テクニカルノート

超低周波数領域のウィナースペクトルの測定

白石 順二・畑 川 政 勝

大阪市立大学医学部付属病院中央放射線部

(論文受理 1988年12月5日)

(最終論文受理 1989年5月19日)

(Code No. 313)

Key words: Low frequency, Wiener spectrum, Microdensitometer

METHOD OF MEASURING THE ULTRA-LOW FREQUENCY WIENER SPECTRUM

JUNJI SHIRAISHI and MASAKATSU HATAGAWA

Department of Radiology, Osaka City University Hospital

(Article received ; Dec., 5, 1988)

Summary

It is general knowledge that image noise from radiographic imaging system consist of quantum mottle, structure mottle and film graininess. Wiener spectrum is often used for an evaluation of the image noise, and it is usually measured in the frequency range above 0.1 cycle/mm. However image noise may actually have, noises that exist in frequency range below 0.1 cycle/mm such as roller marks from film processors or pressure marks. In this study, we changed the optical systems of our microdensitometer to attach own scanning aperture having 17 mm slit length and 0.7 mm slit width, and carried out investigating for measuring Wiener spectrum at ultra low frequencies. As a result, in the 0.06~0.1 cycle/mm frequency range, a rapid rising of the Wiener spectral value was observed. By comparing Wiener spectra of two types of film which having different sensitivities, it was considered that this rising was due to low frequency noise rather than quantum mottle.

1. はじめに

放射線画像系の粒状性, すなわちノイズ特性の評価にはウィナースペクトルが多く用いられている¹⁾. これはノイズ特性を, その成り立つ周波数成分ごとに記述できるためである.

一般に, 放射線画像系のノイズは, 量子モトル, 構造モトル, フィルムの粒状性等から成り立つといわれてい

るが²⁾, これらは, 通常約0.1 cycle/mm以上の周波数領域で測定されている. しかし, 実際の画像には, 自動現像機のローラによるムラや, プレッシャマークなど, これらより低い周波数領域のノイズも含まれると考えられる. また, これら以外に未知の低周波ノイズが含まれている可能性もあり, 0.1 cycle/mm以下の周波数領域(以後, 超低周波数領域とする.)のウィナースペクトルを測定することは, 興味深いことである.

超低周波数領域のウィナースペクトルの測定 (白石・他)

こういった超低周波数領域のウィナースペクトルの測定を行うとき、従来の方法では、スキニングアパーチャ (以後スリット) の長さ、試料をスキャンする際のサンプリング距離との関係で、測定値に誤差が生じるために、正確な測定が行えない³⁾⁴⁾⁵⁾。

これらの問題点を避けるために、二次元走査によるスキャンデータを積算して、実質的にスリットの長さを長くする方法 (synthesized slit 法)⁶⁾ や、スリットの長さが有限であることから生じる誤差を補正する方法など⁶⁾ がこれまでに報告されている。

また、Wolf らは、20 mm のスリット長さと、必要とされるサンプリング距離を、1 度のスキャンにより得られる特殊な走査機構とを有するマイクロデンシトメータを用いて、0.05~0.8 cycle/mm の超低周波数領域のウィナースペクトルの報告を行っている⁷⁾。

しかし、これらは特殊な装置を必要とするため、一般的ではない。そこで、われわれは市販のマイクロデンシトメータの光学系を、通常の使用に問題がなく、簡単に超低周波数領域のウィナースペクトルの測定が行えるように改造し、0.06 cycle/mm~1.0 cycle/mm のウィナースペクトルの測定を試み、有用な結果を得たので報告する。

2. 方 法

2.1 スリットの長さとサンプリング距離の関係

マイクロデンシトメータを用いて細長いスリットで測定された一次元のウィナースペクトル $W'(u)$ は実際には二次元のスペクトルの断面 $W(u, 0)$ と考えられる。また、スリットの長さを L 、幅を a としたとき、マイクロデンシトメータの伝達関数 $T(u, v)$ は、

$$T(u, v) = \text{sinc}(au) \text{sinc}(Lv) \quad (1)$$

の式であらわされ、ここから一次元のウィナースペクトル $W'(u)$ と $W(u, 0)$ の関係は、

$$W'(u) = \frac{\text{sinc}^2(au)}{L} W(u, 0) \quad (2)$$

$$W(u, 0) = \frac{L}{\text{sinc}^2(au)} W'(u) \quad (3)$$

の式で示される⁸⁾。

スリットの長さ L は、測定するウィナースペクトルの周波数領域 U によって測定値に影響を及ぼすが、低周波数領域における、両者の関係は

$$U < 1/L \quad (4)$$

であらわされ、この関係が成立する範囲で、正確な測定が可能である⁷⁾。

今回の実験ではマイクロデンシトメータのレンズ系を使用せずに、照射および測光ツープスに直接スリットを取り付けることによって、スリットの長さを 17 mm まで確保し、(4)式によって約 0.06 cycle/mm 以上のウィナースペクトルの測定を理論的に可能とした。

レンズ系を用いず自作のスリットを使用したので、実際のウィナースペクトル測定にあたっては、自作のスリットの MTF を測定して補正をおこなった。このときの補正式は

$$W(u, 0) = \frac{L}{(\text{スリットの MTF})^2} W'(u) \quad (5)$$

で示される⁸⁾。

一方、0.01 cycle/mm の超低周波ウィナースペクトルを計算するために、1024 点の FFT を用いる (後述) と、サンプリング間隔は 100 μm となり、サンプリング距離は、1000 mm となる。

以上の条件で与えられる実効標準誤差は

$$SE = (X \cdot 1/\delta x)^{-1/2} \quad (6)$$

X : サンプリング距離 δx : サンプリング間隔

の式で示され、本法では、約 1% の誤差となった。

ここで、試料をサンプリングするときのサンプリング間隔 δx と求められる最大周波数 u_{max} の関係は

$$u_{\text{max}} = \frac{1}{2\delta x} \quad (7)$$

の式であらわされる⁹⁾。

2.2 実験方法

自作スリットの本体は、直径 20 mm のプラスチック製パイプで製作した。スリット部は加工のしやすさから選択した鉛箔をアクリル板に張った後、スリット状にカットした。自作スリットは照射用の 1×17 mm のスリットと、測光用の 0.7×17 mm のスリットで、これらをマイクロデンシトメータの試料テーブルの上下にある対物レンズをはずしたあとに、スリットの中心が光軸線上にくるように固定した (Fig. 1, 2, 3)。また、スリット中心の微調整は装着後、付属のレンズ台の微調整つまみにより行った。このとき、スリット—試料間の距離は約 0.5 mm とし、外部からの光の進入をなくすために、測定時は室内の照明を最小限度に落とした。なお、ピントの調整については、レンズ系を使用していないため必要がなかった。

また、光源に従来の装置のものをそのまま使用したので、照射電球のフィラメントの形状が光分布にムラを生じ、これを除去するために測光サイド側のスリットにはオパールガラスを装着した。

Optical system of normal microdensitometer

a. original system (before change)

Optical system of improvement microdensitometer

b. improved system (after change)

Fig. 1 Optical systems of microdensitometer.

自作スリットの長さは、もとの対物レンズ取り付けツープスのサイズの関係で最大の17 mm に、またスリット幅は、光電子増倍管への入力レンズ系を使用していないことから、幅が狭すぎると光量不足を生じ測定不能となるため、測定可能な最低幅である0.7 mm とした。

また、自作スリットのMTFは、マイクロデンシトメータで普通用いられる、ナイフエッジをもちいた方法で測定した⁸⁾。

試料作製には、当院の一般撮影系で、通常使用している Du Pont 社 Quanta Fast Detail の増感紙と、フィルム Cronex-4、Cronex-7 の組み合わせを用いた。両フィルムとも、半切サイズのカセットを使用し FFD220 cm

Fig. 2 Illustrations of the set up our slit.
a. original system
b. improved system

Fig. 3 Structure of our slit.

で濃度が 1.0 ± 0.02 になるよう露光を与えた。このとき、半切サイズ全面について、前記の濃度範囲におさまるように特に注意して試料を作成した。

スキャンは、フィルムのサンプリング距離(1000 mm)がテーブルの移動距離(350 mm)より長いために、スリットの長軸方向に少しずつシフトさせながら試料テーブルを3回往復させて行った (Fig. 4)。

Fig. 4 Scanning method of sample.

超低周波数領域のウィナースペクトルの測定 (白石・他)

試料送りのスピードは1.0 mm/sec でサンプリング間隔は100 μm である。

また、スキャンと同時にXYレコーダで波形を記録し、スキャン全域にわたって、X線管のヒール効果によるトレンドの有無を確認し、このトレンドの認められたデータについてはスキャンをやり直した。

得られたデータは、一旦、MZ-2000に取り込んだ後、PC-9801に転送した。ウィナースペクトルの計算は、当院で使用している計算プログラムを用いた。これは、スキャンデータからの取り込みや計算が、通常の方法で、簡便に行えるためである。われわれのウィナースペクトル測定法ならびに計算法はBRHレポート、および、日放技の委員会報告“放射線画像系の粒状性の測定法”に準ずるものである⁵⁾¹⁰⁾¹¹⁾。使用機器は、マイクロデンストメータがサクラPDS-15、A-Dコンバータがカノーブス電子CAD-12-4である。サンプリング間隔は、通常の測定ではテーブル送り早さが0.1 mm/secなので、10 μm であるが、今回の測定ではサンプリング間隔を100 μm とするためにテーブル送りを1.0 mm/secとした。また、サンプリング数は通常の測定と同様に約10,000点である。データは2点スムージングの後、18セグメントの1024点のデータを高速フーリエ変換(FFT)し、次に18のFFT結果をアンサンブル平均して、1回スキャンの測定値とした。このスキャン計算をフィルムの場所を変えて10回行い、その平均を4次式で近似して最終値とした。なお、計算によるトレンド処理は行わず、拡散光濃度への変換係数Qファクタによる変換も行わなかった。

また比較のため、自作スリットではなく従来より使用しているレンズ系を用いて、スリットサイズを最高の長さ2 mm 幅50 μm に設定し、その他はすべて本法と同じ条件で測定を行った(ただし、Qファクタの補正は行った)。

3. 結 果

Fig. 5 には自作スリットのMTFを示す。理論的に、ス

Fig. 5 Modulation transfer function of our slit.

リットの幅が0.7 mm の場合、スリットのMTFは約1.4 cycle/mm で0になる。しかし、本法では、光源の光分布の不均一により、全領域においてMTFは理論値より高い値を示した。

Fig. 6 は、今回の測定で得られた自作スリットを用いたときと、レンズを用いたときの超低周波数領域のウィナースペクトルを示している。レンズを使用したときは(3)式によって補正をおこなったが、自作スリットを求めたものより低い値を示した。今回の実験においては、測定値の信頼性は0.06 cycle/mm 以上であるが、計算プログラム上、0.01 cycle/mm まで算出が可能であった。

Fig. 7 は自作スリットを用いて求めたCronex-4とCronex-7のウィナースペクトルを示している。超低周波数領域では両者に大きな差はみられず、ともにこの領域での低周波ノイズによる立ち上がりが見られた。

Fig. 8 は、従来の方法で得られたウィナースペクトルと、今回の実験で得られた超低周波数領域のウィナースペクトルを示している。Cronex-4、Cronex-7ともに0.5 cycle/mm 付近では、従来の方法で得られた値と近い値を示し、その結合が可能であると考えられる。

4. 考 察

予備実験中に、スキャンデータが、長いサンプリ

Fig. 6 Wiener spectra at low frequencies obtained by using our slit and regular aperture for Cronex7/QFD

Fig. 7 Wiener spectra at low frequencies obtained with our slit for Cronex 4 and Cronex 7

ング距離のために、X線管焦点の強度分布によるトレンドの影響を受けることが判明した。そのため、本実験においては、試料の濃度がフィルム全面にわたって一定(±0.02)となるようにした。これは、増感紙-フィルム系および現像以外のファクタをノイズ要因から除去するためである。

また、スキャンングテーブルの移動距離の関係から、1回のスキャンにつきテーブルを3回往復させているので、その切り替えの際に、濃度の不自然な変動が混入し測定誤差を生じた。このため、サンプリング距離を短くすることも考えられたが、従来の測定装置、計算プログラムを用いて測定することを今回の実験の目的としたので、プログラム変更はしなかった。

マイクロデンシトメータの光電子増倍管は、平行光測光であったが、レンズ系を取り外したので拡散光測光と考え、Qファクタによる補正は行わなかった。

今回の実験により得られた測定結果では、Wolfらの報告と同様に、超低周波数領域でウィナースペクトルが高い値を示した。また、Fig. 6に示されるように、レンズを用いた方法でも同様の傾向を示した。自作スリットとレンズを用いた方法で差が生じたのは、レンズを用いた方法ではスリットの長さが足りなかったためであろう。

Fig. 8 Wiener spectra of Cronex 4 and Cronex 7 systems in the low frequency range obtained with our slit and those at usual frequency range obtained with regular aperture.

次に、従来の方法で測定した0.1~1.0 cycle/mmのウィナースペクトルと、本法で測定した超低周波数領域のウィナースペクトルとを比較すると、0.5 cycle/mm付近において非常に似た値を示し、結合可能であると考えられる (Fig. 8)。

一般に、量子モトルのウィナースペクトルはMTFの自乗に比例するため、周波数軸に対しほぼフラットである²⁾。しかし、超低周波数領域ではわれわれの測定したウィナースペクトルは高い値を示した。これは、量子モトルの上にさらに何らかの濃度変動、例えば自動現像機のローラによる濃度ムラやプレッシャマークなどの変動が加わっているものと考えられる。またこの領域で、Cronex-4とCronex-7という感度の異なるフィルムが、同様な値を示したのは、フィルムの構造によるものや、量子モトルによる変動よりも、それ以外の前述のようなファクタによって変動する成分の方が多いからであり、それに対して0.5 cycle/mmより上の領域では、それより量子モトルによる影響の方が強く現れていることを示している。

このような超低周波数領域での濃度変動をどのように

超低周波数領域のウィナースペクトルの測定 (白石・他)

評価するかは今後の問題であり、一般の画像評価としては、0.1 cycle/mm 以上で十分であると考えられる。

5. 結 語

市販のマイクロデンシトメータのスキヤニングアパーチャに、自作のスリットを取り付けるという簡単な改造によって、超低周波数領域のウィナースペクトルの測定を行うことができた。その結果、超低周波数領域ではウィナースペクトル値が、急激に高くなることがわかった。したがって、この測定法はプレッシャマーク、その他の低周波数ノイズの定量測定に有効であるという結論を得た。

最後に、今回の実験、発表にあたって適切な助言をいただいた当大学非常勤講師光田秀雄氏に感謝します。

文 献

- 1) 内田 勝, 山下一也, 稲津 博: 放射線画像情報工学(1), p. 223-233, 通商産業研究社, (1980).
- 2) Rossmann K: Spatial fluctuations of x-ray quanta and the recording of radiographic mottle. Am. J. Roentgenol., Rad. Therapy & Nuclear Med., **90**, 863-869, (1963).
- 3) Sandrik JM, Wagner RF: Radiographic screen-film noise power spectrum: variation with microdensitometer slit length. Appl. Opt., **20**, 2795-2798, (1981).
- 4) 「放射線写真のスクリーナーフィルム系の MTF とウィナースペクトル」. 日放技学誌, **39**(3), 240-270 ; **39**(4), 426-447, (1983).
- 5) 「放射線画像系の粒状性の測定法 (I) (II)」. 日放技学誌, **43**(12), 1743-1768, (1987) ; **44**(1), 44-62 (1988).
- 6) Koedooder K, Strackee J, Venema HW: A new method for microdensitometer slit length correction of radiographic noise power spectra. Med. Phys., **13**, 469-473, (1947).
- 7) Wolf M, Angerstein W: Low-frequency Wiener spectra of radiographic screen-film systems. Phys. Med. Biol., **32**, 557-564, (1987).
- 8) Dainty JC, Show R: Image science, Academic Press, p. 276-319, (1974).
- 9) Dainty JC, Show R: Image science, Academic press, p. 190-231, (1974).
- 10) 畑川政勝, 他: 散乱線, 管電圧, 被写体厚が増感紙—フィルム系の粒状性におよぼす影響. 日放技学誌, **43**(12), 1721-1727, (1987).
- 11) Doi K, Holje G, Sandrik JM, et al: MTF's and Wiener spectra of radiographic screen-film systems. HHS Publication, FDA 82-8187, 1, (1982).