テレビ装置の雑音

NHK 放送科学基礎研究所 坂 田 晴 夫

I. 総 説

1. ま え が き

前回までで、雑音の1次元的性質、2次元的性質が記された。今回は実際の画像装置で発生する雑音について記すが、個々のカメラやVTRあるいは中継装置等で問題となる雑音を論ずる前に、画像装置全体で問題となる雑音の性質について記す。

画像装置には撮像から受像に至るまで種々の装置があり、雑音の種類、性質も各装置ごとに異なっている場合が多い。テレビを例にとって画像装置の配列を図1に示す。図1で最終の検出装置は視覚系である。多くの画像は視覚で見えることを目的としているので、画像装置の系列から視覚系を除外することはできない。画像の S/N の改善において、単に電気信号としての S/N が改善されるだけでは意味がなく、視覚系を通して S/N が改善されていることが必要である。

画像装置の中で代表的なテレビ系の雑音は種々の分類方法がある。

(1) 1次元雑音と2次元雑音

図1の系で、撮像管および受像管の光電変換部分の空間的不均一性や、フィルムの粒状性のように、2次元のまま画像を処理する系で加わる雑音が2次元雑音であり、テレビの電気信号系で加わる雑音のように時間だけの1次元の軸を有する雑音が1次元雑音である。1次元雑音も走査により2次元雑音に変換されて視覚系に伝送される。

(2) 時間軸による分類

スローVTRのスチール再生(静止画放送も同じ)の

図1 画像伝送での雑音の付加

"Noise (7): Noise of Television Equipment" by Haruo Sakata
(NHK Broadcasting Science Research Laboratories, Tokyo)

ように、1枚の画を繰り返して再生する場合の雑音は、写真の粒状性の場合のように空間的な雑音で、時間的には変化しない。

一方、フリッカーのように画面全部が時間によって変動する雑音もある。一般のテレビ画像はその1枚(たとえば1フィールド)を見れば空間的な雑音を有しており、画面の一部に着目すればフィールドごとに変化する時間変動の雑音になっている。

フィルム送像系におけるフィルムの粒状性は、時間的には $1/24 \text{ sec}$ ごとに変化する雑音である。

(3) 画像との相関性

従来のテレビ系の雑音の多くは、撮像系で加わるものも、伝送系で加わるものも、信号とは無相関な雑音が多かった。最近の超高感度撮像管では、その出力信号が入力的光子数に比例するものもあり、雑音は信号(画像)との相関をもつことになる。

また、PCM伝送での量子化雑音は明らかに画像と相関があり、ゆるやかに変化する大面積でのもが目立っている。

(4) 輝度雑音と色雑音

NTSC方式をはじめ現在放送されている標準方式は、輝度信号に色信号を変調した信号を高周波部分に多重している。伝送系で加わる雑音の中には、輝度信号に影響するものと色信号に影響するものがある。

一方、視覚の雑音に対する感度も輝度と色とは異なっている。色雑音に対する視覚の特性はまだよくわかっていない点が多い。

NTSC方式では色情報の伝達には色差信号を用いている。色差信号の帯域は I で 1.5 MHz 、 Q で 0.5 MHz と狭いので、色差チャンネルの雑音は水平相関性が大きく、視覚的に目立ちやすい形になっている。NTSC方式では色差チャンネルの雑音は再現画像の輝度雑音にはならないという定輝度原理が成り立ち、色差チャンネルの目立ちやすい分布が輝度に変換されないようにしている。しかし、この定輝度原理は系が線形の場合に成り立つので、実際の系ではCRTが非線形のた

図2 走査と画像の雑音

めに色差チャネルの雑音がいくぶん輝度成分に変換されて、場合によっては画質劣化の要因となる。

2. 雑音と走査

1章で記した2次元雑音自体については、前回の画像雑音としてくわしく記されているので、ここでは省略する。テレビ信号の伝送系で付加される1次元雑音は走査により2次元雑音となって再現される。テレビ信号も走査により2次元画像に変換されるので、この点では信号も雑音も同じように扱うことができる。ただし、テレビ信号は撮像管の走査により元来2次元画像だったものを伝送の都合上1次元信号に変換し、再現系で再び2次元に変換して元の画像に復元しているのに対し、1次元伝送系で付加される雑音は走査によりはじめて2次元像となる。この点で、フィルムの粒状性等は元来2次元像であるので、テレビ系にとっては画像信号と同様に考えてよい雑音である。

図2(a)は本来の2次元雑音が走査、伝送、走査を経て2次元雑音として再現される例であり、図2(b)は1次元伝送系で加わった雑音が走査により2次元雑音として再現される例である。

1次元信号と2次元信号との走査変換は Mertz, Gray¹⁾ らが解析している。この解析はそのまま1次元雑音の走査による2次元雑音への変換に適用することができる。Huang²⁾によると、雑音の水平方向と垂直方向の周波数分布は次式となる。

$$\Phi_{\infty}(\omega) = \frac{1}{L} \Phi_0\left(\frac{\omega}{L}\right) \quad (1)$$

ω : 空間角周波数

$\Phi_0(\omega)$: 水平方向の雑音の電力密度分布
(1次元の電力密度分布に対応する)

$\Phi_{\infty}(\omega)$: 垂直方向の雑音の電力密度分布
 L : 走査線数

(1)式でわかるように、空間周波数分布としては垂直方向は水平方向の雑音の L 倍に帯域が拡大する。したがって、白色雑音に対して通常の電氣的フィルターで雑音を帯域制限しても、垂直方向にはかなりの広帯域になっている。このことが、テレビの場合には雑音の最終検出系である視覚の空間周波数特性と結びついて雑音の視

感評価曲線になる。

3. 雑音と相関性

すでに第1回に記されているように、雑音は電気信号または物理量としては電力で評価すればよい。しかし、画像の場合に情報の検出系は視覚であるので、画像の雑音評価も当然視覚の特性で支配される。物理量として等しい電力の雑音も異なった評価になることがある。このことは検出系としての視覚の特性によることはもちろんであるが、入力信号としての雑音の性質にもよる。ここでは雑音のひとつの性質である相関性について記す。

相関性については第2回および第3回で記されているが、画像装置の観点より記す。

3.1 空間相関性

(1) 水平方向の相関

テレビ信号系での通常の電氣的フィルターにより、画像としての水平方向の相関性を種々変化させることができる。

(a) 白色雑音 写真1は周波数特性が平坦な雑音の場合のCRT上の再現像であり、具体的にはイメージオルシコンカメラの場合の雑音である。また、白色雑音は周波数特性が平坦なので種々の雑音の規準となる場合

写真1 白色雑音

写真2 低域雑音 (白色雑音に低域フィルター使用)

写真3 帯域雑音 (白色雑音に帯域フィルター使用)

が多い。

(b) 低域フィルター特性 写真2は白色雑音に低域フィルターを用いた場合のCRT上への再現像であり、水平方向に長い雑音となる。実際のテレビ系での典型的な例は3.6MHz付近の雑音が色信号に変換されるクロスカラー雑音である。

(c) 帯域フィルター特性 写真3は白色雑音に帯域フィルターを用いた場合の再現像である。実際の系では共振回路を含むような系で生ずる。

(d) 三角雑音 高周波領域になるほど振幅が増大するもので、その一例を図3に示す。実際の系ではこの種の雑音はかなり多い。たとえば、現在最も一般的なプランビコンやビジコンを用いたカメラの雑音は増幅器の初段の雑音で決まり、図4に示すように、初段入力回路ではストレー容量のため信号の高域成分が低下するので、後段でこの補正をする。このため、初段で発生した雑音は三角雑音 (正確には低周波でゼロにならないので

図3 三角雑音の周波数特性

図4 入力段のストレー容量とその補償回路
(C_H により高域雑音の利得増加する)

写真4 クランプによるラインノイズの発生

(a) 雑音の重畳した同期波形

(b) ラインノイズ画面 (わかりやすくするために画面部分は信号なし)

擬三角雑音である)になる。

また、FMを使用する回線では、入力出力のエンファシス回路により種々の雑音分布の形をとるが、エンファシス定数によっては三角雑音となる。

(e) ラインノイズ 一般に非線形系を通ると雑音の形状も変化する。テレビ信号でその代表的なものはクランプ回路によるラインノイズの発生であろう。

写真4に示すように、ランダム雑音の重畳した信号の同期部分をクランプすると、クランプした部分の雑音レベルにより直流レベルが1ライン分だけ変動する。この画面は同図(b)のように横縞となって再現され、著しい妨害となる。対策としてソフトクランプやインピーダンスクランプがある。

(2) 垂直方向の相関

テレビ信号では垂直方向の相関性を変化させるためには走査の性質を利用して1ライン遅延線を使用する。このような信号処理系に、たとえば白色雑音を加えられると画像雑音として垂直相関性が変化する。

最近、1ライン遅延線が比較的容易に使用できるようになったので、垂直方向の相関性が白色雑音と異なったものも多くなっている。

図5は1ライン遅延線を用いた2ライン加算回路であり、垂直方向の空間周波数特性は図6のように一種の低域フィルターとなる。この場合の白色雑音に対する再現像は写真5に示すように画面では縦長になる。

カラーカメラで使用されている輪郭補償回路は、垂直成分についても高域成分を増大させている。図7は、そ

図5 1ライン遅延線を用いた垂直方向の加算回路

図6 垂直方向加算回路の空間周波数特性

$$f_{v0} = \frac{1}{27}, \tau: 1 \text{ ライン画面上のピッチ}$$

写真5 2ライン加算雑音

図7 輪郭補償回路の構成例

図8 輪郭補償回路の周波数特性

$$\tau: \text{図7の } \tau_H \text{ (水平の場合)}$$

$$\tau: \tau_v \text{ (垂直の場合)}$$

の構成図であり、図8は空間周波数特性である。

垂直相関の大きい例としては、水平方向に線状に走査した光源を用い垂直方向は機械走査をするような、ファックス等の光源のむらや、プラズマパネルで画像表示する際にパネルの製造上のむらが垂直に現われる例がある。これらの雑音は水平方向にはランダムであるが垂直

方向には相関を有し、縦の棒状の画像となる。

(3) 位相相関

パルス雑音は、ランダム雑音と異なり空間的な相関が強い。すなわち、単独のパルスは広帯域な周波数成分の集りであるが、そのおのおのの成分の位相関係が一定であってはいじめてパルスになるので、位相関係がランダムな場合は白色雑音と大差ない。

3.2 時間の相関性

(1) 静止雑音

写真の粒状性、スロー VTR のスチールモードでの入力信号の雑音、飛点走査系 (FSS) の光源の CRT の粒状性、撮像管の粗だむら、フィルム録画系での CRT の塗りむら等がこれに属す。

(2) 時間で変化する雑音

テレビ系の電気信号系で発生する雑音は、大部分画像として再現される場合はサンプリング時間 1/60 sec で変化している。しかし、スロー VTR で再生する場合には、再生速度比に応じて同一雑音が繰り返されて異質の雑音になる。たとえば速度比 1/4 では 1/15 sec の間同一雑音が画像として再現されることになる。

一方、フィルム送像系ではフィルム粒状性は近似的に 1/24 sec ごとに変化であり、視覚の特性を考慮すると 1/60 sec で変化する電気信号系雑音よりも目立ちやすい。

4. 雑音の加算性

雑音の加算性は、一般に同種雑音については電力加算でよいが、異種雑音の加算は雑音検出系の特性によって異なり、検出系も雑音伝送系に含めて検討する必要がある。テレビの場合にもたとえば、伝送系だけの S/N を検討する場合には雑音の電力加算で処理してよいが、画像として評価する場合には視覚の特性が大きく影響するので、視覚の特性も伝送系の一部として考えなければならない。

4.1 電気信号系の電力加算

図9に示すように、直列伝送系の各部より同種の雑音 N_1, N_2, N_3 が加わる場合のテレビ信号の S/N の劣化は、雑音を電力表示することで容易に求められる。図9のCにおける雑音電圧 N は入力に換算すると次式となる。

図9 直列伝送系で同種雑音の加わる場合
(A_1, A_2 は利得)

$$N = \sqrt{N_1^2 + \left(\frac{N_2}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{N_3}{A_1 A_2}\right)^2} \quad (2)$$

異種雑音（3章に示した相関性の異なる雑音）の場合にも電力表示で加算すればよい。ただし、この場合には単なる雑音の電力的検出の場合にのみ正しい。

たとえば、点順次式単管カラーカメラの出力から色信号を分離する場合に、図5に示した1ライン加算回路を用いることにより電気信号としての S/N は 3 dB 改善されて、より確実に色情報を取り出すことができる。

VTR のように FM された信号に雑音に加わる場合には、FM 復調器の検出特性を考慮して加算あるいは異種雑音の比較を行なわなければならない。たとえば、必要帯域における同じ電力値の雑音でも、白色雑音とパルス雑音では、位相に相関のあるパルス雑音のほうがはるかに妨害の程度は高い。

4.2 画像雑音の加算性

画像は視覚で検出することを目的としているので、画像雑音の検出も当然、視覚の検出特性で大きく影響される。したがって、雑音を画像雑音として評価する場合には、視覚の検出系までを画像信号の伝送系と考えて検討すればよい。しかし、現状では画像検出に対する視覚の特性はまだ十分に判明していない点も多く、結論を下せない場合もあり、そのような場合には心理評価実験を行なわなければならない。

視覚の画像に対する特性で未知の部分が判明すれば、画像雑音の加算性についてもより明らかになるが、現在までに明暗情報を中心に、視覚の空間周波数特性、視覚の時間特性、視覚の空間周波数パターンの時間変化特性、テレビのランダム雑音に対する評価曲線等が求められている。したがって、これらのわかっている特性を基礎に検討できる画像雑音については、雑音の加算を行なうことも可能である。

このように、条件付きとはいえ画像雑音の加算性を見出しておくことは、画像装置における画像雑音の種類が3章に記したように多様であり、今後新しい装置や新しい方式も誕生する可能性があるため、重要である。

(1) 空間周波数分布の異なる場合

ランダム雑音の加算は、その統計的性質により一般に電力加算が行なわれている。視覚の伝送特性のうち空間周波数特性は図10に示す実線のように、1次元では帯域通過形である³⁾。図10の特性を基礎にして視覚の2次元空間周波数特性を求めることもできるが、異方性を含めた測定値も得られている³⁾。一方、テレビ信号に重畳される雑音は元来1次元雑音であるが、走査により、CRT 上では2次元雑音となる。この際の水平、垂直方向の雑音の分布の関係は2章(1)に示した。したがっ

図 10 視覚の空間正弦波レスポンスと雑音のレスポンス¹⁾²⁾ (視距離 4 H)

図 11 異なった空間周波数分布の雑音の加算
 N_1 : レベル 1, 帯域 $f_1 \sim f_2$
 N_2 : レベル n , 帯域 $f_2 \sim f_3$

て、1次元伝送系で加わった雑音（周波数 f_N ）の見え方は、視覚の2次元空間周波数特性において、水平空間周波数 u_N （時間周波数 f_N に対応）についての電力加算値となる。このようにしてランダム雑音に対する視覚の評価曲線が求められる。図10の破線は実測値⁴⁾であるが、計算値もほぼ等しくなる。

異なった周波数分布をもったランダム雑音を加えた場合の効果は、図10の評価曲線を適用して電力加算すればよい。

たとえば、図11に示すような伝送信号雑音電圧 N_1 , N_2 が加わった場合の画像雑音は $W_n(f)$ を図10に示す雑音評価関数とすれば、

$$N = \sqrt{\int_{f_1}^{f_3} W_n(f)^2 df + n^2 \int_{f_2}^{f_3} W_n(f)^2 df} \quad (3)$$

になる。ただし、 $W_n(f)$ は雑音電圧 (rms 値) に対する評価関数である。

(2) 時間特性の異なる雑音の加算

すでに記したように、テレビ系には種々の時間特性の異なる雑音が存在しているので、これら異種雑音の加算には、空間周波数における雑音の評価曲線と同様な、時間周波数についての雑音の評価曲線が必要である。現在まで実用し得る評価曲線は実験的にはまだ求められてい

図 12 時間変動の影響 (G. Robson)

ないので、視覚の時空間特性等より計算せざるを得ない。

なお、視覚の時間特性は、大面積についてはフリッカー特性として知られ、図 12 に示すように帯域通過形である。一方、空間周波数の高いパターンでは、そのフリッカー特性は低域通過形になる。図 12 は空間周波数をパラメーターとしたもので Robson の測定⁶⁾による。

一例として、フィルム送像系の場合について説明する。フィルム送像系の主な雑音は、フィルム粒状性とカメラ前置増幅器の初段雑音である。前者は近似的に $1/24$ sec サンプル雑音（多くは 2-3 方式なので若干異なる）と見なし、後者は $1/60$ sec サンプル雑音である。フィルムを撮像管のビームアパーチャーと等価なアパーチャーで走査した場合の雑音の実効値を N_f (S を 1 とする) とし、カメラの雑音実効値を N_A とする。仮りにフィルムが毎秒 60 コマで送られていれば (EVR のように) この場合の出力の雑音 N_0 は、

$$N_0 = \sqrt{N_f^2 + N_A^2} \quad (4)$$

になる。しかし、一般のテレビネではフィルムは毎秒 24 コマで送られているので、毎秒 60 コマの場合に対する雑音の視感度を W_f とすると、

$$N_0 = \sqrt{(N_f W_f)^2 + N_A^2} \quad (5)$$

になる。視覚の時空間特性より $W_f > 1$ であるので、フ

ィルムの雑音 N_f の測定値がカメラの雑音 N_A の値より小さくても、テレビネ系全体の S/N はフィルム粒状性で決まることが多い。

(3) 輝度雑音と色雑音の加算

実際に生ずる問題としては、色差チャンネルに生ずる雑音と輝度雑音の加算である。このような問題は、NTSC 信号の伝送系で加わる雑音の影響を検討する際に起きる。視覚の色に対する特性、輝度と色の相対関係の特性が明確になっていないので、視覚系を含んで相対的な係数を見出すまでに至っていない。また、カラー再現用の CRT も非線形特性のため、評価係数も再現する色によって変化する。その一例は後の第 8 回で記される予定であり、ここでは詳細は省略する。仮りに、輝度雑音 N_Y と色雑音 N_C が共存する場合、 N_C の N_Y を規準とした評価係数を W_{NC} とすると、輝度に換算した画像雑音 N は、

$$N = \sqrt{N_Y^2 + (W_{NC} N_C)^2} \quad (6)$$

になる。

5. む す び

画像装置雑音に共通していること、および種々の雑音の加算に重点を置いて記した。個々の装置に特有の雑音に関しては、次回を参照されたい。また、画像雑音としては視覚の特性を考慮しなければならないが、まだ充分にわかっていない点もあり、視覚を考慮した場合に必ずしもすべての雑音の加算が簡単にできるとは限らない。種々の評価係数については今後明確にして行かなければならない問題である。なお、画質との関連は第 8 回を参照されたい。

〔参 考 文 献〕

- 1) P. Mertz and F. Gray: BSTJ, **13** (1934) 464
- 2) T. S. Huang: MIT-QPR, No. 69, Apr. (1963) 143
- 3) 樋渡, 渡部, 森, 長田: 視覚の空間正弦波レスポンス, NHK 技術研究, **16**, 1 (1964) 38
- 4) 山口: テレビジョン系におけるランダムノイズの視感曲線とその応用, NHK 技術研究, **18**, 2 (1966) 68
- 5) 坂田: 視覚の空間周波数特性とテレビノイズの評価曲線, テレビ学会視覚研究委資, No. 29-3 (1972)
- 6) J. G. Robson: JOSA, **56**, 8 (1966) 1141