F_a(t_m + t_H) \\ &= F_c(t_m + t_H) - F_c(t_m)\end{aligned}$$

一方, 仮定3および4から

$$\begin{aligned}F_c(T) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^t d\theta \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^t C(\omega) e^{j\psi(\omega)} e^{j\omega\theta} d\omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^t d\theta \int_0^\infty C(\omega) \cos(\omega\theta + \psi) d\omega\end{aligned}$$

であり, 仮定5から積分順序の交換が可能であるから,

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{1}{\pi} \int_{t_m}^{t_m+t_H} d\theta \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{C(\omega)}{\omega} [\sin\{\omega(t_m+t_H) + \psi\} \\ &\quad - \sin\{\omega t_m + \psi\}] d\omega\end{aligned}$$

上式の大カッコ内の $\psi(\omega)$ に $\delta\psi$ の変分を加えれば, 大カッコ内の関数の変分は次式のようになる.

$$\begin{aligned}\cos \delta\psi [\sin\{\omega(t_m+t_H) + \psi\} - \sin(\omega t_m + \psi)] \\ + \sin \delta\psi [\cos\{\omega(t_m+t_H) + \psi\} - \cos(\omega t_m + \psi)]\end{aligned}$$

ここで大カッコ内が極値をとるためには, 上式が $\delta\psi$ の偶関数であることが必要であるから, $\sin \delta\psi$ の係数をゼロとおき次式が得られる.

$$\omega t_m + \omega t_H + \psi = \pm(\omega t_m + \psi) + 2n\pi$$

負号をとれば

$$\psi(\omega) = -\omega t_m - \omega t_H/2 + n\pi$$

この値を代入すると, 大カッコ内の値は次式のようになる.

$$[\quad] = \begin{cases} +2 \sin(\omega t_H/2) & : n \text{ 偶} \\ -2 \sin(\omega t_H/2) & : n \text{ 奇} \end{cases}$$

したがって ψ が任意に与えられた場合, 大カッコ内が取り得る正最大の値は

$$2 |\sin(\omega t_H/2)|$$

で, t_H, ω 正ゆえ, Δ の最大値は次式で表わされる.

$$\begin{aligned}\Delta &\leq \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{C(\omega)}{\omega} \cdot 2 |\sin(\omega t_H/2)| d\omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty C(\omega) \cdot \left| \frac{\sin(\omega t_H/2)}{(\omega t_H/2)} \right| d\omega\end{aligned}$$

被積分関数の $C(\omega)$ に対する重み関数の最初の零点は $\omega = \omega_H$ であるから上式を ω_H の点で分割して表わし,

第4図 周波数特性 A, B, C の説明図

第5図 応答 Fa, Fb, Fc の説明図

$\omega \leq \omega_H$ では $|\sin X/X| \leq 1$,

$\omega \geq \omega_H$ では $|\sin X/X| \leq 1/X$

なる関係を用いて簡略化すれば次式が得られる.

$$\Delta \leq \frac{t_H}{\pi} \int_0^{\omega_H} C(\omega) d\omega + \frac{2}{\pi} \int_{\omega_H}^\infty \frac{C(\omega)}{\omega} d\omega$$

$\omega > \omega_H$ にて $|C(\omega)| = O(\omega^{-m})$, $m \geq 1$

と見なされる場合には上式第2項は

$$\frac{2}{\pi} \int_{\omega_H}^\infty \frac{C(\omega)}{\omega} d\omega = O(\omega_H^{-m})$$

であり, 仮定6により

$$|C(\omega_H)| = O(\omega_H^{-m}) \ll 1$$

であるから第2項は無視することができ, 第1項, すなわち周波数ゼロから水平周波数までに含まれる $C(\omega)$ の面積によって, サグの最大量を評価することができる.

3. CR 結合回路1段の例

例として増幅器の段間結合に用いられている第6図の回路について, サグの量を求めてみる.

この回路の伝送特性は

$$A(\omega) e^{j\varphi_A} = 1/(1 + j\omega CR)$$

で与えられ, この場合は高周波領域で位相特性が $\varphi_A \rightarrow 0$ となるから, $\tau = 0$ である.

第6図 CR 結合回路

第7図 多段CR結合増幅器

定義により $C(\omega)$ は次式で与えられる.

$$C(\omega) = |1 - A(\omega)e^{j(\varphi A + \omega\tau)}|$$

上式で $\tau=0$ とおき, 伝送特性を代入すれば

$$C(\omega) = \left| 1 - \frac{1}{1 + j\omega CR} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}$$

となり, Δ の評価式に代入すると

$$\Delta \leq \frac{t_H}{\pi CR} \operatorname{arcsinh}(\omega_H CR)$$

一方, 第6図の回路の応答は

$$e^{-t/CR} \doteq 1 - t/CR$$

であるから, 実際のサグの量 Δ_t は

$$\Delta_t = t_H/CR = 1/f_H CR$$

第1表 多段CR結合回路の応答極大値

段数 l	$X (<10)$	X のステップ	$y_{\max}$ (5位4捨5入)
2	2.0	0.2	- 0.0677
	4.8		+ 0.0120
4	1.0	0.2	- 0.1226
	3.4		+ 0.0265
	7.8		- 0.0021
5	0.7	0.1	- 0.1362
	2.6		+ 0.0396
	5.7		- 0.0064
6	0.6	0.1	- 0.1464
	2.1		+ 0.0506
	4.6		- 0.0116
	8.40*		+ 0.0014
7	0.5	0.1	- 0.1539
	1.8		+ 0.0609
	3.8		- 0.0178
	6.85*		+ 0.0034
8	0.5	0.1	- 0.1571
	1.6		+ 0.0673
	3.35*		- 0.0225
	5.45*		+ 0.0053
	9.35*		- 0.0007
9	0.4	0.1	- 0.1633
	1.4		+ 0.0740
	2.95*		- 0.0276
	5.15*		+ 0.0078
	8.20*		- 0.0015
10	0.4	0.1	- 0.1650
	1.2		+ 0.0791
	2.65*		- 0.0322
	4.65*		+ 0.0103
	7.25*		- 0.0024

註 (1) y の値は第5位を4捨5入してある.

(2) *印は y が X の数ステップの間, 同値をとる場合で, X としてはそれらの平均値を示した.

で与えられる. 例として $\Delta_t = 10\%$ ($CR = 10 \cdot t_H$) の場合を求めれば, Δ の評価式は

$$\Delta \leq (1/10\pi) \operatorname{arcsinh}(20\pi) \doteq 0.154$$

すなわち Δ は16%以下と推定され, 実際の Δ は10%であるから, 上記の評価式から得た値をこえないことがわかる.

念のため評価式で省略した第2項を計算すると $\omega_H CR = 20\pi \gg 1$ ゆえ, 第2項は次式で表わされる.

$$\begin{aligned} & -\frac{2}{\pi} \log \left| \frac{\omega_H CR}{1 + \sqrt{\omega_H^2 C^2 R^2 + 1}} \right| \\ & \doteq \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\omega_H CR} = 0.0102 \end{aligned}$$

したがって, 第2項を無視した場合の評価値の誤差は7%であるから, 実用上第2項を省略できる.

4. CR結合回路3段の例

次にCR結合が3段の場合について考える. この場合 $C(\omega)$ は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} C(\omega) &= |1 - \{j\omega CR / (1 + j\omega CR)\}^3| \\ &= |1 - jX^3 / (1 + jX)^3| \\ &= \sqrt{(1 + 3X^2 + 9X^4) / (1 + X^2)^3} \end{aligned}$$

ただし $X = \omega CR$ とする.

この積分は計数特別研究室の電子計算機を用いて行なったが, ここでは計算の詳細については省略する.

積分結果から求めたサグの評価量は

$$\Delta = 0.388$$

で, 一方後述のCR3段の応答から $t=0$ と $t=t_H$ の間に実際に生ずるサグは ($X_H = 0.1$)

$$\Delta t = 0.272$$

で, 真のサグ Δ_t は評価値 Δ より小さく, したがってこの評価値でサグの量を評価できることが証明される.

多段CR結合回路の波形ひずみ

1. 多段CR結合回路の応答

第6図のCR回路の特性を $g(P)$ とすれば,

$$g(P) = PCR / (1 + PCR) = P / (P + k)$$

で表わされる. ただし $k = 1/CR$ とする.

第7図のCR-l段の回路の単位応答に対応する像関数は次式で与えられる.

$$F(P) = [g(P)]^l / P = P^{l-1} / (C + k)^l$$

したがって, l段の応答 h_l は $X = kt = t/CR$ とおいて, 次式で与えられる.

$$h_l(X) = e^{-X} \sum_{i=0}^{l-1} \left[\frac{(-1)^i (l-1)!}{(l-2)! (i!)^2} X^i \right]$$

$X=10$ までの電子計算機による演算結果の極大値のみを第1表, $X=5$ までの波形を第8, 9図に示した. ただし応答は計算の都合で $y=h/2$ に基準化してある.

第8図
CRI 段の応答
(1:2.4.6.8.10)

第9図
CRI 段の応答
(1:3.5.79)

2. 多段 CR 結合増幅器に発生するひずみ

入力映像信号として、画面が任意の間隔で黒、白交互に変化する場合、すなわち入力が

$$\sum_r (-1)^r \eta(t - \tau_r)$$

$$\text{ただし } \eta(t) = \begin{cases} 1 & \dots t > 0 \\ 0 & \dots t < 0 \end{cases}$$

の形のとき、出力 Y に表われるひずみについて考える。

まず単位応答における $X=0$ の値を $y_{m0}=1/2$ とし、以下、極大値の生ずる点の X の値を順次 $X_{m1}, X_{m2}, \dots$ とし、対応する y の極値をそれぞれ、 $y_{m1}, y_{m2}, \dots$ とする。

ここで時刻 X_m にて応答 Y が負の最大値をとる入力を見ると、この波形は $X=X_m$ に負の単位関数、 $X=X_m-X_{m1}$ に正の単位関数、 $X=X_m-X_{m2}$ に負の単位関数、……を合成したもので、このときの X_m における Y の値 Y_m はそれぞれの単位関数の極大値の総和と

なり、また極大の生ずる点の数は $(l-1)$ 個であるから

$$|Y_m| = \sum_{i=0}^{l-1} |y_{mi}|$$

で表わされる。

この入力の白と黒を入れかえれば、 X_m で同振幅の正最大値が生ずるから、必要な増幅器の直線動作領域は入力 0.5 に対して $2 \cdot Y_m$ 、すなわち映像振幅の $4 Y_m$ 倍が必要である。

第2表 増幅器に必要な振幅の範囲

段数 l	$4 Y_m$
2	2.2707
3	2.4568
4	2.6050
5	2.7543 (2.7289)
6	2.8460 (2.8403)
7	2.9705 (2.9436)
8	3.0171 (3.0112)
9	3.1143 (3.0967)
10	3.1953 (3.1562)

(註) カッコ内は X が 10 以上にある極大値を無視した場合の値。

第10図 系の中にクランプのある場合の説明図

例として $l=6$ の場合をとると、 $X < 10$ では最後の極大値 y_{m5} が求められないが、第1表から

$$|y_{m1}| > |y_{m2}| > |y_{m3}| > \dots$$

であるから、 y_{m5} を無視したときの Y_m の誤差 ε は

$$\varepsilon = |y_{m5}| < |y_{m4}| = 0.00142$$

したがって

$$Y_m < \sum_{i=0}^4 |y_{mi}| + \varepsilon = 0.7101 + 0.0014$$

$$4Y_m < 2.8460$$

すなわち映像振幅の約3倍の直線領域が必要である。

10段までの $4Y_m$ の値を第2表に示す。同表のカッコ内は $X > 10$ にある極大値を無視した場合で、カッコの前の値は前例のように変域内の最後の極大値以下と考えた場合の値である。この表から10段までの増幅器に必要な動作範囲が求められる。

4. 実際の場合に適用するための考察

1. 垂直パルスの影響

垂直帰線期間は垂直周期の6.5%であるから、送像側ではこれより小さい値をとっているが、仮に6.5%とすると、この時間は約1msである。

垂直帰線信号1個が加わった場合を考えると、2個の単位関数が1msおきて逆向きに加わったことに相当し、この信号は前述の映像信号の一部と見なせるから、垂直帰線信号を含んだ映像信号が第2表の $4Y_m$ をこえないことは明らかである。

映像信号が無変調の場合には、出力最大値は $4Y_m$ より若干減少する。CRの時定数が1msの場合を例にとると、隣のパルスの影響を無視すれば単位関数の間隔は

$X=1$ に相当するから、第8, 9図からCR4段のとき単位応答の初の極大位置に次の単位関数が加えられることになり、最大値は $1+2y_{m1}$ となる。

2. 水平パルスの影響

水平周期を1としたときの水平帰線幅を $1-\alpha$ とおき、水平帰線信号で変調された単位関数を、直流分を含まない周期 f_H のパルス群と単位関数との和にわけて考えると、パルス群は f_H とその側帯波で作られているから、系の f_H 近傍の特性に欠陥がなければ、そのまま伝達され、単位関数のみが低周波特性の影響を受けることになる。

第1図に示したように映像振幅を A 、帰線信号の振幅を B とすると、水平パルスを含んだ信号の平均値に相当する波形は黒および白の部分でそれぞれ

$$B \cdot \alpha, (A+B) \alpha$$

となるから、単位関数の振幅はこれらの差 $A \cdot \alpha$ となり、したがって波形ひずみの大きさは水平パルスがない場合の α 倍に減少する。ただし水平帰線期間は水平周期の17%以下であるから、 α はその幅に応じて $0.83 < \alpha < 1$ なる値をとる。

3. クランプが系の途中にある場合のサグ

簡単のため中間に1個のクランプの入った第10図の場合について説明する。

中間のクランプ位置 P における波形は、単位関数の入力に対しクランプがない場合には同図2、これをクランプすると同図3のようになる。

ここで、この波形を単位関数(同図4)と鋸歯状部分の平均値変動(同図5)と、振幅変調された鋸歯状波(同図6)に分解して考えると、波形6は f_H とその側帯波からなっているから、つぎの回路の f_H 近傍の特性に欠陥がなければそのまま通過して出力に重畳する。波形5はつぎの回路によって振幅、位相の変化を受けるが、その振幅は初めの回路で発生するサグ Δ_1 のオーダーであり、その変化の速度は f_H に比して充分おそいから、任意の位置で時間 T_H へだたった点の振幅の差はきわめて小さく、最後にクランプすれば無視することができる。

したがって、出力では第2の回路による単位関数4の応答と、波形6の重畳したものをクランプした波形が得られる。波形6の水平パルスの間の傾斜は波形2のものと全く同一であるから、 T_H の間で起るサグを問題とする場合は、第1の回路網の応答に、第2の回路網の応答を加えた波形をクランプしたと考えても同じ結果が得られる。

それぞれの応答のサグを Δ_1, Δ_2 とすれば、全系のサグは $(\Delta_1 + \Delta_2)$ となる。

特に同じ時定数をもつ CR 結合回路の場合には、 l 段の応答は前記のように

$$y = e^{-x} \left\{ 1 - (l-1)X + \frac{(l-1)(l-2)}{4} X^2 - \dots \right\}$$

で表わされ

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{CR} [-e^{-x} \{ 1 - (l-1)X + \dots \} + e^{-x} \{ -(l-1) + \dots \}]$$

であり、傾斜最大の位置は $t=0$ であるから

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = \frac{l}{CR}$$

となり、サグは近似的に

$$\Delta = l \cdot t_H / C \cdot R$$

で表わされ、したがって第 1 の回路網の段数を l_1 、第 2 のものを l_2 とすると、この場合のサグは

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = t_H (l_1 + l_2) / C \cdot R$$

となり、系の全段数の応答で評価できることがわかる。

4. サグ評価法に対する考察

前記のサグ評価法では $C(\omega)$ を求める必要があるが、これには 2 つの方法がある。第 1 は解析的に与えられる場合で、この場合はラプラス変換を用いて応答を計算して、直接その最大傾斜を求めれば、サグを知ることができるが、一般にはこの傾斜最大の位置は定まっていないから、適当な時間間隔でその応答を計算する必要がある。

これに反して、前記の方法では $C(\omega)$ の積分値を求めることになるが、多くの場合、時間関数は像関数に比して複雑な形をとるので、 $C(\omega)$ が解析的に積分できる場合はもちろんであるが、これが困難な場合にも $C(\omega)$ の曲線を描くことは原関数を計算するより容易であり、この曲線の面積をプランメータで測れば、サグ評価量を容易に求めることができる。本文中では電子計算機を用いて数値積分を行なったが、プランメータで行なった結果との相対誤差は 2.5% 程度であった。

第 2 は $C(\omega)$ を測定により求める場合で、この場合測定可能な最低周波数を f_l とし、ゼロ周波数から f_l までの $C(\omega)$ を 1 とおいた場合に生ずる誤差について考えてみると、 $C(\omega) = |1 - A(\omega) e^{j(\varphi A + \omega \tau)}|$ であるので、 $|A(\omega)| \leq 1$ とすれば $|C(\omega)| \leq 2$ であるから、この場合の誤差 δ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{t_H}{\pi} \int_0^{\omega_l} \{C(\omega) - 1\} d\omega \\ &\leq \frac{t_H}{\pi} \int_0^{\omega_l} 1 d\omega = \frac{t_H}{\pi} \omega_l = 2 \frac{f_l}{f_H} \end{aligned}$$

現在市販の低周波位相測定器では $f_l = 20 \sim$ であるから、誤差は 0.25% 以下である。また 1% の誤差を許す

とすれば、78 $\sim$ まで測定すれば良い。

む す び

低周波伝送特性の欠陥により、クランプしても残るサグの量は、もしこの欠陥が水平周波数より充分低い部分にあれば、実際の特性と理想特性の差の振幅特性の周波数ゼロから水平周波数までに含まれる面積で定まる量をこえず、この振幅特性の形には関係しない。また差の特性が位相ひずみをもつ場合は位相ひずみのない場合の波形ひずみと等しいか、それ以下であることを示し、CR 結合 1 段と 3 段の場合について計算例を示した。

つぎに、これに関連して計算した多段 CR 結合増幅器の応答から CR 結合増幅器で信号がクリップされないためには、映像信号の何倍の直線動作範囲が必要であるかを求め、10 段までに対する値を示した。

さらに実際の場合に対する考察として、垂直、水平パルスの影響、クランプが系の途中にある場合、サグ評価量の求め方等に対して若干の考察を行なった。なお低域特性に欠陥のある場合を高域の場合と比較してみると、系の単位応答を y とし、その導関数を y' とすれば、高域特性に劣化のあるときは

$y_{\max}$: オーバershoot, リンギング

$y'_{\max}$: 立上り時間

に対応するのに対して、低域特性に劣化のあるときは

$y_{\max}$: 増幅器の必要な振幅範囲の幅

$y'_{\max}$: クランプ後も残るサグ

に対応しているといえよう。

したがってサグ量と立上りの傾斜は本質的には同一のもので、ただ前者は少ないほど、後者は大きいほど良い点が異なるだけである。この傾斜は「TV 伝送系の線形ひずみ」にも述べたように、位相ひずみがない場合、入力信号の位相が揃うので最大となる。すなわち特性から位相ひずみを取除いた絶対値の特性の面積、ここでは $C(\omega)$ の面積がこの最大値を与える。

また、評価値は特に系自体に位相ひずみが存在しない場合には、振幅特性の欠除した面積であるから、等価低域遮断周波数に他ならない。この評価値をおさえることによって、テレビジョン伝送系から発生するサグを所望の値以下におさえることができるから、これを用いて系の使用者の立場から低域特性の保守規準を与えることが可能であろう。

なお本文の前半のサグ評価量の解析は、筆者がフランス放送協会に留学中に行なった研究に、若干修正を加えたものである。

終りに、本研究に当り御指導を頂いた吉田計数特別研究室長、木下副室長に深謝する。(昭和 37 年 1 月 29 日受付)