スミアひずみと画質への影響

日本テレビ放送網株式会社 池 田 辰 雄

スミアひずみには、スミアレベルとスミアタイムの2つの要素があり、いずれも画質を低下させることが著しい。ここでは、これらのスミアひずみ波形と周波数特性、位相特性の関係を求め、さらに、スミアひずみの種々の場合の画像について、技術者と非技術者による画質評価を行ない、そのひずみの量と画質との関係を明らかにし、この結果、スミアレベルに対する画質劣化の許容値を求めることができた。なお、同軸ケーブルにおけるスミアひずみを求め、これらに対する補正についても良好な結果を得た。

1. ま え が き

画面上に現われるスミアは伝送波形の周波数スペクトルの中域における位相と、振幅ひずみに基づくものであり、画像の階調レベルに対して、同極性の場合と反極性の場合がある。通常の伝送系でのスミアひずみは前者の場合が多く、伝送機器や同軸系にその発生源がある。

このひずみを伴う画面は分解能を減じ、画質を著しく劣化させるが、これはスミアレベルとスミアタイムの2つの要素に起因することになる。

ここでは最初にスミアひずみを発生する基本回路によって、基準となるスミアひずみ波形を発生し、上記の2つの要素を定量的に与えた波形について、周波数振幅ひずみと位相ひずみの様相を求め、また、このスミアレベルとタイムの多くの組合せに対する画像の評価を行ない、その画像劣化の程度を求め、さらに、その許容値を求めることができた。

2. 集中定数回路におけるスミアひずみ

2.1 スミアの波形ひずみ

いわゆるスミアひずみの波形は図1に示すような2つの場合がある。このようなスミアひずみは、図2に示すような抵抗 R と、容量 C の組合せを用い、容量 C_1 と C_2 を互いに増減し、抵抗 R_1 と R_2 は同方向に増減して発生させることができる。

いま、 $T_1 = R_1 C_1$ 、 $T_2 = R_2 C_2$ とし、さらに、

$$T_1 < T_2 \text{ のとき } n_1 = \frac{T_2}{T_1} \quad (n_1 > 1)$$

$$T_1 > T_2 \text{ のとき } n_2 = \frac{T_1}{T_2} \quad (n_2 > 1)$$

図1 スミアひずみ波形の基本

Typical waveforms of smearing distortions.

図2 スミアひずみの基本回路

Typical circuit of smearing distortions.

とする。この回路における方形波の応動波形は、次式によって求めることができる。

$$A(t) = E_0 \mathcal{L}^{-1} \frac{R_2 (T_1 P + 1)}{(R_1 T_2 + R_2 T_1) P + (R_1 + R_2)} \quad (1)$$

ただし、 $P = j\omega$

いま、 $T_1 < T_2$ のとき $R_1 = R_2 = R$ とし、かつ、パルス幅を τ_0 とし、 $D_1 = \tau_0 / T_1$ とすれば (1) 式は、
 $0 < t < \tau_0$

$$A_1(t) = \frac{E_0}{2} + E_0 \left\{ \frac{1}{(n_1 + 1)} - \frac{1}{2} \right\} e^{\{-2/(n_1 + 1)\} D_1 (t/\tau_0)} \quad (2)$$

"Smearing Distortion and Its Effects on the Picture Quality" by
 Tatsuo Ikeda (Nippon Television Network Corp., Tokyo)

同様に $T_1 > T_2$ のときには $D_2 = \tau_0 / T_2$ とし、

$$A_1(t) = \frac{E_0}{2} + E_0 \left\{ \frac{n_2}{(n_2+1)} - \frac{1}{2} \right\} \varepsilon \{ -2/(n_2+1) \} D_2(t/\tau_0) \quad (3)$$

$t > \tau_0$

$$A_2(t) = A_1(t) - A_1(t - \tau_0) \quad (4)$$

上式において D_1 , D_2 はスミアひずみ波形のスミアタイムを規定するものであり、 n_1 , n_2 はスミアレベルを規定するものである。

(2), (3), (4) 式によって、スミアひずみ波形を計算したものが図3, 図4である。すなわち、図3はスミアレベル、 n_1 , $n_2=4$ のときのスミアタイムの変化を示し、図4はスミアタイム、 D_1 , $D_2=50$ のときにおけるスミアレベルに対する波形である。

実験波形の写真1は、パルス幅 $\tau_0=20 \mu\text{s}$ に対し、 $R_1=R_2=30 \text{ k}\Omega$, $C_1=13 \text{ pF}$, $C_2=52 \text{ pF}$ の場合であり、このときの値から、スミアレベルは $n_1=C_2/C_1=4$, スミアタイム $D_1=\tau_0/T_1=50$ のときの波形であり、また、

写真1 スミアひずみ波形 ($D_2=50$, $n_2=4$, $T_1 > T_2$)

Smearing waveform distortion. ($D_2=50$, $n_2=4$, $T_1 > T_2$)

写真2 スミアひずみ波形 ($D_1=50$, $n_1=4$, $T_1 < T_2$)

Smearing waveform distortion. ($D_1=50$, $n_1=4$, $T_1 < T_2$)

写真2は同様に、 $C_1=52 \text{ pF}$, $C_2=13 \text{ pF}$ の場合であり、 $n_2=C_1/C_2=4$, $D_2=50$ のときの波形であり、いずれも、図3, 図4の中のこの値に対する計算波形に相当する。

2.2 スミアの周波数振幅ひずみと位相ひずみ

スミアひずみは伝送波形の周波数スペクトルのうち、主として中域における振幅ひずみと位相ひずみによるもので、この両者と波形ひずみの関係を知る必要がある。

最初に周波数ひずみについて、図1に示した基本回路について求めてみると、このときの入力電圧 e_{in} に対する出力電圧 e_{out} に対する値は次式ようになる。

$T_1 < T_2$ のとき $T_1=T$, $T_2=n_1 T$ とすれば、

$$\frac{e_{out}}{e_{in}} = \frac{j\omega T + 1}{j\omega(n_1+1)T + 2} \quad (5)$$

同様に、 $T_1 > T_2$, $T_2=T$, $T_1=n_2 T$ とすれば、

$$\frac{e_{out}}{e_{in}} = \frac{j\omega n_2 T + 1}{j\omega(n_2+1)T + 2} \quad (6)$$

(5) 式の場合は、白レベルに対して白のスミアであり、(6)式は白レベルに対して黒のスミアである。

この両者の場合について n の変化、すなわちスミアレベルに対する周波数振幅ひずみの変化の様相を、 $\tau_0=20 \mu\text{s}$ 、スミアタイム $D=50$ の場合について計算した結果を図5に示す。

次に、スミアひずみに対する位相ひずみは、(8)式より次のように求めることがで

図3 スミアひずみ波形 (スミアレベル n_1 , $n_2=4$)

Waveforms of smearing distortions. (Smear level n_1 , $n_2=4$)

図4 スミアひずみ波形 (スミアタイム D_1 , $D_2=50$)

Waveforms of smearing distortions. (Smear time D_1 , $D_2=50$)

図 5 スミアタイムに対する周波数ひずみ
Smearing distortions frequency characteristics.

図 6 スミアひずみの位相推移量
Smearing distortions phase shift characteristics.

きる。いま、位相ひずみ量を θ とすれば、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega(T_1 - T_2)}{\omega^2 T_1(T_1 + T_2) + 2} \quad (7)$$

$T_1 < T_2$ のとき、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(1 - n_1)\omega T}{(1 + n_1)(\omega T)^2 + 2} \quad (8)$$

$T_1 > T_2$ のとき、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(n_2 - 1)\omega T}{(1 - n_2)n_2(\omega T)^2 + 2} \quad (9)$$

(8) 式は (5) 式で示す振幅ひずみに付随する位相量であり、同様に、(9) 式は (6) 式に対応する位相量である。(8)、(9) 式によって、計算した位相推移量と、実験による測定結果は図 6 に示す。

この位相量 θ が最大となる周波数は、 $d\theta/d\omega = 0$ のときの f によって求められる。たとえば、(8) 式の場合には次のようになる。

$$f_{\theta=\max} = \frac{1}{\pi T_1 \sqrt{2(1 + n_1)}} \quad (10)$$

図 7 パルス幅に対する最大位相推移点の周波数
Maximum phase shift frequency of smearing distortions.

(10) 式によって、 $n_1=4$ のときの各種の波形幅に対する位相推移の最大点の周波数の関係の様相は図 7 に示す。

3. 標準スミア発生器

スミアひずみを発生し、また逆に補正する回路は、図 2 の基本回路によって与えられる。このため、スミアひずみと画質との関連を求め、また、スミアひずみを逆特性によって補正するために、図 8 に示すよう

な標準スミアひずみ発生回路を作製した。

この回路によって与えられるひずみの中には、基準となるスミアレベルとタイムが発生できるので、スミアによる画質劣化の評価のために、画像に定量的なスミアひずみを与えることができ、逆に、画像のスミアひずみを補正することもできる。

この回路では容量 C_1 、 C_2 を逆方向に可変できるように連動することによって、いずれの方向のスミアレベルをも可変でき、また、抵抗 R を切替えることによって、

図 8 スミアひずみ発生回路
Circuit diagram of smearing distortion generator.

任意のスミアタイムを得ることができる。

4. スミアひずみの画質評価

定量的に測定されたスミアひずみの要素と、このときひずみ量が与えられた画像の画質との関連を知る必要がある。

この目的のために、前述のスミアひずみの要素の組合せに従って正確にスミアひずみを発生する、標準スミア発生器を製作し、これによってすべての場合におけるスミアを画像に与え、これに従って画質評価を行なった。また評価には、スミアひずみを評価するに適当と思われる写真3のような人物の写真をカメラで撮像したものを利用した。

すなわち、この画像の走査によって発生する顕著な波形は、だいたい $1\mu\text{s}$ から $30\mu\text{s}$ の幅と思われるので、この画像の評価に適当なスミアタイムを、1, 3, 5, 10, 15 μs を与えるように選定し、また、スミアレベルは 5, 10, 15, 20, 25, 30% のひずみを与えるようにした。

上記の2種のひずみの組合せに対するスミアひずみは、30種のひずみ量が得られることになる。このときの画質劣化の評価基準は表1に示す評価区分に従った。また、この評価には技術者5人と、非技術者として、主として学生などで構成した、延べ人員8人による評価者をもって行なった。

評価に当たっては、スミアタイムとレベルの組合せと、評価の順序は不同に選択し、かつ、毎回の評価の前後に

表1 スミア画質に用いた評価基準

The scales for smearing picture viewing test.

評価	画 質	評価	画 質
5	スミアが認められない	2	かなり気になる
4	認められるが気にならない	1	非常に悪い
3	気になる

写真3 評価に用いた画像

Monitoring picture of the viewing test.

は同一のモニター上で正常画像との比較を行なった。

この30種のスミアひずみに対する両者の評価結果のなかで、その一部を示すならば、図9～図12のようなものである。

いま、この評価結果を集成したものについて、スミアレベルをパラメーターとして、スミアタイムの変化に対する評価値を、技術者と非技術者について、それぞれ相加平均を求め、図示したものが図13である。

この技術者と非技術者の評価において、両者は総体的に、だいたい一致している結果が得られた。ただ幾分、スミアレベルが小さい範囲において、非技術者の評価値のほうが低くなっているのは、各人の評価値に不ぞろいが目立っている結果と思われる。

図9 技術者の評価試験

Viewing tests of smearing picture by technicians.

図 10 非技術者の評価試験

Viewing tests of smearing pictures by non-technicians.

図 11 技術者の評価試験

Viewing tests of smearing pictures by technicians.

図 12 非技術者の評価試験

Viewing tests of smearing pictures by non-technicians.

図 13 技術者と非技術者のスミア評価結果

Viewing tests of smearing pictures by technicians and nontechnicians.

両者の評価結果から、スミアレベル・タイムのいずれについても、その増加とともに評価値が低下することは当然であるが、この傾向は技術者のほうが幾分顕著のようである。

いま、評価値 4 以上は画質障害がないものとすれば、スミアレベルが 5% 以下では、スミアタイムの大小のいかにかわらず、画質の障害にならないことを示している。スミアレベルが 10% では、スミアタイム約 4 μ s 以上の場合に障害となることになる。また、スミアレベルが 15% 以上のときには、スミアタイム 1 μ s 以下のときでも障害となることが推測できる。

さらに、スミアひずみが画質上の障害とならない許容値を明確に求めるために、評価結果 (図 13) のスミアレベルの小さいときの範囲を、スミアタイムをパラメータ

図 14 スミアレベルの許容値
Tolerable limit of smear level.

ーとして求めると、図 14 のようになる。

前述のように、いま、表 1 の評価区分において、評価値 4 以上は画質障害がないものとすれば、實際上、スミアタイムの割合に大きい 10 μ s のときでも、図 14 の斜線のスミアレベルの範囲では画質評価 4 が保持できるので、画質障害の許容範囲と考えられる。

このように、延べ約 120 回の評価では、ほぼ正確な平均結果が得られたと思われる。この結果よりすれば技術者、非技術者とも、スミアレベル約 8% 以下では画質に問題ないスミアレベルの評価値と考えられ、約 15% 以上では画質の劣化が著しく増加する結果が得られた。

5. 分布定数回路におけるスミアひずみとその補償

画像信号が線路を伝搬するときには、上述の波形ひずみと異なったひずみを生じる。ことに、伝送線路が比較的長いときや、継続的に線路が累加されるときには、伝送波形のなかに、高周波ひずみとともに、割合スミアレベルの大きいスミアひずみを生じ、上記の場合と同様に画質を低下させることが著しい。ゆえに、線路の伝搬距離に対するひずみ波形からスミアひずみ量を求め、画質の劣化や補正量を知る必要がある。

いま線路において、伝搬定数を $\dot{\gamma}$ とすると、入力電圧 E_{in} と、出力電圧 E_{out} の間には次の関係がある。

$$E_{out} = E_{in} e^{-\dot{\gamma} x} \quad (11)$$

ただし、

$$\dot{\gamma} = \sqrt{(R_e + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

$$\mathcal{L}^{-1} E_{out} e^{-\dot{\gamma} x} = A(t) \quad \text{とすれば、}$$

$$A(t) = E_0 e^{(-1/8)(R_0/Z_0)x} \left[1 - \phi \left(\frac{m(R_0/Z_0)x}{2\sqrt{t}} \right) \right] \quad (12)$$

$\phi[]$ は Gauss の誤差積分

x は伝送距離 $R_0 = 23.3 \Omega/\text{km}$ (RG-11/U)

$Z_0 = 75 \Omega$, $m = \sqrt{4\pi a^2/\rho} = 0.587 \times 10^{-2}$ (RG-11/U)

として、(12)式を用いて同軸ケーブル RG-11/U (7C-2 V) について計算した結果は図 15 に示す。この結果よりすれば、同軸ケーブルの場合には、スミアタイムは実用範囲ではあまり大でないが、これに比較して、スミアレベルの増加が著しいので、画質の低下もこれらに起因することになる。

スミアひずみに対するこの両種のひずみ量の増加を、同軸ケーブル RG-11/U の場合、その線路長に対して、図 15 より求めたものが図 16 である。同軸ケーブルの補償は伝送線路の長さに応じて、その波形ひずみについて正確な補償が必要となる。この補償のためには、同軸ケーブルの高周波の周波数ひずみのほかに、スミアひず

図 15 同軸ビデオケーブルの伝送波形 (RG-11/U)
Waveform distortions on video coaxial transmission line.
(RG-11/U)

図 16 同軸ケーブル (RG-11/U) のスミアひずみ量
Smearing distortion of coaxial cable. (RG-11/U)

みに対する位相補償をも可能とする位相補償回路をもつものでなくてはならず、また、同軸ケーブルの長さに応じて、可変補償するものであることが必要である。このためには、図 17 に示す多分岐路の補償器が同軸ケーブルの補償器として有効になる。

同図の補償器は最も少ない分岐路の例であるが、この場合でも充分、同軸ケーブルの高周波特性補償とスミア補償を行なうことができる。

写真 4 は入力波形であり、写真 5 は 300m の同軸ケーブル (RG-11/U) のスミアひずみ波形であり、写真 6 は

図 17 同軸ケーブル補償回路
Circuit diagram of video cable compensator.

写真 4 入力波形 (0.2 μs/cm)
Input signal. (0.2 μs/cm)

写真 5 同軸ケーブル出力波形 (RG-11/U, 300 m)
Output signal. (RG-11/U, 300 m)

写真 6 同軸ケーブル補償波形 (RG-11/U, 300 m)
Output signal. (RG-11/U, 300 m)

図 17 の同軸ケーブル補償器を用いて補正した波形である。

6. む す び

集中定数回路におけるスミアひずみの場合について、周波数ひずみ、位相ひずみに起因するスミアひずみの量と画質との関係をそれぞれ比較することができたが、この場合のスミアひずみは、中域における特性を等化し、波形的にも完全な補正効果が容易に得られ、画質向上に有効である。一方、同軸ケーブルにおけるような分布定数回路では、スミアひずみは高周波ひずみと混在するので、前述のように、スミア補正の効果を用いて初めて効果がある。

これらについて、計算値と実験値の間にも正確な合致が得られ、その相互関係を明確にすることができたように思われる。

終りに、この研究に種々提言をいただいた民放連伝送専門部会の方々、ならびに、画質評価の労をいただいた方々に厚くお礼申し上げる。

(昭和 43 年 8 月 30 日受付)

【参 考 文 献】

- 1) 極波：テレビジョンの画質とその評価、テレビ誌，19，10(1965) 676
- 2) 印東：テレビジョン画質の主観的評価に関する方法的検討，研究実用化報告，11，12 (1962)

- 3) 池田：映像補償回路，テレビ誌，17，3 (1963)
 4) 池田：伝送線路における波形の伝送特性，テレビ誌，16，9 (1962)
 5) 池田：スミアひずみと画質，民放連伝送専門部会資料，技伝 67-11 (1967)，テレビ学会伝送研資，3-1 号 (1968)

〈付 録〉

(1) (2) 式の誘導

(1) 式より，

$$A(t) = E_0 \left\{ \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \left(\frac{R_2 T_1}{R_1 T_2 + R_2 T_1} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \times \varepsilon - \{(R_1 + R_2)/(R_1 T_2 + R_2 T_1)\} t \right\}$$

(2) (5) 式の誘導

$$\begin{aligned} \frac{\dot{e}_{out}}{\dot{e}_{in}} &= \frac{R_2(T_1 j\omega + 1)}{(R_1 T_2 + R_2 T_1) j\omega + (R_1 + R_2)} \\ &= \frac{j\omega T_1 + 1}{j\omega(T_1 + T_2) + 2} \\ (\because R_1 = R_2 = R) \end{aligned}$$

(3) (12) 式の誘導

この式の誘導と計算結果は，参考文献 4) の池田の論

文にて示されている。

付・表 1 CCIR Doc. XI/140, 1966 (Japan) の画質評価の表

QUALITY	IMPAIRMENT
5 Excellent	5 imperceptible
4 Good	4 perceptible but not annoying, tolerable for high quality transmission
3 Fair	3 somewhat annoying, intolerable for high quality transmission
2 Bad	2 severely annoying, intolerable even for general service
1 Very bad	1 picture information undetectable

The four thresholds for the categories are:

- A: Limit of perception of impairment
 B: Tolerable limit I (to be used for the design of systems)
 C: Tolerable limit II (to be used for general service)
 D: Limit of detection of picture information

付・表 2 現用されている画質の評価区分の例

評 価 区 分			
5	妨害が認められない	2	じゃまになる
4	認められるが気にならない	1	画にならない
3	気になるがじゃまにならない		

昭和 44 年度テレビジョン学会編集委員会の構成

編集長	宇都宮 敏 男 東 大	委員	長谷川 伸 電通大	委員	北 靖 洋 日 立
編集理事	遠 藤 敬 二 N H K	"	林 義 昭 電電公社	"	塩 谷 雄 一 東京放送
"	青 木 昌 治 東 大	"	藤 尾 孝 N H K	"	嶋 忠 雄 日 電
論文部門委員会		"	松 村 純 フジテレビ	"	鈴 木 弘 史 コロムビア
幹 事	加 納 顕 一 日 電	"	村 田 重 元 N H K	"	高 木 幹 夫 東 大
"	稲 津 稔 N H K	"	室 谷 正 芳 電電公社	"	立 野 敏 郵 政 省
委員	王 丸 謙 治 N H K	"	柳 沢 卓 司 東 芝	"	広 田 昭 ビクター
"	川 村 俊 明 芝 電	"	吉 田 三 樹 東京12ch	"	山 本 平 一 電電公社
"	倉 田 是 千 葉 大	"	渡 部 勲 N H K	ニュース・特許部門委員会	
"	栗 田 正 一 慶 大	"	渡 辺 苞	幹 事	芦 川 幹 雄 日 立
"	黒 川 信 次 日 電		富士フィルム	"	宮 崎 栄 一 松下東研
"	佐々木 哲 夫 電機大	地方委員	池 田 俊 夫 東 北 大	委員	大 滝 泰 郎 郵 政 省
"	坂 田 晴 夫 N H K	"	稲 田 謙 三 三洋電機	"	金 子 正 広 東京放送
"	島 田 聰 ソ ニ ー	"	神 瀬 昭 読売テレビ	"	柴 崎 英 輔 民 放 連
"	高 橋 秀 N H K	"	寺 田 正 純 阪 大	"	関 邦 秀 国際電電
"	竹 下 彊 一	"	羽 鳥 孝 三 北 大	"	古 川 英 夫 日本テレビ
	NET テレビ	"	山 田 祥 二 静 大	"	森 泉 日出男
"	中 沢 康 克 早 大	海外文献部門委員会			NET テレビ
"	中 村 康 平 日 大	幹 事	斎 藤 利 也 N H K	"	山 根 三 郎 N H K
"	成 田 昭 日 立	"	深 津 忠 泰 ゼネラル		
"	二 宮 輝 輝 N H K	委員	菊 川 正 一 東 芝		