

FM 放送のマルチパスひずみと受信品質

NHK 総合技術研究所 大 原 光 雄

FM ステレオ放送のマルチパスひずみについて、室内実験により主観評価試験とひずみの物理量の測定を行い、純音による変調の条件を適切に選定することにより、そのひずみの値から受信品質を比較的ばらつきの少ない状態で定量的に把握できることを示した。さらに、得られた結果をもとに、受信品質を確保するために必要な DU 比を求めた。

1. ま え が き

FM 放送において、送信アンテナから直接到来する直接波に、山や建物などで反射してきた反射波が加わった電波を受信すると、受信出力にいわゆるマルチパスひずみが発生する。このマルチパスひずみに対して、純音で変調した場合のひずみの物理量については、計算機を使用した詳細な解析¹⁾が行われ、その特有の性質が明らかにされている。しかし、受信品質についての研究は、これまでに見あたらない。

本文では、マルチパスひずみが発生している場合の受信品質の定量的把握に関して行った実験と検討結果について述べる。

2. マルチパス伝送系と受信品質

FM 放送の直接波に反射波が加わると、直接波のみの場合の伝送系とは異なった伝送系（以下、マルチパス伝送系と称す）を変調信号が通過することとなり、その結果、受信出力にひずみが発生する。そして、このマルチパス伝送系は、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（高周波位相）などの反射波の加わり具合に関係した伝搬上の条件により決定される。

どの程度のマルチパス伝送系であれば、受信品質にどの程度の影響を与えるかを調べるにあたって、ある種のひずみの物理量を測定し、その量によって判断することができれば、上記の伝搬上の条件が未知の場合であっても、受信品質を定量的に把握することができ、有効な手段となる。さらに、測定するひずみの物理量として、純

音で変調した場合のひずみの物理量を使用することができれば、これをひずみ率により把握することができ、測定法も簡単であるため実際である。このためには、純音で変調して得られるひずみ率と番組音で変調した場合の受信品質の間にどのような対応関係があるかを明らかにし、適切な条件を選定する必要がある。

オーディオ機器や伝送系におけるひずみの物理量と聴感の関係については、代表的な 2 次ひずみ系、3 次ひずみ系について検知限を求めた研究²⁾、高調波ひずみ成分の次数ごとに重みづけをして聴感との対応づけを試みた研究³⁾⁴⁾などがある。しかし、これらの研究は単純な非直線ひずみ系を対象として行われたもので、下記のようにひずみの発生機構が単純でないステレオ放送時のマルチパスひずみに対して、これらの結果を適用することには難点がある。

■前述の解析においても示されているように、マルチパスひずみはモノ放送時よりもステレオ放送時に大きなひずみが発生して問題となるため、以下ステレオ放送時の受信品質について論じることとするが、この場合には、純音による変調であっても、実際は複数の周波数成分より成るコンポジット信号で変調することとなる。マルチパス伝送系を通ることにより、これらの周波数の高調波成分と相互間のビート成分が発生し、しかも、これらの成分はかなり高次となる場合が多い。そして、これらをステレオ復調すると、ひずみ成分には純音の高調波成分ばかりでなく他の周波数成分も含まれることとなる。さらに、変調周波数が 7.5 kHz を越える場合には、復調帯域が 15 kHz であるため、ひずみ成分にはその高調波が含まれず、他の周波数成分のみとなる。このように、ステレオ放送時のマルチパスひずみの発生機構は、単に整数倍の高調波を発生する単純な非直線ひずみ系の場合とは異なっている。

ステレオ放送時のマルチパスひずみは、変調周波数が

¹⁾ "Multipath Distortion and the Received Quality 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。

高い場合に大きくなることが前述の解析から明らかにされている。一方、番組音については、数 kHz 以上の高い周波数成分は低い周波数成分にくらべて一般的に少ない。したがって、純音で変調して得られるひずみ率と番組音で変調した場合の受信品質との対応を求めるにあたって、純音の変調条件が特定の周波数や変調度の付近において、他の変調条件におけるよりも両者の間に強い相関関係が見出されることが考えられる。

このような考えのもとに、室内実験により伝搬上の条件にできるだけ変化をもたせてマルチパス伝送系を設定し、これらの種々のマルチパス伝送系をサンプルとして番組音で変調した場合の受信品質を主観評価試験により求め、これと同じ状態において純音による変調条件をいろいろ変えてひずみ率を測定し、両者の相関関係を求めることとして、以下の実験を行った。

3. 実験方法

3.1 実験系統

実験の基本的な系統図を図 1 に示す。スイッチ #1 をテープ再生機とスピーカー側に接続した場合には、変調器において番組音によりステレオ変調された FM 放送帯の高周波信号が発生する。スイッチ #2 により、マルチパス妨害のある場合とない場合の切換えができる。復調器により、高周波信号を検波してステレオ復調し、この復調音を評価試験に供す。スイッチ #1 を発振器とひずみ率計側に接続し、純音でステレオ変調してひずみ率を測定する。

3.2 マルチパス伝送系の設定

マルチパス発生器において、直接波を分岐して遅延させ、さらに強度と高周波位相を調整して反射波に相当する妨害波を発生させ、これを直接波に加えることにより、DU 比、遅延時間および高周波位相の 3 つの伝搬上の条件を設定できる。これらの条件の設定にあたって、できるだけ組合せに変化をもたせることとし、DU 比は明らかにひずみのわかる条件からわからない条件まで数段階とり、遅延時間に対しては 4 種類の高周波遅延素子

(6, 10, 20 および 30 μ s) をそれぞれ使用し、また、任意の高周波位相とするなど配慮し、約 30 種類の組合せのマルチパス伝送系を設定した。

3.3 番組音

番組音としては、高品質放送の観点からひずみが検知されやすい番組を使用することとした。ピアノ曲は信号のスペクトル分布が離散的であることなどの理由で、一般的な番組音の中ではひずみをもっとも検知されやすいことが示されており⁵⁾、ステレオ回線の伝送試験⁶⁾等でもすでに用いられているピアノ曲を用いた。

なお、番組音は片側信号（左信号）入力に規定入力レベルに加え、受信した左信号出力を評価試験に用いた。これは、大半の場合、片側信号のみの変調の場合に最大のひずみが発生するため、実験条件の複雑化をさけるためにもこのような方法に統一した。

3.4 評価方法

マルチパス妨害のある場合とない場合にそれぞれ受信した試験音を、評定者に順不同で 1 対提示した。そして、表 1 に示す CCIR の 7 段階評定尺度を用いて、1 対のうちの前者に対する後者についての評語に対応した評点を求めた。

表 1 CCIR の 7 段階評定尺度
Seven-point grading scale proposed in CCIR.

| 評点 | 3 | 2 | 1 | 0 | -1 | -2 | -3 |
|----|-------|----|------|----|------|----|-------|
| 評語 | 非常に良い | 良い | やや良い | 同じ | やや悪い | 悪い | 非常に悪い |

3.5 評定者と聴取条件

評定者は音響技術者およびこれに準ずる技術者 10 名である。聴取室は残響時間約 0.3 秒の試験室を使用し、聴取位置における音圧レベルは約 75 dB とし、騒音レベルは約 40 dB (A) である。試験用スピーカーは、放送モニター用 3001 型（三菱電機製）2 台を使用した。

3.6 ひずみ率の測定

評価試験のために設定した約 30 種類のマルチパス伝送系のすべてにおいて、純音で変調してひずみ率の測定を併せ行った。変調周波数は変調の最大周波数として規定されている 15 kHz の周波数以内で約 1 kHz おきとし、変調度は 100, 50 および 30% とした。

なお、評価試験の方法に合わせて、左信号入力に信号を加え、受信した左信号出力を測定に用いた。また、測定にあたって、復調器のディエンファシス（現行放送の時定数 50 μ s）も評価試験に合わせて、入れた状態で測定した。

4. 実験結果と検討

測定により得られたひずみ率と評価試験により得

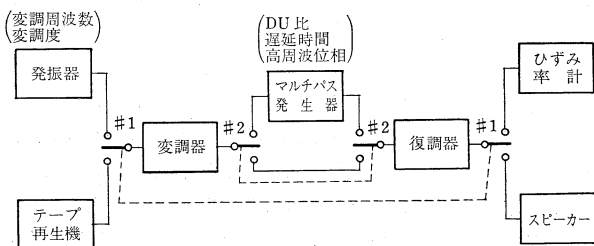


図 1 実験系統基本図

Schematic block diagram of the experiment.

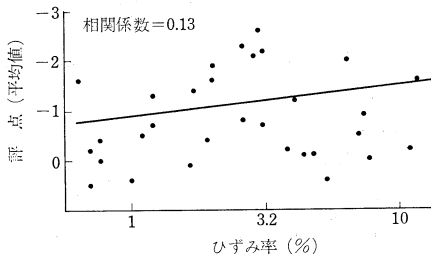
られた評点との関係を、それぞれの純音による変調条件ごとにグラフ化して、両者の相関関係を求めた。この際、ひずみ率に対しては対数目盛を使用してプロットし、評点についてはマルチパス妨害のない場合とくらべた評点の10名の平均値を用いた。

両者の相関関係を評価するには、相関係数を求めて、この値により論ずることが適切である。Vを回帰線からの分散とし、Wを算術平均値からの分散とすれば、相関係数 ρ は(1)式から求められる⁷⁾。

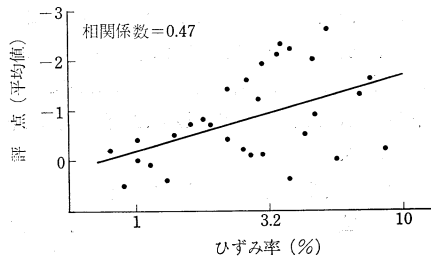
$$\rho = \sqrt{1 - \frac{V}{W}} \quad (1)$$

両者の相関関係が強ければ強いほど ρ の値は1に近づき、弱ければ弱いほど0に近づくため、 ρ の値が1と0とのどの位置にあるかによって両者の相関関係の強さを測ることができる。

図2に100%変調でのひずみ率と評点の関係の例を示す。図2(a)は変調周波数が1kHzの場合で、図2(b)は3kHzの場合の結果である。これらの場合の相関係数は、それぞれ0.13と0.47であり、大きな値ではない。放送機やそれに至る伝送線と増幅器類のレベルセットには1kHzがよく用いられ、また、これらの機器の特性は通常変調レベルが高いほど厳しい値となるため、1kHz 100%変調という変調条件は放送機などの特性測定によく用いられる条件である。しかし、マルチパスひずみに対しては、上記の結果が示すように、受信品質と



(a) 変調周波数が1kHzの場合

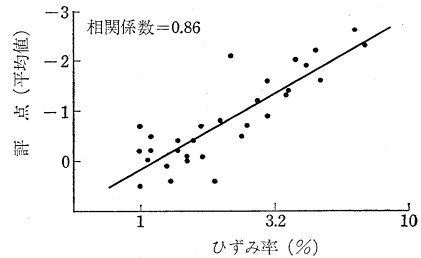


(b) 変調周波数が3kHzの場合

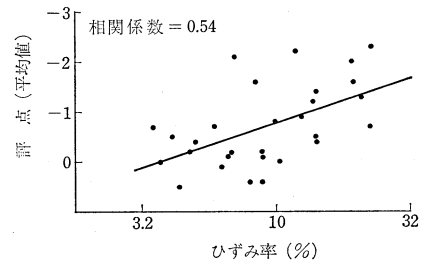
図2 100 変調でのひずみ率と評点の関係
Relations between distortion at 100 percent modulation and grade.

表2 2 kHz での相関係数
Correlation coefficients at 2 kHz.

| 変 調 度 | 相 関 係 数 |
|-------|---------|
| 30% | 0.86 |
| 50% | 0.70 |
| 100% | 0.29 |



(a) 変調周波数が2kHzの場合



(b) 変調周波数が15kHzの場合

図3 30% 変調でのひずみ率と評点の関係
Relations between distortion at 30 percent modulation and grade.

の対応の点から考えると、測定条件としては適切な条件であるとはいえない。

表2は、2kHzで変調した場合の変調度と相関係数の関係の例である。他の変調周波数においても変調度が100%の場合よりもむしろ30%の場合の方が相関係数が高い値となる傾向にある。これは、巨視的に見ると、番組音のなかでピークレベル付近の時間率の小さい部分よりも、平均レベル付近の時間率の大きい部分との関係の方が深いことを示していると考えられる。

図3は30%変調でのひずみ率と評点の関係の例である。図3(a)は変調周波数が2kHzの場合で、図3(b)は15kHzの場合である。特に図3(a)の変調条件における相関係数は0.86で、測定した変調条件のなかで最も大きな値であり、このように変調条件を適切に選定すれば強い相関関係が得られることがわかった。

ここで、評点0(同じ)と評点-1(やや悪い)の中間にあたる評点-0.5は、ひずみがちょうど検知される限界(以下、検知限界と称す)であると考えられ、2kHz

30% 変調でのこれに対応するひずみ率を図 3(a) から求めると 1.2% の値が得られた。なお、通常の受信状態では、右信号出力をも復調出力からとりだして聴取するが、文献 1) の解析においても明らかにされたように、左信号のみの変調であっても左信号出力のひずみ成分とほぼ同等のエネルギー成分が右信号出力にも現われる。したがって、聴く人の両耳に加わる聴感上のひずみ感も、3 dB 相当分だけ増加する。上記の 1.2% の値はこの分だけ補正した結果である。さらに、評点 -1 (やや悪い) と評点 -2 (悪い) の中間にあたる評点 -1.5 を、ひずみが許容できる限界 (以下、許容限界と称す) とすれば、図 3(a) から、同様にしてこれに対応するひずみ率として 2.5% の値が得られる。

以上の結果より、ステレオ放送時に、純音による変調条件を 2 kHz 30% としてひずみ率を測定すれば、受信品質との相関が強いと、その値から比較的ばらつきの少ない状態で受信品質を定量的に把握することができる。いいかえると、マルチパス伝送系が受信品質に及ぼす影響の程度を比較的ばらつきの少ない状態で客観的にとらえることができることとなる。

ここで、放送機を含む放送系統の特性測定との関連を考えると、これらの測定にあたって数ポイントの周波数を使用して特性の概略の傾向を把握しようとする場合に 1 kHz や 3 kHz の周波数が用いられることが多い。したがって、2 kHz の場合とくらべて受信品質との対応関係が若干劣るけれども、これらの周波数により機器の特性測定とマルチパスに関する測定を同時に行うことができるという現場における測定の便利さを考えて、1~3 kHz 30% 変調での結果を示したものが表 3 である。そして、マルチパス妨害のある場合に、受信アンテナや受信点の選定、受信アンテナのダイバーシティー調整などにより受信品質の劣化を防ぐめやすのために表 3 の結果を利用することとすれば、巨視的に見て 1~3 kHz 30% 変調時のひずみ率が、それぞれ、検知限界の受信品質の確保のためには 1.5% 程度以下の値を、許容限界に対し

表 3 1~3 kHz 30% 変調での結果
Results at 30 percent modulation of 1 to 3 kHz.

| 変調条件 | 項目 | 相関係数 | 検知限界のひずみ率 (%) | 許容限界のひずみ率 (%) |
|--------------|----|------|---------------|---------------|
| 1 kHz 30% 変調 | | 0.81 | 1.3 | 3.0 |
| 2 kHz 30% 変調 | | 0.86 | 1.2 | 2.5 |
| 3 kHz 30% 変調 | | 0.80 | 1.1 | 2.4 |

* 許容できる限界は、聴取態度、環境などによって変るものであり、本来、一義的には定めにくい。しかし実用面を考えれば、何らかの形で一応のめやすを与えておく必要がある。5段階の評定尺度 (5, 4, 3, 2, 1 の評点を与える) による評価では、4と3の境界を許容限とするのが普通であり、この考え方を準用して、本文では -1 と -2 の境界を許容できる限界とみなした。

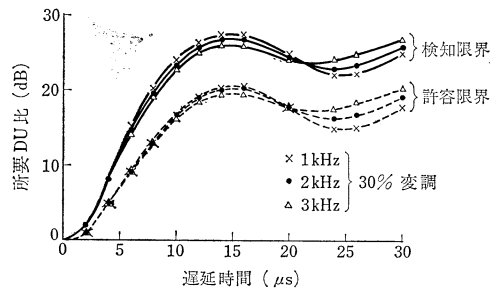


図 4 遅延時間と所要 DU 比の関係
Relation between delay time and necessary DU ratio.

ては 3% 程度以下の値を考えればよい。

検知限界や許容限界の受信品質を確保するための所要の DU 比は、1~3 kHz 30% 変調時に、表 3 の検知限界と許容限界に対応したひずみの値を越えないような DU 比を求めて得られる。この DU 比を、妨害波が 1 波の場合に、前述の解析により計算機を使用して正確に算出した。

図 4 は、このようにして得た遅延時間と所要 DU 比の関係である。それぞれの変調周波数の間で値が若干異なるが、これらの結果を巨視的にとらえると、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え、10 μ s 程度を越えると、検知限界の受信品質の確保のためには 25 dB 程度の値で、許容限界に対しては 20 dB 弱の値となる。

5. む す び

FM ステレオ放送のマルチパスひずみと受信品質について、主観評価試験を含む実験と検討を行い、次の点を明らかにした。

(1) 純音による変調の条件を適切に選定することにより、ひずみ率と受信品質の間に強い相関が見出され、このひずみ率から受信品質を比較的ばらつきの少ない状態で定量的に把握することができる。

(2) 受信アンテナや受信点の選定、受信アンテナのダイバーシティー調整などにより、マルチパスによる受信品質の劣化を防ぐめやすとしては、1~3 kHz 30% 変調時のひずみの値に着目し、検知限界に対しては 1.5% 程度以下の値を、許容限界に対しては 3% 程度以下の値を考えるとよい。

(3) 受信品質を確保するための所要 DU 比は、遅延時間 10 μ s 程度以上では、検知限界に対しては 25 dB 程度の値で、許容限界に対しては 20 dB 弱の値である。

おわりに、本研究を進めるにあたって、終始有益な助言を下された当所 遠藤主任研究員、評価試験に協力していただいた二階堂主任研究員、および、評定者になって

いただいた関係各位に深く感謝する。

(昭和 54 年 4 月 19 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 大原：FM 放送のマルチパスひずみの解析，テレビ誌，**32**，3 (1978) 224-230
- 2) 黒木，松尾：非直線ひずみの検知限について，NHK 技術研究，**31** (1957) 11-25
- 3) Ryffert：Die Grenzen der Hörbarkeit nichtlinearer

Verzerrungen vierter und fünfter Ordnung für die einfache Quint, Frequenz, **15**, 8 (1961) 254-261

- 4) Wigan：New Distortion Criterion, Electronic Technology, April (1961) 128-137, May (1961) 163-174
- 5) 二階堂：非直線ひずみの検知限ならびに測定法に関する考察，日本音響学会誌，**28**，9 (1972) 485-495
- 6) 松本，高島，三浦，二階堂，浅見：放送プログラム用符号化端局装置の主観評価試験，信学会技術報告，**76**，255 (EA 76-71)，(1977) 23-28
- 7) 岸根：統計学，養賢堂 (1975) 91-93

テレビジョン学会誌特集号，小特集号のバックナンバーのご案内

下記の学会誌特集号，小特集号のバックナンバーはまだ残部がありますので購入ご希望の方は事務局までお申込みください。

(*印は小特集号)

| 年 月 号 | 題 目 | 価 格 | 年 月 号 | 題 目 | 価 格 |
|-------|------------------|------|-------|--------------------|--------|
| 42 10 | UHF テレビジョン技術 | 欠号 | 50 3 | *リモートセンシング | 800円 |
| 43 3 | 最近の受像管 | 欠号 | 4 | 画像伝送 | 欠号 |
| 7 | テレビジョン年報 | 800円 | 7 | *創立 25 周年記念号 | 850円 |
| 10 | テレビジョンの産業応用 | 800円 | 11 | モデルとシミュレーション | 900円 |
| 44 4 | テレビジョン放送局における近代化 | 800円 | 51 4 | 不可視情報の画像化技術 | 1,200円 |
| 10 | テレビジョンと視覚 | 800円 | 7 | テレビジョン年報 | 1,200円 |
| 45 7 | テレビジョン年報 | 800円 | 10 | デジタルテレビジョン | 1,200円 |
| 9 | 創立 20 周年記念特集 | 800円 | 52 1 | *ゴースト対策 | 950円 |
| 46 4 | テレビジョンにおける音響技術 | 800円 | 4 | ディスプレイ | 1,200円 |
| 10 | 画像走査 | 欠号 | 7 | *音声放送 | 950円 |
| 47 4 | ファクシミリ | 欠号 | 10 | ポータブル機器による番組制作 | 欠号 |
| 7 | テレビジョン年報 | 800円 | 53 1 | *ビデオディスク | 950円 |
| 11 | 画像エレクトロニクス | 800円 | 4 | 光通信 | 1,200円 |
| 48 5 | ディスプレイデバイス | 800円 | 7 | テレビジョン年報 | 1,200円 |
| 11 | 画像メモリー | 800円 | 10 | 磁気録画 | 1,200円 |
| 49 4 | 画像とコンピューター | 800円 | 54 1 | *PCM 録音 | 950円 |
| 7 | テレビジョン年報 | 800円 | 4 | テレビジョンにおけるデジタル処理技術 | 1,200円 |
| 9 | *テレビジョン技術用語集 | 800円 | 7 | *固体撮像デバイス論文特集 | 950円 |
| 11 | 撮像デバイス | 欠号 | | | |

申込先 〒105 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内 テレビジョン学会事務局 TEL (03)432-4677

Abstracts

A Quantitative Analysis on the Subjective Effects of TV Pictures Impaired by Multiple Ghosts

by Shigeru Yamazaki

A method for quantifying subjective quality of TV pictures impaired by multiple ghosts is discussed by proposing a typical model for the assessment of ghost image problems in TV reception. Equivalent Perceived DC Ratio has been proposed and considered as the first step to obtain quantitative relations between subjective quality evaluation and such physical factors as r.f. signal/r.f. ghost level ratio (D/U), r.f. phase (ϕ), delay time (τ), number of ghosts (n), and variety of pictures.

Subjective tests have been made on the effect of single ghost and of a few types of multiple ghosts on still color pictures. It is clear that the effect due to D/U and ϕ can be expressed in terms of Equivalent S/I defined as the signal to positive ghost level ratio to which the subjective effects are equivalent. Multiple ghosts with the same polarity and close delay time with each other can be subjectively converted into a single ghost by the power sum law with delay-time-weighting.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 33, No. 8 (1979) 628~634

Multipath Distortion and the Received Quality in Frequency-modulation Sound Broadcasting

by Mitsuo Ohara

Laboratory simulation concerning the influence of multipath transmission on stereophonic FM sound broadcasting was carried out. It consists of subjective listening tests and measurement of distortion.

The relation between the distortion expressed in percent and the received sound quality was investigated, and by appropriately selecting the modulation condition of a pure tone modulation signal for the measurement, strong correlation was obtained between the above distortion and quality. Therefore, the received quality can be got hold of quantitatively by the measured distortion with comparatively small dispersion.

From the above relation, a practical method to estimate the degradation of the quality is suggested, and the necessary DU ratio to secure the quality over just perceptible or permissible limit has been derived as a function of delay time.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 33, No. 8 (1979) 635~639
