2. 撮 像 管 の ノ イ ズ

東京芝浦電気株式会社 中央研究所 中 山 良 明
小田川 嘉一郎
長 谷 川 伸

イメージオルシコン、ビジコン、イメージ管を用いたテレビカメラ、フライングスポット装置などのノイズの理論、測定法、実験結果などにつき概説する。

1. イメージオルシコンのノイズ

イメージオルシコンは二次電子増倍部を内蔵しているので、増幅器のノイズは無視でき、それ自身のノイズだけが問題となる。このノイズに関して多くの理論式が導かれているが、まだ定説はない。ここでは、まず簡単な理論式をのべてから、厳密な取扱いを行なっている種々の理論式を検討し、つぎに最近進歩した測定法や実験結果についてのべる。

1.1 簡単な理論式

簡単のため入射光のない場合のノイズを考える。入射光がある場合もノイズにそれほど大きな違いはない。この場合、SN比は次式で表わされる。

$$(S/N)_1 = \frac{\text{ハイライトの出力信号電流尖頭値 } I_{S_1}}{\text{暗い部分の出力電流中にふくまれるノイズ電流(RMS値) } I_{N_1}}$$

ビームのノイズ ($\sqrt{i_n^2}$) はショットノイズのみとし、二次電子増倍部 (利得 μ) でのノイズの増加率¹⁾ を k (詳細は後述) とすると

$$(S/N)_1 = \frac{I_S}{I_N} = \frac{\mu i_s}{k \mu \sqrt{2e i_b F}} \propto \sqrt{i_s} \sqrt{m} \propto \sqrt{m C E_{ta}} \quad (1)$$

ただし i_s はターゲットにランジグする電流、 i_b はビーム電流、 $m = i_s/i_b$ はビーム変調度、 e は電子の電荷、 F は増幅系帯域幅、 C はターゲットの容量、 E_{ta} はターゲット電圧。第1図は E_{ta} を変化したときの m と SN比の実測結果で、(1)式とよく一致する²⁾。

1.2 厳密な理論式

ある光量が入射したときのノイズを考え、SN比としてはつぎの値をとる。

$$(S/N)_2 = \frac{\text{ある光量が入射したときの出力電流(尖頭値) } I_{S_2}}{I_{N_2} \text{ 中のノイズ電流 (RMS値) } I_{N_2}}$$

I_{N_2} にはつぎの諸因子が問題となる。入射光子のゆらぎ、

光電面の光電子放射のゆらぎ、光電子のコレクタ・メッシュを通過するさいのゆらぎ、ターゲットガラスからの二次電子放出比のゆらぎ、二次電子のメッシュにとられるときのゆらぎ (透過、反射、再分布)¹⁰⁾、ターゲットガラスの蓄積効果、ターゲットガラスの走査側での低速度電子の反射率³⁾ のゆらぎ、フィールドメッシュの効果、走査ビーム中のノイズの性質、走査ビーム内の初速度分散、二次電子増倍部でのノイズの増加など。

二次電子増倍部におけるノイズの増加率 k_m は小さいので (後述)、まず二次電子増倍部に入る前の状態の SN比を取扱う。

以上の諸項目に対する考え方の違いにより多くの説があり、それらの一部の比較もされている⁴⁾。ここでは比較に便利のように、つぎの2つの形式で表わす。

$$(S/N) = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F \cdot k_1}} = (S/N)_0 k_2 \quad (2)$$

$$\text{ただし } (S/N)_0 = \sqrt{T \cdot n_{pk}} = \sqrt{\frac{T i_{pk}}{2 e F}}$$

n_{pk} : 1 絵素あたり 1 フレーム時間内に光電面から出される光電子の数

i_{pk} : それを電流で表わしたもの

T : ターゲットメッシュの透過率

(2)式で、もし $k_1 > 1$ の場合は明るい方がノイズが多いことを示し、 $k_2 > 1$ の場合はターゲットに入るところ

第1図 イメージオルシコン(M7032)のターゲット電圧とSN比(実測値)

"Signal-to-Noise Ratio of Television Pickup Devices" by Yoshiaki Nakayama, Kaichiro Odagawa and Shin Hasegawa

の SN 比 $(S/N)_0$ よりも、出力の方が SN 比がよくなることを示す。

(1) Bedford の式⁵⁾ :

$$(S/N)_2 = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F [1 + (\eta_t - 1)m]}} \\ = (S/N)_0 \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{m} - 1\right) \frac{1}{\eta_t} + 1}}$$

ターゲットの利得を η_t とし、ターゲット部ではノイズは付加されないと考えている。 $k_1 > 1$, $k_2 < 1$ となる。

(2) A. A. Rotow の式⁶⁾ :

$$(S/N)_2 = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F \cdot \left(1 + \frac{2m}{\delta - 1}\right)}} \\ = (S/N)_0 \sqrt{m \frac{\delta - 1}{\delta - 1 + 2m}}$$

δ はターゲット面での二次電子放出比を示す。ターゲット面からの二次電子流のノイズが、光電子流のノイズと全く相関がないと考えている。 $k_1 > 1$ であり、 δ が大きいときは $k_2 > 1$ になり得る。

(3) Theile の式⁷⁾ :

$$(S/N)_2 = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F (m\alpha_0 + \alpha_1)}}$$

α_0 (≥ 1) はターゲット部の蓄積電荷のゆらぎ、 α_1 は走査機構のゆらぎに関する係数である。暗い場面では $m=0$, $\alpha_1=1$ になるはずで、 α_1 は m の関数と考えられるが、 α_0 , α_1 の内容は明らかにされていない。

(4) DeHaan の式⁸⁾ :

$$(S/N)_2 = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F \left\{ \frac{m}{\delta - 1} (\delta^2 + \delta + 1) + 1 \right\}}} \\ = (S/N)_0 \frac{\delta - 1}{\sqrt{\delta_2 + \delta + 1 + (\delta - 1) \frac{1}{m}}}$$

入射光のある場合、もどりビームは減少するが、ビーム中のノイズは減少しないとしている。また光電子流のノイズが二重に計算されている。 $k_1 > 1$, $k_2 < 1$ となる。

(5) B. H. Vine の式⁹⁾ :

$$(S/N)_2 = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F \left\{ \frac{m}{\delta - 1} (\delta^2 - \delta + 1) + 1 \right\}}} \\ = (S/N)_0 \frac{\delta - 1}{\sqrt{\delta^2 - \delta + 1 + (\delta - 1) \frac{1}{m}}}$$

ビーム中のノイズはへらずに、全部もどるとしている。なお第 1 ダイノードの二次電子放出比によるノイズの増加分をふくめた式を導いているが、それをふくめない場合を示した(Weimer¹⁰⁾参照)。 $k_1 > 1$, $k_2 < 1$ となる。

(6) Wuerffel & Webb の式¹¹⁾ :

$$(S/N)_2 = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F (1 - m)}} = (S/N)_0 \sqrt{\frac{m(\delta - 1)}{1 - m}}$$

ターゲットに蓄積されたノイズを走査ビームで読みとるときには 600 c/s くらいの帯域幅を考えればよいとし、したがってこれを無視して、もどりビーム中のノイズのみを考えている。 $k_1 < 1$ となり、明るい方がノイズは少ない。 δ 大では $k_2 > 1$ になり得る。

(7) 吉永の式¹²⁾ :

$$(S/N)_2 = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F \left\{ 1 - m + \frac{f}{F} \cdot m \cdot \frac{\delta^2 + \delta + 1}{\delta - 1} \alpha \right\}}} \\ = (S/N)_2 \frac{\sqrt{m(\delta - 1)}}{\sqrt{1 - m + \frac{f}{F} \cdot m \cdot \frac{\delta^2 + \delta + 1}{\delta - 1} \alpha}}$$

(6) と同様、映像増幅器の帯域幅 F と、走査とり出しの変換における帯域幅 f は異なると考えている。なお光電子流のノイズと、それがターゲットで増幅された値とを無相関として加え合せている。ただし α は有効走査係数 (≈ 0.78)。 $f \ll F$ では $k_1 < 1$, また δ 大では $k_2 > 1$ になり得る。

(8) John の式¹³⁾ :

$$(S/N)_2 = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F (m\delta + 1)}} = (S/N)_0 \sqrt{\frac{m(\delta - 1)}{m\delta + 1}}$$

走査ビーム中のノイズは全部もどると仮定し、ターゲット部の δ のバラツキによるノイズの付加分は加えてある。 $k_1 > 1$, $k_2 < 1$ となる。

(9) Ramberg の式¹⁴⁾ :

$$S/N = \frac{i_s}{\sqrt{2e i_b F \left[\left\{ (\delta - 1) + \frac{\delta}{\delta - 1} \right\} m + \left\{ \left(\frac{m}{1 - \delta'} \right)^2 \left(1 - \frac{2(1 - \cos x_c)}{x_c} \right)^2 - 2 \left(\frac{m}{1 - \delta'} \right) \left(1 - \frac{s_i x_c}{x_c} \right) + 1 \right\} \right]}}$$

分母の前の項はターゲットの部分のノイズで Vine の式と一致する。後の項はビームがターゲットにランジグするときの反射率 δ' を考慮し、矩形のビームとして計算したときのもどりのビーム中のノイズである。計算の結果、 k_1 は 1 よりも相当大きい値が示されている。

考 察

上の諸説の考え方の大きな相異点は、(1) ターゲットでのノイズの加え方、(2) それを走査読みとるさいの周波数帯域、(3) 走査ビーム中のノイズが全部もどりビームにふくまれるか、などである。

(1) については、光電変換特性が直線性を保つ範囲では van der Ziel の方法¹⁾ で厳密に計算すると、 $H = \delta + 1$ (ただし H は δ のゆらぎに関する係数) という仮定のもとでは、Vine の計算に一致する。しかし実際には $H = \delta + (1 \sim 3)$ である¹⁾。

実験結果では、入射光のある方がノイズが少なく (後

述), $k_1 > 1$ になる説はなんらかの修正が必要であろう。また $k_2 > 1$ になるものは, 入力も出力と同じ時間間隔をとっているにもかかわらず, 入力よりも SN 比のよい出力が得られることになり, ちょっと不思議である。

実験と合う理論を出すには, 光量による δ の変化¹⁵⁾, ターゲットメッシュでの電子の反射率¹⁶⁾なども考慮しなければならないかも知れない。

二次電子増倍部におけるノイズの増加率 k_m は, ダイノードの二次電子放出比を初段 δ_1 , 第 2 段以降 δ とすると

$$k_m = \sqrt{\left(H_1 + \frac{H - \delta}{\delta - 1}\right) \frac{1}{\delta_1}} \quad (3)$$

となる。ふつう $H - \delta = (1.2 \sim 1.5) \delta$ である¹⁾。もし δ のばらつきの確率分布をポアソン分布と仮定すると (実際はそうはならないが) $H - \delta = 1$, $H_1 - \delta_1 = 1$ となり¹⁾

$$k'_m = \sqrt{1 + \frac{\delta}{\delta - 1} \frac{1}{\delta_1}} \quad (4)$$

となって, 吉永の式¹²⁾と一致する。(3), (4)式の計算結果を第 2 図に示す。

1.3 イメージオルシコンのノイズの測定法

イメージオルシコンのノイズに関して, 上記のように種々の理論がのべられているのは, それらを検討する適当な測定法が最近までなかったためである。従来はオシロスコープの信号波形を観察し, それに重畳している“くさむら”のようなノイズの振幅を判読する方法があったが, 個人差や測定条件による誤差が大きく, 周波数特性も測れなかった。

Bedford⁵⁾ は等価ノイズ二極管を用いて絶対値を求めようとしたが, 広帯域の増幅器で測定するため, 帰線期間の信号や誘導が入り, 誤差を生じやすい。

第 2 図 二次電子増倍部のノイズ増加率 k に対する第 1 ダイノードの二次電子放出比 δ_1 の影響(計算値)

イメージオルシコン

第 3 図 イメージオルシコンのノイズ測定法

第 4 図 イメージオルシコンとビジコンの周波数特性 (ホワイトノイズで規準化したもの)

Weaver¹⁷⁾ は上の欠点を除去して帯域幅は 1 kc 程度の狭帯域にし, テレビ水平走査周波数の高調波間のノイズのみの部分を選別して, 別のノイズ源と比較した。一般にテレビ信号の SN 比を測定するのに便利な巧みな方法であるが, 前置増幅器の出力で SN 比を測るとその周波数特性がイメージオルシコンのノイズに付加されてしまう。Fix, Kaufman は真空管電圧計と帯域幅 50kc¹⁸⁾, 5 kc¹⁹⁾ の増幅系とを組合わせて測定を行なった。

中山, 小田川²⁰⁾ は増幅系の周波数特性にもとづく誤差を除くため, Weaver の方法とイメージオルシコンの出力電極に並列に標準ノイズ源を挿入する方法を組合わせ (第 3 図), 安定にノイズの周波数特性や入射光を入れたときの特性などを測定した (次節参照)。

S. W. Edwardson²¹⁾ はテレビのはめこみ技術を利用して, その中のノイズを正弦波発生機の出力と比較した。中村, 海老沢²²⁾ はこれでイメージオルシコンのノイズの測定を行なえることを示したが, 広帯域増幅器を用いており, 周波数特性は測定しにくい。

1.4 実験結果

以上のべたように, 正確な測定法が工夫されたのが最近なので, 発表された実験結果は多くない。第 4 図は Fix¹⁸⁾ が測定した周波数特性である。

第 5 図は筆者の測定した結果で, 縦軸は入射光がないときの出力電流中のノイズ IN_1 を $\mu\sqrt{2eibF}$ で除した値である¹⁵⁾。この値はビーム中のノイズをショットノイズ $\sqrt{2eibF}$ のみとすると, 二次電子増倍部でのノイズ

第5図 イメージオルシコン 5820 のノイズの周波数特性 (ショットノイズで規準化したもの)。縦軸の値は二次電子増倍部でのノイズの増加率を示すであろう (本文参照)

第6図 入射光量とノイズの関係

の増加率 k_m を示すことになる ((1) 式参照)。この値が 1.6~1.4 程度で、これが全部二次電子増倍部で付加されたものか、あるいはビーム自身がショットノイズよりもいくらか多くのノイズをもっているのが問題であるが、主として前者がきいていると思われる。それは実効的な $\hat{\sigma}_1$ を実験により求めたところ 1.2~1.5 であり、

(3) 式と第2図から、二次電子増倍部でのノイズの増加率が 1.4~1.65 の間にあると考えられ、第5図の実験とよく一致するからである。なお第5図は 5820 を5本測定した平均値を示したが、平均値からのばらつきは $\pm 3\%$ 程度しかなかった。

従来、イメージオルシコンのノイズの周波数特性は、ショットノイズと同様平らであるとされていたが、高周波の方がいくらか少ないことが第4図、第5図からわかる。この原因はおそらく、走査部や二次電子増倍部での電子の走行時間がきいているためであろう。

明るさとノイズの関係の一例を第6図に示す²⁰⁾。これは前述の諸理論を検討する1つの根拠となるが、明るい方が普通若干ノイズが減っている。Theile²³⁾も出力波形の写真観察により明部でのノイズの減少を認めている。

なお Weimer¹⁰⁾が実験値を考慮して計算した SN 比の値を第7図に示す。

2. ビジコンのノイズ

ビジコンの場合は出力信号が小さいので、出力信号中のノイズのほかに負荷抵抗 R の熱擾乱ノイズ、増幅器の初段真空管のノイズ (等価ノイズ抵抗 R_e) などを考えなければならない。

(1) Haan⁸⁾ の式：

$$S/N = \frac{i_s}{\sqrt{2 e i_s (\sigma + 1) F + \frac{4 k T}{R} F + \frac{4 k T}{R^2} R_e F \left(1 + \frac{4}{3} \pi^2 R^2 C^2 F^2\right)}}$$

i_s はビジコンの出力電流、分母の第1項は信号電流中のノイズ、第2項は R の熱ノイズ、第3項は初段管のノイズ、 C は R に並列に入っている漂遊容量、 σ は1個の Photon により出力電極に流れだす電子の数である。

(2) Theile⁷⁾ の式：

$$S/N = \frac{i_s}{\sqrt{2 e \sigma_1 i_s F + \frac{4 k T}{R} F + 4 k T \frac{4 \pi^2}{3} R_e C^2 F^3}}$$

$R_e \ll R$ と近似しており、分母の各項は前と同様の内容である。ただし、 $\sigma_1 = \alpha_0 + \alpha_1/m$ で、 $\alpha_0 (\geq 1)$ は蓄積電荷のゆらぎ、 α_1 はビームがターゲットにランジングするときのゆらぎに関するもの、 m はビーム変調度である。

(3) Ramberg¹⁴⁾ の式：

$$S/N = \frac{i_s}{\sqrt{\left\{ 2 e (i_s + i_d) + \frac{4 k T (R + R_e)}{R^2} \right\} \frac{F \int_0^{\sqrt{2k_0}} e^{t^2} dt}{\sqrt{2k_0}} + \frac{4 k T R_e \cdot 4 \pi^2 C^2 F^2}{3} \left\{ e^{2k_0} - \frac{1}{\sqrt{2k_0}} \int_0^{\sqrt{2k_0}} e^{t^2} dt \right\}}}}$$

$i_s + i_d$ の項は信号電流と暗電流がショットノイズのみをふくむとし、 k_0 によりビジコンのレスポンス、増幅系の特性の影響を考慮している。

実際にはビームを増すとノイズが増大するので、その点からは Theile の方が適していると思われる。しかし σ_1 の厳密な内容は詳らかでない。

第7図 種々の撮像管の SN 比 (計算値)

- ① イメージ・インテンシファイヤ・オルシコン ($S=150 \mu A/lm$)
- ② 高利得ターゲットを用いた広間隔の IO ($S=150 \mu A/lm$)
- ③ 高利得ターゲットを用いた狭間隔の IO ($\delta=15, m=0.25$)
- ④ 実験用ビジコン (RCA 74008) ガラス状、⑤ 実験用ビジコン (多孔質)、⑥ CPS エミトロン ($S=75 \mu A/lm$)、⑦ アイコノスコープ ($S=75 \mu A/lm$)、⑧ イメージ・ディセクタ ($S=150 \mu A/lm$)

なお、ノイズの大体の大きさを計算すると、 $F = 4.5 \text{ Mc}$ として、 $\sqrt{2 e i_s F}$ は $i_s = 0.3 \mu\text{A}$ のときに約 $6 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ 、 $\sqrt{\frac{4 k T}{R}}$ は $R = 100 \text{ k}\Omega$ として約 $9 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ 、 $\sqrt{4 k T R_e \frac{4}{3} \pi^2 C^2 F^3}$ は $R_e = 270 \Omega$ 、 $C = 20 \text{ pF}$ として約 $14 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ となり、Theile の式で $\sigma_1 = 1$ とすれば SN 比 ≈ 165 が得られる。

Neuhauser²⁴⁾ は高周波部分ではノイズが目立ちにくく、アパーチャ補正やガンマ補正ではノイズが目立ちやすくなることを考慮して、目で見た感じではビジコンカメラからの信号の SN 比は 100 ぐらいであろうと述べている。なお Fix の測定結果を第 4 図にふくめたが、イメージオルシコンと異なり高周波のノイズが多い。

3. その他の撮像装置のノイズ

前記の撮像管以外に、イメージ管と一般の撮像管との組合わせ、フライングスポット装置などが使われている。

3.1 イメージ管と撮像管の組合わせ

不可視線像または、きわめて暗い像をイメージ管で明るい可視光像に変換したのち撮像することができる。入力像を電子的に輝度増倍して撮像管に導くため、それにとまらぬノイズ、けい光面の粒状ノイズなどが問題となる。種々のイメージ管のうちX線けい光増倍管を用いたもののみが実用されており²⁵⁾、主としてそのノイズにつき考察する。

(1) 量子のゆらぎ

第 8 図(a) はX線けい光増倍管東芝7018を用いたX線テレビの系統図、(b) は人体胸部透視程度の条件で、その 1 mm^2 、 $1/30$ 秒あたりの量子数の過程による変化を示す。全体の SN 比は量子数最小段階で定まり、以降の段階で量子数を増倍しても SN 比は改善されない。第 8 図ではCがそれにあたる。ノイズのない理想的な系で吸収量子を 1 : 1 の比で電子に変えて撮像し、平均出力電流 I を得たとし、帯域幅 F を 4.5 Mc として SN 比を

$$\frac{S}{N} = \frac{I}{\sqrt{i_N^2}} = \sqrt{I/2eF} \quad (5)$$

から求めると、その値は 5.0 となる。

この状態で増倍管出力像の明るさは $9 \times 10^{-4} \text{ lm/cm}^2$ であり、F 1.2 のレンズを拡大率 1.5 (集光能率 3.7%) としてイメージオルシコンに導くと、光電面照度は 0.14 Lx となる。これはイメージオルシコンには十分な値なので、系全体の SN 比はX線量子の数で定まり SN 比を改善するためにはX線量を増す必要がある。

同じレンズを拡大率 2/3 (集光能率 1.6%) とし、ビジコンに導くと光電面照度は 0.32 Lx になる。7735 A を暗電流 $0.02 \mu\text{A}$ で用いると信号電流は $0.02 \mu\text{A}$ 以下²⁶⁾、 4.5 Mc の帯域幅でビジコンカメラのノイズ電流

第 8 図 X線テレビカメラ系統図(a)，およびその各段における平均量子数(b)

は $1.5 \times 10^{-9} \text{ A}$ 程度であり、 SN 比は約 10 となる。したがってX線量子ノイズと同程度であり、両者が重なると SN 比は 4.4 となる。線量を n 倍に増すと SN 比は両者ともほぼ $\sqrt{n}$ 倍に改善され、系の SN 比もほぼその値だけ改善される。

(2) 暗電流

光電面からの暗電流は常温で 10^{-15} A/cm^2 、したがって電子数は 70 個/ mm^2 秒で、第 8 図の E 段階の電子数約 5×10^5 よりはるかに小さく、無視し得る。

(3) けい光面の粒状

イメージ管の出力けい光像は粒状構造で、撮像すれば出力信号にノイズ (受像機では静止) を生ずる。その空間周波数スペクトルの発表値²⁹⁾をテレビ撮像した場合の周波数スペクトルに直すと第 9 図を得る。この場合、スペクトルよりノイズ電圧が重要であるが、その値はわかっていない。けい光膜を微視的に見ると光る粒子の間隙

第 9 図 X線けい光増倍管の出力像 (直径 15mm) をテレビ撮像したときのけい光面の粒状構造によるノイズの周波数スペクトル

第10図 フライングスポット装置の入力光信号に対する SN 比 (帯域幅は 8 Mc)

はさらに輝度が高い。粒子は層状で、各々の輝度は電子衝撃面からの深さで変わるからである。1 絵素にふくまれる粒子数を n とすると、走査の過程で絵素に 1 個の粒子が出入するときの信号変化は前記輝度差の $1/n$ となり、SN 比は n に比例して改善される。けい光面上で絵素は $30 \times 30 \mu$ で、 n は数個～10個と推定される。

X線テレビでは一般に被検体の浴びるX線量をできるだけ減らすため、(1)の項のノイズが目立つ場合が多い。

【注】最近、可視光に対しきわめて高感度のイメージ管²⁷⁾、イメージ増倍部をもつオルシコン²⁸⁾が研究され、これらはきわめてわずかの入力光で動作する。この場合、量子数最少の段階は初段光電面からの放出光電子で、光電面の量子効率の改善が要請される。

3.2 フライングスポット装置

フライングスポット装置 (以下 FSC) は光源ブラウン管の一樣輝度のラスタ像を被写体に結ばせ、透過または反射光を光電子増倍管 (以下 PM) で増幅する³⁰⁾。

(1) 量子数のユラギによるノイズ

PM に数百 V 与えて電子増倍度 10^4 程度とし、5 吋ブラウン管を組合わせた例では、平均電流は PM の一次電流 10^{-8} A、出力側で 10^{-4} A 程度で使われる。光電面の量子効率は 20% 以下であるから、量子数最少の段階は PM の一次光電流で、系の量子のユラギによる SN 比はこの段階で定まる。 $F=8$ Mc とし (5) 式より SN 比を求めると、平均の明るさで 36 dB、3 倍の明るさのハイライトで 43 dB となる。電子増倍部での SN 比の低下は 2 dB 以下の程度である¹⁾。

(2) PM の暗電流

PM の光電面からはつねに熱電子が放出され、その散射ノイズが前項に重なる。しかし、Sb-Cs 面の熱電流は 10^{-15} A/cm²、全面積について 10^{-13} A 以下で、入力光量がきわめて小さい場合以外は無視しうる。

(3) PM の負荷抵抗の熱ノイズ

抵抗 R の両端に発生する熱ノイズ電圧は温度 T °K、ボルツマン定数 k とすると $e_n^2 = 4kTR$ で、 $F=8$ Mc、 $T=300^\circ\text{K}$ 、 $R=1$ k Ω ならば $\sqrt{e_n^2} = 13 \mu\text{V}$ となる。光

電子放出の散射ノイズは PM の負荷抵抗の両端で平均 1 mV となり、熱ノイズは無視できる。

(4) けい光面粒状性によるノイズ

光源ブラウン管けい光面の粒状構造はノイズ源となり得るが、けい光面面積が大きいため無視し得る。5 吋ブラウン管の粒状をイメージ管と同じと仮定すれば、絵素の面積は後者の約 64 倍、 n の値は数 100 となり、これによるノイズはきわめて小さい。

以上の結果、FSC のノイズの原因は一般に光電子の散射ノイズで、入力光電流値と第10図の関係をもつ。光電流が 10^{-12} A 以下では、(2)(3) 項のノイズによって SN 比は急速に悪化するが、ふつう、この範囲は使われない¹⁴⁾。実際 FSC の SN 比は明るい場面で 40 dB 前後で大体第10図と一致する。

4. む す び

以上、各種の撮像装置のノイズにつき概説した。本文からわかるようにまだ不明の点も残されており、今後の解明がまつれる。終りに懇切な指導をいただいた岡部部長に感謝の意を表する。

【参 考 文 献】

- 1) A. van der Ziel: 雑音 (滝, 飯島, 田宮訳, 近代科学社, 昭32)
- 2) 中山, 小田川: 昭37電四学連大, 986頁, または TV 用電子管研委資料第166号 (1962-05)
- 3) 小田川: 信学誌, 41, 9 (1958) 850-856
- 4) 武井: テレビ誌, 15, 10 (1961) 583-587
- 5) L. H. Bedford: J. Brit. IRE, (1954-10) 464-474
- 6) A. A. Rotow: IRE Conv. Rec. Part 3, (1956) 41-49
- 7) R. Theile: Adv. in Elec. & Elec. Phys., 12 (1960), 277-290
- 8) E. F. DeHaan: Adv. in Elec. & Elec. Phys., 12 (1960), 291-306
- 9) B. H. Vine: J. SMPTE, (1961, 06), 432-435
- 10) P. K. Weimer: Adv. in Elec. & Elec. Phys., 13 (1960), 387-437
- 11) H. L. Wuerffel & D. E. Webb: NRL Rep., 4498 (1955-03)
- 12) 吉永: TV 用電子管研委資料 120 号 (1961, 02)
- 13) Melvin R. St. John: PB-161, 728 (1960-02)
- 14) E. G. Ramberg: IRE Trans. PGME-12, (1958-12), 58-64
- 15) 恒岡, 小田川: 昭31 信学全大, 139
- 16) 二宮: NHK 技術研究, 13, No. 1 (1961-01), 43-56
- 17) L. E. Weaver: BBC Eng. Mono. No. 24 (1959)
- 18) H. Fix, A. Kaufmann: Rundfukt tech. Mit., (1960-04), 60-65
- 19) H. Fix, A. Kaufmann: radio menter, (1961-02), 114-116
- 20) 中山, 小田川: 昭36 信学全大 264頁, または TV 用電子管研委資料 147 号 (1961-10)
- 21) S. W. Edwardson: BBC. Eng. Mono. No. 37 (1961-06)
- 22) 中村, 海老沢: TV 用電子管研委資料 174 号 (1961, 09)
- 23) R. Theile, H. Fix: A. E. Ü. 10 (1956-03), 98-104
- 24) R. G. Neuhauser: J. SMPTE, 70, No. 10 (1961), 791-794
- 25) 小川: テレビ誌 15, (1961), 213-220
- 26) M. Rome: IRE Int. Conv. Roc., 9, Part 7, (1961), 12-18
- 27) A. E. Anderson: IRE Trans. NS-7, 2/3 (1960), 133-136
- 28) G. A. Morton 他: Adv. in Elect. and Elect. Phys., 12, (1960), 183-193
- 29) 長谷川: テレビ誌 15 (1961), 459-463
- 30) A. J. Baracket: Tele. Tech. 10, 12 (1951), 42-44