



Title	移動無線用エネルギー密度アンテナについての考察
Author(s)	柏木, 道朗; 伊藤, 精彦; 松本, 正
Citation	北海道大學工學部研究報告, 59, 15-22
Issue Date	1971-03-10
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/41031">http://hdl.handle.net/2115/41031</a>
Type	bulletin (article)
File Information	59_15-22.pdf



[Instructions for use](#)

# 移動無線用エネルギー密度アンテナについての考察

柏木 道朗\* 伊藤 精彦\*

松本 正\*

(昭和45年9月30日受理)

## Some Considerations on Energy Density Mobile Radio Antenna

Michio KASHIWAGI Kiyohiko ITOH

Tadashi MATSUMOTO

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering,  
Hokkaido University, Sapporo, Japan

(Received September 30, 1970)

### Abstract

This paper deals with an analysis of the fading phenomenon in a mobile radio field by using a reflector model and a simple statistical model and a new type of energy density radio antenna which is helpful in overcoming this fading.

The energy density antenna is an antenna which samples the energy density, that is,  $1/2(\epsilon|E|^2 + \mu|H|^2)$  of a mobile radio field, rather than the electric field only. J. R. Pierce proposed the energy density antenna systems which samples  $E$  field by a monopole antenna and  $H$  field by a loop antenna. This paper proposes a new type of energy density antenna system which samples  $H$  field by a slot antenna or a magnetic current antenna and  $E$  field by a conductor antenna or an electric current antenna.

When only one component of the  $H$  field is to be received in the statistical model, the component which is perpendicular to the direction of motion should be chosen, that is, when the slot antenna is set normal to the motion.

### 1. ま え が き

自動車等の移動体に搭載した受信アンテナが山間部や都会のビルの間を走る場合には、電波の陰となる不感地帯の存在によるフェージングの他に、ビル等による電波の多重反射波同士による干渉、またはそれらの反射波と基地局よりの入射波とが干渉した、いわゆる定在波によるフェージングが存在する。

この報告は、このフェージングを軽減する対策として考えられたエネルギー密度アンテナについての考察を、反射モデルおよび統計的モデルにより行っている。その結果、経済性をねらって自乗検波器を2台使用する場合には(エネルギー密度受信の場合は3台の自乗検波器が必要)電界と磁界の成分との組合せを用いて、かつ、移動体の進行方向に直角な磁界成分を受信するように構成すればよいとの結論を得ている。

### 2. エネルギー密度アンテナの原理

ピアース<sup>1)</sup>により提案されたエネルギー密度アンテナの原理を以下のような反射モデルを用い

\* 電子工学科 電波伝送工学講座

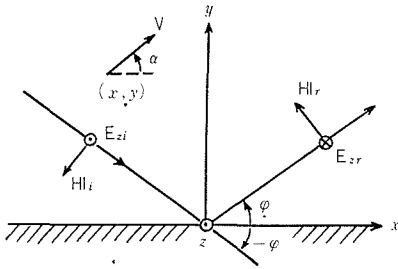


Fig. 1 Geometry of the model

て説明する。すなわち、ビル等を無限大導体平板と考虑、Fig. 1 のように垂直偏波の場合を考虑する。移動体としては、自動車等を考虑しているため、その速度は光速に比べきわめて小さい。したがって、電磁界に対する相対論的効果は一切無視して、単にドップラー効果のみを考慮に入れる。いま、Fig. 1 において、移動体が点  $r(x, y)$  で  $V$  m/sec なる速度で導体板に対して  $\alpha$  なる角度で走行しているものとし、基地局よりの直接波は反射波に対して  $-\varphi$  なる方向から入射するものとする、移動体が受信

する電磁界は次式により与えられる<sup>2)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} E_z &= j2A \sin \phi \cdot \exp(-j\phi) \\ H_x &= -\frac{2}{z_0} A \sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \exp(-j\phi) \\ H_y &= -j\frac{2}{z_0} A \cos \phi \cdot \sin \phi \cdot \exp(-j\phi) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \phi &\equiv k(y + Vt \sin \alpha) \cdot \sin \varphi \equiv kY \sin \varphi \\ \phi &\equiv k(x + Vt \cos \alpha) \cdot \cos \varphi - \omega t \equiv kX \cos \varphi - \omega t \\ k &= \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \end{aligned}$$

いま、 $E_z, H_y, H_x$  なる 3 つの界成分を同時に受信して、それぞれ自乗検波して加え合わせると、出力として、

$$W = \frac{1}{2}(\epsilon E_z E_z^* + \mu H_x H_x^* + \mu H_y H_y^*) \quad (2)$$

なるエネルギー密度に比例する量を受信することが可能となる。したがって(2)式は

$$W = 2|A|^2 \epsilon \left\{ 1 - \frac{1}{2}(1 + \cos 2\varphi) \cdot \cos 2\phi \right\}$$

となり、 $W$  を  $2|A|^2 \epsilon$  で割って  $W(Y)$  とおくと

$$W(Y) = 1 - \frac{1}{2}(1 + \cos 2\varphi) \cdot \cos(2kY \sin \varphi) \quad (3)$$

となる。上式より、フェージングの振幅は  $\varphi$  により、また周期は  $Y$  すなわち  $\alpha$  および  $V$  によることがわかる。まず、フェージング周波数  $f_d$  は

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} |\sin \varphi \cdot \sin \alpha| \quad \left( \varphi \neq \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

となる。次に、フェージングの振幅を求めると  $\frac{1}{2}(1 - \cos 2\varphi) \leq W(Y) \leq \frac{1}{2}(3 + \cos 2\varphi)$  (5)

となり、 $\varphi = \pi/2$ 、すなわち、電磁波が導体板に対して垂直入射する時  $W(Y) = 1$  で  $\alpha$  に無関係に常に一定となる。 $\varphi$  とフェージングの振幅との関係は Fig. 2 に示してある。

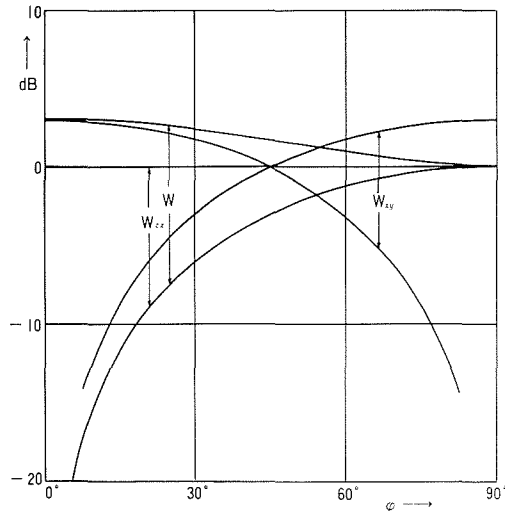


Fig. 2 Fading amplitude

以上のことからわかるように、定在波の立っている空間を走行する移動体が、式(2)のように何らかの方法でその空間のエネルギー密度に比例する量を受信すれば、フェージングが非常に少ない受信が可能となる。例えば、電界をユニポールで、磁界をループで受信することによりエネルギー密度に比例した量を受信することが可能で、このような原理に基づくアンテナがエネルギー密度アンテナである。電界と磁界の受信にある可変の重みを加えることにより $\varphi$ のある範囲で $W(Y)$ を一定に保つことも可能となる。

同様に、電界のエネルギーのみを受信した場合には、

$$W_E(Y) = \frac{1}{2} \{1 - \cos(2kY \sin \varphi)\} \quad (6)$$

となる。(ただし、 $2\varepsilon|A|^2$ で規格化してある) したがって、フェージング周波数は(4)式と同様となり、フェージングの振幅は $0 \leq W_E(Y) \leq 1$ となる。

次に、 $E_x$ と $H_x$ の二成分を自乗検波して加えると、(ただし、 $2\varepsilon|A|^2$ で規格化してある)

$$W_{zx}(Y) = \frac{1}{2} (1 + \sin^2 \varphi) + \frac{1}{2} (\sin^2 \varphi - 1) \cdot \cos(2kY \sin \varphi) \quad (7)$$

フェージングの振幅は

$$\frac{1}{2} (1 - \cos 2\varphi) \leq W_{zx}(Y) \leq 1 \quad (8)$$

$E_x$ と $H_y$ の場合は(ただし、 $\varepsilon|A|^2$ で規格化してある)

$$W_{zy}(Y) = \frac{1}{2} (3 + \cos 2\varphi) \{1 - \cos(2kY \sin \varphi)\} \quad (9)$$

フェージングの振幅は

$$0 \leq W_{zy}(Y) \leq \frac{1}{2} (3 + \cos 2\varphi) \quad (10)$$

$H_x$ と $H_y$ の場合はすなわち磁界のみを受信した場合は( $2\varepsilon|A|^2$ で規格化して)

$$W_{yy}(Y) = 1 - \cos 2\varphi \cdot \cos(2kY \sin \varphi) \quad (11)$$

フェージングの振幅は

$$\left. \begin{aligned} 1 - \cos 2\varphi \leq W_{yy}(Y) \leq 1 + \cos 2\varphi & \quad \left(0 < \varphi \leq \frac{\pi}{4}\right) \\ 1 + \cos 2\varphi \leq W_{yy}(Y) \leq 1 - \cos 2\varphi & \quad \left(\frac{\pi}{4} < \varphi \leq \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

となる。

また、電界および磁界をいずれも等方性の指向を有するアンテナで受信した場合、すなわち、

$$W_{eh} = \frac{1}{2} (\varepsilon E_z \cdot E_z^* + \mu H \cdot H^*) \quad (13)$$

において

$$H = -H_y + jH_x \quad (14)$$

とした場合は( $2\varepsilon|A|^2$ で規格化して)

$$W_{eh}(Y) = 1 - \cos 2\varphi \cdot \cos(2kY \sin \varphi - \varphi) \quad (15)$$

となる。したがって、振幅の変化は $W_{xy}(Y)$ と同じである。

以上の結果をフェージングの振幅について Fig. 2 に示してある。図からわかるように、無限大導体平板が存在するときの電磁界においては、三成分の自乗検波出力を合成したエネルギー密度は必ずしも一定ではなく、エネルギー密度がすべての点で一様になるのは垂直入射の場合だけである。また、下限の包絡線がその最大値1の1/2 (-3 dB) 以上である $\varphi$ の範囲を求めると、 $W$ および $W_{zx}$ の場合は、 $\varphi = 45^\circ \sim 90^\circ$ の $45^\circ$ 範囲であり、また $W_{zx}$ の方が $W$ より変動が少ないことがわかる。

### 3. 統計的モデルによるエネルギー密度アンテナの原理

#### 3.1 Lee の統計的モデル<sup>1)</sup>

前節までは反射モデルにより、エネルギー密度アンテナが定在波によるフェージングにつよいアンテナであることが示され、さらに電界  $E_z$  および磁界の一方成分 (例えば  $H_x$ ) をそれぞれ自乗検波して加えることにより ( $W_{zx}(Y)$ ), エネルギー密度アンテナと同程度にフェージングに強いアンテナが可能となることが示された。統計的モデルによるエネルギー密度アンテナの特性評価は Lee<sup>1)</sup> によりすでになされている。Lee の論文では、 $N$  個の垂直偏波が  $N$  個の方向から到来した時、移動局の全方向性アンテナが受ける三成分を (磁界は  $z_0$  をかけて  $E_z$  と Dimension をあわせてある)

$$\left. \begin{aligned} E_z &= \sum_{u=1}^N A_u \cdot \exp(-j\beta \mathbf{u} \cdot \mathbf{V}t) \\ &= \sum_{u=1}^N A_u \cdot \exp[-j\beta Vt \cos(\theta_u - \alpha)] \\ &\equiv \sum_{u=1}^N A_u \cdot EXP_u \equiv X_1 + jY_1 \\ H_x &= \sum_{u=1}^N A_u \sin \theta_u \cdot EXP_u = X_2 + jY_2 \\ H_y &= -\sum_{u=1}^N A_u \cos \theta_u \cdot EXP_u = X_3 + jY_3 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ただし

$$EXP_u = \exp[-j\beta Vt \cos(\theta_u - \alpha)]$$

とし、(ここで、 $\theta_u$  は  $u$  番目の波が進む方向  $\mathbf{u}$  と  $x$  軸とのなす角、 $\alpha$  は  $x$  軸と速度  $\mathbf{V}$  とがなす角である) 統計的モデルを次のように仮定する。

1°  $A_u = R_u + jS_u$  とでき、 $R_u, S_u$  なる実確率変数は平均値 0, 分散 1 の正規分布をなす。

2°  $N$  個の波は等方的に到来する。すなわち、 $k$  番目の波に対して  $\theta_k = 2\pi k/N$ 。

さらに、以上の統計的モデルより規格化信号レベル  $\tilde{\Psi}$  についての変動のこまかさ<sup>3)</sup>  $n(\tilde{\Psi})$  (the number of crossings), 平均瞬断時間<sup>3)</sup>  $t(\tilde{\Psi})$  (the average duration of fades), およびレベル以下におちる確率<sup>3)</sup>  $p(\tilde{\Psi})$  を無限の波 ( $N \rightarrow \infty$ ) を仮定して理論的に導びき、電界とエネルギー密度の  $n(\tilde{\Psi})$  を比較して、少なくとも 2 倍だけエネルギー密度が電界より小さいことが示されている。また、Lee のこの論文により、電界よりエネルギーを受信した方が、統計的モデルより導かれた前述の三つの量を比較して、フェージングにつよいことが示された。

#### 3.2 統計的モデルによる $W_{zx}, W_{zy}, W_{xy}, W_{ch}$ の変動のこまかさ、平均瞬断時間、レベル以下におちる確率

いま、磁界は  $x$  方向成分のみを利用したとするとその出力  $W_{zx}$  は

$$W_{zx} = \frac{1}{2} \varepsilon \{|E_z|^2 + |H_x|^2\} = \frac{1}{2} \varepsilon \phi_{zx} \quad (17)$$

となる。ここで

$$\phi_{zx} = |E_z|^2 + |H_x|^2 = X_1^2 + Y_1^2 + X_2^2 + Y_2^2 \quad (18)$$

であり、この  $\phi_{zx}$  に対する変動のこまかさ  $n_{zx}(\phi)$ , 平均瞬断時間  $t_{zx}(\phi)$ , レベル以下におちる確率  $P_{zx}(\phi)$  率を求めればよい。文献 1 の方法により、この結果は次式になる。

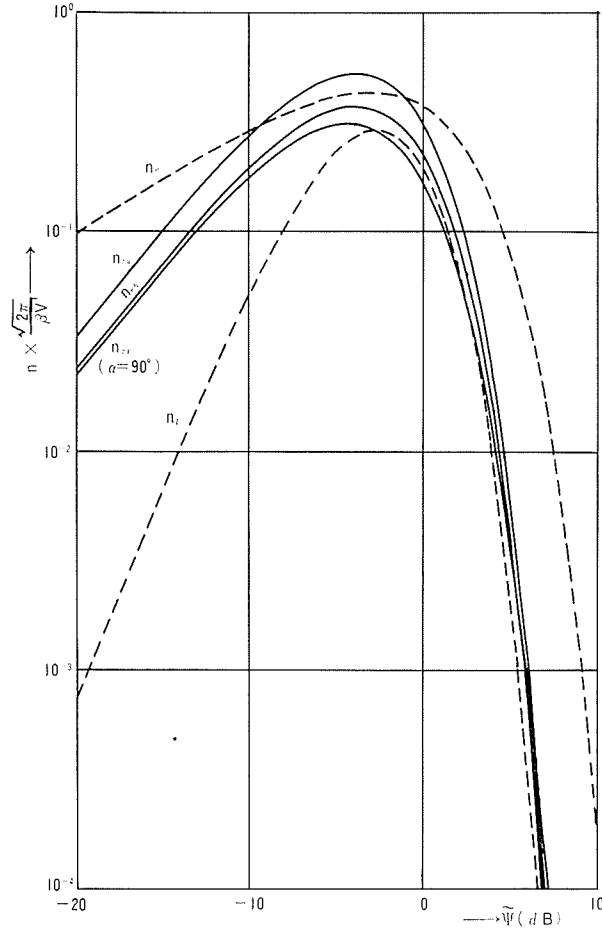


Fig. 3 Level crossing rate

$$\left. \begin{aligned}
 n_{zx}(\tilde{\psi}) &= \frac{\beta V}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{3}{2}(2 + \cos 2\alpha)} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{14}}{2}\tilde{\psi}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{14}}{2}\tilde{\psi}\right) \\
 P_{zx}(\tilde{\psi}) &= 1 - 2 \exp\left(-\frac{\sqrt{14}}{2}\tilde{\psi}\right) + \exp(-\sqrt{14}\tilde{\psi}) \\
 t_{zx}(\tilde{\psi}) &= \frac{P_{zx}(\tilde{\psi})}{n_{zx}(\tilde{\psi})}
 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

ここで、 $\tilde{\psi}$  は出力の変動を出力の変動の rms で規格化したもの、すなわち

$$\tilde{\psi} = \frac{\Psi}{\sqrt{\langle \phi^2 \rangle}} = \frac{\Psi}{\phi(\text{rms})} \quad (20)$$

$W_{zy}$  については

$$\left. \begin{aligned}
 n_{zy}(\tilde{\psi}) &= \frac{\beta V}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{3}{2}(2 - \cos 2\alpha)} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sqrt{14}}{2}\tilde{\psi}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{14}}{2}\tilde{\psi}\right) \\
 P_{zy}(\tilde{\psi}) &= P_{zx}(\tilde{\psi}) \\
 t_{zy}(\tilde{\psi}) &= t_{zx}(\tilde{\psi})
 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$W_{xy}$  については

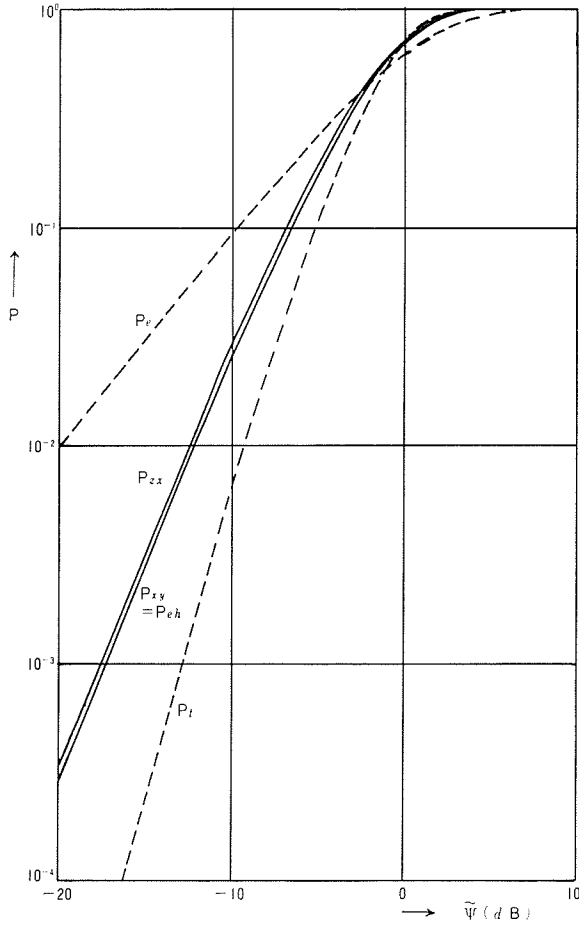


Fig. 4 Probability distribution function

$$\left. \begin{aligned} n_{xy}(\tilde{\Psi}) &= \frac{\beta V}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{12} \tilde{\Psi} \cdot \exp(-\sqrt{6} \tilde{\Psi}) \\ P_{xy}(\tilde{\Psi}) &= 1 - (\sqrt{6} \tilde{\Psi} + 1) \cdot \exp(-\sqrt{6} \tilde{\Psi}) \\ t_{xy}(\tilde{\Psi}) &= \frac{P_{xy}(\tilde{\Psi})}{n_{xy}(\tilde{\Psi})} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$W_{eh}$  については

$$\left. \begin{aligned} n_{eh}(\tilde{\Psi}) &= \frac{\beta V}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{6} \cdot \tilde{\Psi} \exp(-\sqrt{6} \tilde{\Psi}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot n_{xy}(\tilde{\Psi}) \\ P_{eh}(\tilde{\Psi}) &= P_{xy}(\tilde{\Psi}) \\ t_{eh}(\tilde{\Psi}) &= \sqrt{2} P_{xy}(\tilde{\Psi}) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

となる。

上式より、 $n_{zx}(\tilde{\Psi})$  が  $\alpha$  の関数になっていて、 $\alpha = 90^\circ$  の時に最低となることがわかる。すなわち、与えられたレベルにおける変動のこまかさは、受信すべき磁界に対して直角方向に移動体が進んでいる時に最低となる。 $(n_{zy}(\tilde{\Psi})$  も同様である。)

以上の結果を Fig. 3~Fig. 5 に示してある。図において、 $n_i(\tilde{\Psi})$ 、 $P_i(\tilde{\Psi})$ 、 $t_i(\tilde{\Psi})$  および  $n_e(\tilde{\Psi})$ 、 $P_e(\tilde{\Psi})$ 、 $t_e(\tilde{\Psi})$  はそれぞれ Lee の論文におけるエネルギー密度  $W$ 、および電界  $W_z$  の変動のこま

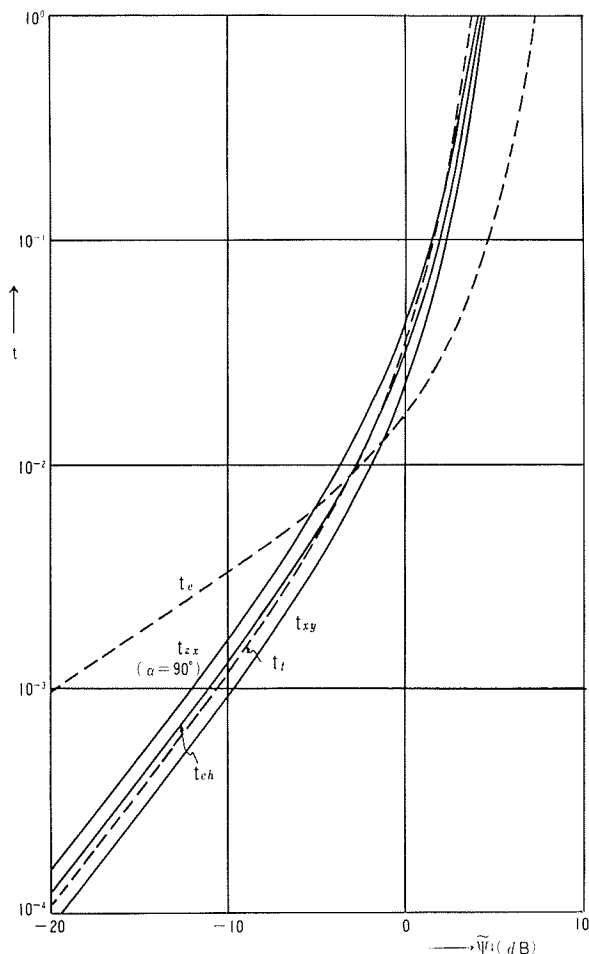


Fig. 5 Duration of fades

かさ、レベル以下におちる確率、平均瞬断時間幅の計算値である。この図からわかるように、エネルギー密度  $W$  を受信した時がいずれの場合より、その振幅の変化が  $\tilde{\psi} = 0$  dB、すなわち振幅の rms 付近に集中していることがわかる。すなわち、フェージングが一番少なくなる。また、電界のみを受信するよりも磁界のみのエネルギーまたは電界と磁界の一成分のエネルギーを受信する方がフェージング特性が改善されることがわかる。特に、電界と磁界の一成分のみのエネルギーを受信するような構成では、振幅の rms 付近の変動のこまかさはエネルギー密度を受信した場合とはほとんど変わらない位であり、平均瞬断時間幅の特性も似たものとなっていることがわかる。経済性をねらって自乗検波器を2つ使用する場合には（エネルギー密度受信の場合は3つの自乗検波器が必要）、電界と磁界の一成分との組合せを用いて、かつ、移動体の進行方向に直角な磁界成分を受信するように構成すればよいことがわかる。

#### 4. スロット・ユニポール結合エネルギー密度アンテナ

以上のように、エネルギー密度を受信した場合にフェージングが少なくなることがわかった。このようなエネルギー密度を受信するためのアンテナとしては、電界をユニポールアンテナで、磁界をループアンテナで受信する方式、またはループアンテナとハイブリッド回路の組合せによ



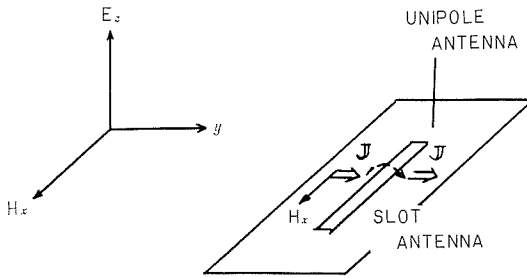


Fig. 6 Characteristic illustration of slot unipole antenna system

るものは既に発表されている。(ピアースアンテナ方式<sup>1)</sup>)

しかし、磁界を磁流アンテナ，すなわちスロットで受信する方式のエネルギー密度アンテナについては文献 2 以外はまだ発表されていない。この電流—磁流結合型アンテナとも言うべきエネルギー密度アンテナにつき，その動作原理の定性的説明を行なう。Fig. 6 は  $E_z - H_x$  成分のみを持った平面波がスロットユニポール結合エネルギー

密度アンテナに入射した場合である。まず， $E_z$  はユニポールアンテナで受信される。また， $H_x$  は  $H_x$  により生ずる電流  $J$  がスロットを横切ることによりスロット上に発生する電圧を同軸ケーブル等で取出せば良い。しかし，両側の開放されたスロットアンテナの指向性は導体平面方向で零となる。したがって，この平面内で輻射があるようにするためには片面に back cavity をつけなければならない。Back cavity の小型化は一つの課題である<sup>2)</sup>。

## 5. 結 論

反射モデルおよび統計的モデルを用いた理論実験により，エネルギー密度アンテナに関するエネルギーダイバシティの効果について検討を行った。これから経済性をねらって自乗検波器を 2 台使用する場合には，電界と磁界の一分成分との組合せを用いて，かつ移動体の進行方向に直角な磁界成分を受信すればよいとの結論を得た。

謝辞 ご討論いただいた電々公社電気通信研究所・野村卓也氏に感謝いたします。

## 文 献

- 1) W. C.-Y. Lee: "Statistical Analysis of the Level Crossings and Duration of Fades of the Signal from an Energy Density Mobile Radio Antenna," B.S.T.J., Feb. (1967), p. 976 または，特許公報 43-1173.
- 2) 伊藤精彦，松本 正: "移動無線用エネルギー密度アンテナの新方式の提案," 北大工学部研究報告 第 53 号 (昭和 44-3).
- 3) 技術用語の日本語訳は以下の文献に従った。  
仲上他: "移動通信トーン信号空間伝送時の誤り率に関する統計的研究," 通研成果報告第 3978 号.
- 4) 伊藤精彦，柏木道朗，松本 正: "移動無線用エネルギー密度アンテナ" 信学会アンテナ伝搬研資 A.P. 69-38 (1969-11).
- 5) 柏木道朗，伊藤精彦，松本 正: "エネルギー密度アンテナ用薄型空洞スロットアンテナ," 本報告.