論文

蛍光灯照明下のビジコンのフリッカー雑音

株式会社日立製作所 中央研究所

芦川 幹雄・竹本 一八男

蛍光灯のちらつきに起因してテレビ画面に現われるフリッカー雑音の理論的解析および実験を行った。その結果ビジコンの時定数とフリッカー雑音の関係、およびそれに及ぼす点灯周波数、フレーム周波数の影響を定量的に把握することに成功した。

1. ま え が き

最近のCATV、テレビ電話などの発展により、テレビカメラが、蛍光灯照明が普及している一般家庭あるいは事務所で使用される機会が増してきている。蛍光灯は一般に交流点灯されているので、その輝度は電源の2倍の周波数で変動している。そのため蛍光灯照明下で撮影すると、テレビ画面にちらつきが生ずる。これがフリッカー雑音である。この言葉は一般にはもっと広い意味で使用されているが、本稿では上記した現象に限って用いることにする。

筆者らはテレビ電話用に開発されたシリコンビジコン¹⁾の研究に従事していた際に、フリッカー雑音の問題の重要性に気がついた。従来この種の問題を定量的に扱った報告²⁾³⁾はきわめて少なく、そのため以下に述べる実験および解析を撮像管（ここではビジコンに限定）の設計資料を得ることを目的に行った。

2. 出力電流の解析

2.1 蛍光灯の発光強度の変動

通常の交流点灯方式では、蛍光灯は電圧の正負いずれのサイクルでも発光するので、その発光強度は電源の2倍の周波数で変化する。また電源電圧がゼロの瞬間でも蛍光体の残光効果により、発光強度がゼロになることはない。その変動の様子は図1にモデル的に示したようになり、発光強度 $I(t)$ は次式で近似的に表現される。

$$I(t) = B + A|\sin 2\pi f t| \quad (1)$$

上式で A , B はおのおの発光強度の変動部分の最大振幅および定常部分の振幅、 f は電源周波数、 t は時間である。

図1 蛍光灯の発光強度の変化

Variation of light intensity of fluorescent lamp.

次に蛍光灯のちらつき度 C を次式で定義する。

$$C = \frac{I(t)_{\max} - I(t)_{\min}}{I(t)_{\max} + I(t)_{\min}} = \frac{A}{A + 2B} \quad (2)$$

ただし添字 $\max$, $\min$ はちらつきの1周期内での最大および最小値を示す。

(2)式を(1)式に代入すると、

$$I(t) = A \left(\frac{1-C}{2C} + |\sin 2\pi f t| \right) \quad (3)$$

となり、以下これを基本式として用いる。

2.2 出力電流の変化

(3)式で表わされる光がビジコンに入射する場合を考える。ビジコンのターゲット上の任意の画素では、電子ビームが走査していない期間（フレーム期間）内に画素中で吸収された光が電荷の形に変換されて、表面電荷として蓄積保持される。次の走査によりこの蓄積電荷が放電されて出力電流となる。このようなビジコンの動作機構を考慮すると、以下のようにして出力電流を計算することができる。その際に次の2項を仮定する。

(i) 入射光が表面電荷に変換される過程での時間的

"Flicker Noise of Vidicon under the Illumination of Fluorescent Lamp" by Mikio Ashikawa and Iwao Takemoto (Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tokyo)

遅れはない。

(ii) 入射光量と表面電荷量は比例する。

この仮定は光導電性残像が大きく、かつ光電変換特性のガンマ値が1よりも小さい Sb_2S_3 ビジコン等では粗い近似となるが、シリコンビジコンあるいはプランビコンに対しては妥当なものであろう。

まず、ある時刻に走査が始まり、それから数えて $n-1$ 回目の走査が終わった直後のターゲット上の1画素を考える。このときに画素表面に残留している電荷量を $Q_{R(n-1)}$ とすると、次のフレーム期間が終る直前の表面電荷量 Q_n は(3)式の $I(t)$ の時間積分に対応する電荷量と $Q_{R(n-1)}$ の和で与えられる。

$$Q_n = Q_{R(n-1)} + \eta A \int_{(n-1)/f_R}^{n/f_R} \left(\frac{1-C}{2C} + |\sin 2\pi f t| \right) dt \quad (4)$$

上式で f_R はフレーム周波数、 η は光電変換の効率である。

次の n 回目の走査で Q_n は放電されるが、放電の時定数を τ_B 、放電された電荷量を Q_{dn} とすると、

$$Q_{dn} = Q_n (1 - e^{-\Delta T / \tau_B}) \quad (5)$$

が成立する。 ΔT は1画素当たりの走査ビームの滞在時間である。上式は表面電荷の放電過程を表わす簡単な近似式⁷⁾として従来から知られているものである。また τ_B は画素容量と電子ビームの等価抵抗の積で表わされる。

n 回目の走査の際の放電電流の単純時間平均値で出力電流 i_{sn} を定義すると、

$$i_{sn} = \frac{1}{\Delta T} Q_{dn} \quad (6)$$

となり、この走査で取り残される電荷量 Q'_{Rn} は、

$$Q'_{Rn} = Q_n - Q_{dn} = Q_n e^{-\Delta T / \tau_B} \quad (7)$$

で与えられる。

2.3 出力電流の計算

i_{sn} は(4)~(7)式を cyclic に解くことにより求まるが、その際に初期条件の与え方について若干の考察が必要になる。まず(4)式を解くには $Q_{R(n-1)}$ の値が必要になる。ここでは1回目の走査の前の走査(0回目)直後の電荷量 $Q_{R0}=0$ と仮定して逐次計算を進め、走査回数 n の大きな値で i_{sn} が定常状態を示すことを確認して、その値を i_{sn} として用いる方法をとることにした。これは具体的には、0回目の走査以前ではビジコンへの光の入射がなく、その直後から光が入射することを意味している。

なお今回の解析では i_{sn} の絶対値ではなく、その相対変化量を求めることが目的であるので、上記の初期条件の設定により、(4)式で $\eta=1$ 、 $A=1$ として式の一般性を失うことなくしに計算を簡略化することができる。

図2 点灯電圧とフレーム走査の位相関係

Phase relationship between lamp voltage and frame scan.

$A=1$ としても、ちらつき度 C はやはり(2)式からわかるように相対値であり、定常値 B を変えることにより C を変化させることができるので、 B の意味は定義とは異なってくるが、数式的には一般性を失うことはない。

次に検討が必要なのは、螢光灯の点灯電圧といま考えている画素のフレーム走査*との位相関係である。図2に示したように、1回目の走査の初めを時間の原点にとり、螢光灯の発光強度の最小値が現われる時間を $1/2f - D$ として、この位相定数 D を用いて両者の位相関係を表わすことにする。したがって $D=0$ の場合、フレーム走査と点灯電圧の位相は $t=0$ においては一致していることになる。(4)式はこの状態に対応するものである。 D の値としては $0 \sim 1/2f$ の範囲をとれば充分であり、(4)式は D を用いて次のように一般化される。

$$Q_n = Q_{R(n-1)} + \eta A \int_{(n-1)/f_R}^{n/f_R} \left\{ \frac{1-C}{2C} + |\sin 2\pi f(t+D)| \right\} dt \quad (4)'$$

以上の議論を基にして、 $Q_{R0}=0$ の初期条件で $D=0$ の場合について、(4)'(5)(6)(7)式を cyclic に解いて i_{sn} を求める。その際 ΔT の値は、ターゲット上の画素数を 500×500 個として、 $\Delta T = 1/(500 \times 500 f_R)$ (sec) を用いる。

図3は τ_B をパラメーターにして i_{sn} を計算機により数値計算した例である。 τ_B としては 5 ms 、 100 ms の2例のみを示してあるが、これは通常のビジコンの τ_B が 30 ms 程度であることを考慮して、その上下限值を選んだものである。

走査回数 n が大きくなると、 τ_B に関係なく i_{sn} は平均的に一定な値を示すようになる。これは入射光量の条件が変わっていないことからくる当然の結果である。 i_{sn} が定常的な周期性変化を示すまでの走査回数 n は、 τ_B が小さいほど少なくなるが、図では $\tau_B = 5 \text{ ms}$ では

* ここではフレーム走査の始まりのある画素が走査された直後と考えるので、一般的なフレーム走査の意味とは若干異なっている。

図3 出力電流の走査回数による変化

Output current variation with number of scanning times.

$n=20$ 以上, $\tau_B=100$ ms では $n=30$ 以上で定常状態に達していることがわかる。この結果からさらに安全度を見込んで、次章以下では $n=50$ 以上で i_{sn} が定常的变化を示すものとして取り扱う。

3. フリッカー雑音の解析

前章の解析結果を基にして、本章ではフリッカー雑音の解析を行う。フリッカー雑音ではその周波数 f_F と絶対値の2量が問題になるが、雑音の大きさ F を i_{sn} の1周期の変化内での最大、最小値を用いて次式で定義する。

$$F = \frac{i_{sn \max} - i_{sn \min}}{i_{sn \max} + i_{sn \min}} \times 100 (\%) \quad (8)$$

3.1 周波数

蛍光灯の発光強度の変動は $1/2f$, フレーム走査は $1/f_R$ の周期でくり返されるので, k, l をおのおの正の整数とすると,

$$k/2f = l/f_R \quad (9)$$

が成立する k, l の最小値の組合せを単位にして、両者の位相関係の同一状態が周期的に出現する。これは i_{sn} の変化の周期でもあるので、フリッカー雑音の周期を意味することになる。

たとえば $f=50$ Hz, $f_R=30$ Hz の場合, $k/l=10/3$ となって, $l=3$ すなわちフレーム走査の3周期分がフリッカー雑音の周期 $1/f_F$ となる。したがって $f_F=10$ Hz が求まる。 f および f_R としては通常おのおの 50, 60 および 25, 30 Hz が予想されるので、その各組合せについて f_F を求めた結果が表1である。なお表中で f_R の値として 50, 60 Hz が併記してあるのは次の理由による。

表1 フリッカー雑音の周波数 f_F

Flicker noise frequency f_F . (単位: Hz)

フレーム周波数 f_R	25	30	50	60
電源周波数 f				
50	25	10	50	20
60	5	30	10	60

すなわち、ビジコンの走査ビームのスポット径は通常水平走査線間隔よりも大きいので、ターゲット上の画素に対しての実効的なフレーム期間は1対1のインタレース方式ではフィールド期間に相当したものになる。フィールド期間はフレーム期間の半分であるので、 $2f_R$ の値が解析上必要になってくる。また表1から f_R が f の約数になっているときには、 f_F と f_R が一致することがわかる。この場合、特に $2f_R$ の実効フレーム周波数を考慮すると、 f_F は 50 Hz 以上になり、視覚上フリッカー雑音が感知されにくくなるので、以下の解析では対象として取り上げないことにする。

図4(a)~(d)は i_{sn} を f と f_R の各組合せについて計算した結果である。条件により波形は異なるが、 i_{sn} は周期的な変化を示している。横軸の走査回数1回は時間としては $1/f_R$ になるので、図(a)~(d)から f_F として 10, 20, 5, 10 Hz が求まり、この値は表1と一致している。

以上でフリッカー雑音の周波数を求めることができたが、図(d)の場合、1つの周期が2つの山で構成されて

図4 フリッカー雑音の周期
Periodicity of flicker noise.

 (a) $f_R = 25 \text{ Hz}$, $f = 60 \text{ Hz}$

 (b) $f_R = 50 \text{ Hz}$, $f = 60 \text{ Hz}$

 (c) $f_R = 30 \text{ Hz}$, $f = 50 \text{ Hz}$

 (d) $f_R = 60 \text{ Hz}$, $f = 50 \text{ Hz}$

 図 5 フリッカー雑音の大きさ
Magnitude of flicker noise.

おり、視覚的には f_F が 10 Hz ではなく 20 Hz として感覚されることが予想される。また他の場合でも波形の差によっては、フリッカー雑音が単一の周波数成分をもつとすると、実際の人間の感覚とは矛盾する結果が出てくる可能性が残っている。

3.2 フリッカー雑音の大きさ

図 5 (a)~(d) は、 $D=0$ の場合に、フリッカー雑音の大きさ F を計算した結果である。図から τ_B が大きいほど F が小さくなり、その減少の割合は $\tau_B > 1 \times 10^{-2} \text{ sec}$ では少なくなる傾向が認められる。また、ちらつき度 C が増すと、当然ではあるが F は増大する。また各図を比較すると、 f の値に関係なく f_R が高いほど、すなわち (a) (b), (c), (d) の順序で F の値が大きくなっている。これは f_R が高くなると、(4)' 式の積分時間が短く

なるために i_{sn} の変化が大きくなることによっている。

3.3 位相定数の影響

図 6 は位相定数 D をパラメーターにして、 i_{sn} と走査回数 n の関係を計算した結果である。図は i_{sn} の変化の様子を例示するためのものである。図では D としては 3 点の場合のみを示してある。本図からもわかるように、同一の走査回数でも i_{sn} の値は D によって異なる。また i_{sn} の変化の周期は変わらないが、その波形および詳細に見ると最大、最小値は変化している。

図 7 は D と F の関係を計算した例である。 τ_B の値によって程度は異なるが、 F は D により $\pm 5 \sim 10\%$ の範囲でその値が変動する。 F の変動幅は本稿では省略した他の条件での計算結果を含めても、最大 $\pm 10\%$ 程度である。したがって、実用的にはテレビカメラは電源非同期

図 6 位相定数と出力電流

Output current versus phase constant.

図 7 位相定数とフリッカー雑音の大きさ

Flicker noise versus phase constant.

方式で運用されることが多いことを考慮すると、蛍光灯の点灯電圧とフレーム走査の間の位相関係は一般にはランダムである。そのため本節の検討から、 D の影響により図5の F の各曲線はその上下に10%程度の幅をもつ帯として扱うのが妥当と考える。

3.4 フリッカー雑音の出現状態

前節までに行った解析は、すべてターゲット上の1画素を対象にしたものである。本節では実際のテレビ画面上でフリッカー雑音がどのような状態で観察されるかについて考察を加える。

ビジコンのターゲット上に1画素の大きさに見合う程度のスポット光が入射した場合には、フリッカー雑音は

図 8 同一走査回数での位相定数と出力電流

(条件 $n=52$, $C=0.8$, $\tau_B=1 \times 10^{-2}\text{sec}$)

Relation between phase constant and output current calculated at the same number of scanning.

表1に示した周波数でテレビ画面上の小部分の輝度変動する現象として観測される。

しかし、ターゲット全面に均一光が入射した場合には事情が異なってくる。すなわち位相定数 D は、2.3節で述べたように、ターゲット上の1画素に関して定めたものである。したがって、ターゲットが時間順次的に走査されることを考えると、各画素ごとに D が異なってくることになる。そのため各画素のターゲット上での位置と D を相対的にではあるが関連づけることが可能になる。

いま、1フレーム期間で構成された画面を考えると、画素間での最大位相差は $1/f_R$ となる。インターレース方式では事情は若干複雑になるが、各画素を走査の順にしたがって1次元状に配列すると、その軸上の位値を D で表わすことができる。 D は $1/2f$ ごとに同じ値をとるので、 $1/f_R \leq 1/2f$ ならば D と軸上の位置は1対1に対応し、 $1/f_R > 1/2f$ の場合は、複数の対応をすることになる。図8(a)~(d)は、同一走査回数での i_{sn} と D の関係をプロットしたものである。

上記議論から横軸の D は画面上の位置と解釈することができるので、 i_{sn} が位置によって周期的に変化することが図から示される。同図(b)(d)での f_R の値は、それぞれ(a),(c)の2倍をとってある。 i_{sn} の変化の周期は(a),(c)では(b),(d)の1/2になっている。

同図(c)を例にとってフリッカー雑音が観測される状態を考えてみる。 $D=0$ に対応する画面上の位置は、一般的にはフレーム期間ごとに異なってくるので、 D 軸を位置としてとらえると、 i_{sn} の波形は画面ごとに左右へ

移動することになる。 i_{sn} の山は、モノクロームの画面上では白く観測されるので、図から3ないし4本の白い線が画面に現われることになる。

実際には D 軸は2次的に配列しなおされるので、3～4本の白線は、画面上斜めの線として観測される。さらにインターレースを考慮すると、白線相互の間隔は必ずしも等しくなく、また図の i_{sn} の波形からも予想されるように、線ではなく幅の広い白縞が出現することになる。

上記例で示したように、均一光入射の場合には、フリッカー雑音は、 f 、 f_R の組合せで決まる数本の白い縞として観測される。さらに画面上の各画素の輝度は、スポット光入射の場合と同様に f_F の周波数で変動し、またすでに述べたように各画面ごとで D と位置の関係が変化するので、白い縞は決して固定したものではなく、絶えず移動することになる。

実際のテレビ画面では、種々な光の入射状態があり事情はさらに複雑化するが、上記の検討を部分ごとに適用することにより、フリッカー雑音の出現状態を予測することができよう。

4. 実験結果と検討

4.1 実験方法

実験管としては1インチ型のシリコンターゲットビジコンを用いた。シリコン基板結晶の比抵抗の異なるものを使用して、残像値の異なる数本の管を試作した。

測定に用いたテレビカメラ系は、電源非同期方式でフレーム周波数30 Hz、インターレース採用の標準型のものである。光源は市販の白色蛍光灯を50 Hzの電源で点灯した。したがって実験条件は、 $f=50$ Hz、 $f_R=30$ Hzに対応している。

ビジコンの出力電流は、ラインセレクト法により直接オシロスコープ上で観測した。

4.2 実験結果

写真1に示したのは、蛍光灯の発光強度の時間変化を直線性をあらかじめ確かめてある光ダイオードを用いて観測したオシロ写真である。

写真1 蛍光灯の発光強度の変化

Observed light intensity variation of fluorescent lamp.

写真2 ビジコンの出力電流の変化
($f_R=30$ Hz、 $f=50$ Hzでの実測)

Observed output current variation of vidicon.

その波形は図1のモデルのように整然とした形ではないので、(2)式で定義した蛍光灯のちらつき度 C を写真から求めると0.5～0.6の範囲の値になる。

次に写真2に示したのは、上記の蛍光灯を直接撮影したときのビジコンの出力電流の時間変化の観測写真である。出力電流パルスの上端のわずかな変化が、フリッカー雑音に対応している。各パルスの間隔は1フィールド期間(1/60 sec)に相当するので、写真からパルス3本分を1周期とする出力電流の周期的変化が認められ、その周波数は20 Hzとなる。この数値を表1と比較すると、 $f=50$ Hz、 $f_R=30$ Hzでは10 Hzであり、両者は一致していない。しかし3.1節で述べた実効フレーム周波数を考えると、本実験では $f_R=60$ Hzとなり、この場合は表の数値と一致してくる。

図9(a)は6本の実験管の残像および立上り時間(光入射後3フィールド目での信号値の定常値に対する比)を測定した結果である。両者はほぼ比例関係を示しているので、この結果から次節では時定数 τ_B を推定することにする。図(b)は写真2と同様な測定を各管に対して行って、(9)式で定義したフリッカー雑音の大きさ F を求め、各管の残像値に対してプロットした結果である。 F の値は残像が大きくなるほど減少している。

さらに写真にとるのは困難であったが、蛍光灯で白色パターンを照明して画面を観測したところ、動く3本前後の白い縞を認めることができた。

4.3 実験結果の検討

本節ではフリッカー雑音の大きさを中心にして、本章の実験結果と3章の解析結果を比較検討する。解析結果は実験条件と合わせるために、図5(b)の $f=50$ Hz、 $f_R=60$ Hz(実効フレーム周波数)の場合をとり上げる。

実験管の残像および立上りが指数関数型であると仮定して、それぞれの実測値から時定数 τ_B を求め、フリッカー雑音の大きさの測定値をプロットしたのが図10である。また図5(b)の計算結果をも併示してある。図か

(a) 実験管の残像と立上り

(b) 残像とフリッカ雑音の大きさ

図 9 フリッカー雑音の大きさの測定結果

Measured data on the magnitude of flicker noise.

(a) Decay time vs. rise time of vidicon.

(b) Flicker noise vs. decay time.

らわかるように、実測値に見合う $C=0.6$ の理論曲線よりも約 30% 実験値の方が大きい値を示している。定量的な不一致の原因としては、解析面では蛍光灯の発光強度の表現式の近似性、ターゲットの動作を表わす簡単な

図 10 フリッカー雑音の大きさと時定数の関係

Measured relation between flicker noise and time constant of vidicon.

近似式〔(5)式〕の妥当性等があげられる。しかし、この程度の不一致はビジコンの定量解析では常につきまとう問題であり、むしろ図 10 の結果は 2, 3 章の解析の妥当性を裏づけしているものとも考えられる。

次に、テレビ方式とフリッカー雑音の関係について若干の考察を行う。

3.2 節で述べたように、フリッカー雑音の大きさはフレーム周波数 f_R が高いほど大きくなるので、一般的には f_R を小さく選ぶ方が得である。またテレビの標準方式では、すでに何度もふれたように f_R は実効的には 2 倍の周波数になるが、テレビ電話等で走査線数 275 本のインターレース方式が採用になれば、走査線間隔が広がり走査電子ビームのスポット径の影響が小さくなるので、 f_R の値そのものがフリッカー雑音を支配することになる。

この場合には、後者の方式の方がフリッカー雑音に関しては有利になるはずである。具体例をあげてみると、図 5 (c) (d) から、 $f=50 \text{ Hz}$, $C=0.6$, $\tau_B=10 \text{ ms}$ の場合、 $f_R=60 \text{ Hz}$ ではフリッカー雑音の大きさは 4.2%, $f_R=30 \text{ Hz}$ では 2.9% であり、大きな差が生ずることがわかるであろう。もちろんこの場合、フリッカー雑音の周波数が表 1 から前者では 20 Hz、後者では 10 Hz と異なっているので、視覚的には後者の方が目立ちやすくなるため、単に大きさだけで議論をすることには問題が残っている。

次にテレビ方式が決まっている場合、それに適したビジコンの残像値の求め方を例をあげて説明する。一般に市販されている蛍光灯のちらつき度 C は 0.2~0.8 と大きくばらついている。代表として $C=0.6$ をとり、図 5 (d) の $f=50 \text{ Hz}$, $f_R=60 \text{ Hz}$ 方式を例にする。フリッカー雑音の大きさを 1% 以下にするためには、時定数 τ_B は 45 ms 以上が必要である。残像が指数関数的であれば、これは 32% 以上の残像が必要なことを意味する。この残像値では、もちろん運動物体の撮像上問題が生ずるので、実際にはフリッカー雑音の許容度を若干増すという設計上の妥協が必要になってくるであろう。

5. む す び

蛍光灯の発光強度の変動に起因するビジコンの出力電流の変化を表わす理論式を導き、それに基づいてフリッカー雑音の大きさ、周波数とビジコンのターゲットの放電時定数の関係およびそれに及ぼす点灯周波数、フレーム周波数の影響について解析を行った。

ついで限定条件の下ではあるが、蛍光灯を実際にビジコンで撮像して、残像とフリッカー雑音の大きさの関係を測定した。

テレビジョン

測定値と理論値との間には 30% 程度の定量的不一致はあるが、定性的傾向はよく一致しており、本報の解析法によりフリッカー雑音の面でのテレビ方式とビジコンの残像の関係を明確にすることができた。これにより、テレビ方式（電源周波数を含めて）が決まれば、それに適合したビジコンの残像値を指定することができる。

なお本解析ではフリッカー雑音をビジコンの出力電流の変化としてのみ取扱ってきたが、実際には映像増幅器あるいはブラウン管の非直線性、さらに観測者である人間の眼の感覚をも考慮に入れないと厳密な解析にはならないであろう。

本報告を終えるに当たり、終始御指導、御討論をいただいた日立戸塚工場 牛島(故人)、草間両主任技師に厚い感謝の意を表する。

(昭和 48 年 6 月 21 日受付, 昭和 48 年 9 月 5 日再受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) M. H. Crowell, et al.: BSTJ, 46 (1967) 491
- 2) 芦川ほか: テレビ学会電子装置研究委資料, No. 100(昭和 46. 10)
- 3) 久樹ほか: テレビ全大予, 13-5 (1972)
- 4) 西田: テレビ誌, 16 (1962) 82