

電子ビーム雑音パラメーターの測定

齋藤成文・藤井陽一

雑音の少ない進行波管をつくるための基礎的なデータをうる目的で、この雑音特性をきめる“雑音パラメーター”を測定した。初めに、この雑音パラメーターの意義と性質について述べ、つぎに、測定の方法を簡単にのべている。雑音特性は、とくに、電子銃部の状態でおおきく変わるので、これを、ウェネルト電圧、陽極電圧、陰極温度などを変えてはかり、いろいろの興味のある現象を発見した

1. はじめに

マイクロ波を通信やそのほかの活動に応用することが発展してきたので、この領域での受信機の感度を上げるために、内部雑音の少ない前置増幅器が必要になっている。メーザーやパラメトリック増幅器はこの必要にこたえるものだが、進行波管は、その広帯域性の点から非常に重要な低雑音増幅器である²⁾。進行波の雑音を少なくすることは、アメリカを中心にしてとても成功し、数 dB の雑音指数のものができた³⁾。

理論的にも、進行波管のように、電子ビームとマイクロ波回路との相互作用で増幅を行なうものでは、電子ビームのなかにある雑音をへらすことが重要なので、その研究が行なわれた結果、電子ビームの雑音の原因は、根本的に陰極の付近の、ビームがまだ十分に陽極に加速されない領域にあることがわかった²⁾。そこで、この雑音成分を直接に測定して、理論の結果と比較したり、もっとも適当な、陰極および陽極の構造をきめたりすることが要求される。測定する対象としては、ハウスの雑音パラメーターというものをえらぶ。電子ビームのなかの雑音は、電子ビームをつくっている電子の速度のばらつきと電流のばらつきと、この二つの成分との間の相関関係との各要素がある。これらのうち、実際に進行波などの雑音指数をきめるものとして重要なものは、ハウスの雑音パラメーター、 S と I である。

これらのパラメーターはつぎのような物理的意味をもっている。 S は雑音の速度成分と、電流成分の絶対値の積で、雑音の大きさを、 I は速度成分と電流成分とではこばれる実の電力、したがって I/S のかたちになると、両成分間の相関係数をあらわす。この二つのパラメーターは、雑音指数に対して、

$$NF=1+2\pi(S-I)/kT. \quad (1)$$

の関係にある。

いままでにも、RCA, BTL の研究者たちによって電子ビームの雑音について、いろいろの測定が行なわれている^{2), 3)}。その結果、たとえば、“カリ効果⁷⁾”のような現象と、その雑音パラメーターの上でのあらわれかた

がわかった。(これは、陰極のすぐ横にある電極にふつうは負のところ、正の電圧をかけたとき、雑音指数がよくなるという現象である)。これらの測定では、おもに、パラメーター S と雑音指数との間の関係を調べていて、 I の測定は、むつかしかったのだが、齋藤¹⁾が発案した選択性ビーム結合器をつかって、この測定が確実にできるようになった。

また、いままでの測定では、おもに、真空装置の中へ入れて、真空にポンプでひきながら測定を行なっていたので、測定に非常に大きな努力を要し、多数のデータをとることが困難だった。それが、ここの測定のやりかたでは、ふうじきりにした、ふつうの進行波管についても測定できるようになった。この方法は、非常に多くのデータがとれるだけでなく、実際に使用され、雑音指数のわかっている進行波管についても測定できるという利点もある。

2. 電子ビームの雑音

ハウス¹⁾などによって、進行波管でつかっているような、電子ビームの縦なみは、二つの基本モード“速いなみ”と“遅いなみ”をもっていることがわかった。これらは、それぞれ正、負のエネルギーをはこんでいる。進行波管などは、これらのなみと、ヘリックスなどのマイクロ波回路の相互作用を利用しているわけである。電子ビームの雑音には、いろいろな原因によるものがあるわけだが、そのうちでもっとも基本的なものとして、電子の速度のばらつきと、電子の数のばらつき(ショット雑音)の二つがあり、これらも、速いなみ、遅いなみとなって電子ビーム中を伝ばんしてゆくわけである。

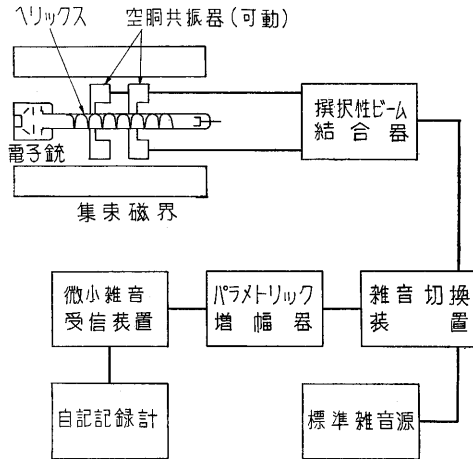
一番重要な問題は、この二つの基本的な雑音がどこからきて、どうすれば減らせるかを調べることである。この知識は、まだとても足りないが、速度が、陰極温度のマクスウェル分布、電子の数が完全にランダムとすると、雑音指数は約 6 dB になる勘定だ。実際は、この値とは一致しないので、陰極や、その近所での電子放出の機構は、もっと複雑なのではないかと思われる。

これを例証する一つの計算として、ジークマン⁹⁾とそ

のグループが、電子ビームを低速ではしらせているときに、 S が減って、 I がふえることをみつけた。またカーリーなど⁷⁾は、陰極のまわりにある電極に正の電圧をかけて、陰極のへりだけから電子をとりだすようにしたとき、雑音が下がることをみつけた。

これらの結果から、低速度域で電子ビームをゆっくりはしらせたり⁴⁾、あるいは、特にへりから電子を放射させたりした電子銃が作られている。

このような現象を理論的に解析するのは、非常にむづかしい。この解析法は、主にいろいろな理想化されたモデルについて行なっているもので、実際の陰極からの電子放射のプロセスを理解できるまでにはなっていない。特に、速度の分布と、非線型の方程式を考えなければならないことが、この困難さをましている。最近は、これを統計力学的な取扱いをして解析し、断熱膨張という雑音低減の機構が考えられている⁸⁾。



第1図 測定装置

3. はかりかた

第1図に、おおざっぱな測定回路を書いている。被測定進行波管の電子ビームの速度は、増幅に使うときの値よりも倍ちかく速くして、ヘリックスとの結合がなくなるようにしている。ガラス管は、0.01 mm 以内に、5.22 mm の外径を整形して、その上からリエントラントがたの測定用空洞共振器を通す。

S をはかるときは、モーターで、この空洞をビームぞいに動かして、雑音の定在波形をとる。 I/S をはかるときは、電子ビームの速いなみと遅いなみの位相速度が違うので、その差を利用して、移相器とハイブリッドを使った“選択性ビーム結合器”で速いなみか、遅いなみを取りだし、この値から、

$$I = \text{速いなみの大きさ} - \text{遅いなみの大きさ} \quad (1)$$

の式で計算して出す。

それ以後は、ラジオメーターという、微小な雑音等を

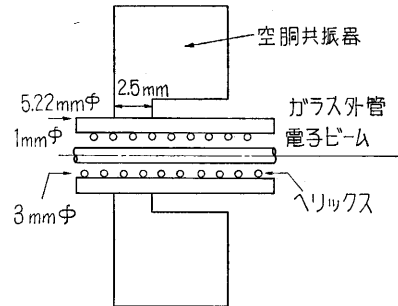
はかる受信機なのだが、この感度は ΔT は、受信機の雑音 T が小さいほどよくなるので、

$$\Delta T \sim T / (\tau B)^{1/2} \quad (2)$$

(ただし、 τ は検出器とき定数、 B は受信機帯域幅) よく低雑音受信機に使われる、ダイオードのパラメトリック増幅器をつかって、約 1000°K の雑音、したがって $\tau=10$ 秒、 $B=10$ Mc なので、0.1°K の雑音をはかれるわけだ。電子ビームと、空洞との間には、約 30 dB の結合損があるので、SWR=10 dB のときなら、300°K=3 dB の雑音指数の進行波管まではかれるはずだが、いままで測定できた最低の値は、約 7 dB だった。

測定は 4000 Mc で行なっている。

この測定法は、つぎのようにして説明される。電子ビームの運動方程式とマクスウェルの方程式から、一定速度で走っている電子ビームのなかには、二つの基本のモードがあることがわかる。この位相速度が、 $\beta_0 - \beta_a$ 、 $\beta_0 + \beta_a$ (ただし、 $\beta_0 = \omega/v_0$ 、 $\beta_a = \omega_a/v_0$ 、 v_0 は電子ビーム直流速度、 ω_a は空間電荷波の固有振動数、 ω は測定周



第2図 雑音とりだし部

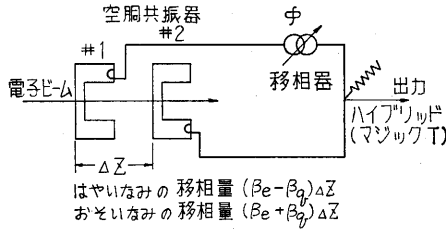
波数) なので、それぞれ、速いなみ、遅いなみといわれる。電子ビームの、速度分、電流分は、この二つのなみであらわされるので、これによって、定在波がたつ。電子ビームに空洞共振器を結合させると、空洞共振器は、その電流分と結合し、その結合係数は、 $M_0^2 M_G^2$ であらわされる。 M_0 は、電子の空洞共振器の間隙を通過する走行角 θ によって、

$$M_0 = \sin(\theta/2) / (\theta/2) \quad (3)$$

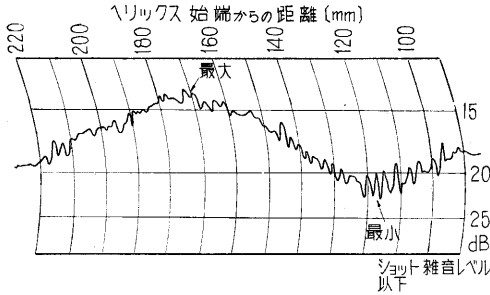
と書れ、 M_G は、電子ビームと、空腔間隙との間の距離によってきまる係数で、およそ、

$$M_G = I_0(\gamma a) / I_0(\gamma c) \quad (4)$$

の程度で、 γ は横方向伝ばん定数、 a 、 c は電子ビーム、空腔間隙の内径、 I_0 は変形ベッセル関数である。空腔間隙は、ヘリックス上を伝ばんするなみと、相互作用をなくすために、ヘリックス上のなみに対しては、この係数が、0 になって結合しないようにしてある。そのため、間隙は 2.5 mm とひろいので、 M_0 は小さくなり、また、 M_G の方も、 $c/a=5.22\text{mm}/1\text{mm}$ とかなりはなれているので小さくなる。合計して、約 -30 dB になる。 S をはかるときは、この電流定在波の最大値と最小値を



第 3 図 選択性ビーム結合器の原理



第 4 図 雑音定在波形
K 1-4 ビーム電流 1000 μ A

測定して、

$$S = (Z_0/4\pi) \cdot (\bar{i}_{\max}^2 \cdot \bar{i}_{\min}^2)^{1/2} \quad (5)$$

から計算する。ただし、 Z_0 は電子ビームのを伝送線路と考えたときの特性インピーダンスである。

また、 Π/S をはかるには、第 3 図のような回路を使って、二つの空胴からのなみの和をとる。このとき、移相器を、はしくないなみの成分を打ち消すように、速いなみだけほしいときは $\varphi_f = (\beta_e + \beta_q)\Delta z$ 、遅いなみときは $\varphi_s = (\beta_e - \beta_q)\Delta z$ にすれば、それぞれの成分の大きさ、 A_{11} 、 A_{22} がわかる。それから、電流定在波比 ρ がわかると、

$$\frac{\Pi}{S} = \frac{(\rho^2 + 1)}{2\rho} \cdot \frac{A_{11} - A_{22}}{A_{11} + A_{22}} \quad (6)$$

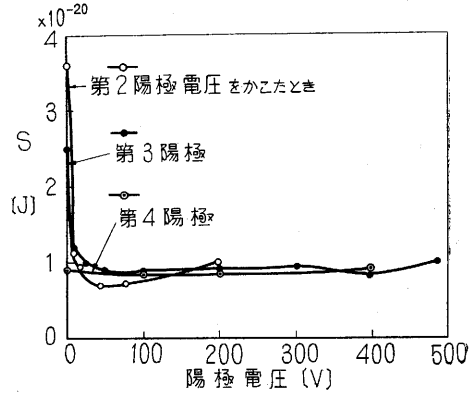
から計算できる。

S のときは、雑音電力の絶対値を求める必要があるがこれは、電流を数 μ A 以下にしたときの雑音電力を標準にして求めた。

電子ビームの加速電圧は、増幅管として使用するときより高く (1000V) して、ヘリックスと結合するのをふせぐ。低雑音管では、ビーム電流は少なくして使うことが多いので、実験は、100 と 200 μ A を中心にして行なった。

4. 実験の結果

以上のようにして、主に、陰極半径が 1 mm の低雑音用の進行波管について、実験をした。このたまは、第 2 図のような寸法をもっている。電子銃部は、3 枚陽極と、5 枚陽極の二種がある。



第 5 図 陰極に近い陽極電圧ほど S を大きくかえる

この実験は、つぎのような項目で行なった。

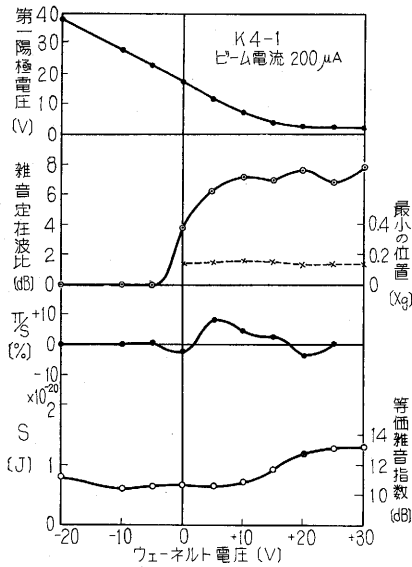
- i) 陽極電圧による変化
- ii) ウェーネルト電極による変化
- iii) 陰極温度による変化
- iv) 集束磁界による変化

第 1 表 測定したたまの種類

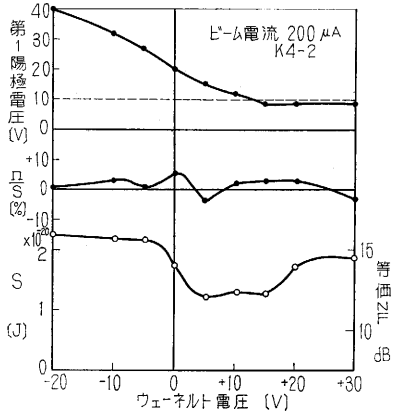
3 枚 陽極	K 1-1, K 1-4
5 枚 陽極	K 4-1, K 4-2

i) は、各種の陽極電圧をかえて、そのときの雑音パラメーターを測定する。このたまは、陽極数が、3 と 5 のものがあって、初めは 3 枚のものを使っていたが、これは第 2 陽極と、第 3 陽極の間の電位差が大きくなりすぎ、電子レンズ効果⁵⁾などをおこすので、そのあいだに、もう 2 枚陽極を挿入して、5 枚の陽極をもったものを作った。電子ビームの線型理論によると、電子ビームの雑音分が小信号とみなされるかぎりでは、陽極電圧を変化して、電位勾配をかえても、雑音パラメーターの S 、および Π は不変量である。しかし、第 5 図にみられるとおりに、陰極に近接した陽極ほど、電圧変化に対して、雑音パラメーターが変化していることがわかる。この変化は、とくに、陽極電圧が 0 V に近いところで、 S が急昇することで特徴づけられる。これらの場合、第 1 陽極電圧は、ビーム電流を一定に保つようにかえている。この S の上昇は、陽極が陰極に近いほど、その電極の電圧の変化が、ただ、ビームの線型変換器のパラメーターをかえるだけではなくて、第 1 陽極電圧と同じように、ビーム電流を制御する役目を、少しずつもっているからだと思われる。

また第 4 図のように、雑音電流分の定在波形から、ある基準点、たとえば、ヘリックス始端でのインピーダンスを、導波管の回路のように、求めることができる。その結果、定在波比は、ウェーネルト電圧や陽極電圧によって、0~10 dB のあいだでかわるが、位相、つまり、最小点の位置は、ビーム電流によって一定にきまっています。



第6図 通常のウェーネルト電圧対雑音パラメーター特性



第7図 第2陽極電圧が低いとき、ウェーネルト電圧が負で、 S が増大する

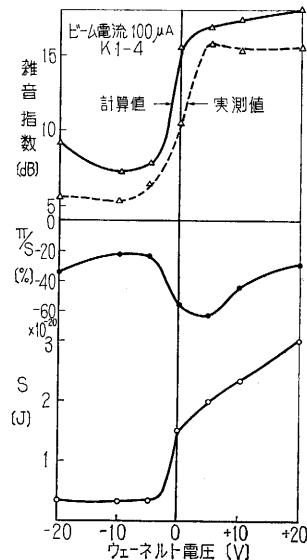
まって、なにをかえてもかわらない。

ii) の、ウェーネルト電極の電圧をかえてなかった結果は、特に“カーリー効果”を例証すべきものとして興味がある。測定は、第2陽極以上の電圧を一定にして、第1陽極電圧を、ビーム電流が一定になるようにきめ、ウェーネルト電圧をパラメーターにして、雑音パラメーターを測定する。この結果は第6~8図に示すとおりである。普通の電極配置では、第6図のようにウェーネルト電圧が0Vの付近で、雑音パラメーター S は最小値を示し、正のウェーネルト電圧で上昇し、また、負では不変か少し上昇きみである。このとき、 II/S は、だいたい、わずか正(数%)の値を示し、かわらないので、第1式から計算される雑音指数の計算値も0V付近で最少値を示し、約10dBになる。

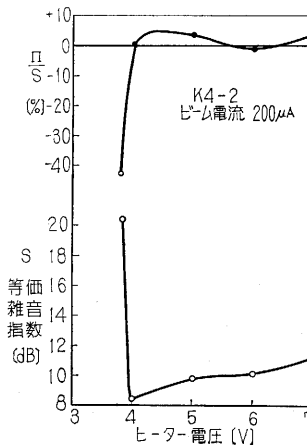
以上が通常のであるが、特別の場合には、異常な

ちを示すことがある。たとえば、第7図のように、第2陽極電圧が、第1陽極より低いところでは、ウェーネルト電圧が負でも S は増大する。もう一つおもしろい例としては、3陽極のため、カソード温度が高いとき(ヒーター6V)、ウェーネルト電圧が、0から負になると、 S が急に減り、また、 II/S は、その0V付近で、負相関を示すことである。第8図にヘリックス・カップラーを使って、増幅管として働かせたときのデータを付記してある。

iii) の陰極温度によっておこる変化は、第9図に示す。



第8図 陰極温度が高いとき(ヒーター6V)雑音パラメーターの減少。雑音指数実測値を比較する

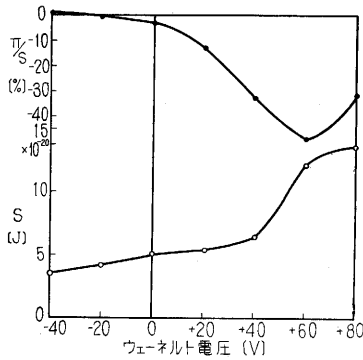


第9図 陰極温度をかえたときの雑音パラメーター; 温度制限になると、 S と負相関が急増する

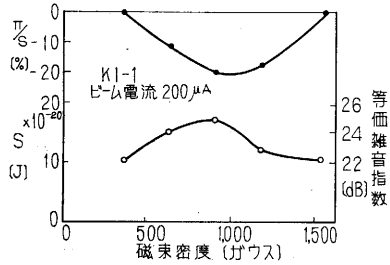
す。 S は、温度が上がるのに比例して増加し、また、温度が下がって、陰極からの熱電子放射が足りなくなる温度制限域に達すると、急に上昇して、20dB相当以上になる。

最低点はこの直前にある。また温度制限域になると、 II/S が、強度の負相関を示す。この、ウェーネルト電圧に対する関係が第10図である。ウェーネルト電圧が正になってゆくと、 II/S は0から、負のほうにどんどん増加してゆく。温度制限域でないところでは、ウェーネルト電圧に対する関係は、温度を下げてゆくと、全体のレベルが下がるだけでとくに異状をみせない。

iv) の磁界の変化は、普通の状態ではほとんど変化はない。しかし、前に書いた温度制限域になると、約1000 Gauss付近に、 $S \cdot II/S$ のピークがでてくる(第11図)。また、温度の高いところで、磁界を弱くしてゆくと II/S が負の相関になることがある。



第 10 図 温度制限域で、ウェーネルト電圧をあげると負の相関があらわれる



第 11 図 温度制限のときは、集束磁界の強さで、S や負相関にやまがでる

5. まとめと今後の問題

こんなふうに、電子ビームの雑音パラメーターをはかって、いままでの結果を例証したり、新しいことをみつめたりできた。

a) 陽極電圧による変化をはかり、第 2 陽極はインピーダンス変換素子としてよりも、陰極付近の非線型部分に属すること；電圧はなるべくゆるやかに変化させたほうがいいこと。

b) ウェーネルト電極による“カーリー効果”といったものは、特に、はっきりあらわれないこと（これには、全体の雑音レベルが、10 dB 程度とまだ大きいことが影響しているだろう）。

c) 温度制限域で、負の相関を示す範囲があること。

d) また、そのほかにも、磁界、陰極温度などによる奇妙な現象で、解明を要するものなどを、知ることができた。

しかし、これらの実験では、つぎのような点で、発展させる必要がある。

i) 測定したたが、雑音指数 10 dB 級のものなので、もっとよいものをはかることと、測定系の精度を高めて、3 dB 級のたまものはかれるようにすること。

ii) ここで実験はすべて、電極配置は一定なので、これをかえてみることに。

iii) いままでは、電子ビームの横方向の電流密度分布は未知だったが、これらの実験から、それが重要な役目をもっていることが予想されるので、これをも測定できるようにすること、などがあげられる。

これらのことをとおして、進行波管の雑音指数をひく

くできる設計法の基準をうることを、大きな目的にしている。

感謝のことば

有益なご討論をたまわっている当所浜崎助教授および研究室の方々、また試作管をお願いした日本電気株式会社、測定器にご協力下さった島田理化学工業の皆さまに感謝する。

(1962 年 5 月 16 日受理)

文 献

- 1) S. Saito; "New Method of Measuring the Noise Parameters of an Electron Beam"; Trans. IRE; vol. ED-5, No. 4; pp. 264-275; Oct., 1958
- 2) L.D. Smullin, and H.A. Haus; "Noise in Electron Devices"; MIT Press and John Wiley & Sons, Inc, New York; 1959
- 3) E.W. Kinamann, and M. Magid; "Very Low Noise Traveling-Wave Tube Amplifier"; Proc. IRE; vol. 46; No. 5; pp. 861-867; May, 1958,
- 4) A.W. Shaw, A.E. Siegman, and D.A. Watkins; "Reduction of Electron Beam Noisiness by Means of a Low-Potential Drift Region"; Proc. IRE; vol. 47, No. 2; pp. 334-335; Feb., 1960.
- 5) R.C. Knechtli; "Effect of Electron Lenses on Beam Noise," Trans. IRE; vol. ED-5, No. 2; pp. 84-88; Apr., 1958
- 6) A. Zacharias and L.D. Smullin; "Noise Reduction in Electron Beams", Trans. IRE; vol. ED-7, No 3; pp. 172-173; July, 1960
- 7) M.R. Currie and D.C. Foster; "New Mechanism of Noise Reduction in Electron Beams," JAP; vol. 30, No. 1; pp. 94-103; Jan., 1959
- 8) G. Hok; "Conservation Principles in Multivelocity Electron Flow," Trans. IRE; vol. ED-8, No. 6; pp. 452-461; Nov., 1961
- 9) A.E. Siegman, D.A. Watkins, and H.C. Hsieh, "Density Function Calculation of Noise Propagation on an Accelerated Multivelocity Electron Flow," JAP; vol. 28, No. 10; pp. 1138-1148; Oct., 1957

