

資料7：FM放送のマルチパスひずみの解析

FM 放送のマルチパスひずみの解析

NHK 総合技術研究所 大 原 光 雄

モノ放送およびステレオ放送のマルチパスひずみについて、高速フーリエ変換 (FFT) をとり入れた計算プログラムを開発して計算機による広範な解析を行い、DU 比、遅延時間、位相差、変調周波数、変調度などのマルチパスひずみに影響を与える諸条件とひずみの関係を明らかにして、複雑な現象を解明することができた。さらに、解析結果をもとに受信上の留意すべき点について検討した。

1. ま え が き

山や建物などで反射してきた反射波が直接波に加わった放送電波を受信すると、テレビでは画面にゴーストがあらわれるが、FM 放送では、いわゆるマルチパスひずみとなって音質劣化の主な原因となる。

最近、都市における高層建造物の増加にともない、マルチパスひずみはゴーストとともに受信上の大きな問題となってきている。ゴーストについては、すでに現象の解明も進み、さらに対策も種々検討されている。しかし、マルチパスひずみについては、これまでにひずみの計算式は明らかにされたもの^{1)~4)}、大幅な省略算によっても計算が容易でなく、一部の条件についてのみ計算が行われたが、その結果も実験と充分に一致せず、したがって、現象について、その傾向が明らかにされないままの状態にあった。

本文では、まず、現象についてその傾向を明らかにするためには、DU 比^{*}、直接波に対する反射波の遅延時間、直接波と反射波の位相差、変調周波数、変調度などの条件をいろいろ変えてひずみを正確に計算し、ひずみとの関係を明らかにする必要があることを指摘した。

次に、この目的で FFT^{**} をとり入れた計算プログラムを開発して、ひずみの計算式から直接数値計算により任意の条件で正確かつ容易にひずみの計算を行うことを可能とし、計算機による広範な解析を行って上記の条件とひずみの関係を明らかにし、複雑な現象を総合的に把

握することができた。さらに、これらの結果をもとに受信上の留意すべき点について検討したので報告する。

2. ひずみの計算

直接波の振幅を E_1 、反射波の振幅を E_2 、遅延時間を τ 、搬送波の角周波数を ω 、変調周波数を f_m とする。

モノ放送の場合、周波数偏移を D として、 $D \cos 2\pi f_m t$ で変調された直接波と反射波の合成波、

$$E_1 \sin\left(\omega t + \frac{D}{f_m} \sin 2\pi f_m t\right) + E_2 \sin\left(\omega(t-\tau) + \frac{D}{f_m} \sin 2\pi f_m(t-\tau)\right)$$

から FM 復調により、

$$D \cos 2\pi f_m t + \frac{E_2}{E_1} \cos\left\{2\frac{D}{f_m} \sin \pi f_m \tau\right\} \cdot \frac{\cos(2\pi f_m t - \pi f_m \tau) + \omega\tau}{\cos(2\pi f_m t - \pi f_m \tau) + \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2} + 2D \sin \pi f_m \tau \sin(2\pi f_m t - \pi f_m \tau)$$

が得られる。第 1 項は変調成分で、第 2 項がひずみ成分で、 E_2/E_1 、 τ 、 $\omega\tau$ 、 f_m 、 D の関数となっており、換言すれば、DU 比、遅延時間、位相差、変調周波数、変調度の複雑な関数である。

ステレオ放送の場合、副搬送波周波数を f_s 、パイロット信号周波数を f_p とし、主チャンネル信号、副チャンネル信号およびパイロット信号の周波数偏移を、それぞれ、 D_m 、 D_s 、 D_p とすると、

$$D_m \cos 2\pi f_m t + D_s \cos 2\pi f_m t \sin 2\pi f_s t + D_p \sin 2\pi f_p t$$

¹⁾ "Analysis of Distortion Caused by Multipath Transmission in Frequency-Modulation Sound Broadcasting" by Mitsuo Ohara (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)

^{*} Desired wave (希望波) と Undesired wave (妨害波) の強度比で、ここでは直接波が希望波に、反射波が妨害波にあたる。

^{**} Fast Fourier Transform の略で、周波数分析などフーリエ変換を行う際に要するばう大な計算量を軽減するための計算手法。

の変調入力に対し、直接波と反射波の合成波の FM 復調出力（コンポジット信号出力）のひずみ成分は、

$$\frac{E_2 \cos \theta + \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2}{1 + 2\frac{E_2}{E_1} \cos \theta + \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2} \cdot \alpha$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} \theta &= 2\frac{D_m}{f_m} \sin \pi f_m \tau \cos (2\pi f_m t - \pi f_m \tau) \\ &+ \frac{D_s}{f_s - f_m} \sin \pi (f_s - f_m) \tau \sin \{2\pi (f_s - f_m) t - \pi (f_s - f_m) \tau\} \\ &- \pi (f_s - f_m) \tau + \frac{D_s}{f_s + f_m} \sin \pi (f_s + f_m) \tau \\ &\cdot \sin \{2\pi (f_s + f_m) t - \pi (f_s + f_m) \tau\} \\ &+ 2\frac{D_p}{f_p} \sin \pi f_p \tau \sin (2\pi f_p t - \pi f_p \tau) + \omega \tau \\ \alpha &= 2D_m \sin \pi f_m \tau \sin (2\pi f_m t - \pi f_m \tau) \\ &- D_s \sin \pi (f_s - f_m) \tau \cos \{2\pi (f_s - f_m) t - \pi (f_s - f_m) \tau\} \\ &- \pi (f_s - f_m) \tau - D_s \sin \pi (f_s + f_m) \tau \\ &\cdot \cos \{2\pi (f_s + f_m) t - \pi (f_s + f_m) \tau\} \\ &- 2D_p \sin \pi f_p \tau \cos (2\pi f_p t - \pi f_p \tau) \end{aligned}$$

このひずみ成分も、DU 比、遅延時間、位相差、変調周波数、変調度の関数で、モノ放送の場合よりもさらに複雑な関数である。

現象の解明のためには、上記の条件をいろいろ変えて正確に計算し、ひずみとの関係を明らかにする必要があるが、ひずみ成分について、ほう大なスペクトル分析の計算を伴う。手計算による従来の方法では困難であり FFT をとり入れて計算機処理することにより可能となった。

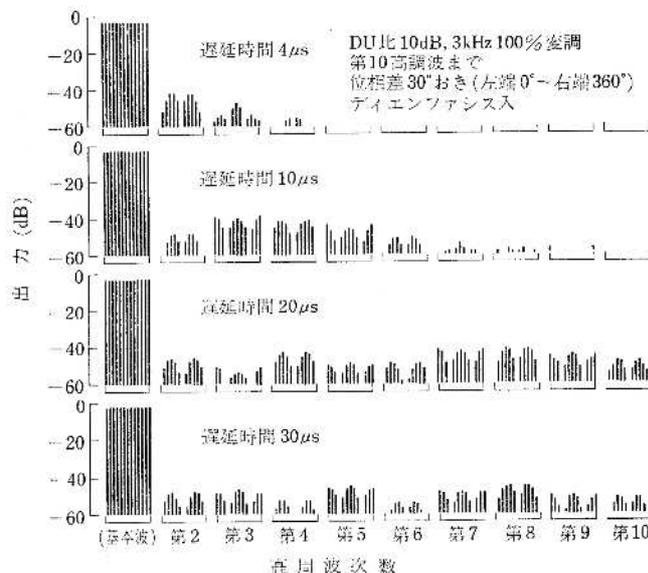


図 1 復調出力のスペクトル分布 (モノ)
Spectrum distribution of demodulated output. (monophony)

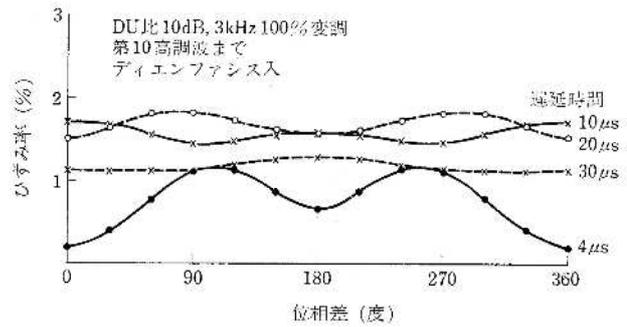


図 2 位相差とひずみ率 (モノ)
Phase difference versus distortion. (monophony)

3. 解析結果

マルチパスひずみに影響を与える諸条件を幅広く変えて解析を行い、多くの結果が得られたが、この中のいくつかを例示しつつ、明らかになったマルチパスひずみの主な現象について述べる。

3.1 モノ放送

図 1 に、DU 比 10 dB、3 kHz 100% 変調* で、位相差を 30° おきとし、遅延時間を変えた場合の復調出力のスペクトル分布を示す。この場合、音声周波数の 15 kHz バンド内には第 5 高調波までであるが、参考のため第 10 高調波まで示してある。遅延時間が長くなるにつれて高次の高調波までスペクトルが分布する。スペクトルは 180° の位相差を中心として対称である。また 0°, 180°, 360° では偶数次高調波のレベルは小、奇数次高調波のレベルは大で、90° および 270° ではこの反対の傾向にある。これらの傾向は他の条件においても同様である。

図 2 に、図 1 と同一条件での位相差とひずみ率の関係を示す。ひずみ率が最大および最小となる位相差は遅延時間によって異なる。なお、この位相差は遅延時間のほか、変調周波数、変調度、DU 比などの他の条件によっても変り、特定の角度とはならない。遅延時間が短い場合にはひずみ率の最大値と最小値の開きが大きい。この傾向は他の条件についてもみられる。

図 3 は遅延時間とひずみ率最大値の関係の例である。ひずみ率最大値は、変調周波数によっても異なるが、遅延時間 数 μs ~ 10 μs 程度までは遅延時間にほぼ比例して増加し、それ以上の遅延時間では、変調周波数が高くなると波打つが、変調周波数にあまり関係なくほぼ同じ値となる。この傾向は他の DU 比においてもほぼ同様である。

位相差とひずみ率の関係および変調周波数とひずみ率の関係について、計算結果と遅延素子を用いた

* 周波数偏移が FM 放送において規定されている最大値 (±75 kHz) となる入力レベルで変調することを用いる。

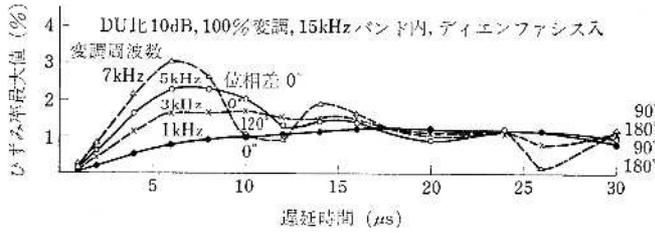


図 3 遅延時間とひずみ率最大値 (モノ)
Delay time versus maximum distortion. (monophony)

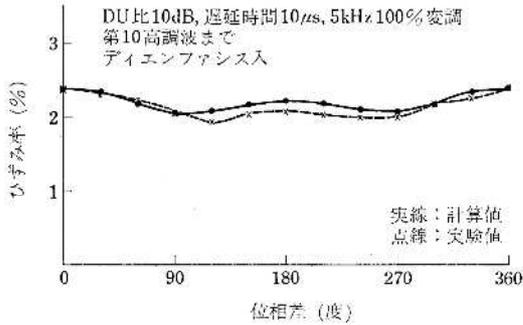


図 4 位相差とひずみ率 (モノ)
Phase difference versus distortion. (monophony)

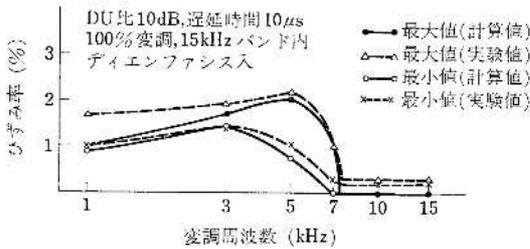


図 5 変調周波数とひずみ率 (モノ)
Modulation frequency versus distortion. (monophony)

室内実験結果との対応を求めた例を図 4 と図 5 に示す。

図 6 は DU 比とひずみ率の関係の例である。参考のためにディエンファシスを切った場合の計算も行った。遅延時間が短い場合には、ディエンファシスの入切によってひずみ率はほとんど変わらないが、これは、ひずみ成分として比較的低下の高調波が強勢であるからである。遅延時間が長い場合には、比較的高次の高調波が強勢で、入切によってひずみ率に大きな差がある。また、DU 比がほぼ 10 dB よりも大きければ DU 比とひずみ率はほぼ比例の関係にある。これらは他の変調周波数の場合にもいえる。

図 7 は変調度とひずみ率最大値の関係の例である。遅延時間が短い場合には、変調度を深くするにつれてひずみ率最大値は大きくなり、ディエンファシスの入切によってあまり差がない。遅延時間が長く、たとえば 30 μ s 程度になると、変調度が浅いうちにひずみ率最大値は最大となってしまい、変調度を深くするとディエンファシス切の場合はほとんど一定であるが、入の場合は小さく

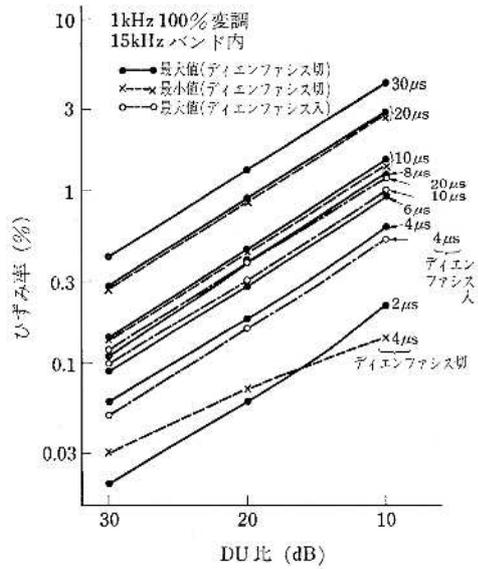


図 6 DU 比とひずみ率 (モノ)
DU ratio versus distortion. (monophony)

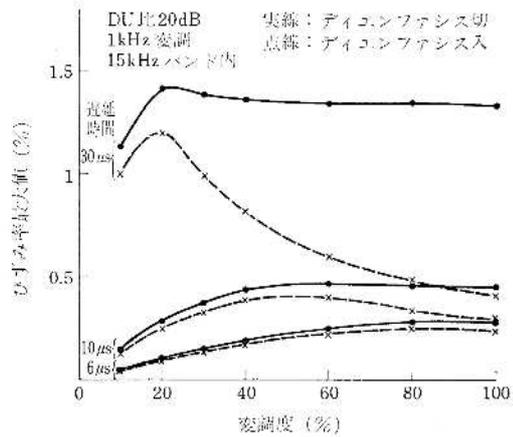


図 7 変調度とひずみ率最大値 (モノ)
Percentage of modulation versus maximum distortion. (monophony)

なる。なお、この傾向は DU 比によってはあまり変わらないが、遅延時間が長い場合の変化は変調周波数により異なる。

3.2 ステレオ放送

図 8 は位相差とひずみ率の関係の例である。モノ放送の場合と同様に、ひずみ率は 180° の位相差を中心として対称となる。ひずみ率が最大および最小となる位相差は変調周波数によって異なる。なお、この位相差は変調周波数のほか、他の条件によっても変り、特定の角度とはならない。

図 9 に、位相差とひずみ率の関係について、計算結果と室内実験結果との対応を求めた例を示す。

図 10 は復調出力のスペクトル分布の例である。この場合の変調入力のコモジット信号は、15, 19, 23 およ

FM 放送のマルチパスひずみの解析 □ 論文・資料

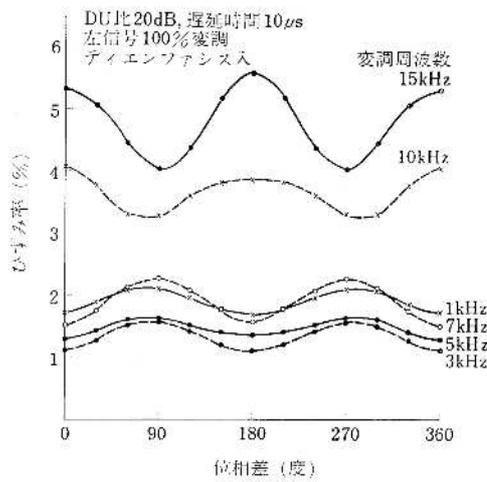


図 8 位相差とひずみ率 (ステレオ)
Phase difference versus distortion. (stereophony)

び 53 kHz の 4 つのスペクトルから成る信号であるが、これらの周波数の高調波出力と相互のビート出力がひずみ成分として発生し、これらのひずみ成分が上記の 4 つの周波数成分に加わったものが FM 復調出力、つまりコンポジット信号出力として得られ、これをステレオ復調して左信号出力と右信号出力が得られる。この例では位相差が 180° でひずみ率が最大で、90° で最小となるが、これらの位相差における 53 kHz までのコンポジット信号出力のスペクトル分布を示す。左信号出力のスペ

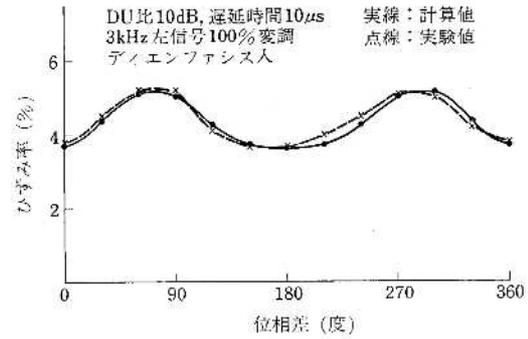


図 9 位相差とひずみ率 (ステレオ)
Phase difference versus distortion. (stereophony)

クトル分布としては、変調周波数 15 kHz の出力のほか、図示の他の周波数成分が発生し、左信号出力のひずみ成分となる。なお、変調周波数が低い場合には、その周波数の高調波で 15 kHz バンド内の周波数成分に他の周波数の成分が合わさったものがひずみ成分として発生する。右信号出力は漏話であるが、変調周波数で左信号出力よりもかなりレベルの低い出力のほか、他の周波数で左信号出力とほぼ同じ大きさの出力が発生する。これら左右信号のスペクトルも 180° の位相差を中心として対称である。

図 11 は遅延時間とひずみ率の関係の例で、一部の遅延時間での実験結果も示す。遅延時間に対するひずみ率の変化は変調周波数によって異なるが、図 12 に遅延時

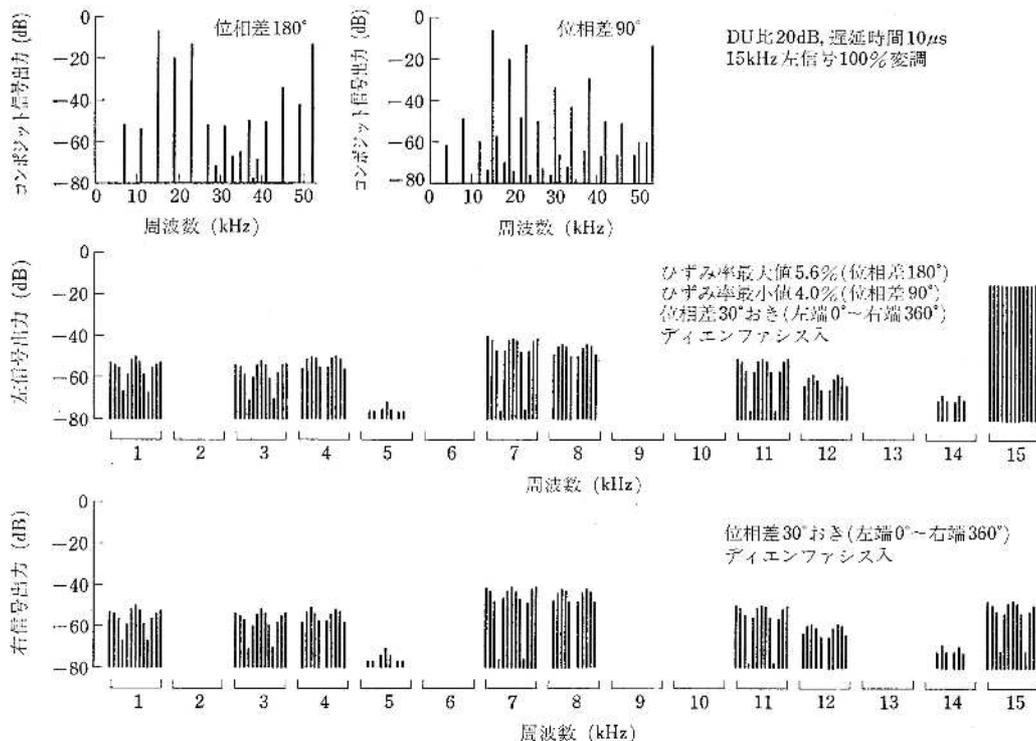


図 10 復調出力のスペクトル分布 (ステレオ)
Spectrum distribution of demodulated output. (stereophony)

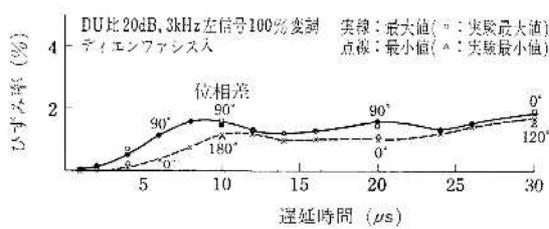


図 11 遅延時間とひずみ率 (ステレオ)
Delay time versus distortion. (stereophony)

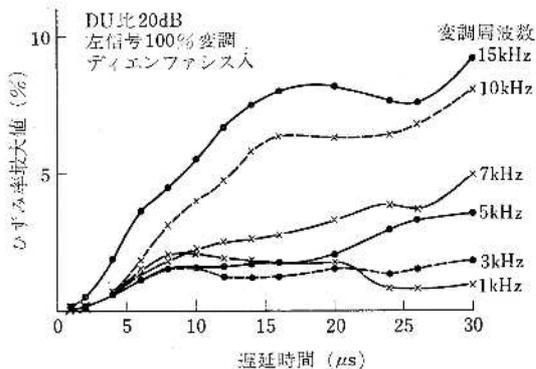


図 12 遅延時間とひずみ率最大値 (ステレオ)
Delay time versus maximum distortion. (stereophony)

間に対するひずみ率最大値の変化の例を変調周波数をパラメーターとして示す。ひずみ率最大値は、遅延時間が短い場合には全体的に小さいが、遅延時間が長くなると変調周波数によっても異なるが遅延時間 10 μ s 程度までは遅延時間にはほぼ比例して増加する。変調周波数 15kHz でのひずみ率最大値は、どの遅延時間においても他の変調周波数での値より大きく、1~3kHz 程度での値の数倍に達する。なお、このことは他の DU 比についてもいえる。

図 13 は DU 比とひずみ率の関係の例である。モノ放送の場合と同様に、DU 比がほぼ 10 dB よりも大きければ DU 比とひずみ率はほぼ比例関係にある。遅延時間が短い場合にはひずみ率の最大値と最小値の開きが

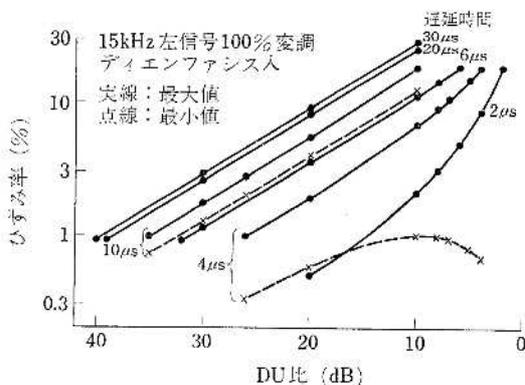


図 13 DU 比とひずみ率 (ステレオ)
DU ratio versus distortion. (stereophony)

大きく、DU 比が小さいほど開きは増大する。なお、これらの傾向は他の変調周波数での結果にもみられる。次に、図 13 と図 6 を比較すれば、ステレオ放送のひずみ率最大値がモノ放送の場合の何倍程度であるか把握できる。たとえば、遅延時間 20 μ s で DU 比 20 dB の場合、図 13 から約 8%、図 6 から約 0.4% と読みとれる。図 3 からモノ放送の場合に遅延時間 20 μ s 程度では変調周波数にかかわらず、ひずみ率最大値はほぼ一定の値であるので、1 kHz についての図 6 の結果をもってモノ放送のひずみ率最大値とみなすことができる。したがって、ステレオ放送のひずみ率最大値はモノ放送のひずみ率最大値とくらべると、DU 比を変えてもともに DU 比にほぼ比例するため、DU 比にあまり関係なく遅延時間 20 μ s で約 20 倍の値となる。遅延時間を 30 μ s として同様に比較すると 30 倍近い値となる。遅延時間が短い場合には上記ほどの倍率にはならないが、いずれにしてもステレオ放送ではモノ放送とくらべて相当大きな値となる。

図 14 はひずみ率最大値を一定の値に押えるために必要な DU 比が遅延時間に応じてどう変るかを図 13 の結果から求めたものである。所要 DU 比は、遅延時間 10 μ s 程度までは遅延時間にはほぼ比例して増加し、10 μ s 程度をこえると、ひずみ率最大値 3% に対しては 30 dB 近い値、10% に対しては 20 dB 近い値となるなど、大きな値となる。

図 15 は変調度とひずみ率の関係の例である。遅延時間が短い場合には、変調度を深くするにつれてひずみ率は大きくなる。遅延時間が長い場合には、浅い変調度でひずみ率が大きくなる。しかし、ひずみ成分の大きさは 100% 変調の場合よりも小さい。なお、遅延時間が長い場合のひずみ率の変化は変調周波数により異なるが、DU 比を変えてもカーブ全体の形はほぼ相似である。

図 16 に、図 8 と同一の条件での位相差と左右分離度の関係を示す。左右分離度は左信号出力の変調成分に対

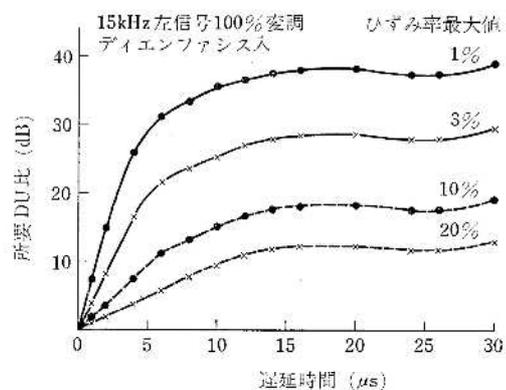


図 14 遅延時間と所要 DU 比 (ステレオ)
Delay time versus necessary DU ratio. (stereophony)

FM 放送のマルチパスひずみの解析 □ 論文・資料

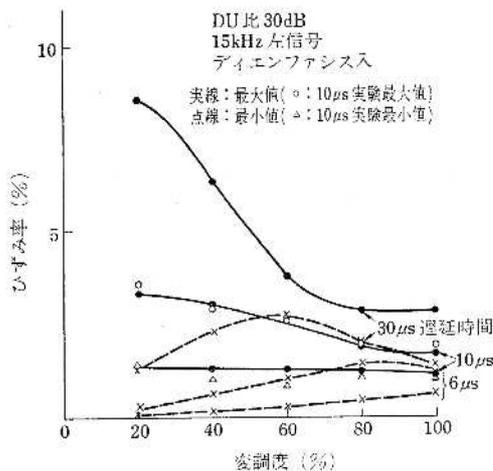


図 15 変調度とひずみ率 (ステレオ)
Percentage of modulation versus distortion.
(stereophony)

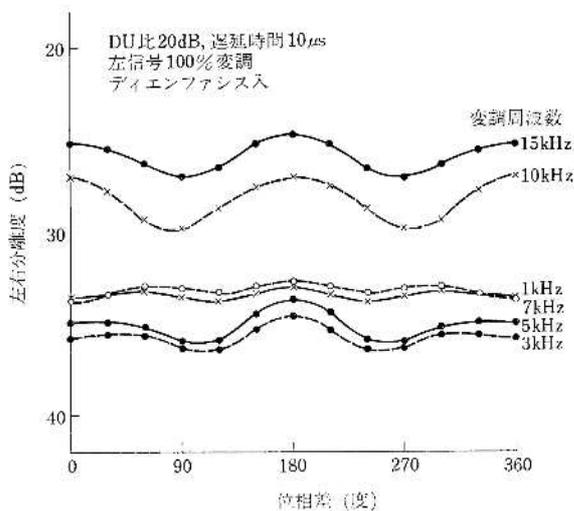


図 16 位相差と左右分離度の関係 (ステレオ)
Phase difference versus separation. (stereophony)

する右信号出力のデシベル値の絶対値で表わしてある。左右分離度も 180° の位相差を中心として対称となる。さらに、図 16 と図 8 を比較すると、左右分離度が最小および最大となる位相差は、ひずみ率が最大および最小となる位相差と、変調周波数が高い場合にはほぼ一致する。左右分離度の大きさはひずみ率をデシベルの絶対値で表わした値よりもわずかに小さい値である。なお、これらの傾向は他の条件においても同様に見られる。

4. 受信上の留意点

解析結果をもとに、マルチパスひずみを考慮した場合に、受信上の留意すべき主な点について検討すると、

(1) DU 比がほぼ 10 dB よりも大きいと、DU 比を改善すればそれにほぼ比例してひずみ率も改善されるので、簡便な室内アンテナなどを使用するよりも、でき

るだけ指向性のある専用アンテナを使用して受信機入力端での DU 比を改善して受信するとよい。

(2) 遅延時間が短い場合は DU 比が小さくない限りひずみはあまり問題とならない。10 μ s 程度まではひずみは遅延時間にほぼ比例して増加し、10 μ s 程度をこえると、高品質のステレオ受信のためには大きな DU 比を確保する必要がある。つまり、テレビ受信でブランキングゴーストとなる程度の長い遅延時間においては、ひずみが大きくなりやすいので、ゴースト対策と同様に特に DU 比に配慮すべきである。

(3) ステレオ放送ではモノ放送とくらべてひずみが相当大きく、また、高い周波数の音でひずみが大きくなる。ひずみの検知には、特にこの点に着目するとよい。

(4) 位相差が変動するとひずみ率も左右分離度も変るので、これらの測定には慎重な配慮が必要である。

5. む す び

諸条件とひずみの関係を明らかにして、マルチパスひずみについて総合的に解明することができ、これをもとに受信上の留意すべき点を述べた。本文で明らかにした解析結果は、アンテナ対策など今後のマルチパスひずみ対策の基礎資料となる。

おわりに、本研究を進めるにあたって、終始助言をいただいた当所 遠藤主任研究員、および、実験に協力いただいた当所 黒沼氏に深く感謝する。

(昭和 52 年 6 月 23 日受付)

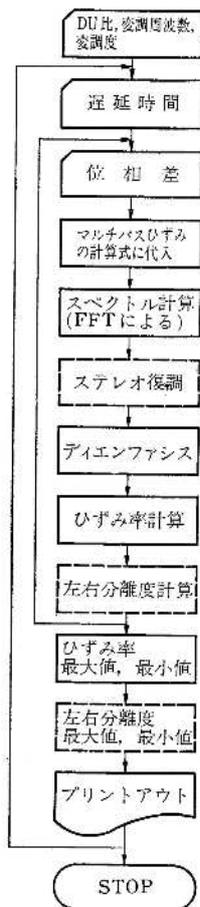
〔参 考 文 献〕

- 1) M. S. Corrington: Frequency-Modulation Distortion Caused by Multipath Transmission, Proc. IRE, **33**, Dec. (1945) 878-891
- 2) S. T. Meyers: Nonlinearity in Frequency-Modulation Radio Systems Due to Multipath Propagation, Proc. IRE, **34**, May (1946) 256-265
- 3) 高橋, 倉掛: VHF-FM 放送波の多重伝搬路による受信ひずみ, NHK 技術研究, **12**, 6 (1960) 27-37
- 4) 倉掛: FM ステレオ放送波の多重伝搬路によるひずみと漏話, 信学誌, **48**, 12 (1965) 2071-2077

〈付 録〉

マルチパスひずみの解析のために開発した計算プログラムの概要を計算のフローとして付・図 1 に示す。

まず、DU 比、変調周波数、変調度について任意の条件を指定し、次に計算すべき遅延時間を必要な分だけ指定し、さらに直接波と反射波の位相差を何度おきとして計算するかを指定する。なお、これらの指定はデータカードによる。これらの条件をマルチパスひずみの計算式に代入して FM 復調出力として時間領域のデータを得る。ひずみ率を計算するためには、これをフーリエ変換



点線内はステレオの場合

付・図 1 計算のフロー
Flow chart of calculation.

り周波数領域のデータにする。つまり、周波数分析によるスペクトルの計算を行う必要がある。通常のフーリエ変換による場合は、大型計算機をもってしても処理不能となる程度の計算量を要するので、計算時間の大幅な短縮のために FFT によりスペクトルを求める。ステレオ放送の場合、FM 復調出力はコンポジット信号出力であるので、ステレオ復調の計算を行って左信号と右信号出力に分離する。

次に、復調して得られた音声周波の信号出力に $50 \mu\text{s}$ のディエンファシスをかけ、ひずみ率を計算する。ステレオ放送の場合は左右分離度も計算する。指定した DU 比、変調周波数、変調度、遅延時間において、指定したとおりに何回か位相差をかえてこの計算をくり返し、ひずみ率の最大値と最小値を求める。ステレオ放送の場合は左右分離度の最大値と最小値も求める。以上求めたスペクトル分布、ひずみ率、左右分離度の計算結果をプリントアウトし、指定した順に遅延時間を変えて同様の操作をくり返す。

Abstracts

Sensitivity Differences between Central and Peripheral Regions of Retina Measured by Critical Flicker Frequency

by Tadahiko Fukuda

CFF (Critical Flicker Frequency) determinations were made at various retinal positions by using a fixation point to which the line of vision is fixed in the first test and by employing a moving target which led the line of vision in the second test.

It is inferred from the results of the tests that CFF in the periphery is higher than that in the fovea when the target size is larger than 2° , and that the variation of CFF according to the locality on the retina in the case where the target size is very small (less than $1/8^\circ$) depends basically upon the density distribution of cones and rods on the retina.

It is also pointed out that CFF is higher during eye movement than when the line of vision is fixed, especially when the target size is large and in the periphery of the retina.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 32, No. 3 (1978) 210~216

Analysis of Correlation between Beam Discharge Lag and Scanning Electron Beam Performance in Pickup Tubes

by Mitsuhiro Kurashige

In order to find out clues for improving the beam discharge lag in widely used photoconductive pickup tubes with blocking contacts, the author looked into the following aspects in the scanning electron beam performance as the factors affecting the lag: (1) Energy distribution broadening due to relaxation in the scanning beam. (2) Beam convergence angle on the target. (3) Angle of incidence of the beam on the target. (4) Local distribution of contact potential difference between target and cathode. (5) Second exponential region of the beam acceptance curves.

The author has worked out a computational procedure to follow the surface potential variation on the target and investigated the correlations among the beam performance, the resultant beam acceptance curves and the beam discharge lag.

It is concluded that the relaxation has the most predominant effect and that the other factors add only minor influence on the decay lag characteristics due to beam discharge.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 32, No. 3 (1978) 217~223

Analysis of Distortion Caused by Multipath Transmission in Frequency-modulation Sound Broadcasting

by Mitsuo Ohara

Relations between distortion caused by multipath transmission and the essential parameters are analyzed for both monophonic and stereophonic FM sound broadcasting.

The parameters involved are DU ratio, delay time of the reflected wave in comparison with the direct wave, phase difference of these two carrier waves, modulation frequency and percentage of modulation.

Fast Fourier Transform processing technique is applied in the computer programme using which the complicated spectrum computation is carried out easily to allow a thorough analysis of multipath transmission phenomenon.

As a result, the complex nature of multipath distortion became clearly understandable. In addition, some considerations necessary for the better reception of FM sound broadcasting under the environment of multipath transmission are derived from the results of analysis.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 32, No. 3 (1978) 224~230