

研 究

VII-2 評 価 実 験 装 置
—伝搬路模擬装置—神尾 享秀^{*1} 三瓶 政一^{*1} 笹岡 秀一^{*1} 横山 光雄^{*2}

(1990年7月20日受理)

VII-2 EXPERIMENTLY EQUIPMENT
—FADING SIMULATOR—

By

Yukiyoshi KAMIO, Seiichi SAMPEI,
Hideichi SASAOKA, and Mitsuo YOKOYAMA

1. ま え が き

ディジタル陸上移動通信においては、マルチパスフェージングの影響により伝送信号の品質劣化が激しい。

この様な伝搬路で動作する無線通信システムを開発する場合、野外における走行実験は、実用化ための特性評価に重要である。しかし、準備と実行に、多大の時間と労力を必要とし、繰り返し走行しても厳密な再現性が期待できないなどの問題点がある。

一方、変復調方式などの研究開発では、計算機シミュレーションによる評価も、方式比較、新方式の確認などに有用である。しかし、実際のハードウェア化に伴う問題点をも含むシミュレーションは膨大なプログラム開発、及び演算時間がかかるため、実際の装置劣化などの要因を十分に取り込めない。

このため、陸上移動通信システムの研究開発において、室内で伝搬路を再現できる模擬装置を用いて、室内実験による評価が行われている。このような目的のため、フェージング伝搬路模擬装置が開発されている⁽¹⁾⁽²⁾。

ところで、変調波がフェージング伝搬路を通った場合に、振幅、位相がどの様に変化するか、そしてどの様な状態でシンボル誤り、位相のサイクルスリップなどが起こるのかを知ることは、フェージング対策技術の開発に有用である。このような研究は、一部で行われている⁽³⁾。しかし、従来の伝搬路模擬装置において、これらすべて

を満足するものの報告はない。

そこで、DSP (Digital Signal Processor) を用いて、従来のものより多機能化を図ったフェージング伝搬路模擬装置を開発した (以下本装置と呼ぶ)。本論文では、本装置の概要を述べる。

本装置は、次のような特徴を有する。

- (1) 任意の時点で、同一現象の再現ができる。
- (2) 2系統の入出力を持ち、各パス間に相関を与えられる。
- (3) 振幅、位相情報を出力 (アナログ及びディジタル値) できる。

2. 伝搬路モデル

陸上移動通信では、地形、地物の影響により、マルチパスが発生する。

伝送帯域がコヒーレンス帯域付近から、遅延波の影響がでてくる。これは、選択性フェージングと呼ばれている。一般に、マルチパスフェージング伝搬路はタップ付き遅延線によるモデルであらわすことができる⁽⁴⁾。

送信信号 $s(t)$ を

$$s(t) = \text{Re}\{u_0(t)e^{j\omega t}\} \quad \dots\dots(1)$$

とすると、受信信号 $u(t)$ は次式のようになる。

$$u(t) = \sum_{m=0}^{\infty} b_m(t) u_0\left(t - \frac{m}{W}\right) e^{j\omega t} \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $u_0(t)$ は変調信号、 ω は搬送角周波数、タップ間隔は $T = 1/W$ である。また、 W は帯域幅であり、各 m 番目のタップの変動 $b_m(t)$ は、 $u_0(t)$ の変調速度

^{*1} 通信技術部 通信方式研究室

^{*2} 総合通信部

に比べて十分ゆっくりであると仮定している。

一様フェージングでは、 $m=0$ の場合に相当する。また、 $b_m(t)$ の変動は次のようになる。

2.1 瞬時変動 (Rapid fading)

移動による短時間の変動成分についてのモデルとしては、同一レベルの波が、全方向から到来すると仮定した場合、包絡線変動の確率密度関数はレイリー分布、位相変動の確率密度関数は一様分布となる。また、ある一方向からの波が主成分と仮定した場合は仲上—ライス分布となる。

レイリー分布の場合の受信信号の電力スペクトル密度は等価低域系において次式のように示される⁽¹⁾

$$S(f) = \begin{cases} \frac{E^2}{2\pi f_d} \left[1 - \left(\frac{f}{f_d} \right)^2 \right]^{-1/2} & |f| \leq f_d \\ 0 & |f| > f_d \end{cases} \quad \dots\dots(3)$$

2.2 長周期変動 (Shadow fading)

陸上移動通信での電界強度の短区間の中央値の変動は、地形、地物の種類による電波しゃへい度に応じた減衰量の変化で、対数正規分布をされると言われている⁽⁵⁾。

2.3 相 関

ダイバーシチ技術を用いる場合、各ブランチ間の相関の有無により特性が異なる⁽⁶⁾。また、隣接チャネル波、同一チャネル波による干渉を扱う場合、干渉波のフェージングを考慮し、希望波と干渉波のフェージング相互の相関の有無による影響を検討する必要がある。

3. 装置の構成

伝搬路モデルとしては、(2)式のタップ付き遅延線で実現されるモデルを用いた。また、フェージング下での変復調方式のミクロな解析のため、同一のフェージング状態を繰り返し再現する、再現機能を持たせた。

本装置の主要性能を第1表に示す。また、全体構成図を第1図に示す。

変調された信号は、2系統の遅延発生部に入力され、遅延を受ける。各系統の出力は、瞬時変動/長周期変動発生部に入力され、伝搬特性処理制御部よりの変動成分がかけられ、出力合成部で合成され出力される。また、表示処理部では、出力の振幅、位相情報がアナログ、デジタルで表示される。なお、遅延波が無い場合のシミュレーションにおいては、瞬時変動/長周期変動発生部の四つの入力に直接接続することにより、4系統のパスの使用が可能である。

3.1 遅延発生部

帯域が B Hz の伝搬路を(2)式のタップ付き遅延線モデルで表すには、 $1/B$ sec ごとの遅延波を考えればよい⁽⁷⁾。そこで、帯域 $B = 250$ kHz 程度までを考える場

第1表 本装置の主要性能

入・出力及び遅延発生部			
帯	域	250 kHz (±0.5 dB)	
入	力	0 dBm	70 MHz 50Ω 2系統
出	力	-10 dBm	70 MHz 50Ω 2系統
遅	延	時	間
		4 μsec ± 3 %	
瞬時変動発生部			
パ	ス	の	数
			4
スペクトル形状		平坦または両肩上がりの特性	
変動周期		0~100 Hz	
レイリー分布からのずれ		+ 8 ~ -32 dB (r.m.s.) の範囲で±1 dB 以内	
停止時の位相差の設定		0 ~ (7/4) × π	
ドップラーシフト		-100 ~ +100 Hz (パス 1, 3 のみ)	
レイリー成分と鏡面反射成分の電力比		- 20 ~ +20 dB (パス 1, 3 のみ) 鏡面反射成分のみの発生可能	
各パス間の相関		0 ~ 1	
長周期変動発生部			
パ	ス	の	数
			4
変動幅		40 dB 以上	
変動周期		0~3 Hz	
分散		0~8 dB	
平均レベルの設定		0~-30 dB	
各パス間の相関		0 ~ 1	
再現機能			
再	現	周	期
			0.5, 1, 2, 4 秒

合には、 $1/B = 4 \mu$ sec の遅延波を発生できればよい。

最近の研究では、長い遅延波も観測されている⁽⁸⁾。しかし、2波モデルは解釈しやすく、解析には十分である。

この遅延は、SAW (Surface Acoustic Wave) 遅延線によって発生させている。SAW は、恒温槽に入れ安定性、再現性を高めている。

干渉実験などのために2系統用意されている。

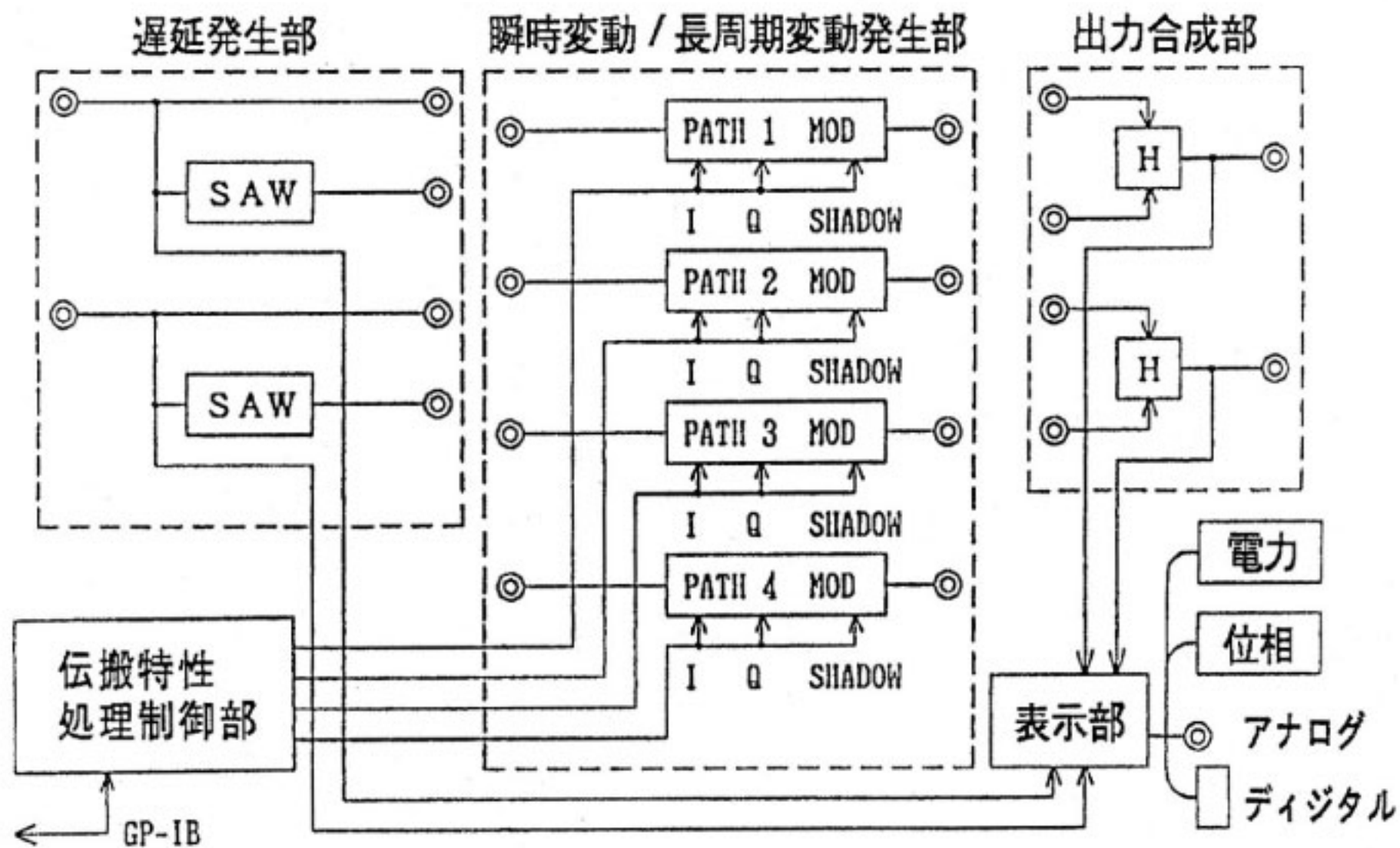
3.2 伝搬特性処理制御部

伝搬路特性を MPU (Micro Processing Unit, Intel 8085) 及び、DSP (NEC μ PD77P20) を用い、デジタル信号処理により各種変動成分を計算し、変動成分を発生している。

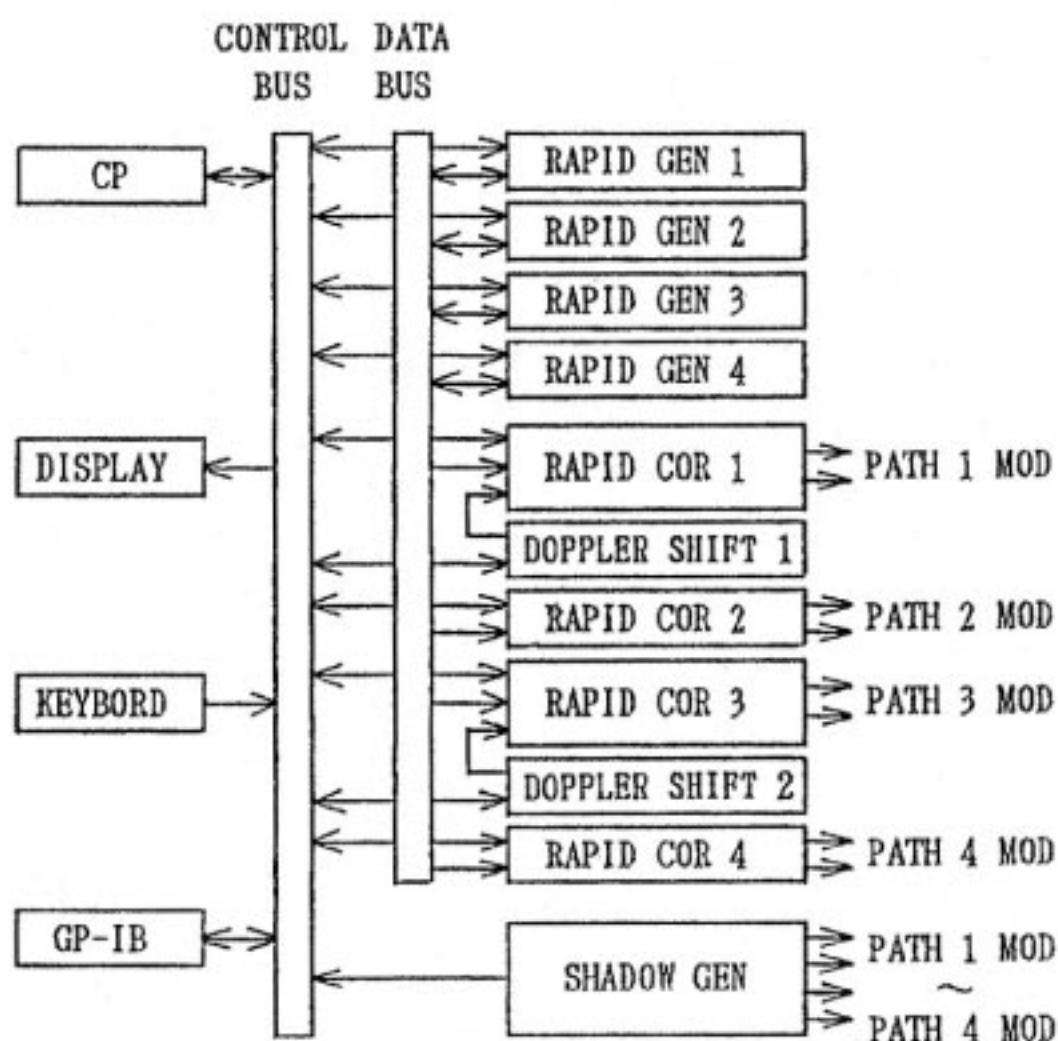
ブロック図を第2図に示す。各ブロックは、次のような機能を持つ。

(a) 中央制御 (CP ; Central Processor)

各ブロックの制御、再現機能の制御、GP-IB を介



第1図 本装置の全体構成図



第2図 伝搬特性処理制御部のブロック図

して外部計算機による制御、キーボードからのパラメータの入力、表示、パラメータの初期設定を行う。

再現機能は、再現時に各 DSP に割り込みをかけることにより行われる。

(b) 瞬時変動発生 (RAPID GEN ; Rapid fading Generator)

PN 符号で疑似雑音を発生させ、DSP を用いて(3)式の $S(f)$ を近似したフィルタにより瞬時変動成分を発生させる。この方式は、文献(1)と同様なフィルタとなっている。

最大ドップラー周波数を容易に変更できるようにす

るため、及び再現機能のため、デジタルフィルタを用いており雑音発生とともに、DSP によって実現されている。

最大ドップラー周波数の変更は、デジタルフィルタのクロックレートを変えることによって行なっている。

再現機能は、PN 符号発生用のシフトレジスタの値を記憶しておき、CP からの割り込み信号で、この値を再ロードすることにより実現される。

(c) ドップラーシフト (DOPPLER SHIFT)

周波数シフトした鏡面反射成分は ROM (Read Only Memory) を読むことによって得る。

このデータは、RAPID COR に送られ、瞬時変動成分と合成される。

(d) 瞬時変動相関計算 (RAPID COR)

異なったパスの間の振幅の相関を計算⁽⁹⁾し、瞬時変動成分、鏡面反射成分を合成する。

(e) シャドウ変動発生 (SHADOW GEN ; Shadow fading Generator)

対数正規分布に従うシャドウ変動成分を瞬時変動成分発生と同じようにデジタルフィルタを用いて発生させる。また、この変動に関する任意のパス間の相関も計算、合成される。

3.3 瞬時変動/長周期変動発生部

伝搬特性処理部より生成した変動成分で入力波を、直交変調器を用いて変調する。

PATH1~PATH4 は独立に動作し、各々一つの伝搬路模擬装置として用いることが可能である。

3.4 出力合成部

二つの入力を合成する。2系統用意されている。

3.5 表示部

振幅、位相をデジタル及びアナログ信号で出力する。

デジタル出力は、計算機に取り込むことにより、振幅分布、位相分布、電力などの測定が可能となる。計算処理により、変動分を平滑化できるためフェージング時の電力測定が容易となる。

4. 性能

4.1 基本特性

(a) 振幅分布

仲上-ライス分布の確率密度関数は、次式で表わされる⁽⁹⁾。

$$q_1(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} I_0 \left[\frac{\rho \sqrt{2\gamma}}{\sigma} \right] e^{-\gamma - \rho^2/2\sigma^2} \quad \dots\dots(4)$$

ただし $\gamma = \frac{A^2}{2\sigma^2}$ は、レイリー成分と鏡面反射成分の電力比である。

また、

$$I_0(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^{2n}}{2^{2n}(n!)^2} \quad \dots\dots(5)$$

は第1種0次の変形ベッセル関数である。

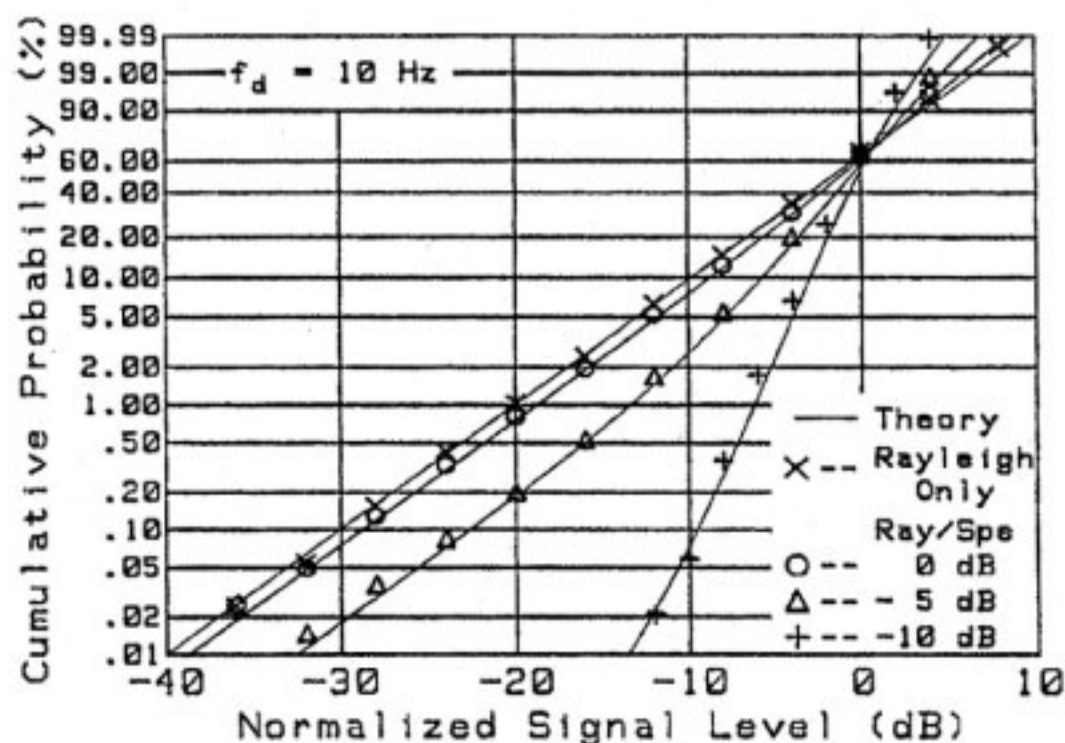
これらより、包絡線の累積確率分布は(4)(5)式を用いて数値計算することにより求められる。

第3図にレイリーフェージング、仲上-ライスフェージングにおける振幅分布を示す。同図で実線は、理論値であり、実測値は±1 dB 以内におさまっている。

(b) 位相分布

仲上-ライス分布する場合の位相分布は、次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$q_2(\phi) = \frac{1}{2\pi} e^{-\gamma} \{1 + \sqrt{\pi\gamma} \cos\phi\} \times [1 + \operatorname{erf}(\sqrt{\gamma} \cos\phi)] e^{\gamma \cos^2\phi} \quad \dots\dots(6)$$



第3図 振幅分布

$$\text{ただし } \gamma = \frac{A^2}{2\sigma^2}$$

第4図にレイリーフェージング、仲上-ライスフェージングにおける位相分布を示す。理論値とよく一致しているのがわかる。

4.2 再現機能

第5図(a), (b)に時間間隔 0.5 sec で再現を繰り返した場合の振幅及び、位相変動の様子を示す。PN 符号のシフトレジスタの値により再発生するため、デジタルフィルタの立ち上がりに不連続があり、 $t=0, 0.5$ sec では不連続になっている。

第5図(c)は伝送速度 16 Kbit/s の BPSK (Binary Phase Shift Keying) 同期検波方式での軽減困難誤りの発生の様子を示している。ほぼ同じ位置でビット誤りが起こっていることがわかる。

また、再現機能の正確さを測定するために、CW 波を入力し、フェージングを通した後、同相、直交成分に分解し、再現時の波の rms エラーを測定した。その結果、rms エラーは、-45 dB 以下であり、再現機能は良好であった。

4.3 周波数相関

遅延波がある場合の性能評価として、周波数相関の各成分を測定した。これは、周波数 f_1 の波をある伝搬路を通したときの変動成分と、周波数 f_2 の波を通したときの変動成分との相互の相関値を測定するものである。

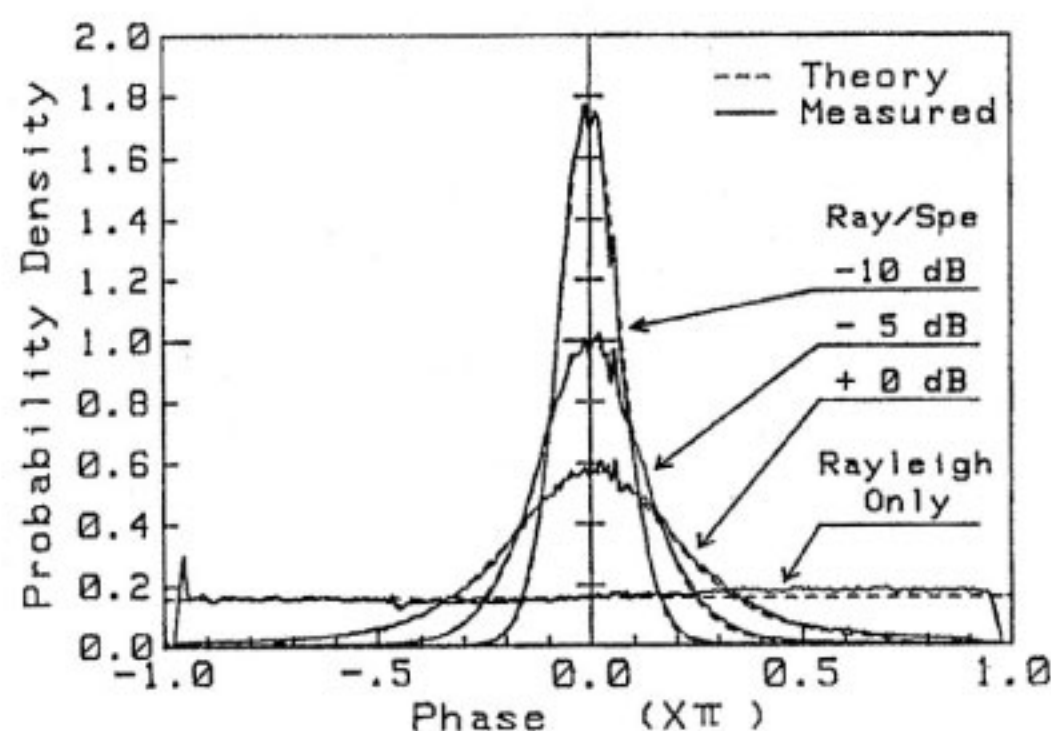
周波数相関 ρ は、周波数 f_1 の同相、直交成分をそれぞれ x_1, y_1 、周波数 f_2 の同相、直交成分をそれぞれ x_2, y_2 とすると、次式で表される。

$$\rho = x_1 x_2 + y_1 y_2 + j(-x_1 y_2 + y_1 x_2) \quad \dots\dots(7)$$

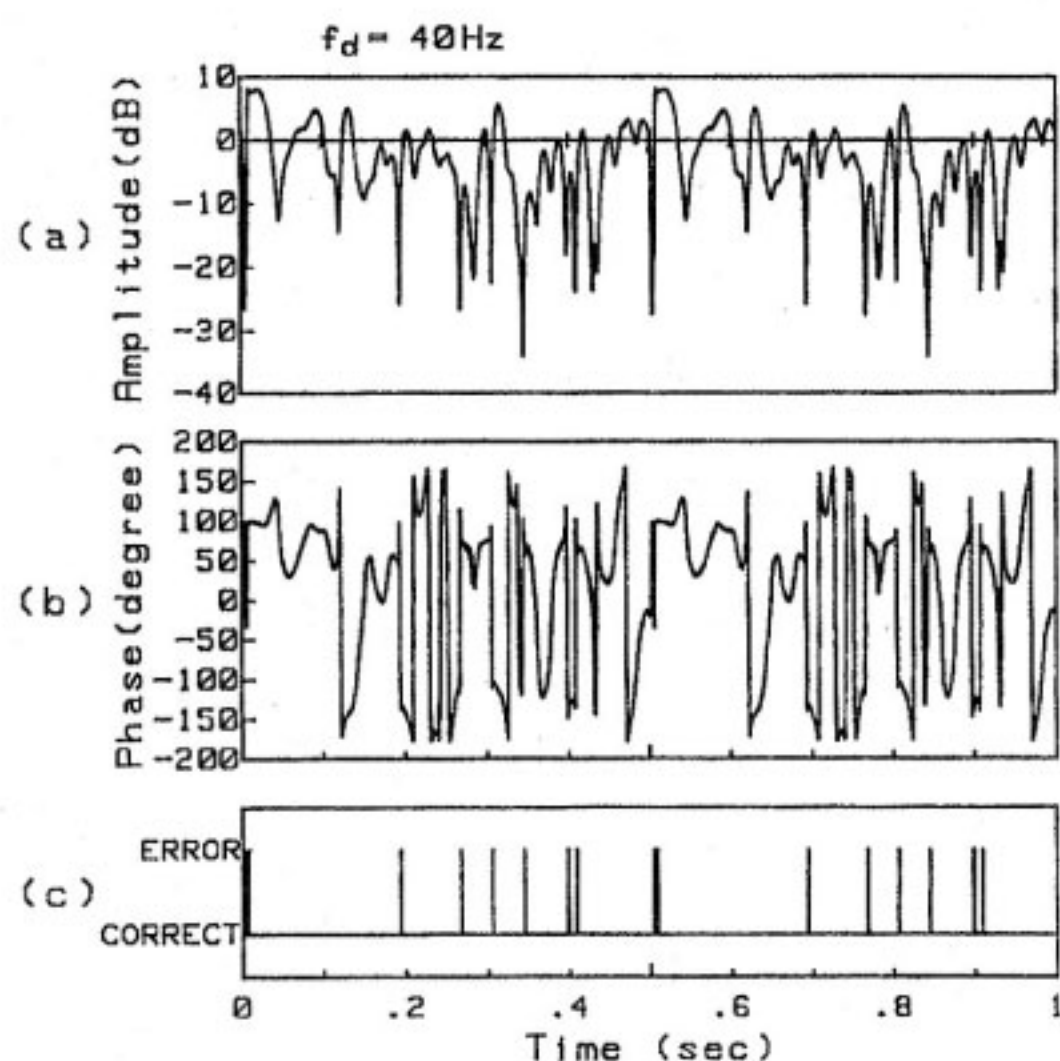
$$x_1 x_2 = \frac{1 + \cos(\theta_2 - \theta_1)}{2} \quad \dots\dots(8)$$

$$y_1 y_2 = \frac{1 + \cos(\theta_2 - \theta_1)}{2} \quad \dots\dots(9)$$

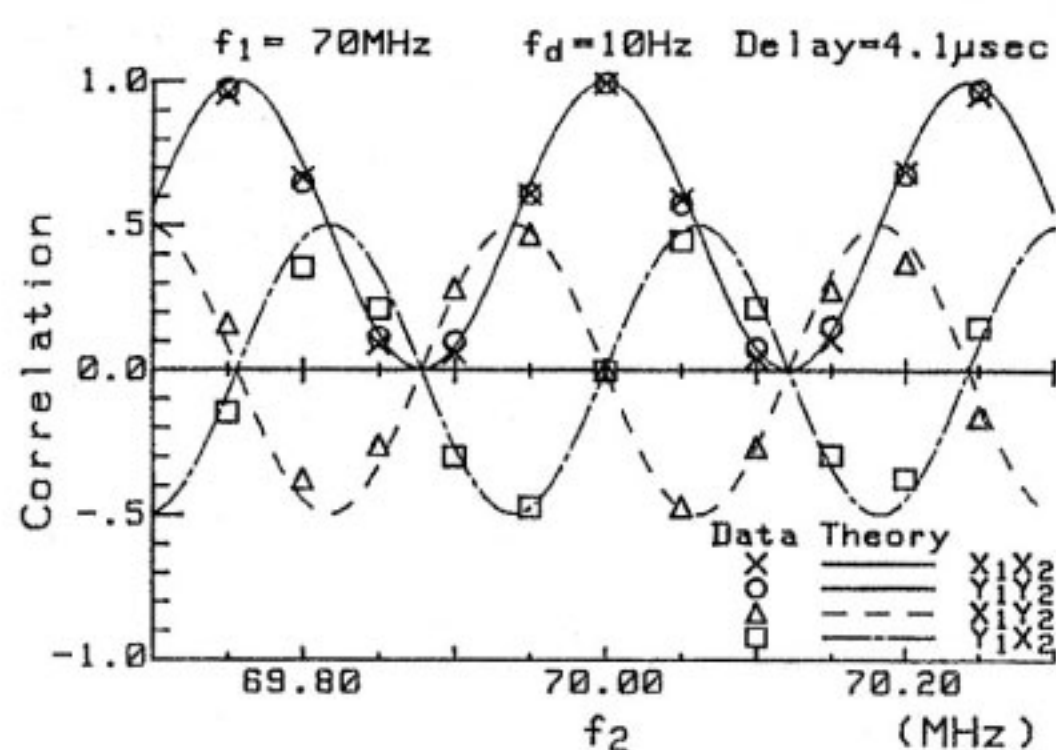
$$x_1 y_2 = \frac{-\sin(\theta_2 - \theta_1)}{2} \quad \dots\dots(10)$$



第4図 位相分布



第5図 再現機能の様子



第6図 周波数相関測定結果

$$y_1 x_2 = \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{2} \quad \dots\dots(11)$$

ここで、 θ_1 、 θ_2 はそれぞれ周波数 f_1 、 f_2 の位相である。

(a) 測定方法

- (1) 再現機能をセットし、70 MHz (IF 周波数) の CW 波 (周波数: f_1) を入力し、デジタル出力より振幅と位相のサンプル値を計算機に取り込む。この値より同相成分 (x_1)、直交成分 (y_1)、相関値を計算、累積する。
- (2) CW 波の周波数を変化 (周波数: f_2) させ、そのときの同相成分 (x_2)、直交成分 (y_2)、相関値を計算、累積する。
- (3) 再現機能を解除し、異なった状態で同様な操作を繰り返すことにより統計データを得る。

(4) 正規化の操作を行う。

(b) 測定結果

第6図に測定結果を示す。同図において、 $X_1 X_2$ は周波数 f_1 、 f_2 での同相成分 x_1 、 x_2 の相互の相関値を示している。また、実線及び点線は、理論値を示している。

測定値は、理論値とよく一致しており、再現機能、遅延発生回路とも良好な動作をしていることがわかる。

5. む す び

新しいタイプのフェージング伝搬路模擬装置の製作を行った。本装置は、種々の設定が可能のため、理論との比較、モデルの適合性の検討、再現機能による現象観測、原因究明に大きな助けとなる。

フェージング伝搬路については、まだ十分な解明が行われていない。最近の伝搬路の測定などにより、陸上移動通信での高速、広帯域通信において、等化器などの評価には、従来のシミュレータでは不十分であり、ミクロな解析が要求される。この様な目的にあった伝搬路模擬装置の開発も必要となっている。

今後、伝搬実験データを基にして、新しいモデルに対処した伝搬路模擬装置も製作されると思われるが、DSP などの発展により、複雑なモデルの装置化も可能となるであろう。

謝 辞

装置製作を担当して頂いた国際電気の関係各位に感謝致します。また、ご討論頂いた総合通信部の水野通信系研究室長、久保田主任研究官に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) G.A. Arredondo, W.H. Chriss, and E.H. Walker, "Multipath Fading Simulator for Mobile Radio", IEEE Trans. Commun., 11, COM-21, pp.1325-1328, Nov. 1973.
- (2) 平出, 安部, 花沢, 安達, "陸上移動無線用フェージングシミュレータ", 信学論, J58-B, 9, pp.449-456, 1975年9月
- (3) 高井, 吉田, 池上, 竹内, "多重伝搬による瞬時符号誤りとビット同期系に基づく誤り発生機構の分析", 信学技報 CS83-158, 1984年1月
- (4) M. Schwartz, W.R. Bennett and S. Stein, "Communication Systems and Techniques", pp.563-567, McGraw-Hill, 1966.
- (5) 奥村, 進士 監修, "移動通信の基礎", 第2章,

電子通信学会, 1986年.

- (6) 河野隆二 監修, “移動通信のデジタル化技術”, 5章, トリケップス, 1990年.
- (7) Bello, P.A., “Characterization of Randomly Time-Variant Liner Channels”, IEEE, Trans., Syst., **CS-11**, pp.360-393, Dec. 1963.
- (8) 水野, 猿渡, 守山, 岩間, 柳光, 関沢, “市街地及

び山岳地域における陸上移動遅延プロファイルの測定”, 信学技報, **A-P87-77** 1987年10月.

- (9) 服部, 平出, “相互に相関関係にある複数の疑似マルチパスフェージング波の発生”, 信学論, **J59-B**, 9, pp.464-471, 1976年9月
- (10) S. Stein and J.J. Jones (関英男 監訳), “現代の通信回線理論”, 4章, 森北出版, 1970年.

.....