

海事衛星通信における海面反射フェージングの相関特性

唐 沢 好 男*
塩 川 孝 泰**

Correlation Characteristics of Multipath Fading due to Sea Surface Reflection in Maritime Satellite Communications

By

Yoshio KARASAWA, Takayasu SHIOKAWA : Radio Transmission
Laboratory, KDD Research and Development Laboratories

Multipath fading due to sea surface reflection will be a significant problem in maritime satellite communications, particularly for a system operating with low G/T ship earth stations at low elevation angles. This paper presents correlation characteristics of multipath fading as to time, space and frequency domains, based on the theoretical model previously presented by the authors. As for the power spectrum, which is one expression of time- (or auto-) correlation, the validity of estimated values is also examined by comparison with experimental data obtained by coast and onboard experiments. Moreover, the applicability of space and frequency diversity to the maritime satellite communications as a probable fading reduction technique is discussed, based on the calculation of space and frequency correlation characteristics. Finally, the possibility of fading reduction for up-link is also considered.

1. ま え が き

インマルサットシステムによる海事衛星通信では、現在、衛星仰角 5° 以上の海域にある船舶を対象として通信サービスの提供が行われている。このような海事衛星通信の場合、船舶が電波をよく反射する海で囲まれているという特殊性から、仰角が $5^\circ \sim 10^\circ$ の低仰角運用の際には、海面からの反射波によって信号強度が変動する現象、いわゆるマルチパスフェージングが発生する。このマルチパスフェージング(以下、海面反射フェージングと呼ぶ)は、ビーム幅の広い小型のアンテナほど大きなものとなるため、将来システムとして検討が進められている低 G/T 船舶地球局システム(小型アンテナが用いら

れる)では、特に重要な検討課題となっている。このため筆者らは文献(1)において、仰角、アンテナ利得、海面状態等に対するフェージングの大きさを求めるための理論モデルとその計算結果を示し、海面反射フェージングによる受信強度の劣化特性について定量的な検討を行った。

一方、通信方式の検討、あるいはフェージング軽減の検討を行う際には、フェージングの大きさとともに時間、空間および周波数をスケールとする相関的な性質も把握しておくことが重要である。ここでいう時間的な相関特性とは、変動の速さに関する情報を与えるものとして、また空間相関特性はスペースダイバーシチを検討する際に、また周波数相関特性は、フェージングの帯域内周波数選択性、周波数ダイバーシチ、送受両リンクでのフェージングの相関等を検討するうえでそれぞれ重要な量で

* 研究所 無線伝送研究室主査

** " 無線伝送研究室主任研究員

ある。

本論文では、まず相関の概念を述べ、次に文献(1)に示したモデルを基に相関特性を得るための理論的取扱いについて検討し、時間、空間、周波数に関する相関特性の解析結果を示す。また、この結果を基に、海事衛星通信システムの設計や、フェージングの軽減対策を検討する際の問題点を考察する。

2. 相関の概念と理論モデル

2.1 相関の概念

海面からの反射波は、直接波に対して振幅と位相が一定な関係にあるコヒーレント成分（または正規反射波成分） C および、波の動きに伴って振幅や位相が絶えず不規則な変動を繰り返すインコヒーレント成分から成る。コヒーレント成分は波高の低い穏やかな海面で卓越し、波高の増加とともに減少する一方、インコヒーレント成分は、波高とともに増加し、やがて飽和値に達する。1.5 GHzの電波の仰角 5° 以上では、波高が1mを超える海面状態になるとインコヒーレント成分はほぼ飽和値に達し、コヒーレント成分は、無視できる程度に小さくなる。文献(1)でも述べたように、このインコヒーレント成分が主体となる海面状態は、発生する頻度が高く、かつフェージングそのものも大きなものとなることから、フェージングを検討する際に重要である。

図1はフェージングにより信号強度が変動する様子3種類を概念的に示したものである。図で実線のカーブ①を基準に考えると、破線②とはかなり形状が似ており、点線③とは、あまり共通性がないように見える。このような場合、①と②には強い相関があるといい、①と③には相関がないという。相関の強さの程度は $1 \sim -1$ の間の値で表わされ、相関係数と呼ばれる。この場合、1（波形が完全に相似形）、0（関連性なし）、 -1 （波形が反転相似）が基準となる。ところで、図1が空間的に異なる

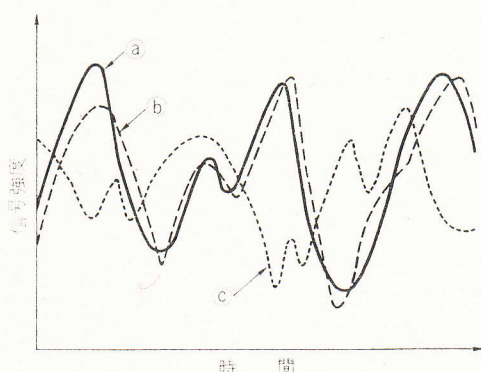


図1 フェージングによる信号強度の変動（概念図）

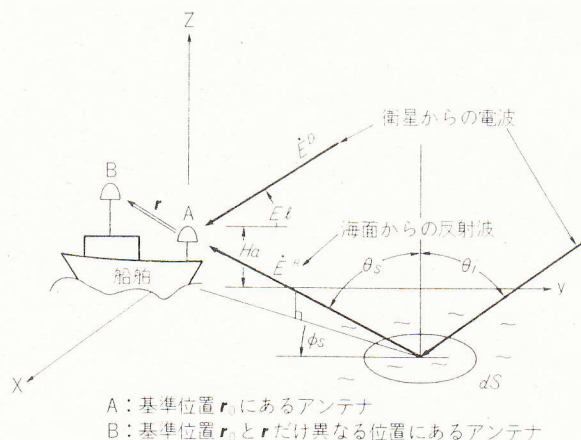


図2 海面からの反射波と座標系

3地点で同時に測定されたものであるならば、その場合の相関特性とは受信点の位置によって異なるフェージングパターンの相似性（空間相関特性）を示すことになる。同様に図1の結果が周波数の異なる電波を同一地点、同一時刻に観測したものであるならば、周波数に関する相関特性を、更に、同一地点、同一周波数の電波の受信記録を時間をずらして比較しているような場合には、時間的な相関特性（自己相関特性）をそれぞれ調べていることになる。

一例として、フェージングの空間領域での相関特性について述べる。図2で基準となるアンテナAの位置ベクトルを r_0 とし、 r_0 と微量 r だけ離れた r_0+r にあるアンテナBの間で、直接波(E^D)で正規化された反射波(E^R/E^D)のパラメータ r に対する相関関数 $C(r)$ を次式で定義する。

$$C(r) \triangleq \text{Re} \left[\frac{\langle \dot{E}^R(r_0) \dot{E}^{R*}(r_0+r) \rangle}{\langle \dot{E}^R(r_0) \dot{E}^{R*}(r_0) \rangle \langle \dot{E}^D(r_0) \dot{E}^{D*}(r_0+r) \rangle} \right] \\ = \frac{P_{\text{coh}} C_{\text{coh}}(r) + P_{\text{inc}} C_{\text{inc}}(r)}{P_{\text{coh}} + P_{\text{inc}}} \quad (1)$$

ここで $\langle \rangle$ はアンサンブル平均、 $*$ は共役複素量を、また $\text{Re} [\]$ は複素量の実数部を表わす。また、 C_{coh} 、 C_{inc} は反射波のコヒーレント成分、インコヒーレント成分に着目した相関関数、 P_{coh} 、 P_{inc} は両成分の平均電力である。式(1)はある点 r_0 で観測しているときの直接波と反射波の関係(振幅および位相)が、位置が r だけずれることによって変化し、この変化の程度に応じて相関係数が小さくなることを意味している。式(1)中の空間スケール、 r_0 、 r を周波数スケールに置き換えることによって周波数相関特性を、また時間スケールに置き換えることによって時間相関特性を得ることができる。

式(1)中の P_{coh} 、 P_{inc} は文献(1)、(2)によって、

$$P_{\text{coh}} = \Gamma^2 G^2 e^{-u^2} \quad (2)$$

$$P_{inc} = \frac{1}{4\pi} \iint_{\text{全海面}} \sigma_0 S \Gamma^2 G^2 \tan \theta_s d\phi_s d\theta_s \quad (3)$$

で与えられる。ここで Γ は海面の反射係数、 G は反射波到来方向のアンテナ利得（電界の次元）、 u は海の荒れ具合を表わすパラメータ、 σ_0 は海面を完全導体粗面とみなしたときの単位面積当りの散乱断面積、 S は散乱波に対する海の波による遮へい係数である。

一方、コヒーレント成分の相関係数は、空間、時間、周波数のそれぞれの変化量 $\mathbf{r}$, t , F に対して

$$C_{coh}(\mathbf{r}) = \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} \cos \theta_i \mathbf{z} \cdot \mathbf{r} \right) \quad (4)$$

$$C_{coh}(t) = 1 \quad (5)$$

$$C_{coh}(F) = \cos \left(\frac{4\pi H_a F}{c} \cos \theta_i \right) \quad (6)$$

(H_a : アンテナの海面からの高さ、 c : 光速)

となる。またインコヒーレント成分の相関係数は、概念的に、

$$C_{inc} \left(\frac{\mathbf{r}}{t} \right) = \frac{1}{4\pi P_{inc}} \iint_{\text{全海面}} \sigma \left(\frac{\mathbf{r}}{t} \right) S \Gamma^2 G^2 \cdot \tan \theta_s d\phi_s d\theta_s \quad (7)$$

と表わせる。ここで σ は相関散乱断面積と呼ばれる量である。以下の節では、時間、空間、周波数に関する相関散乱断面積 σ を定式化するための前提条件等について述べる。式の導出については、文献(3)、(4)に記述されているので、ここでは式の記述は割愛する。

2.2 自己相関特性

時間に関する相関特性は自己相関特性と呼ばれる。信号強度が緩慢に変化するようなフェージングでは、同一状態が比較的長い時間維持されることになるため、相関時間〔相関係数が $1/e$ (e は自然対数の底: 2.718) となる時間〕も比較的長いものとなる。逆に急峻な変化をするフェージングでは、相関時間は短い。このような相関時間の長短は、変動周波数成分の大小（パワースペクトル）としてとらえることができる。すなわち相関時間が長い変動は、低い周波数成分が主体であり、逆に相関時間が短い変動では高い周波数成分が強いことを意味している。自己相関関数とパワースペクトルは表裏一体の関係にあり、Wiener-Khintchine の関係式を用いれば、一方を他方に変換することができる。通常、信号強度変動の時間的なふるまいについては、パワースペクトルによって表現されることが多いので、本論文でも後述する解析結果の節ではパワースペクトルの形で結果を示す。

スペクトルを決定する要因には、時間的に変化するものすべてが含まれる。すなわち、個々の波の流れの速度

(Oct. 1985)

と方向、船舶の航行に伴うアンテナ位置の移動、船舶のローリングおよびピッチングによって生じるアンテナの動揺等である。波の動きの定式化に際しては次の性質を利用する(3)。すなわち、①波の速度は波の波長の平方根に比例する（重力波の性質）、②波高と波長の間にはある一定の比例関係がある、③風によって生じる波浪（風浪）では、波の動く方向は、風の方向を中央値とする $\pm 90^\circ$ の範囲にほぼ正規分布する。更にスペクトルには、④船の航行に伴うアンテナの一定方向への移動、⑤船舶の動揺によるアンテナの水平および上下方向への動きが反映される。

2.3 空間相関特性

一般にインコヒーレント成分が主体となるフェージングでは、ある位置 $\mathbf{r}_0$ と $\mathbf{r}$ だけ離れた $\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}$ の2地点でのフェージングの相関は2地点間の距離 $\mathbf{r}$ が大きくなるに従って小さくなるが、それには大別して三つの要因が挙げられる。すなわち、①直接波と反射波の相対位相が変わること、②種々の方向から反射波が到来しているため反射波相互の位相関係が変わること、③距離が大きくなるに従ってフェージングに寄与する反射波の到来領域そのものが異なっていくことである。①に関しては図2における z 軸の相関特性に強く影響し、例えばアンテナを z 軸に沿って上げていくと直接波の位相が進み、反射波の位相が遅れるので位相関係の変化が大きく、 z 軸方向の相関長（相関係数が最初に $1/e$ となる距離）が x , y 軸方向に比べて短いことは容易に推定できる。②に関しては、相関長は反射波の到来方向の広がり依存し、この広がりが大きいほど（すなわち反射波到来領域が広いほど）相関長は小さくなる。③に関しては、例えば x 軸方向に十分大きな距離をとれば、2点では全く別の海面を見ることになるので、①、②の理由とは別にインコヒーレント成分に関する相関関数 C_{inc} は0になる。低仰角におけるフェージングでは、インコヒーレント成分の大部分は十分遠方にある広い領域から到来するので、要因③の影響が現われる距離は、①、②の影響が現われる距離に比較して十分長い。そのため、本論文では、比較的短い距離の相関特性に対して支配的な要因である上記①と②のみを考慮する。

2.4 周波数相関特性

次に周波数領域でのフェージングの相関特性を考える。海面の反射係数そのものの周波数依存性は小さく、ここで考えている 1.5GHz 帯を中心とする 100MHz 程度の範囲では、水平および垂直偏波に対する周波数による反射係数の違いは無視できる。また、アンテナ主ビーム内

での放射パターンおよび位相特性も上記周波数帯では、ほぼ同一とみなし得るため、周波数の違いによるフェーシングパターンの違いは、専ら直接波と反射波の通路差によるものとなる。

いま、図2の一つのアンテナにおいて、衛星からアンテナに直接到来する電波と、いったん海面 dS (任意の微小領域) で反射してくる電波との通路長の差を $\Delta L(\theta_i, \theta_s, \phi_s)$ の関数) とすると、ある周波数 f から F だけ離れた f と $f+F$ の二つの電波について見た直接波と反射波の間の電氣的位相差の変化量は $2\pi F\Delta L/c$ (単位ラジアン, c : 光速) となる。

このように周波数差 F が大きくなるほど、直接波と反射波との間の位相差の変化量が増加することから相関も周波数の差 F を関数として変化することになる。

3. フェーシングの相関特性

以下の解析では、インマルサットシステムを想定し、周波数 1.5GHz, 円偏波の電波を受信する場合について考える。またその際の船舶局用アンテナの利得は 12dB_i としている。一般に、反射波の強さを求める場合には、結果はアンテナ利得に強く依存する⁽¹⁾が、相関的性質の場合には、反射波の時間、空間、周波数に対する変化の性質を表わすものであるため、解析結果に対するアンテナ利得依存性は小さい。このため、以下に示す解析結果は、利得 15dB_i 程度以下と想定される各種低 G/T 船舶局システムで発生するフェーシングに対し広く有効である。

3.1 パワースペクトル

前述のとおり、時間に関する相関特性、すなわち自己相関特性は Wiener-Khintchine の関係式によってパワースペクトルに変換でき、かつ時間的な変動の性質についてはパワースペクトルによって議論されることが多いので、ここではパワースペクトルの形で結果を示す。

まず、海面反射波そのものの変動によるフェーシングスペクトルを求めるため、受信アンテナが水平面に対して静止しているプラットフォーム上 (例えばオイルリグ、海岸等) に設置されている場合を考える。

図3は波高 $H_{1/3}$ (有義波高*) が 3m の場合の仰角とスペクトルの関係を、図4は仰角 10° における波高とスペクトルの関係を示している。同図から他の条件が同じならば仰角が高いほど、また波高が高いほどスペクトルの広がりが大きくなることが分かる。図4には海岸実

* 有義波高: 波高の定義法の一つ。波の山と谷の差 (peak-to-peak 値) を長時間測定し、測定値の上位 1/3 を用いて平均した値。海洋学でよく用いられ、人間の目視感覚に最も近いといわれている。

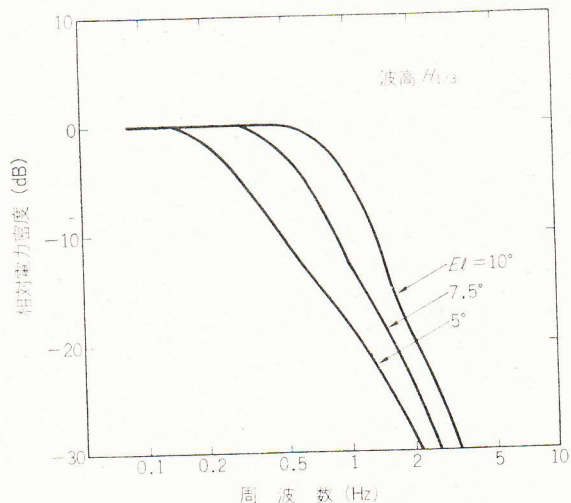


図3 スペクトルの仰角特性 (理論値)

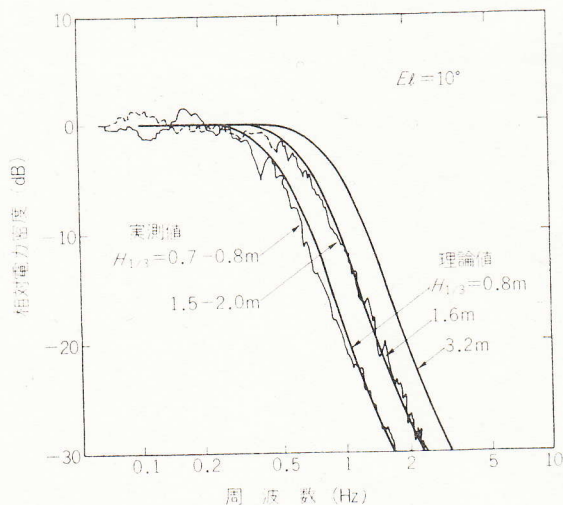


図4 スペクトルの波高特性

験 (アンテナ位置: 固定) によって測定した波高 70~80cm, 1.5~2.0m の場合の実測スペクトルも併せて示してある。同図から理論値と実測値は比較的よく一致していることが分かる。

実際の海事衛星通信の環境下では、船は一定の速さで動いており、また、波による動揺も受けているのでフェーシングによる信号強度の変動にもこれらの影響が反映され、静止プラットフォームを想定した図3、図4の結果よりは、一般的にスペクトル幅は広がる。図5は一例として、船舶実験で得られた実測スペクトル⁽⁵⁾と、これに相当する理論値を併せて示している。高い周波数部分でやや不一致はあるものの、船舶の航行、動揺を考慮することによって、一見複雑とも思える環境下で発生するフェーシングのスペクトルについても、実測値と理論値は比較的よく一致することが分かる。なお、図5の例では、船舶の進行方向と風の向き (すなわち波の向き) の

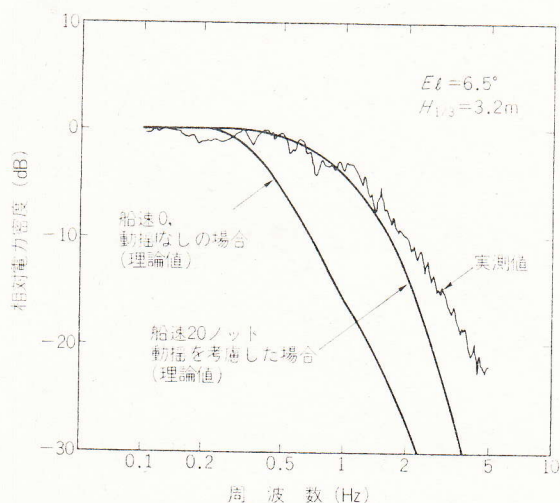


図5 船舶の航行，動揺を考慮したスペクトル

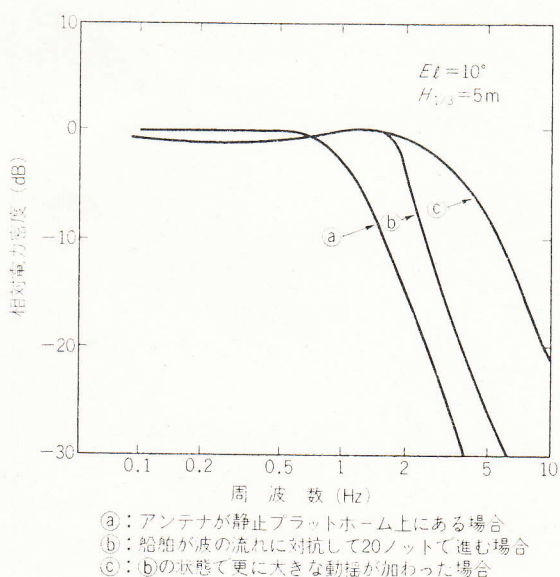


図6 スペクトルの広がり大きい例 (理論値)

角度差が約 60° であり，これを考慮して理論値を得ているが，同一波高，同一仰角の場合，角度差が 180° のとき最もスペクトル幅が広がる⁽³⁾。

上述の検討結果から，フェージングスペクトルの帯域幅は，仰角および波高が高く，かつ大きな動揺を伴いながら波の進行方向と反対方向に船舶が航行する場合に最も広いものとなる．速い変動の生じる一例として，仰角 10° ，波高 5m を考え，①アンテナが静止プラットフォーム上にある場合，②船舶上にあつて，船舶が波の流れに對向して20ノットで進む場合，③かなり大きな動揺を伴う場合のスペクトルの帯域幅を図6に示す．同図からスペクトルの -10dB 幅に着目すると，アンテナが静止している場合で 2Hz 以内，船舶の動きを考慮しても 3Hz 以内であるが，大きな動揺を伴う場合には，5Hz ある

(Oct. 1985)

いはそれ以上になり得ることが分かる．

逆に変動の周期が長くなりスペクトルの幅が狭くなる場合は，上述と反対の場合を考えればよいことになる．ただし非常に緩やかな周期の変動は，ここで解析を行ったインコヒーレント成分によるフェージングよりもむしろコヒーレント成分が卓越する波高の低い海面状態で，船の上下動に起因するハイトパターンのフェージングが存在するときに見られる．海洋実験の実測例では，仰角 5.5° ，波高約 30cm の鏡面状態に近い海面上を船がわずかに動揺しながら進んだ際に生じたフェージングの場合で -10dB 幅 0.3Hz が得られている⁽⁵⁾．以上の解析からスペクトルの -10dB は，仰角 $5^\circ \sim 10^\circ$ では 0.3 ～ 5Hz 程度に広く分布することが分かる．

3.2 空間相関特性

図2の座標系において，コヒーレント成分に関する x ， y 軸方向の相関係数は，式(4)から両軸方向の変位に対して直接波と反射波の位相関係が変化しないため，共に1のまま変化しないのは自明である．一方 z 軸方向に対しては $C_{coh}(z) = \cos(2kz \cos \theta_i)$ (k : 自由空間における電波の波数) となり， z に対して正弦的な変化がある．

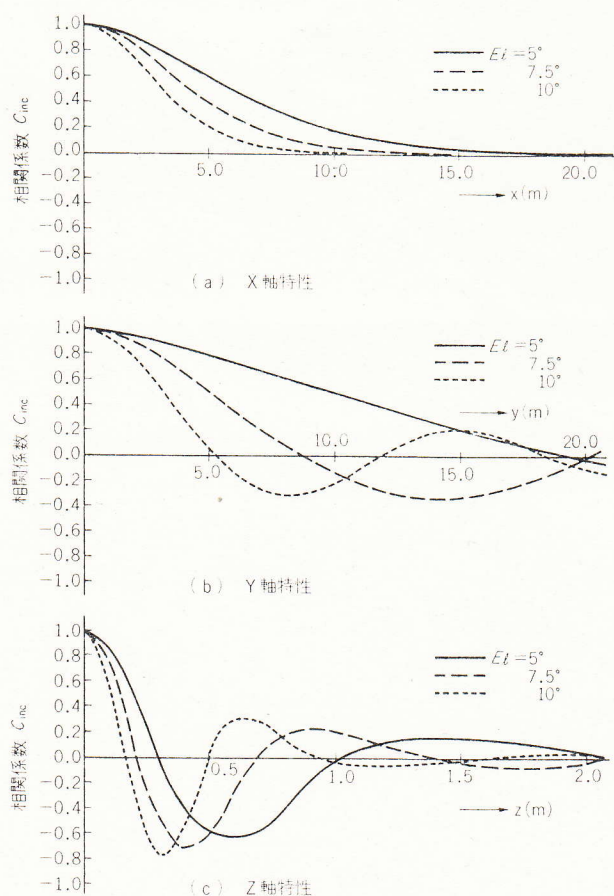


図7 インコヒーレント成分の空間相関特性

z 軸相関係数が最初に -1 になる距離は仰角 5° と 10° に対して、それぞれ 57cm , 29cm である。この正弦変動のピッチ (仰角 5° で 1.15m) はアンテナのハイトパターンとのピッチと一致している。

図7はインコヒーレント成分が主体となる海面状態における同成分の空間相関関数で、(a)~(c)はそれぞれ x , y , z 軸方向の変位に対するものである。同図において z 軸相関特性にハイトパターン性の変動が比較的強く見られるのは、2.3節で述べた要因①の影響が、要因②の影響に比較して強く働いていることによるもので、インコヒーレント成分といえども、その到来領域の広がり方が角度的にあまり大きくないことを意味している。また、インコヒーレント成分が主体となる荒れた海面状態での反射波の主な到来領域が海面の正規反射点より、やや遠方 (すなわち水平線方向) にずれている⁽¹⁾⁽²⁾ことから、 y 軸相関特性に対しても、要因①の影響による長いピッチの周期変動がわずかに重畳している。一方、 x 軸相関特性は専ら要因②によるため、正規分布形の相関特性となっている。相関長を相関が $1/e$ となる距離で定義すると、インコヒーレント成分に対する相関長は、 x , y , z 軸方向に対して仰角 5° でそれぞれ 7.5m , 14m , 0.2m 、仰角 10° で 4m , 3.6m , 0.1m 程度となり、2.3節で述べたとおり、 z 軸方向に対して短い相関長が得られている。更に各軸方向に対して十分に無相関 ($|C| < 0.2$) として取り扱える長さは、それぞれ 10m (x 軸), 18m (y 軸), 1m (z 軸) 以上となっている。

L バンド電波の空間相関特性を測定した例として、仰角 9° で z 軸方向に 60cm 離れた場合の報告がある⁽⁶⁾。それによると波高 $1\sim 1.5\text{m}$ 、すなわちインコヒーレント成分が主体となる状態で相関係数 0.3 が得られており、図7(c)の $E\theta = 10^\circ$, $z = 60\text{cm}$ の値とよく一致している。

3.3 周波数相関特性

図8は仰角 5° におけるアンテナ高をパラメータとした周波数相関特性で(a)はコヒーレント成分を、(b)はインコヒーレント成分を示している。図9は仰角 10° の場合である。これらの図からインコヒーレント成分の相関特性もかなりはっきりした周期性が見られること、相関係数が $1/e$ になる周波数 (相関周波数) はコヒーレント成分に比較してインコヒーレント成分の方がやや小さいこと、相関係数はアンテナ高に対する依存性が強いことが分かる。一例としてアンテナ高 15m の場合では、相関周波数は仰角 5° でコヒーレント成分に対して 22MHz 、インコヒーレント成分に対して 18MHz 、また仰角 10° でコヒーレント成分に対して 11MHz 、インコヒーレント成分に対して 9.2MHz となっている。

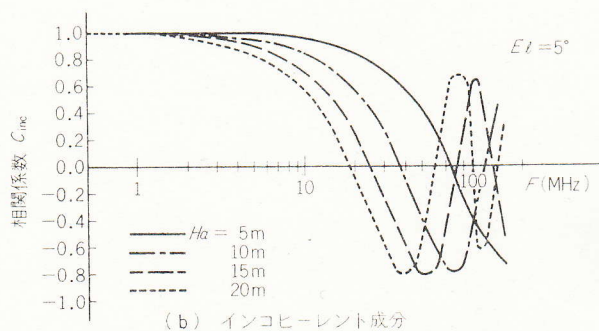
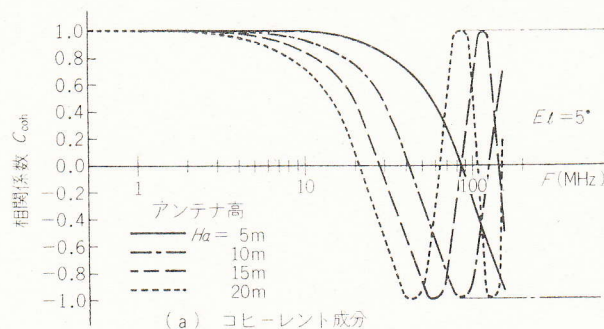


図8 仰角 5° での周波数相関特性

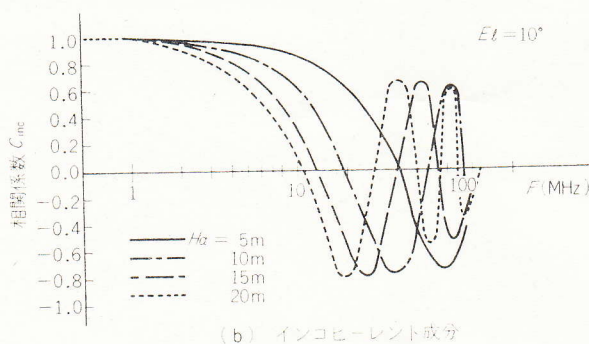
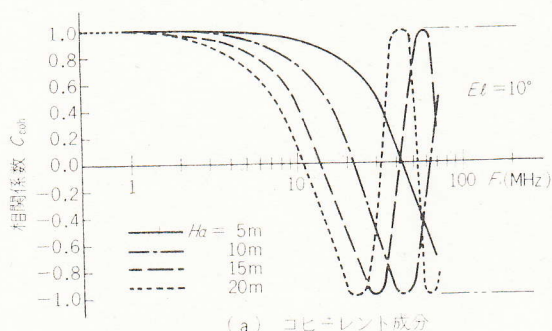


図9 仰角 10° での周波数相関特性

なお、周波数差 20MHz 以上では、相関係数のアンテナ高依存性が非常に顕著になり、例えば 100MHz 付近で考えてみると、アンテナの 1m 程度の上下動でも相関が大きく変わってしまうため、海事衛星通信の船舶地球局のように、常に船舶の上下動が伴うようなフェージングについては、実際上無相関とみなすことができる。

4. 考 察

まず、空間相関の解析結果に基づき、空間ダイバーシチ方式に関する若干の検討を行う。空間ダイバーシチでは、二つのアンテナをフェージングによる受信レベル変動が空間的に相関が小さい、あるいは負の相関を有する地点に配置できれば良好なフェージング軽減効果を得ることが期待できる。3.2節で示した結果を見るとアンテナを近接して配置する場合には、 z 軸方向（上下方向）に並べるとよいことが分かる。一例として z 軸方向に40cm程度離すと仰角 $5^\circ \sim 10^\circ$ のすべての海面状態に対してコヒーレント、インコヒーレント両成分とも負の相関が得られることから、この程度の間隔が望ましいことが分かる。またインコヒーレント成分に着目すれば、 z 軸方向に対して1m、水平方向（ $x-y$ 面上）に対して20m以上の距離をとれば、お互いに無相関な二つの信号を得ることができ、この場合にもダイバーシチ効果が期待できる。

次に、周波数相関特性の解析結果について考察する。

図10は、コヒーレント成分およびインコヒーレント成分の相関周波数をアンテナ高に対して示したもので、インマルサットシステムにおける通信波1波の帯域幅（約30kHz）、受信（または送信）総合帯域幅（15MHz）、および、送受の周波数間隔（100MHz）も併せて示している。図から海事衛星通信（ $H_a: 5 \sim 30\text{m}$ ）の場合、受信帯域全域にわたってフェージングの相関が比較的強いことが

ら、周波数ダイバーシチを行っても、フェージングの軽減があまり期待できないことが分かる。

一方、航空機・衛星間通信の場合には直接波と反射波の通路長差が大きくなるので、通信波1波に対しても、周波数選択性フェージングとなる可能性が生じる。

最後に、各種フェージング軽減方式の送信側（上り回線）に対するフェージング軽減について考察する。電波伝搬の可逆性の原理から下り回線に発生するフェージングとほぼ同じ大きさのフェージングが上り回線に対しても発生すると考えられるが、上述の議論により、100MHz程度離れた二つの電波に対する信号強度の変動の瞬時値は無相関である。このため、受信信号強度のリアルタイムの情報を基に、アンテナ特性（放射パターン、偏波特性等）をアダプティブに制御することによってフェージングを軽減する方法では、送信に対しては、フェージング軽減が図れないことが分かる。一方、アンテナ特性を、反射波を受けにくいように、あらかじめ整形して受信する方法では、100MHz程度の周波数差に対してほぼ等しいアンテナ特性、海面の反射特性が得られるので、送信電波に対しても受信電波と同じような効果が期待できる。いままでに報告されている各種フェージング軽減方式(6)~(8)は、上記いずれかのタイプに分類でき、かつそれぞれ固有の特徴を有しているため、フェージング軽減方式の適用に際しては、その通信が、送信電波に対しても、フェージング軽減を必要とするか否かが重点となろう。

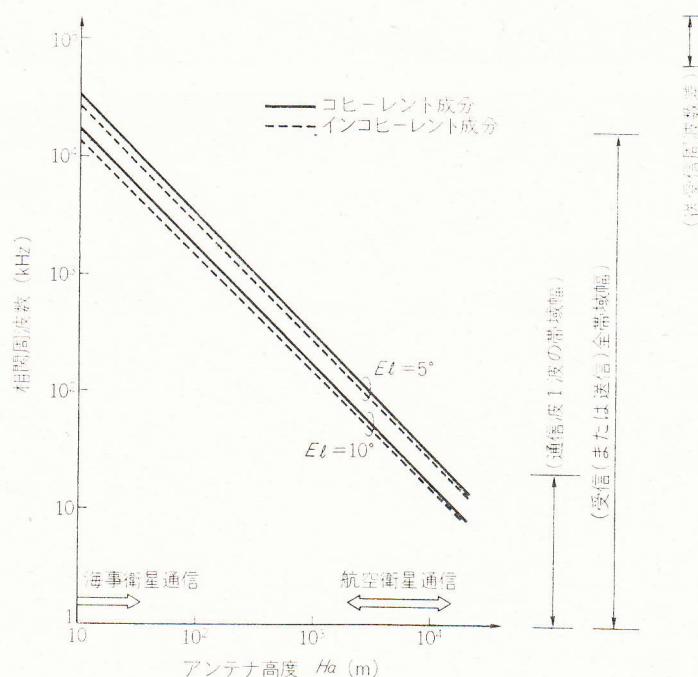


図10 相関周波数とアンテナ高度の関係

5. む す び

散乱理論に基づく海面反射フェージングモデルを用いて、海事衛星通信における1.5GHz帯フェージングの相関的性質すなわちパワースペクトル、空間および周波数相関特性について解析結果を示した。

その結果、

(1) スペクトルに関しては

- ① スペクトルの広がりには仰角、波高が高いほど、また船舶の航行速度が速く、動揺が激しいほど大きくなること。
- ② 仰角 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ で発生するフェージングのスペクトルの -10dB 幅は $0.3\sim 5\text{Hz}$ となること。

(2) 空間相関特性に関しては

- ① 仰角 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ で衛星電波が入射する状況において z 軸方向に 40cm 程度離すと、コヒーレント、インコヒーレント両成分とも負の相関になること、また、インコヒーレント成分が空間的に無相関として扱える距離は、垂直方向で 1m 以上、水平方向で 20m 以上となること。
- ② そのため、空間ダイバーシチ方式を適用してフェージング軽減を図る際には、垂直方向に 1m 以上の距離をとるとよい効果が期待できること。
- (3) 周波数相関特性に関しては
 - ① 10MHz 程度の幅を有する受信帯域内の任意の二つの周波数でのフェージングパターンは、ほぼ同一とみなし得ること。
 - ② 上記①の理由によって周波数ダイバーシチ方式ではフェージングの軽減は困難なこと。
 - ③ 100MHz 程度、周波数が異なる上り下り回線間

(送受信号間)でのフェージングパターンは無相関(あるいは不定)であること。

- ④ 上記③の理由によって、受信レベルの変動に応じて、アンテナ特性をアダプティブに制御するフェージング軽減方式では送信側(上り回線)に対するフェージング軽減が難しいこと。

等が明らかになった。

謝 辞 本研究の機会を与えられた KDD 研究所鍛冶所長、野坂副所長、小川元次長(現シドニー事務所長)に謹んで感謝する。また本研究を進めるに当たり、御指導、御鞭撻いただいた山田無線伝送研究室長に深く感謝する。更に本研究について有益な御討論をいただいた京都大学池上文夫教授に謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 唐沢, 塩川: 海事衛星通信における海面反射フェージング, 国際通信の研究, No. 122, 626-633 (Oct. 1984).
- (2) Karasawa, Y., and Shiokawa, T.: Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection, IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-32, 6, 618-623 (1984).
- (3) 唐沢, 塩川: 海面反射フェージングの周波数スペクトラム, 信学論(B), J67-B, 2, 171-178 (1984).
- (4) 唐沢, 塩川: Lバンドにおける海面反射フェージングの空間および周波数相関特性, 信学論(B), J67-B, 12, 1347-1354 (1984).
- (5) 塩川, 唐沢, 結城: 海面反射フェージング軽減方式の海洋実験報告(I), 信学技報 A-P83-10 (1983).
- (6) 小園, 吉川: 船舶移動衛星通信における Switch and Stay ダイバーシチ効果, 信学論(B), J 64-B, 5, 461-462 (1981).
- (7) Shiokawa, T., and Karasawa, Y.: Shipborne antenna suppressing multipath fading in maritime satellite communication, IEEE AP-S Symp., New Mexico (1982).
- (8) Ohmori, S., and Miura, S.: A fading reduction method for maritime satellite communications, IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-31., 1, 184-187 (1983).