

技術試験衛星V型(ETS-V)を用いた航行援助実験

— 航空機・船舶実験における直接波対マルチパス電力比(C/M)の測定 —

星野尾 一 明* 三 垣 充 彦** 伊 藤 実*

Navigation Experiment Using Engineering Test Satellite V (ETS-V)

— Measurement of the Carrier to Multipath Power Ratio (C/M) in Radio Propagation Experiment for Aircraft and Ship —

Kazuaki HOSHINO, Mitsuhiko MIGAKI and Minoru ITO

Abstract

This paper describes the results of L-band radio wave propagation experiment using Boeing 747, Beechcraft B99, a ship and Engineering Test Satellite V (ETS-V).

Level variations are measured by using unmodulated signal. Carrier to multipath power ratios (C/M) are derived from the distribution of the received signal level. Values of C/M are above 15 dB for aircraft at more than 13° satellite elevation angles and from 5 dB to 20 dB for ship at satellite elevation angle of 5°~40°, respectively.

Level crossing rates at mean value of received signal level are obtained to analyze speed of level variation. The level crossing rates are from 20/sec to 200/sec for aircraft and from 0.5/sec to 3/sec for ship, respectively.

* 衛星航法部

** 電子航法評価部 (元衛星航法部)

1. はじめに

当研究所では1987年8月に打ち上げられた技術試験衛星V型(ETS-V)を用いて航行援助実験を実施した。この実験は洋上航空管制や洋上船舶の航行援助などに必要な衛星通信、測位技術の開発を目的とし、当所の実験用航空機ビーチクラフトB99(以下B99)、日本航空㈱のボーイング747貨物機(以下B747)および海上保安庁の航路標識測定船「つしま」を使用して電波伝搬および通信、測距・測位実験を行った^{(1)~(5)}。

航空機や船舶の移動体衛星通信や測距において、電波のレベル変動の大きさおよび変動の速さを把握しておくことは、実用システムにおけるビット誤り率の推定、電力マージン、復調器の搬送波同期ループ帯域幅、ビットインタリーブの規模などの設計に重要である。

本論文では、B747による北太平洋航空路上の実験、B99による日本国内空域での実験、および船舶による北太平洋での実験のなかで電波伝搬実験で得たデータについての解析を述べている。この解析では、短期変動(航空機では1秒間程度以内、船舶では100秒間程度以内で起こる比較的高速の変動)に注目し、レベル変動の大きさについては、ライス分布のパラメータである直接波対マルチパス電力比(C/M)^{(6),(7)}を指標とし、実験データより C/M を求めた。また、変動の速さの指標として、受信レベルの平均値を実際の信号レベルが横切る単位時間当たりの回数すなわちレベル交差回数(LCR)⁽⁷⁾、および変動の周波数スペクトラムからフェージングバンド幅を求めた。

2. C/M と回線設計およびシステム設計

一般に、衛星からの直接波と地球面による反射波(マルチパス波)を同時に受信したとき、反射面が荒れているとみなせる場合、受信レベルの分布がライス分布となり^{(6),(7)}、反射面が滑らかになり、反射波に鏡面反射成分が増加すると受信レベルの分布はライス分布からずれてくることが知られている。ライス分布において、 C/M は本来の通信に使用する直接波(希望波)とマルチパス波の電力比を示すものであり、反射面の状態ならびにアンテナの放射パターンと直接波およびマルチ

パス波のアンテナへの入射方向との関係により変化する。マルチパス波は一種の妨害波とみなされ、 C/M が小さいことは希望波に対して妨害が大きいことを示し、レベルの変動が大きくなる。このため、 C/M はデジタル通信の品質(ビット誤り率)を決定する上で大きな影響があり、 C/M が小さいと送信電力をいくら増加してもビット誤り率がある点より改善されなくなる。このため、使用する回線で C/M がどの程度になるかが推定できれば、これに対する対策、例えば、誤り訂正符号の選択、アンテナビーム幅の変更(一般的には、ビーム幅を狭くすれば C/M は大きくできる)などの対策をとることができる。また、ライス分布の C/M を求めることにより、理論的なレベル分布から変動の大きさを計算し、回線設計上の電力マージンを決めることができる。

また、デジタル通信では信号レベルがあるしきい値以下となる継続時間(このとき連続的にビットの誤りが発生する)、およびしきい値以下となる発生間隔の把握がビット誤り発生パターンを知る上で重要である。通信システムを設計する場合、これらを用いて、連続して発生する誤りを並び替えて分散しビット誤り率を改善するための手法であるビットインタリーブのサイズ(並び替えを行うビット数)や誤り訂正符号などを決定しなければならない。

レベル交差回数はレベル変動の速さの指標であり、これとレベルの分布を用いて信号レベルがあるしきい値以下となる継続時間やしきい値以下となる発生間隔を求めることができる。一般的には、ゆっくりした変動では、信号レベルがあるしきい値以下となる時間長や発生間隔は大きくなり、発生するビットの誤りが長く連続することになる。このため、インタリーブサイズを大きくしなければならず伝送遅延が増大し費用もかかることになる。高速の変動ではインタリーブサイズは小さくてもよいが、レベル変動の速さが受信機の応答速度と同程度またはそれ以上となった場合、受信機が変化に追従できずビット誤り率が悪くなり、通信品質が劣化する。従って、受信機の応答速度は、変動の速さを考慮して設計する必要がある。

このような点から、 C/M およびレベル変動の速さを表すレベル交差回数がシステム設計上重要

である。

3. 実験方法

3.1 実験システム概要

実験は、郵政省通信総合研究所関東支所鹿島宇宙通信センターに設置した航空・海岸地球局およびETS-Vに搭載した中継器(AMEX)を使用し、B99、B747および「つしま」と航空・海岸地球局の間で信号の送受信を行った。図1に実験システムを示す。

B747による実験は北太平洋航空路上で行い、その衛星仰角は $5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ の範囲である。B99による

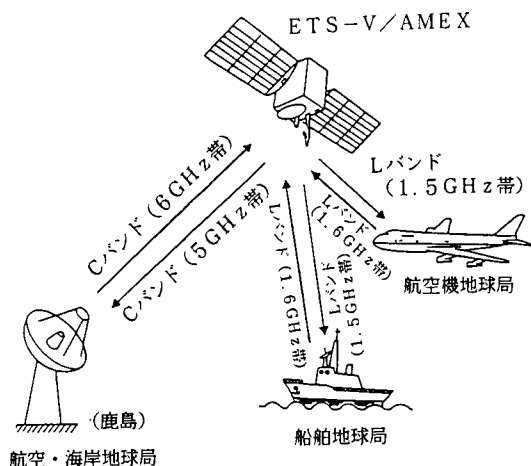


図1 電波伝搬実験システム

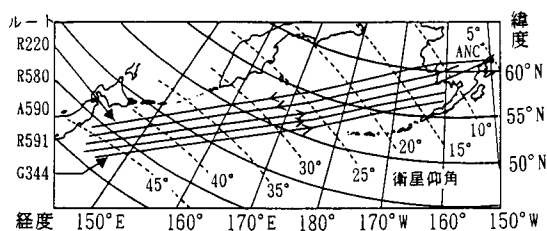


図2 B747実験ルート

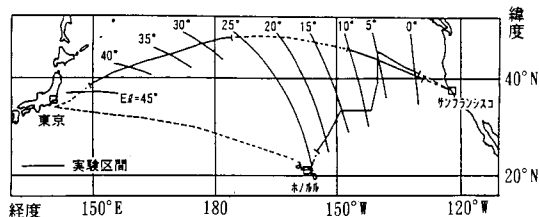


図3 船舶実験ルート（北太平洋）

実験は日本国内空域で行い、その衛星仰角は比較的高く約 45° である。船舶による実験は、北太平洋の東京とサンフランシスコ間およびサンフランシスコとハワイ間で行い、その衛星仰角は $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ である。図2および図3にそれぞれB747と船舶の実験ルートを示す。

電波伝搬実験においては、アンテナの放射特性が、更に航空機ではその取り付け位置も重要であるので、これらを明確にしておく必要がある。図4および図5にそれぞれB747、B99のアンテナ取り付け位置と放射パターンを、図6に船舶アンテナの放射パターンを示す。B747では1素子のマイクロストリップアンテナ（利得7.5dBi）をコックピット後方の胴体背面レドーム内に、図4のNo.2アンテナは仰角(EL) 26° 、機首から 320° に、またNo.3アンテナは仰角 29° 、機首から 140° に向けて取り付け、成田からアンカレッジ行きとアンカレッジから成田行きで切り替えて使用した。B99では機首に1素子のマイクロストリップアンテナ（利得8dBi）と胴体の両側仰角 45° の位置に4素子の和差アンテナ（利得10.5dBi）を装着し上半球

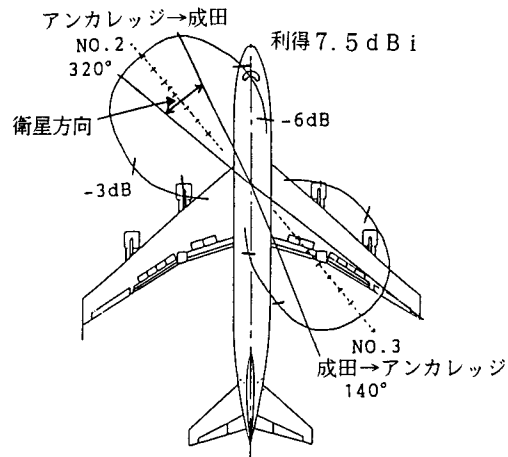
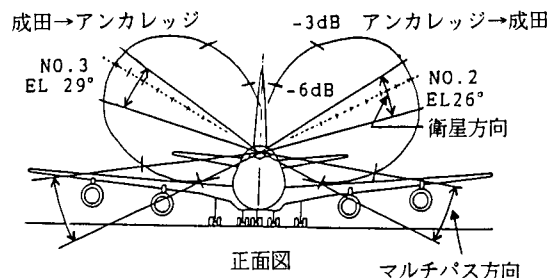


図4 B747のアンテナ位置と放射パターン

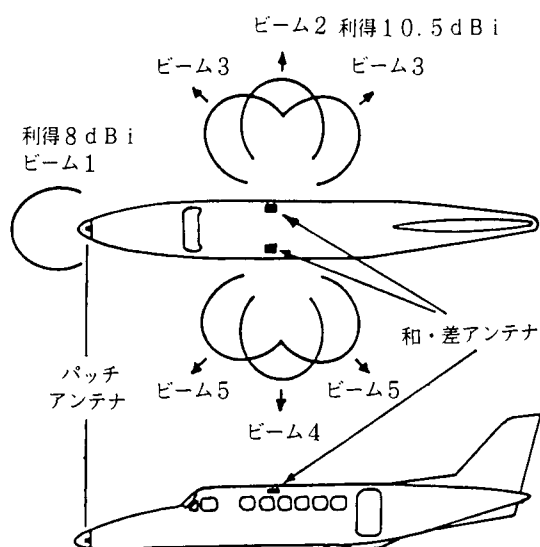


図5 B99のアンテナ位置と放射パターン

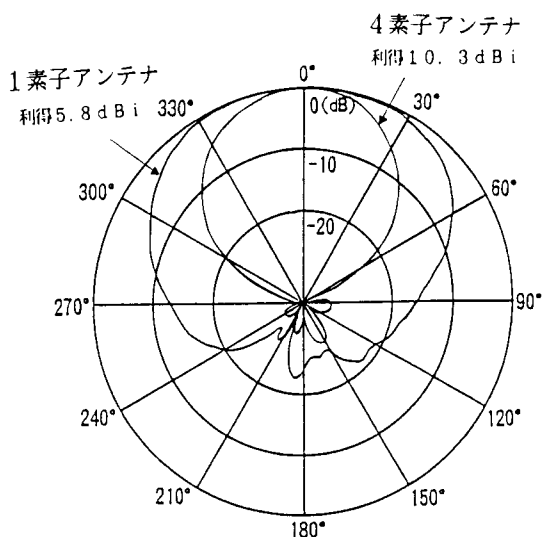


図6 船舶アンテナ放射パターン

をほぼ4 dBi以上でカバーし、衛星方向によりアンテナを切り替えて使用した。船舶では動揺補償台に取り付けた1素子(利得5.8dBi)と4素子(利得10.3dBi)のマイクロストリップアンテナを使用した。船舶実験はアンテナを手動で衛星方向に向けて行った。

3.2 データ取得方法

電波伝搬データは、主として航空機および船舶から無変調波を送信し、受信側の航空・海岸地球

局において中間周波数(70MHz)帯でスペクトラムアナライザを用いて受信レベルを測定することにより取得した。高速のレベル変動の測定ではゼロスパンモード(信号周波数に同調し、レベルの時間変化を測定するモード)を使用した。サンプリング間隔は、航空機実験では1ms、船舶実験では0.1秒とした。これは25kHzまで測定できるスペクトラムアナライザでレベル変動の周波数スペクトラムを測定し、航空機実験では500Hz以上、船舶実験では5Hz以上の周波数成分がないことを確認し、標本化定理を満たすように定めたものである。

また、航空機から航空・海岸地球局への方角で直接周波数拡散信号(SS信号)を用いて直接波と地球表面で反射した多重伝搬経路波(マルチパス波)を分離しC/Mの測定を行った。SS信号のビットレートは1.224Mbpsで、受信機への電波の到達時間差が $0.8\mu\text{s}$ 以上の信号を分離して受信できる⁽⁸⁾。長時間の測定ではスペクトラムアナライザをピークサーチモード(周波数スペクトラムアナライザをピークサーチモード(周波数スペクトラム上で、マークが最大点を追跡するモード)とし、約2秒間隔でデータを取得した。

3.3 データ解析方法

データの解析をおこなうため受信レベルの平均値、標準偏差、ヒストグラム、累積分布を求めた。変動の速さに関しては、ゼロスパンモードのデータ(1024サンプル)を利用し高速フーリエ変換(FFT)による周波数解析を行い、変化の周波数範囲を示すフェージングバンド幅を求めた。また、レベル交差回数(LCR)を同じデータから求めた。

更に、ゼロスパンモードを用い、レベル分布の形から、C/Mを求めた。これは、ライス分布(確率密度関数)を理論的にC/Mが0~24.5dB間を0.5dBステップで計算し、実験値より求めた分布(ヒストグラム)と理論的に計算した分布との間でカイ2乗検定を行い、実験より求めた分布と最も一致する(危険率10%)理論的に計算で求めた分布に対応するC/Mを求めるC/Mとした。C/Mが0dBは直接波と反射波の電力が等しいことを意味し、最悪値と考えられる。また、C/Mが24.5dBは本方法によるC/Mの推定限界で

あり、これ以上の C/M においては反射波の通信性能などへの影響は無視できる。

実験データの分布は標準偏差の1/3の幅でヒストグラムを求め、ライス分布の理論値と比較した。ライス分布の理論値は付録1で示す受信レベルを対数に変換した次式を用いた。

$$P(y) = \left(\frac{1}{A} \right) \cdot (1 + C/M) \cdot \exp(y/A) \cdot \exp \left\{ -\exp(y/A) \cdot (1 + C/M) - C/M \right\} \cdot I_0 \left[2 \cdot \exp(y/A) \cdot (1 + C/M) \cdot C/M \right]^{1/2} \quad (1)$$

y : 受信レベル (dB), A : $10/\ln 10$ $\ln$ は自然対数, I_0 : 第1種0次の変形ベッセル関数

4. 実験結果

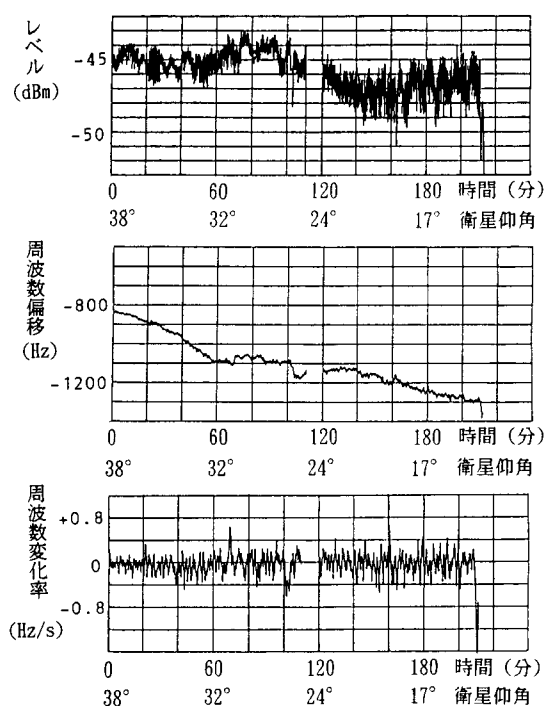
4.1 B747による実験結果

4.1.1 長期レベル変動特性

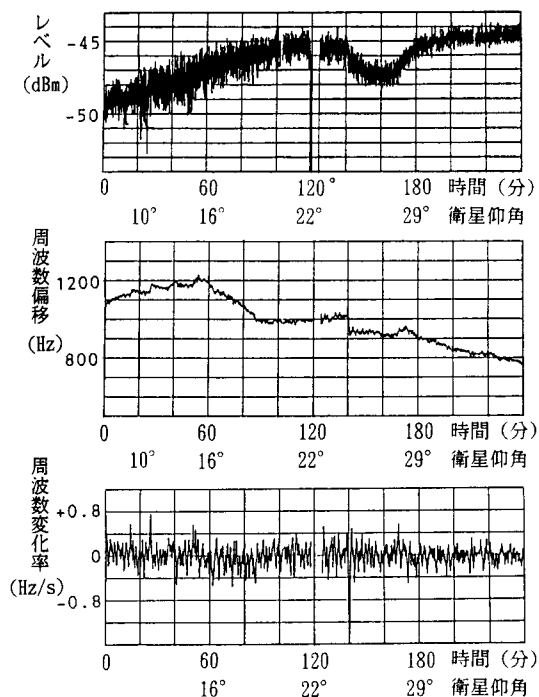
図7にB747実験ルート全体におけるレベルなどの変動を示す。これは、図2の実験ルートを飛

行中の航空機から送られた信号レベルと周波数を航空・海岸地球局で測定したものである。サンプリング間隔は1.7秒である。衛星仰角の範囲は $12^\circ \sim 40^\circ$ で、機首または尾部からの衛星の方位角度は $22^\circ \sim 50^\circ$ である。低仰角における短期レベル変動の範囲は約3dBで高仰角では1dB程度になっている。飛行ルート全体的でみると、短期レベル変動と長期レベル変動が重畳しており、最大値と最小値のレベル差は4～5dBになっている。これは、飛行ルート上で図4のアンテナの放射パターンから予測したレベルの変動1～1.5dBより3dB大きい値で、フェージングの影響および機体での反射波の影響があるものと考えられる。図7(a)の119分頃、図7(b)の120分頃の約10分および最後の約30分間のデータの欠落はデータの取得を中断または終了したためである。

また、図7からわかるように、成田からアンカレッジ方向では、周期約10分の周期的なゆっくりした変動と速い変動が重なっている。これは、アンカレッジから成田方向では測定されていないこ



(a) 成田→アンカレッジ



(b) アンカレッジ→成田

図7 長期変動の例 (B747)

とや図4のアンテナビームと機体との関係から、右主翼による鏡面反射の影響と考えられる⁽⁹⁾。

ドップラー周波数偏位はB747の場合、1.3kHz程度となっている。飛行ルート全体にわたる大きな周波数の変化は航空機の衛星に対する速度が位置により変化するためである。また、図7(b)アンカレッジ→成田の140分頃のデータに見られるように、航空機の進行方向の変化が原因と考えられるステップ状に周波数とレベルが変化する現象が測定されている。B747の場合、周波数の変化率は最大1.6Hz/sであった。

4.1.2 短期レベル変動特性

(1) C/M

高速で短期間のレベル変動を解析するため、サンプリング間隔1msで得られる1024個のデータを1ブロックとし、90s毎に1ブロックのデータを取得した。図8にB747を用いて取得したレベルの時間変動の例を示す。また、付録3の付図3-1および付図3-2に衛星仰角13°、23°および33°で取得した短期の受信レベルの時間変化、累積分布、レベル交差回数および変動のスペクトラムの測定例を示す。なお、スペクトラムは10データブロックの平均スペクトラムである。衛星仰角の増加に従って、レベルの変動が速くなり、周波数スペクトラムが広がるとともにレベルの変動範囲が小さくなりC/Mが大きくなる様子がよくわ

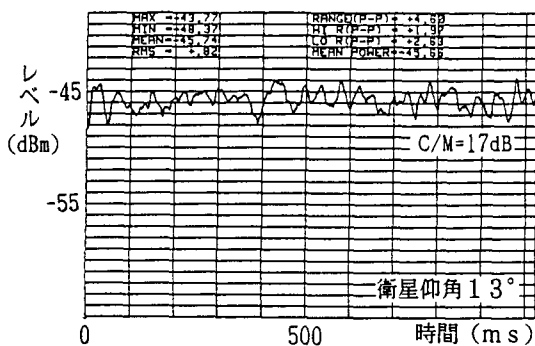


図8 レベルの時間変動の例 (B747)

かる。また、累積分布とC/Mから算出した累積分布の理論値が良く一致することがわかる。

図9にレベルの分布の形から求めた仰角に対する10データブロック分の平均のC/Mを示す。C/Mは18dB以上であった。図9の右上の斜線

の部分は3.3で述べたC/Mの推定限界である24.5dB以上となる範囲である。また、図10にB747の飛行ルート（成田からアンカレッジ方向R220、アンカレッジから成田方向A590を使用）に沿った1データブロック毎のC/Mを示す。衛星仰角が低くなるに従ってC/Mは小さくなり、成田からアンカレッジ方向で衛星仰角18°付近で最

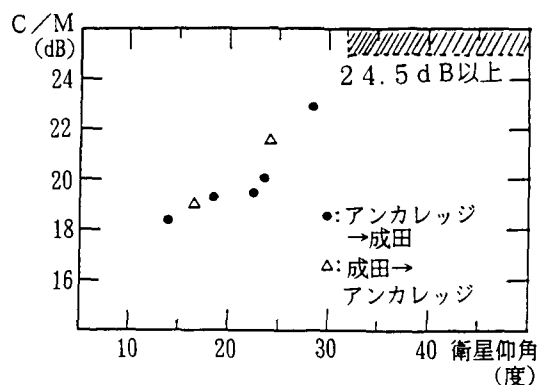


図9 衛星仰角対C/M (B747)

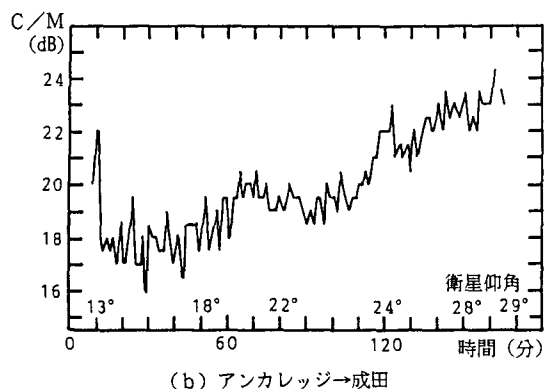
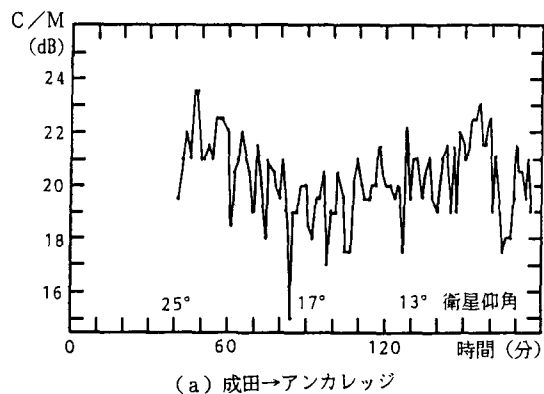


図10 飛行ルート上でのC/M (B747)

低C/M15dBが測定されている。また、衛星仰角が13°以下ではC/Mが大きくなる傾向を示している。これは、陸上を飛行するため、地球表面でのマルチパスの反射が減少したためと考えられる。

レベルの分布は、ライス分布との比較でカイ2乗検定を満足しないものがあり、海面からの散乱波のほか、鏡面反射波、機体からの反射影響が考えられる。なお、ライス分布であるのに、ライス分布でないと見なす危険率を1%とすると、データブロックの60%以上がライス分布になっていた。

C/Mについては、SS信号を利用したマルチパス測定装置⁽⁸⁾を用いて確認した。図11はマルチパス測定装置の出力の例で、衛星仰角13°付近でアンカレッジから成田へ向かうルートで測定したものであり、約5分間のデータを重ね書きしてある。この例ではC/Mは瞬間的に最小12dB程度になることが示されている。なお、平均のC/Mは16~18dBである。また、マルチパスの直接波からの遅延量は約12μsで、付録2に示すように、衛星仰角と航空機高度(衛星仰角約13°、高度10,000m)から計算できる遅延量とよく一致する。遅延の広がりとは2μs程度である。レベルの分布から求めたC/MとSS信号を用いて求めたC/Mはよく一致し、レベル分布と、SS信号を用いて求めた

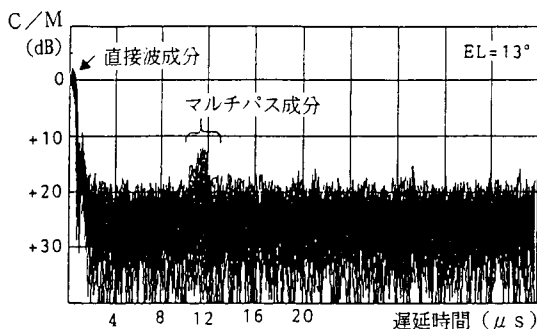


図11 SS信号マルチパス測定装置によるC/M測定例 (B747)

C/Mが妥当なものであることを示している。

(2) フェージングの速さ

図12に、各仰角におけるレベル交差回数とレベル変動のスペクトラムより求めた1/e (eは自然対数の底) バンド幅(定義は後述する)を、フェージングの速さを意味するフェージングバンド幅として示す。スペクトラムより求めたフェージングバンド幅とレベル交差回数は、仰角が大きくなるに従って大きくなり、変動が速くなる。このことは付録3の測定例からもよくわかる。また、これはフェージングバンド幅の理論値からも推定できることである。

航空通信におけるレベル変動のスペクトラムを表すドップラースペクトラムP(ν)は次式で表される⁽¹¹⁾。なお、原点は航空機の直下点の地球表面、水平面内で原点から衛星方向をX軸、水平面内でX軸から反時計回りに90°の方向をY軸、原点から航空機方向をZ軸とする。

$$P(\nu) = (2^{(1/2)} / B_{rms} \pi^{1/2}) \cdot \exp(-2\nu^2 / B_{rms}^2) \quad (2)$$

ただし、

$$B_{rms} = 4(f_i / C) \cdot \alpha \cdot \{ (V_x \sin \theta + V_z \cos \theta)^2 + V_y \sin^2 \theta \}^{1/2} \quad (3)$$

ν: 周波数, θ: 衛星仰角, f_i: 信号周波数, C: 光速, V_x, V_y, V_z: それぞれX軸方向, Y軸方向, Z軸方向の航空機の速度成分, α: 2^{1/2}・σ/T (σは平均海面よりの二乗平均波高, Tは波の自己相関長, αは波の平均傾きである。)

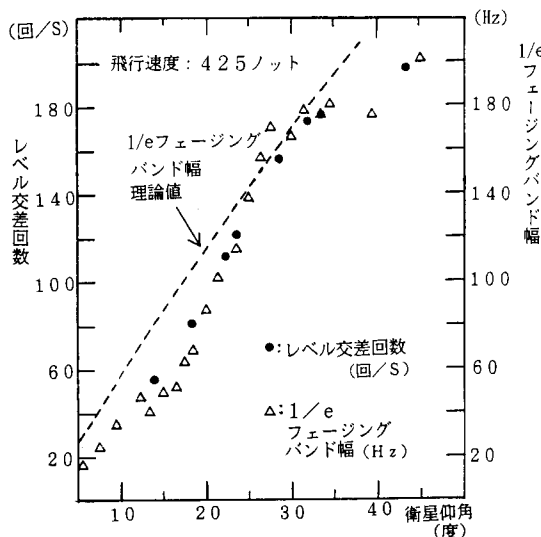


図12 レベル交差回数と1/eバンド幅 (B747)

ドップラースペクトラム $P(\nu)$ の周波数軸上の広がりとして $P(\nu)$ が周波数 $\nu = 0$ のときの値の $1/e$ の値となる周波数 $\nu = B_{rms}/2^{1/2}$ を $1/e$ バンド幅と定義する。 $V_x = 400$ ノット (720km/h), $f_i = 1.6$ GHz, $\alpha = 0.1$ として計算した $B_{rms}/2^{1/2}$ が理論値として図12に示している。理論値と実験から求めた $1/e$ バンド幅の値はよく一致しており、仰角の増加とともに大きくなる。

4.2 B99による実験結果

4.2.1 長期レベル変動特性

図13にB99による実験での受信レベルの変動の例を示す。これは、高知→大分→長崎→鹿児島→種子島→土佐清水→高知のルートを行飛行した場合のものである。高速の1～3 dBの変化と進行方向の変化によるアンテナの切り換えによるレベルの変化がみられる。20dB以上の大きなレベルの低下はアンテナ切り換えに伴うもので、電波が途絶えたためである。

また、陸上を飛行している場合に比べ、海上を飛行している場合、レベル変動の範囲が大きくなる傾向がみられ、更に、変動の速さは海上のほうが遅くなる傾向がみられる。

ドップラー効果による周波数偏移はB747に比較して小さく、周波数の最大偏移は350Hz程度であった。

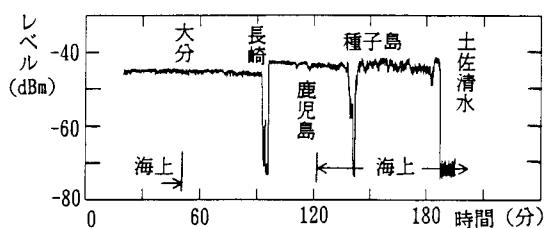


図13 長期変動の例 (B99：四国、九州上空を飛行)

4.2.2 短期レベル変動特性

図13と同じ飛行ルートにおける短期レベル変動を測定した。長崎から種子島までは機首に取り付けられたアンテナを用いてデータを取得した。レベル分布の形から求めたC/Mとレベル交差回数を図14に示す。C/Mは海上部分で18～23.5dBとなる場合があり、陸上部では測定限界の24.5

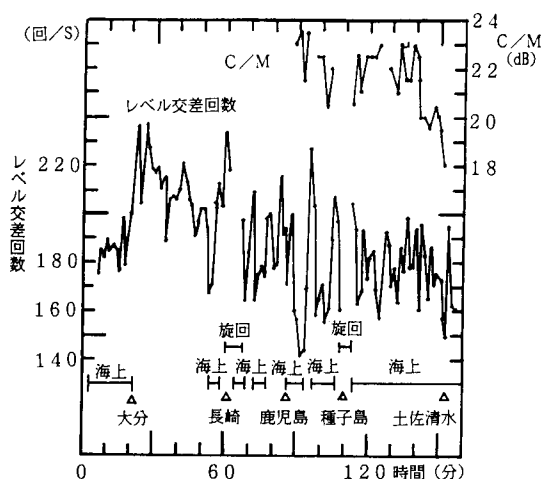


図14 C/Mおよびレベル交差回数 (B99)

dB以上であった。レベル交差回数は、海上で140～190回/s、陸上では190～235回/sとなり、陸上の方が海上より1.2～1.5倍程度早い変化を示している。これは、海面に比べて陸地の方が地形の変化に富み電波を反射する面の変化が大きいためと考えられる。また海上での変動の速さはB747の場合の仰角45°付近のデータとほぼ同じである。

B99を使用した実験ではSS信号によるマルチパスの測定も行ったが、反射波のレベルが低くマルチパスとして識別されなかった。

4.3 船舶による実験結果

船舶による実験は、1素子のマイクロストリップアンテナおよび4素子のマイクロストリップアンテナを用いた。この実験におけるレベル変動はゆっくりしており、102.4秒間で得られる1024個のデータを1ブロックとし、約3分毎に1データブロックを取得した。

実験期間中の風浪は1～4で80%以上が波高5～50cmの1～2であり、うねりは1～2で波高2m未満、波長199m未満であった⁽¹²⁾。これらの海面状態は、衛星仰角1°以上ではLバンドの電波の反射波の主成分が散乱波となる、いわゆる荒れた面⁽¹³⁾と考えられる状態であった。

図15に船舶実験におけるレベルの時間変動の例を示す。また、付録4の付図4-1に衛星仰角3.7°において1素子アンテナで取得した受信レベルの時間変動、ヒストグラム、累積分布、レベル

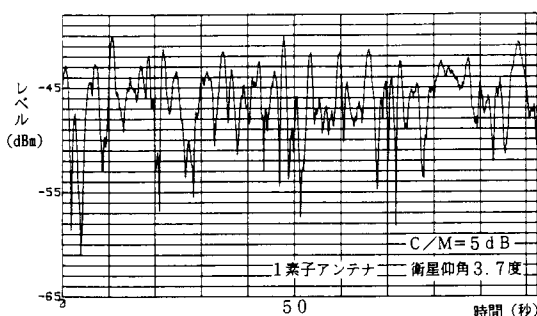


図15 レベルの時間変動の例（船舶）

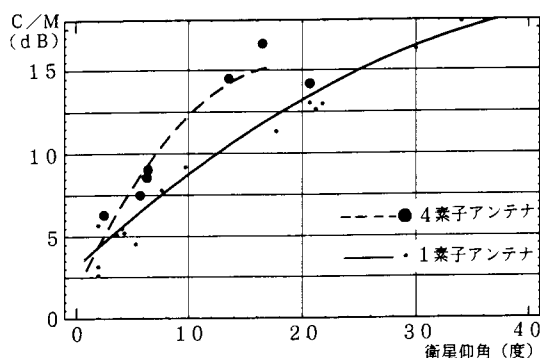


図16 衛星仰角対C/M（船舶）

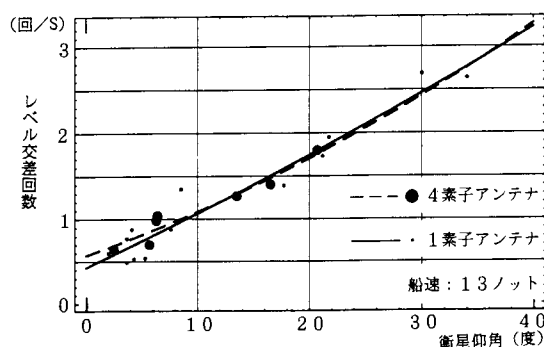


図17 衛星仰角対レベル交差回数（船舶）

交差回数およびレベル変動スペクトラムの例を示す。付録3の航空機による実験の場合に比較して、レベル変動の範囲が大きく、変動の速さもゆっくりしていることがわかる。また、ヒストグラム、累積分布もC/Mから求めた理論値とよく一致している。

図16に1素子と4素子アンテナについて仰角に対する平均C/M（70個の平均）を、図17に各仰角における平均レベル交差回数（70個の平均）を示す。C/Mは衛星仰角5°～10°では1素子アン

テナおよび4素子アンテナの場合とも3～9 dB、1～99%のフェージングレンジは8～16dBとなりアンテナの違いによる差異はほとんどない。衛星仰角15°～20°では4素子アンテナの方が1素子アンテナの場合より1～3 dB大きなC/Mとなり、アンテナパターンの影響が現れる。

レベル交差回数は0.5～3回/sで、航空機の場合と同様に衛星仰角が大きくなるに従ってレベル交差回数が大きくなり、変動が速くなっていることがわかる。変動の速さは、航空機の場合に比較して1/40～1/70で、ほぼ航空機と船舶の速度の比（約1/30）に対応する結果となっており、アンテナの違いによる差異はなかった。

図16および図17の中の実線と破線は、1素子および4素子のアンテナの実験データより最小二乗法を用いて、それぞれを求めたものである。衛星仰角に対するC/Mはアンテナより異なることがよくわかり、レベル交差回数は差が少ないことがよくわかる。

5. まとめ

ETS-Vを用いた航行援助実験のうち電波伝搬実験の結果について述べたが、以下のように要約できる。

- (1) B747の場合、衛星仰角13°以上の水平飛行ではC/Mは15dB以上であった。1/eバンド幅は20～200Hz、レベル交差回数は20～200回/sで、衛星仰角の増加に伴って大きくなる。また、1/eバンド幅は理論値ともよく一致する。これらの変動の速さは低ビットレートでのデジタル伝送ではかなり高速のレベル変動と考えられる。
- (2) B747では主翼での反射波と考えられる周期10分程度の周期的な変動がみられた。
- (3) B99の場合、C/Mは18dB以上であった。レベル交差回数は140～240回/sで、B747の場合の衛星仰角40°付近の値とほぼ同じであった。また、陸上でのレベル交差回数は海上のそれより20%程度大きい。
- (4) B747の場合、レベルの分布から求めたC/MとSS信号を利用したC/Mの測定結果はよく一致しており、両方法で求めたC/M値の妥当性を示している。

(5) 航空機の場合、パイロットの操縦による進行方向の変化に基づく周波数の変化率が 1.6Hz/s 以上であり、同期検波用搬送再生ループの設計に注意を要する。

(6) 船舶の場合、衛星仰角 $5^\circ \sim 10^\circ$ 付近では1素子および4素子アンテナとも C/M は $4 \sim 7\text{dB}$ で差異が認められなかった。

(7) 船舶の場合のレベル変動の速さは、衛星仰角 $2^\circ \sim 35^\circ$ で $0.5 \sim 3$ 回/sで比較的ゆっくりした変動である。アンテナの違いによる差異はない。

(8) 受信レベルの分布は航空機および船舶の場合ともライス分布をする場合が半数以上で、機体の反射や海面での鏡面反射の成分の存在する場合も半数近くあるものと考えられる。

以上の実験結果により、衛星デジタル通信では、利得 $5 \sim 10\text{dBi}$ のアンテナを用いたとき、船舶の場合は、 C/M が小さく、レベル変動がゆっくりしており大きなサイズのビットインタリーブと誤り訂正符号の使用が不可欠と予想できる。航空機の場合は、アンテナの取り付け位置によるが、今回の実験では船舶の場合より C/M が大きくマルチパスの影響は少ないと考えられる。しかし、レベル変動が速く、低ビットレートのデジタル伝送では受信機の応答速度を決める上でレベル変動の速さを考慮する必要がある。

航空衛星通信については、特に1素子パッチアンテナのような低利得アンテナでの電波伝搬についてのデータは少なく、貴重なデータが取得できたものと考えている。これらの結果が今後のシステムの設計に役立てば幸いである。

謝辞

実験の実施に当たってお世話になった郵政省通信総合研究所、宇宙開発事業団、海上保安庁灯台部および日本航空株式会社の関係各位に深く謝意を表します。

最後に、実験データ収集にご協力いただいた当研究所衛星航法部の関係各位に深く感謝します。

参考文献

(1)新美賢治，伊藤実，山田多津人，石出明，星野尾一明，藤田光紘，奈須英臣，西周次：“技術試験衛星V型(ETS-V)を用いた船舶通信実験”，日本航海学会論文集82号pp.103-111，平成2年3

月

(2)石出明，藤田光紘，奈須英臣，星野尾一明，伊藤実，新美賢治，山田多津人，西周次：“技術試験衛星V型(ETS-V)を用いた航空機データ通信実験”，日本航海学会論文集82号，pp.113-119，平成2年3月

(3)山田多津人，伊藤実，新美賢治，石出明，星野尾一明，藤田光紘，奈須英臣，西周次：“技術試験衛星V型(ETS-V)を用いた船舶測距実験”，日本航海学会論文集82号，pp.121-128，平成2年3月

(4)伊藤憲，星野尾一明，伊藤実，西周次：“静止衛星を用いた航空機測距・測位実験”，電子情報通信学会論文誌B-II，Vol.J74-BII No.1，pp.9-16，1991年1月

(5)三垣充彦，星野尾一明，伊藤実，山田多津人：“技術試験衛星V型(ETS-V)を用いた航行援助実験—電波伝搬における信号レベルの低速変動特性—”，電子航法研究所報告No.72，pp.13-25，1992年2月

(6)S.スタイン，J.J.ジョーンズ著，関英男監訳：“現代の通信回線理論”，pp.135-139，森北出版，昭和45年10月

(7)奥村善久，進士昌明監修：“移動体通信の基礎”，pp.67-72，電子通信学会，昭和61年10月

(8)星野尾一明，伊藤実，新美賢治，石出明，西周次：“ETS-Vを用いた航行援助実験用地上局端局装置”，電子情報通信学会技術研究報告宇宙航行エレクトロニクス研究会SANE87-13，1987年7月

(9)K.Hoshino：“Aeronautical mobile satellite communication propagation characteristics in flight experiment using ETS-V”，IEE Seventh International Conference on Antennas and Propagation (ICAP91)，CONFERENCE PUBLICFTION NUMBER 333 PART 2，pp.690-693，April，1991

(10)星野尾一明：“技術試験衛星V型(ETS-V)による航空機・船舶電波伝搬実験”，日本航海学会論文集86号，pp.137-145，1992年3月

(11)PHILLIP A.BELLO：“Aeronautical Channel Characterization”，IEEE Trans. on COM.,Vol.COM-21,No.5,pp.548-563,MAY, 1973

(12)“船舶気象観測指針改訂版増補”，気象庁，1969

(13) PETR BECKMANN, ANDRE SPIZZI-CHINO: "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surface", PERGAMON PRESS, 1963

付録1 式(1)の導出

直接波受信レベルを $a_0^2/2$, 地球面で反射したマルチパス波のレベルを σ^2 とし, 直接波と反射波を合成した受信信号の包絡線 ρ がライス分布をするとすると, ρ の確率密度関数 $P(\rho)$ は文献(6)の(4-211)式より次式で表される。

$$P(\rho) = (\rho/\sigma^2) \cdot \exp \{ -(\rho^2 + a_0^2)/2\sigma^2 \} \cdot I_0 [a_0\rho/\sigma^2] \quad (\text{付一1})$$

ただし, I_0 は第1種0次の変形ベッセル関数

(付一1)式より受信レベル ρ^2 の平均値に対する比の対数で表した受信レベル(平均値を0dBとしたdB表現)の確率密度関数を直接波電力対マルチパス電力比 (C/M) を用いて求める。

まず, $C = a_0^2/2$, $M = \sigma^2$ であるから $C/M = a_0^2/2\sigma^2$ となり, これらを(付一1)式に代入すると次式になる。

$$P(\rho) = (\rho/M) \cdot \exp \{ -(\rho^2/2M) - (C/M) \} \cdot I_0 [\rho_0(2C)^{1/2}/M] \quad (\text{付一2})$$

次に, 受信レベル ρ^2 を受信信号の平均レベル $E[\rho^2]$ で正規化した変数 x を導入する。 $E[\rho^2] = a_0^2 + 2\sigma^2$ で表される(文献(A-1)の(2.10.11)式参照)から x は次式となる。

$$x = \rho^2/E[\rho^2] = \rho^2/\{2M(C/M+1)\} \quad (\text{付一3})$$

(付一3)式より

$$\rho = \{2xM(1+C/M)\}^{1/2} \quad (\text{付一4})$$

(付一2)式において, (付一4)式により ρ を x に変数変換する。一般に, 確率密度関数の変数変換を行う場合, g が確率変数 z の1価の連続関数であり,

$$g = f(z)$$

で表されたとする。 z の確率密度関数 $P(z)$ と g の確率密度関数 $P_g(f(z))$ の関係は次式で表される(文献(6)の(4-27)式または(4-97)式参照)。

$$P(z) = P_g(f(z)) \cdot J \quad (\text{付一5})$$

ただし, J は変換ヤコビアンで, $J = dg/dz$ で表される。

従って, (付一4)式より,

$$J = d\rho/dx = 1/\{2(kx)^{1/2}\} \quad (\text{付一6})$$

$$\text{ただし, } k = 1/\{2M(C/M+1)\}$$

であるから, (付一2), (付一4), (付一5)および(付一6)式より, x の確率密度関数 $P(x)$ として次式を得る。

$$\begin{aligned} P(x) &= \{2x(1+C/M)^{1/2}/M\} \cdot \exp \{ -x(1+C/M) - C/M \} \cdot I_0 [2\{x(1+C/M)C/M\}^{1/2}] \\ &\quad \cdot (d\rho/dx) \\ &= (1+C/M) \cdot \exp \{ -x(1+C/M) - C/M \} \cdot I_0 [2\{x(1+C/M)C/M\}^{1/2}] \quad (\text{付一7}) \end{aligned}$$

次に, 正規化レベル x の対数を y とし, dB表現のレベル y の確率密度関数を求める。

$$\begin{aligned} y = f(x) &= 10 \cdot \log(x) = 10 \cdot \ln(x)/\ln(10) \\ &= A \cdot \ln(x) \quad (\text{付一8}) \end{aligned}$$

ただし, $A = 10/\ln(10)$, $\ln$ は自然対数である。

(付一8)式より, $x = \exp(y/A)$ であるので,

$$J = dx/dy = (1/A) \cdot \exp(y/A) \quad (\text{付一9})$$

となる。

前述の場合と同様に変数 x を y に変換する。

(付一5), (付一7), (付一8)および(付一9)式よりdB表現のレベル y の確率密度関数 $P(y)$ は次式となり, 本文(1)式が求まる。

$$\begin{aligned}
 P(y) &= P(f(x)) \cdot (dx/dy) \\
 &= (1/A) \cdot (1 + C/M) \cdot \exp(y/A) \cdot \\
 &\quad \exp \{-\exp(y/A) \cdot (1 + C/M) \\
 &\quad - C/M\} \cdot I_0 [2 \cdot \{\exp(y/A) \cdot \\
 &\quad (1 + C/M) \cdot C/M\}^{1/2}] \quad (\text{付-10})
 \end{aligned}$$

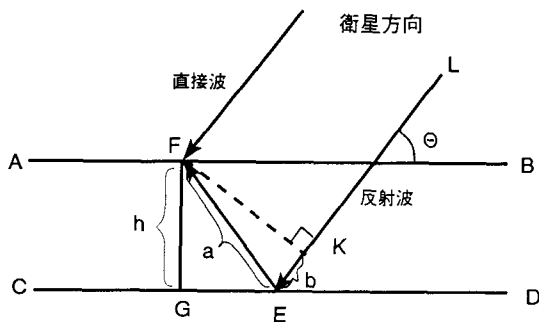
付録1の参考文献

(1-1) 宮脇一男：“雑音解析”，朝倉書店，昭和47年

付録2 航空機における地球面での反射波の遅れの計算

付図2-1のように，地球を平面と仮定し，航空機(F点)，反射点Eおよび衛星を含む面内において，CDを地球表面，ABは高度hでCDに平行とする。衛星仰角 Θ ，EFの長さをa，Fから直線ELに下ろした垂線の足をKとし，EKの長さをbとし，衛星から航空機Fに達する直接波と地球表面による反射波の距離差をrとする。

付図2-1より，



付図2-1 直接波と地球面での反射波との関係

$$a = h / \sin \Theta$$

$$\begin{aligned}
 b/a &= \cos(180 - 2\Theta) \\
 &= 2\sin^2 \Theta - 1
 \end{aligned}$$

よって，

$$b = a (2\sin^2 \Theta - 1)$$

であるから，距離差rは

$$\begin{aligned}
 r &= a + b = (h / \sin \Theta) + (h / \sin \Theta) \cdot \\
 &\quad (2\sin^2 \Theta - 1) \\
 &= (h / \sin \Theta) (1 + 2\sin^2 \Theta - 1) \\
 &= 2 \cdot h \cdot \sin \Theta
 \end{aligned}$$

よって，直接波と反射波の到達時間の差dは，光速をcとすると，次式となる。

$$d = r / c = 2 \cdot (h / c) \cdot \sin \Theta$$

ここで，航空高度h=10,000m，衛星仰角 $\Theta=13^\circ$ ，光速c=299,792,458m/sとおくと，

$$\begin{aligned}
 d &= 2 \cdot (10000 / 299792458) \cdot \sin 13^\circ \\
 &= 15 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

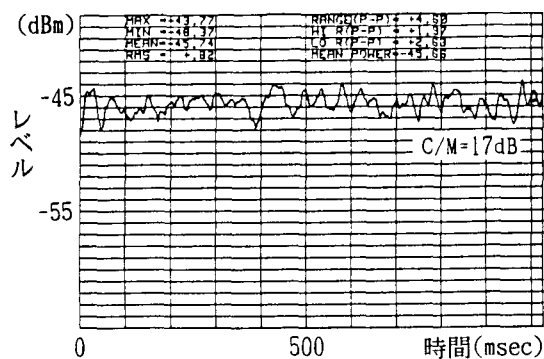
となり，到達時間の差は， $15\mu\text{s}$ となる。

この到達時間の差は，気圧高度計の誤差(最大 $\pm 600\text{m}$)⁽²⁻¹⁾，衛星仰角推定誤差($1 \sim 2^\circ$)を考慮すると， $2 \sim 3\mu\text{s}$ 程度の誤差が考えられるので，本文3.1.2項で述べた遅延量 $12\mu\text{s}$ にほぼ一致しているものと考えられる。

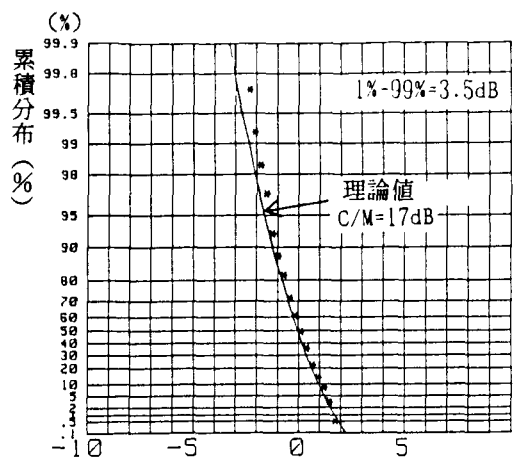
付録2の参考文献

(2-1) 長岡栄，吉岡栄治郎：“航法精度測定装置における気象データ処理”，電子航法研究所報告No.42，1983年7月

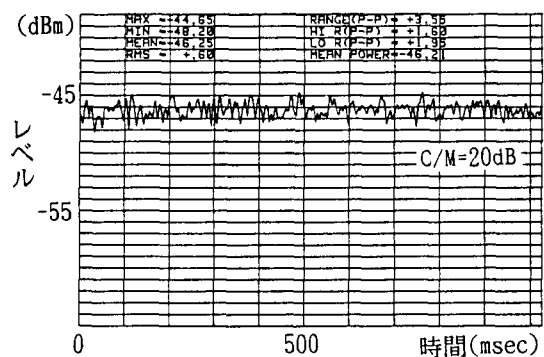
付録3 B747でのレベル変動特性の測定例



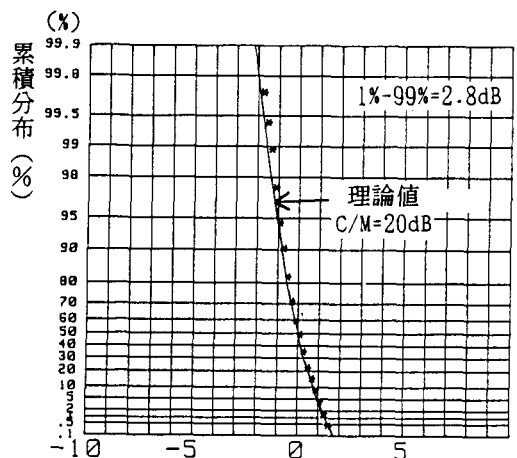
(a-1) 衛星仰角 13°



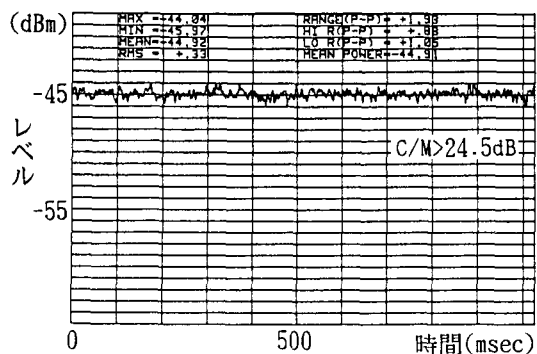
(a-2) 衛星仰角 13° 相対レベル(dB)



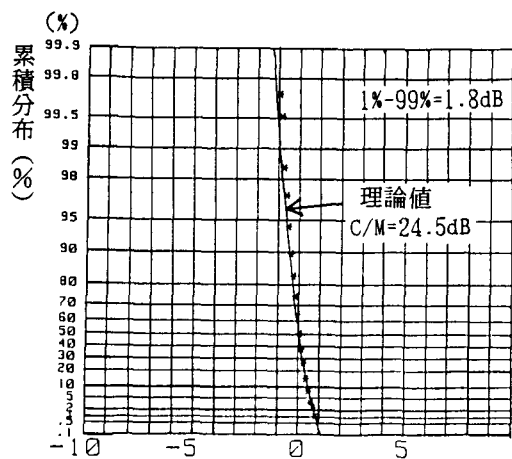
(b-1) 衛星仰角 23°



(b-2) 衛星仰角 23° 相対レベル(dB)



(c-1) 衛星仰角 33°

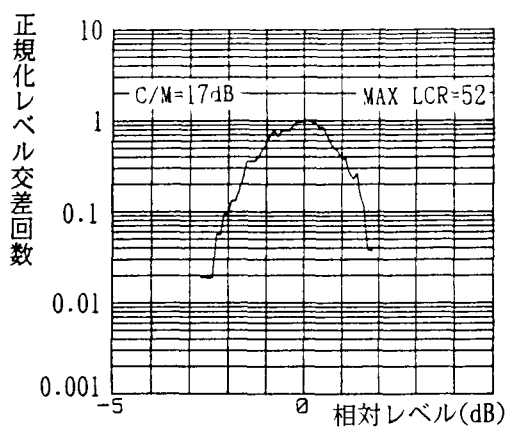


(c-2) 衛星仰角 33° 相対レベル(dB)

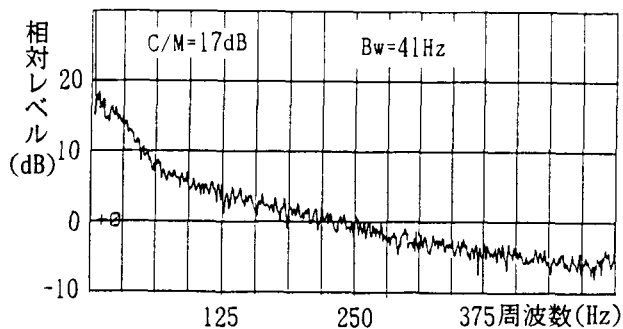
時間変動

累積分布

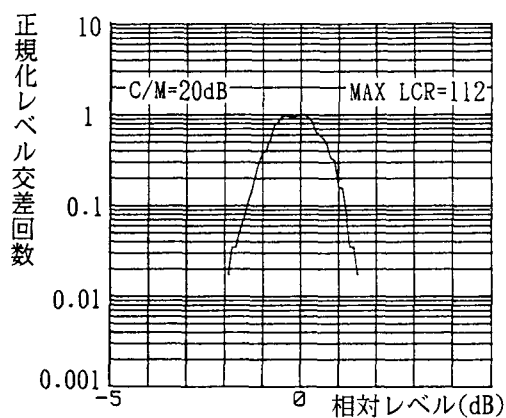
付図3-1 レベルの時間変動および累積分布



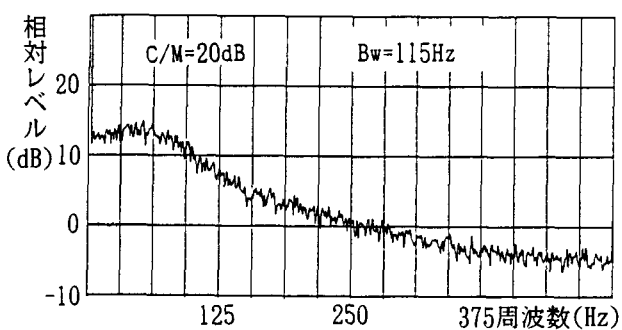
(a-3) 衛星仰角 1.3°



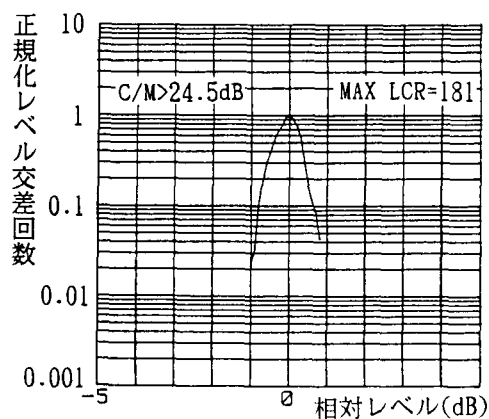
(a-4) 衛星仰角 1.3°



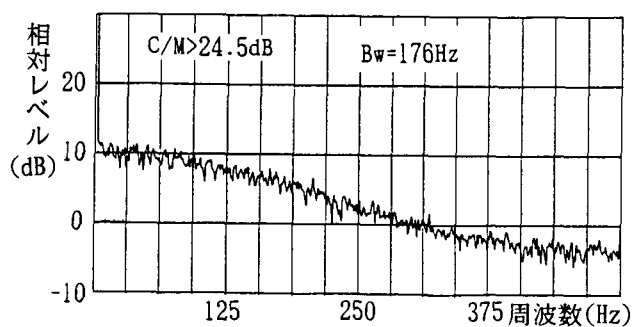
(b-3) 衛星仰角 2.3°



(b-4) 衛星仰角 2.3°



(c-3) 衛星仰角 3.3°



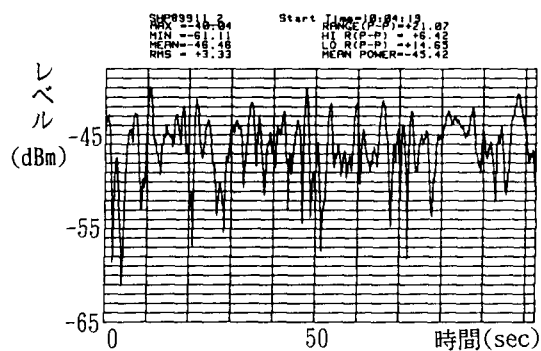
(c-4) 衛星仰角 3.3°

レベル交差回数

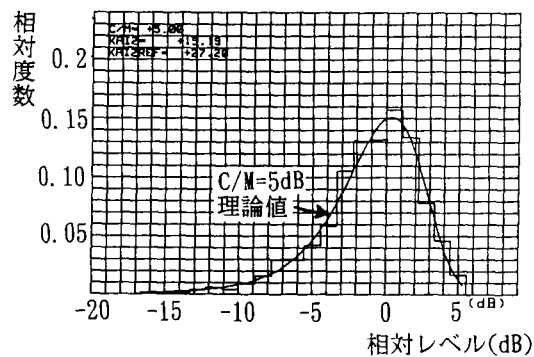
レベル変動スペクトラム

付図3-2 レベル交差回数およびレベル変動スペクトラム

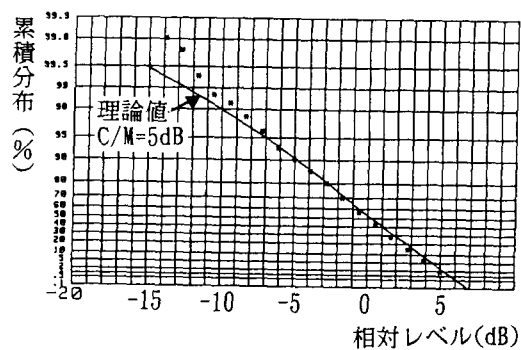
付録 4 船舶でのレベル変動特性の測定例



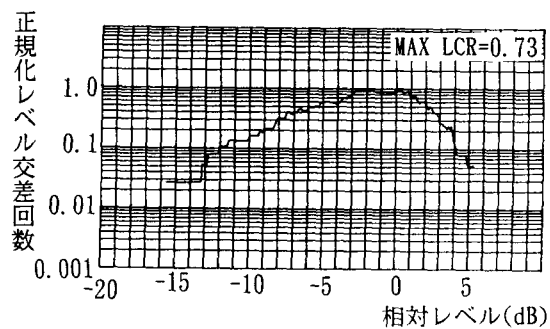
(a) 時間変動



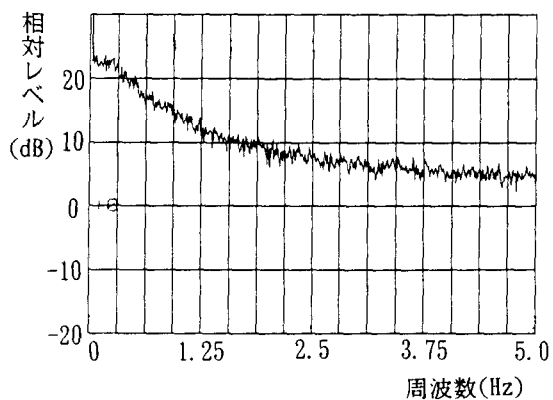
(b) ヒストグラム



(c) 累積分布



(d) レベル交差回数



(e) レベル変動スペクトラム

付図 4-1 船舶でのレベル変動特性
(衛星仰角 3.7° 、 $C/M=5\text{dB}$ 、1 素子アンテナ)