

## スペクトル・アナライザによる FM放送波のマルチパス測定

Multipath Measurement of FM Radio Waves by means of Spectrum Analyzer

小宮紀旦

Noriaki KOMIYA

郵政省電波研究所

Radio Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications

### 1. まえがき

多重反射波(マルチパス)はTVではゴーストとなり、FM放送ではマルチパス歪となって現れる。現在FM放送においてディジタル音声の多重が検討されているが、この場合、マルチパス障害により漏話が発生し、メイン、サブ両チャンネルに受信品質の劣化が生じる。マルチパス量に対する漏話の関係を求める場合に、室内実験であればマルチパス量は実験パラメータとして与えることが出来るが、実際のFM放送波を受信する場合は測定しなければならない。しかし現在のところマルチパス量を測定出来るものはなく、TVのゴースト測定から類推しているのが現状である。

TVのゴースト測定が実用化されているなかで、FMのマルチパス測定の実用化が遅れている理由を考えると、TVのゴーストは目に見えて妨害が認めやすいために、その測定と除去の必要性が高かったこと、さらにTVの変調方式がVSB線形変調であり現象の把握が容易であり、また同期パルスの様なゴーストの測定に便利な波形が埋め込まれていて視覚的にも理解し易い事が実用化を早めたと考えられる。それに対してFMにおけるマルチパス歪は古くから知られていた<sup>(1)</sup>にもかかわらずその測定と除去が立ち後れている理由は、まずFMが非線型

変調方式であり現象が複雑であること、TVの様な同期パルスもなく、またマルチパス現象自体が音の歪として検知されにくいことが考えられる。

FMマルチパスの測定法に関する報告は見あたらないが、マルチパス歪の除去についていくつかの報告があり、測定と深く関わっている。

石垣・他(1980)<sup>(2)</sup>は歪成分をRF振幅変動を用いて発生させ、差し引くことで歪を除去している。伊達・他(1982)<sup>(3)</sup>は、FM検波出力とRF振幅を用いてマルチパスを測定し、それに基づいてマルチパス路の逆フィルタを構成し歪を除去している。望月・他(1985)<sup>(4)</sup>はRF振幅変動が無くなるようにトランスバーサルフィルタのタップ係数を制御して歪を除去している。これらの報告のなかで、伊達・他の報告にはマルチパス測定そのものを含んでおり、またの望月・他の方法においても、フィルタ・タップ係数列がマルチパス路のインパルスレスポンスを含んでいるはずである。

本報告は、最大値保持機能を持ったスペクトル・アナライザによって簡単にマルチパス量の測定が出来ることを明らかにし、実際の放送波の測定結果と測定法の問題点について述べる。

### 2. マルチパス路の周波数伝達関数

マルチパス路の周波数伝達関数  $H(j\omega)$  は、受信点の直接波で正規化すると次の様に表わすことが出来る。

$$H(j\omega) = 1 + \sum r_i \cdot \exp(-j\omega\tau_i + j\theta_i) \quad (1)$$

$r_i$  :  $i$  番目の反射波の比強度

$\omega$  : 搬送波角周波数

$\tau_i$  : 反射波の直接波に対する到達遅延時間

$\theta_i$  : 反射波と直接波の搬送中心周波数における位相差

話を簡単にするために以下、単一の反射波を扱う事にすると式(1)は次式となる。

$$H(j\omega) = 1 + r \cdot \exp(-j\omega\tau + j\theta) \quad (2)$$

$\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ 、 $\omega_0$  : 搬送波中心周波数、

$\Delta\omega$  : 周波数偏移とすると式(2)は次式となる。

$$H(j\Delta\omega) = R(j\Delta\omega) \cdot \exp[-j\phi(j\Delta\omega)] \quad (3)$$

$$R^2(\Delta\omega) = 1 + r^2 + 2r \cdot \cos(\Delta\omega\tau + \psi) \quad (4)$$

$$\phi(\Delta\omega) = \tan^{-1} \left\{ \frac{r \cdot \sin(\Delta\omega\tau + \psi)}{1 + r \cdot \cos(\Delta\omega\tau + \psi)} \right\} \quad (5)$$

$$\psi = \theta - \xi \quad (6)$$

$$\xi = \omega\tau - 2\pi n \quad (7)$$

$$n = [\omega_0 \cdot \tau / 2\pi] \quad (8)$$

式(4)のマルチパス路の振幅周波数特性  $R^2(\Delta\omega)$  を図1に示す。これによってマルチパス・パラメータである  $r$ 、 $\tau$ 、 $\psi$  を求めることが出来る。

一般に伝送路の周波数伝達関数を求めるには、掃引発振器とそれに周波数同期したスペクトル・アナライザを用いたいわゆるネットワーク・アナライ

ザを用いるのが便利である。放送中のFM波は非定常的に瞬時周波数が変化しており、等価な意味で周波数同期をとる工夫をしないとマルチパス路の周波数伝達関数を求めることは出来ない。

### 3. マルチパス量の測定方法

振幅周波数特性  $R^2(\Delta\omega)$  を求めるために、伊達・他は図2に示すように、瞬時周波数偏移はFM検波出力を、RF信号の振幅変動はAM検波出力を用いている。FM放送波をアンテナで受信し、FM受信機フロントエンドおよび帯域増幅器を経てFM検波器によって復調する。一方、リミッターによって振幅制限を受ける前の線形増幅部の信号を振幅検波器によって瞬時振幅を検出する。FM検波器の瞬時出力からは、FM検波器の周波数偏移に対する出力の関係(変換利得)から瞬時周波数偏移を求め、

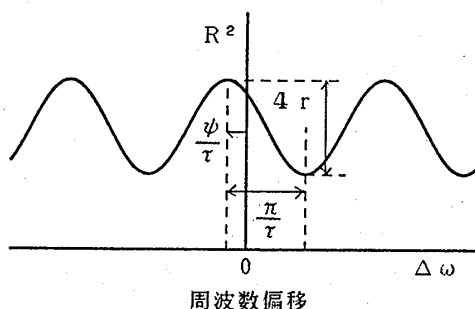


図1 単一マルチパス路の振幅周波数特性

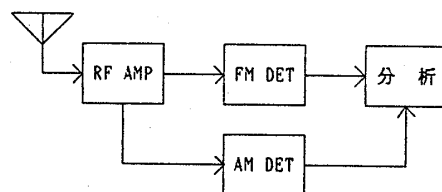


図2 マルチパス振幅周波数特性のブロック図

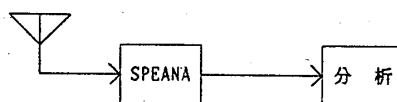


図3 スペクトル・アナライザによるマルチパス測定ブロック図

各瞬時周波数偏移に対する振幅検波器の出力を求める。多数の瞬時周波数に対する瞬時振幅の関係をグラフにかくと図1のようなパターンなる。(マルチバス・ダイヤグラムと呼ぶことにする。) このマルチバス・ダイヤグラムを調波分析してマルチバス・パラメータを求める。

この方法は、アンテナからFM検波器と振幅検波器までの経路が異なり、それらに遅延時間差があると、周波数偏移に対する搬送波振幅の関係に時間のずれが生じ、測定誤差の原因となる。またFM検波器において、周波数偏移対出力電圧の変換利得が正確に求まっていなると遅延時間 $\tau$ 、位相 $\psi$ の測定に誤差を与えたり、すでにマルチバス歪を受けた復調出力をもちいるための誤差が付加される。

本報告の方法は、FM検波器を用いることなく、最大値保持機能を持ったスペクトルアナライザを用いて、直接に瞬時周波数偏移対瞬時振幅の関係を求めている。

図3に示すように、FM放送波をアンテナで受信し、可変同調周波数・狭帯域・線形増幅・振幅検波器として機能するスペクトル・アナライザに直接与えてFM放送波の帯域内のスペクトル強度を測定する。最大値保持機能によって、最も大きなスペクトル強度に時々更新していき、最終的に図1に示したマルチバス・ダイヤグラムを得る。

このようにして得られるマルチバス・ダイヤグラムが正しくマルチバス路の周波数特性になることは次の様に考えれば明らかであろう。

FM放送波の瞬時周波数は非定常的に変化しているが、変調信号がゆっくり変化している部分、あるいは極大、極小値付近のような時点の瞬時周波数変化は準静的であり、短時間スペクトルは分散が少ない。この様な時点でその瞬時周波数に対する最も大きな振幅値が得られる。周波数変化の早い時はスペクトルが広がりエネルギーが分散してマルチバス・ダイヤグラムを形成するのに有効なデータとはならない。このように最大値保持によって、各周波数に対する振幅強度を更新・蓄積することによって最終的なマルチバス・ダイヤグラムを得ることができる。すなわち最大値を保持することが送信側と周波

数同期をとる事と等価になる。

所要のマルチバス・ダイヤグラムを得るまでに要する時間は、ひとえに放送プログラムに依存している。変調信号の時間的変化がゆっくりでかつ変調度の深い信号がマルチバス測定に適している。変調度の深い音声がこの条件を満たし易い。

#### 4 マルチバス測定結果

##### 4.1 室内実験

測定法の妥当性を示すために、単一遅延波が有る場合のマルチバス測定の室内実験の結果を示す。FM-SGを雑音でノモラル変調し、その信号と、遅延回路と減衰器を通した信号を合成し遅延波のD/U(希望波対遅延波強度比(dB))を測定した。ただし遅延装置の制限から搬送周波数は2MHzとし、変調度は尖頭値で約 $\pm 75$ kHzであった。

図4.1に遅延時間 $30\mu s$ 一定で、D/Uを変えた時のD/U測定結果を示す。D/U:10~40dBの測定誤差は1.7dB以下であった。この時のスペクトル・アナライザの掃引周波数幅、周

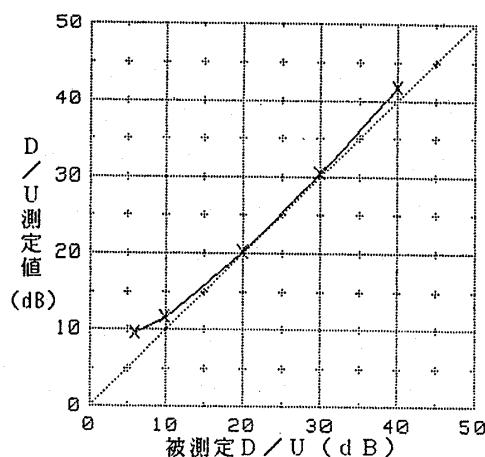


図4.1 D/U測定の室内実験  
( $\tau: 30\mu s$ 一定)

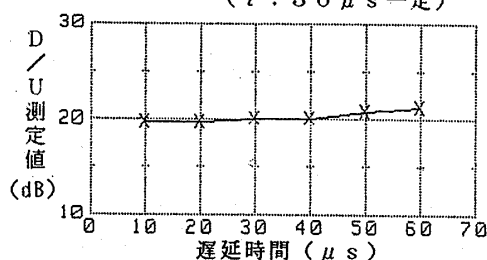


図4.2 D/U測定の室内実験  
(D/U=20dB一定)

波数分解能、掃引速度は、それぞれ $\pm 100\text{ kHz}$ 、 $10\text{ kHz}$ 、 $30\text{ msec}$ であった。

$D/U$ が低い所と高い所で測定誤差が増加しているが、 $D/U$ が低い場合はスペクトル・アナライザの分析フィルタ帯域幅が大きいためマルチパス・ダイヤグラムのリップルがつぶれるためであり、また $D/U$ の高い所での誤差の増加はデータの平滑によるリップルのつぶれによるものである。

図4. 2に $D/U=20$ 一定で、遅延時間を変えたときの $D/U$ 測定結果を示す。遅延時間： $10 \sim 60\text{ }\mu\text{s}$ の測定誤差は $-0.3 \sim 1.2\text{ dB}$ であった。遅延時間の大きな所で測定誤差が増加しているのは、 $D/U$ を変化させた場合の誤差の増加原因と同じである。

スペクトル・アナライザの周波数掃引幅は広い程、短い遅延時間が測れるが、周波数偏移の大きい状態になる頻度が減っていくのでデータの取得に時間がかかる。今回は $\pm 50\text{ kHz}$ までを有効データとしているので $10\text{ }\mu\text{s}$ 以上の遅延時間であれば少なくとも一周期のリップルが生じる。

#### 4. 2 放送波の測定

放送波の受信点は電波研（東京都、小金井市）であり、東京タワーの西約 $24\text{ km}$ にあり、受信アンテナの海拔高は約 $80\text{ m}$ で東京タワーを直視できる位置にある。主な反射波は池袋サンシャインビルからのものであり、ここでは東京タワーから左 $20$ 度の方向から入射する。この反射波の遅延時間は $17\text{ }\mu\text{s}$ であり、主にこの $D/U$ 測定結果を示す。使用したアンテナは、5素子FM用と、12素子TV用の2種である。

図5にFM放送3波〔放送大学（ $77.1\text{ MHz}$ ）、FM東京（ $80\text{ MHz}$ ）、FM-NHK（ $82.5\text{ MHz}$ ）〕、TV放送2波の音声放送波〔1ch（ $95.75\text{ MHz}$ ）、3ch（ $107.75\text{ MHz}$ ）〕、およびTV-1chと3chの映像搬送周波数（1ch： $91.25\text{ MHz}$ 、3ch： $103.25\text{ MHz}$ ）の計7波の主反射波の $D/U$ 測定結果を示す。

測定に用いたマルチパス・ダイヤグラムの例を図6に、ゴーストの測定例を図7に示す。スペクトル・アナライザの測定条件は室内実験と同じである。

図5においてFM用アンテナとTV用アンテナとでは、また測定周波数によって $D/U$ が大きく変化している。これは反射体および受信アンテナの周波数特性が合成されたものであるがそれらの分離は今後の課題である。

このデータからみると、TVのゴースト測定からFMのマルチパス量を推定するには十分注意しなければならないことがわかる。

図6において（f）（FM-NHK、TVアンテナ受信）のダイヤグラムは右上がりの傾斜を持つが、これは $10\text{ }\mu\text{s}$ 以下の遅延波による大きなうねりが重畳されているためであろうと思われる。ここではこの様な一次傾斜をさし引いて $D/U$ を求めている。

図7はTV1chと3chの、水平同期バースを用いた映像搬送波のゴースト測定例である。横軸は時間、縦軸は同期バース時間波形の強度を $\text{dB}$ 表示したものである。一つの図において上側に直交成分を、下側に同相成分をそれぞれ点線で示してある。実線で表示されているのは同相と直交成分の二乗和である。マーク+、×、\*、井は各遅延時間でのゴーストの位相を示している。

TV1・3chとも遅延時間 $17\text{ }\mu\text{s}$ の反射波が最も大きく、ついで $5\text{ }\mu\text{s}$ のゴーストがある。（反射源は特定していない。）この他に $63\text{ }\mu\text{s}$ まで大きなゴーストは見られない。

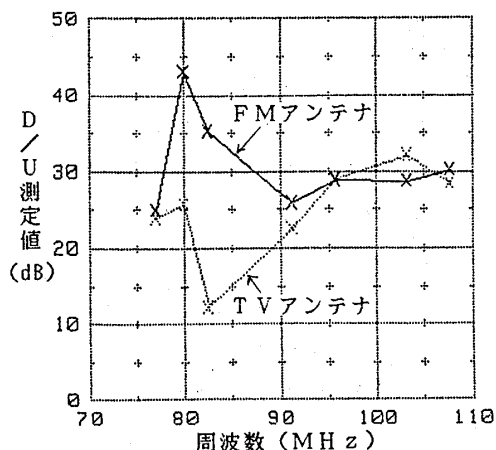


図5 放送波のマルチパス $D/U$ 測定結果（ $17\text{ }\mu\text{s}$ 遅延波）

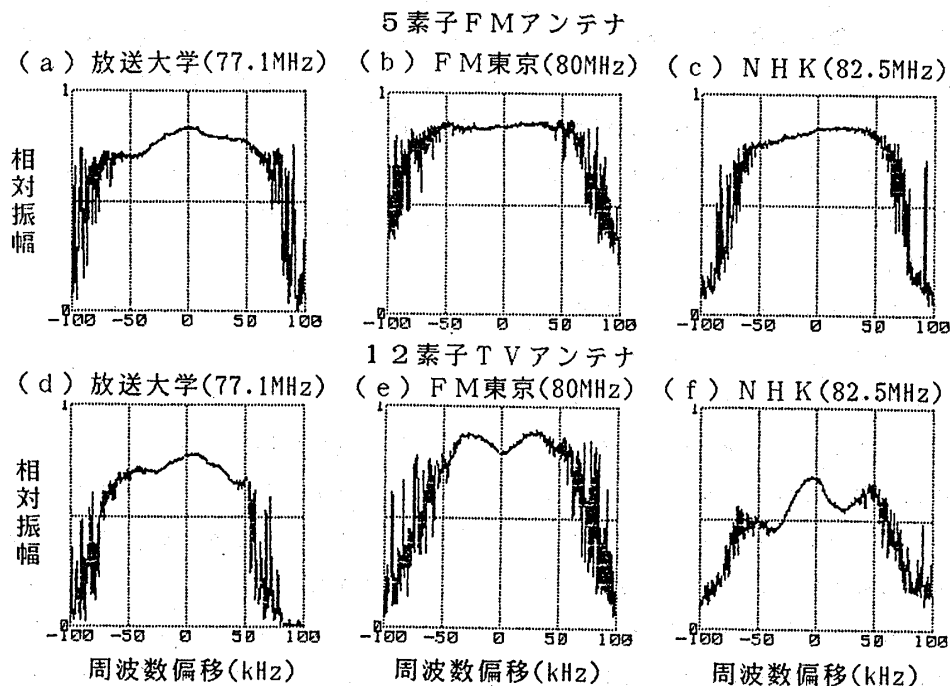


図6 FM放送波のマルチパス・ダイヤグラム測定例

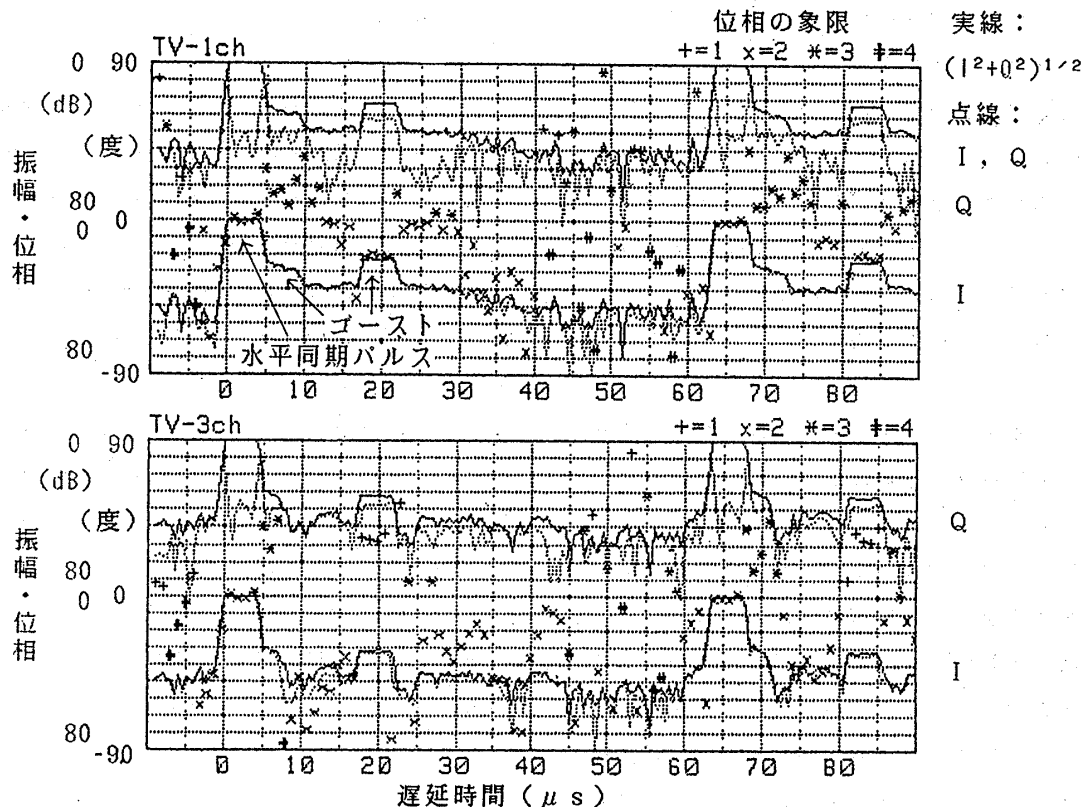


図7 TV-1, 3chの水平同期パルスによるゴースト測定例

## 5. 検討

本報告のマルチパス測定は簡単であるが、いくつかの問題を含んでいる。

まず第一に、本方法によるマルチパス測定はFM放送のプログラム内容(変調波形)に依存していることであり、測定に時間がかかる事である。早いときはデータの蓄積に1分もかからないが、10分でも満足なデータとはならない時がある。動特性同定である以上さけられないところである。

FMの公称チャネル帯域(200kHz)がTV(6MHz)に比べて狭く、時間分解能が悪い。さらにFMの周波数偏移は100%変調で $\pm 75$ kHz、TV音声では $\pm 25$ kHzであり広い周波数範囲のデータを取るのには時間がかかる。有効帯域幅の逆数より短い遅延時間の反射波の測定は困難である。しかし遅延時間の長い反射波については、TVにおいては同期パルス波形の制限から $63\mu s$ 以上の遅延時間のゴースト測定が困難であるのに対して、FMでは逆に測定し易くなる。しかしそれだけ伝搬距離が増加し減衰が大きいのシステムノイズによって測定制限を受ける。

放送波の周波数特性、送信周波数や、アンテナ電力が不安定であると測定誤差となる。現行の技術基準では、周波数安定度は、FMで $2.0 \times 10^{-6}$ 、TVで2kHz、アンテナ電力の安定度は $+10 \sim -20\%$ である。これらによる測定誤差は、 $17\mu s$ 遅延波に対して、位相で約12度、D/Uで約1dBである。

スペクトル・アナライザの掃引周波数幅、周波数分解能、掃引速度の選択は測定時間、測定誤差に影響を与える。

非定常的な変調信号の時間的変化の遅い部分でスペクトル強度がより強い値に更新されるのであるから、周波数分解能を上げると帯域内にそのような状態になる頻度が減っていき最終的なマルチパス・ダイヤグラムを得るまでに時間がかかる。逆に周波数分解能を下げていくとマルチパス・ダイヤグラムのリップル幅が吸収されて、長い遅延時間成分を検出出来なくなる。

掃引速度を上げるとより多くの周波数位置での最大値データの更新の機会が増加するが、分析フィルタのトラジェントのために正しく強度を検出することが出来なくなる。また遅くするとデータの取得に時間がかかる。

このようにこれら3つの値にはトレード・オフが存在する。実験によると先に示した値が最も適当であった。

## 6. あとがき

最大値保持機能を持ったスペクトルアナライザを用いて極めて簡単にFM放送波のマルチパス測定が出来ることを示した。この方法はFMにかぎらず、SSや送信スペクトルのエンベロープが既知である送信波のマルチパス測定に適用出来る。

今後、測定誤差の理論的、実験的検討、および今回特にはふれなかった位相測定や、複数の反射波の測定について報告する予定である。

## 参考文献

- (1) M.S. Corrington : "Frequency-Modulation Distortion caused by Multipath Transmission", Proc. I.R.E. pp.878-891 (Dec. 1945)
- (2) Y.Ishigaki, et al. : "Electronic Reduction of FM Distortion caused by Multipath Transmission", IEEE trans. on CE, vol.CE-26, pp.28-35 (Feb. 1980)
- (3) H.Date, et al. : "Automatic Cancellation Method of Multipath Echo Distortion in FM Broadcasting Receivers", IEEE trans. on BC, vol.BC-28, no.2 pp.73-81 (June 1982)
- (4) 望月孝志、他 : "適応デジタルフィルタによるFMマルチパスひずみ自動除去の一方式", テレビ学誌 vol.39, no.3, pp.228-234 (1985)

郵政省電波研究所 総合通信部 ☎ 0423-21-1211  
〒184 東京都小金井市貫井北町4-2-1