

## 周波数ホッピング方式におけるダイバーシチ効果

正員 松本 博光<sup>†</sup> 正員 仙石 正和<sup>†</sup> 正員 阿部 武雄<sup>†</sup>

Effect of Diversity on Frequency Hopping Techniques

Hiromitsu MATSUMOTO<sup>†</sup>, Masakazu SENGOKU<sup>†</sup> and Takeo ABE<sup>†</sup>,  
Regular Members

あらまし 陸上移動通信において周波数ホッピング方式を適用すると、多重伝搬による周波数選択性レイリーフェージングに対して周波数ダイバーシチ効果が期待できる。従来、最も基本的な1データ2チップの周波数ホッピング方式の周波数選択性レイリーフェージング下での拡散帯域とダイバーシチ効果の関係について検討され、2チップのホッピング範囲を分割する方式が提案されている。

本論文では1データ2チップの周波数ホッピング方式においてホッピング範囲を細分割したり、2チップの周波数差を制限することにより、従来得られた結果よりもさらにダイバーシチ利得が得られることを示し、その分割数及び周波数差の最適値を求めている。又、従来の結果はチップ数が無限であるとの仮定に立っていたのに対し、チップ数が有限で離散的な場合との数値計算による比較も行っている。更に、1データ2チップを1データ多チップにした場合のダイバーシチ効果について検討を行い、チップ数の増加に従い劣化の改善の割合が減少することを示している。

## 1. ま え が き

スペクトラム拡散通信方式が周波数有効利用の手段として有効であるか否かについて種々の研究が行われているが、その有効性の真偽の結論はまだ得られていない<sup>(1),(2)</sup>。その中で周波数ホッピング(Frequency Hopping: FH)方式は選択性フェージングやマルチパス等に対して有効な方法であることが知られており、特に都市内における陸上移動通信にFH方式を適用すると周波数選択性レイリーフェージングを持つ多重伝搬路に対して周波数ダイバーシチ効果が期待できることが知られている。従来、短周期の周波数選択性レイリーフェージング下において、最も基本的な1データ2チップのFH方式の拡散帯域とダイバーシチ効果の関係が検討されており<sup>(3)</sup>、チップ数が無限で拡散帯域内で一様分布であると仮定すると、拡散帯域が多重伝搬路のコヒーレント帯域幅より狭く、チップ間の相関が高くてもダイバーシチを行わない場合と比較してかなりダイバーシチ利得が得られるという結果が出ている。又、2チップのホッピング範囲を分割し、ガード

バンドを設けることにより更にダイバーシチ利得の劣化が改善されるという結果も得られている<sup>(3)</sup>。本論文はこれらの結果を進展させ検討を行ったものである。

まず最初に文献(3)と同じ短周期の周波数選択性レイリーフェージング下の1データ2チップのFH方式について、拡散帯域を全てチップとして使用することを前提にホッピング範囲を細分割したり、2チップの周波数差を制限することにより、従来得られた結果よりもダイバーシチ利得が得られることを示し、更にデータ1ビット当りの劣化量を評価基準としたときの分割数及び周波数差の最適値を示す。

次に、従来のはチップの帯域幅を無視し、チップ数が無限で拡散帯域内に一様に分布することを前提としていた。しかし、各チップはそれぞれ帯域幅を持つから帯域が重複しないと仮定すれば拡散帯域内に存在するチップ数は有限となる。そこで、チップ数が有限で拡散帯域内に離散的に分布するとした場合と従来得られた結果との比較検討を行い、チップ数無限という仮定の妥当性について考察する。

又、これまでの結果は1データ2チップのFH方式について行われたものであり、一般には1データ多チップの検討が必要である。そこで本文の最後で1データ当りのチップ数をふやした場合のダイバーシチ利得の改善について基礎的検討を行う。なお、本文の用語

<sup>†</sup>新潟大学工学部情報工学科, 新潟市  
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi,  
950-21 Japan  
論文番号: 昭58-論561[B-167]

は文献(3)に準じて使用している。

## 2. FH方式の相関係数と多ブランチの分布関数

この章では、以降の章の必要のために相関係数及び多ブランチの振幅の分布関数について述べておく。

### 2.1 FH方式の相関係数<sup>(3)</sup>

到来方向及び位相がそれぞれ異なる多重波の包絡線のフェージングがレイリーフェージングである場合の周波数相関関数は近似的に次式で与えられる<sup>(4)</sup>。

$$\rho_{(s,\tau)} = \frac{J_0^2(\omega_m \tau)}{1 + (2\pi\sigma s)^2} \quad (1)$$

$\omega_m$ は最大ドップラー周波数、 $\tau$ は時間差、 $\sigma$ は多重波の遅延時間の標準偏差、 $s$ は搬送波の周波数差である。

VHF~UHF帯の陸上移動通信におけるFH方式に関してチップのホッピング速度が数 khop/sec 以上ならば式(1)は次式となる<sup>(3)</sup>。

$$\rho_{(s)} = \frac{1}{1 + (2\pi\sigma s)^2} = \frac{1}{1 + (s/B_c)^2} \quad (2)$$

$B_c = 1/2\pi\sigma$  はコヒーレント帯域幅といわれ、相関が 0.5 となる周波数幅である。

式(2)は任意の周波数差における周波数相関関数である。しかし、FHの場合2チップの周波数差は時間的に異なるためチップ間の周波数差の分布(確率密度関数)で平均化する必要がある。

従って周波数相関関数を  $\rho_{(s)}$ 、チップ間の周波数差  $s$  の確率密度関数を  $p_{(s)}$  とすると相関係数  $\rho$  は次式となる。

$$\rho = \int_0^B p_{(s)} \rho_{(s)} ds \quad (3)$$

$B$ は拡散帯域である。

### 2.2 多ブランチの振幅分布

従来FH方式の等利得合成後の振幅分布は2ブランチの場合のみ得られており<sup>(3)</sup>、多ブランチの場合は導出過程の方向が示されていた<sup>(5)~(7)</sup>。そこでこの考えに従って  $M$  ブランチの振幅分布を求める。この場合の等利得合成時の振幅分布も2ブランチの場合と同様に最大比合成の場合の振幅分布を補正して表現できる。

$M$  ブランチの等利得合成時にその合成後の電圧  $\psi$  が  $\epsilon$  より大きい確率は文献(5)の Appendix II の関係を文献(7)の式(10-10-21)~(10-10-22)へ代入することにより得られ、次式で表わされる。

$$p_{(\epsilon \leq \psi)} \simeq 1 - \sum_{m=1}^M \frac{\lambda_m^{M-1} e^{-kA^2}}{\prod_{i=1}^M (\lambda_m - \lambda_i)} \quad (i \neq m) \quad (4)$$

$$k = \frac{gM}{M\lambda_m}, \quad gM = \frac{M}{2 \left[ \left( M - \frac{1}{2} \right)! / \sqrt{\pi} \right]^{\frac{1}{M}}} \quad (5)$$

$$A = \frac{\psi}{\nu} = \frac{\text{合成後の電圧}}{\text{単一ブランチの平均電圧}} \quad (6)$$

ここで  $\lambda_m$  は包絡線の相関係数  $\rho$  の  $M \times M$  の共分散行列の固有値であり、各固有値はそれぞれ異なるものとする。

又、式(4)は2ブランチの場合と同様に CN比の分布関数としても表現できる。等利得合成後の CN比を  $r$ 、単一ブランチの平均 CNを  $\Gamma_s$ 、単一ブランチでの雑音の平均電力を  $N$  とすると、 $r$  及び  $\Gamma_s$  は次式で表わされる<sup>(6)</sup>。

$$r = \frac{\epsilon^2}{2MN} \quad (7)$$

$$\Gamma_s = \frac{\nu^2}{2N} \quad (8)$$

なお、電圧  $\epsilon$ 、 $\nu$  は波高値である。従って式(6)の  $A$  と  $r$ 、 $\Gamma_s$  の間には

$$A^2 = M \frac{r}{\Gamma_s} \quad (9)$$

の関係が得られ、又、FHの場合ダイバーシティのブランチを時間的に切り換えていくため、 $E_b/N_0$  (情報ビット当りの信号エネルギーに対する雑音電力密度)を  $\Gamma$ 、ブランチ数を  $M$  とすると  $\Gamma_s$  は次式で表わされる<sup>(3)</sup>。

$$\Gamma_s = \frac{\Gamma}{M} \quad (10)$$

従って式(4)、(9)、(10)より CN比の分布関数は次式となる。

$$p_{(r \leq x)} \simeq 1 - \sum_{m=1}^M \frac{\lambda_m^{M-1} e^{-M^2 kx/\Gamma}}{\prod_{i=1}^M (\lambda_m - \lambda_i)} \quad (i \neq m) \quad (11)$$

例えば  $M=2$  のとき固有値  $\lambda$  は  $\lambda_1 = 1 - \sqrt{\rho}$ 、 $\lambda_2 = 1 + \sqrt{\rho}$  となり、式(11)へ代入すると文献(3)の式(17)となる。但し、単根と  $(M-1)$  重根の2つの固有値が存在する場合には次式となる。

$$p_{(r \leq x)} \simeq \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)^{M-1} (1 - e^{-ax/\Gamma}) + \sum_{r=0}^{M-2} A_r (1 - e^{-bx/\Gamma} B_r) \quad (12)$$

$$a = \frac{Mg_M}{\lambda_1}, \quad b = \frac{Mg_M}{\lambda_2} \quad (13)$$

$$A_r = \frac{(-1)^r \lambda_1^r \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^{r+1}} \quad (14)$$

$$B_r = \sum_{k=0}^{M-2-r} \frac{(M-2-r)!}{(M-2-r-k)!} (bx/\Gamma)^{M-2-r-k} \quad (15)$$

又、チップ間無相関の場合（固有値は1（ $M$ 重根）となる）の分布関数は次式となる。

$$P(r \leq x) \simeq 1 - e^{-z} \sum_{r=0}^{M-1} \frac{z^{M-1-r}}{(M-1-r)!} \quad (M \geq 1) \quad (16)$$

$$z = \frac{Mg_M x}{\Gamma} \quad (17)$$

### 3. ホッピング範囲を制限したFH方式

#### 3.1 ダイバーシチ効果

従来1データに対して2チップを割当てる場合、チップ数が無限で拡散帯域内に一様に分布するという前提で次の(i)、(ii)の場合について検討されてきた<sup>(3)</sup>。

(i) ホッピング範囲を固定しない方式

これは図1のように拡散帯域 $B$ の任意の2チップを1つのデータに割当てる方式である。

(ii) チップのホッピング範囲を分割し、その間にガードバンドを設ける方式

これは図2のように帯域 $B$ を分割し、中央にガードバンドを設け2チップの内1つのチップを一方のバンドから、もう1つのチップを他方のバンドから選んで割当てる方式である。

ダイバーシチ利得の劣化量（チップ間無相関の場合からの劣化量）は $\alpha = B/B_c$ （ $B$ ：拡散帯域， $B_c$ ：コヒーレント帯域幅）を、すなわち拡散帯域を広くする程チップ間の相関が小さくなるため低くなり、又 $\beta =$

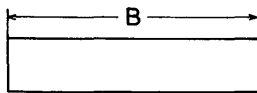


図1 ホッピング範囲を固定しない場合  
Fig.1-A spread band with unfixed hopping bound.

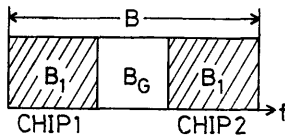


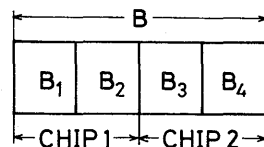
図2 ガードバンドを設けた場合  
Fig.2-A spread band with guard band.

$B_G/B_c$ （ $B_G$ ：ガードバンド幅）を、すなわちガードバンドを大きくする程低くなる。 $\beta = 0$ つまりガードバンド幅を零とした場合でも(i)と比較して劣化量は低くなり、コヒーレント帯域幅の2倍の拡散帯域で約1dB程度の差がある。又、-1dBの劣化量を得るのに(i)の場合場合はコヒーレント帯域幅の約5.7倍、(ii)の場合約3.2倍の拡散帯域が必要となることが知られている<sup>(3)</sup>。

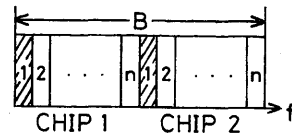
このように2チップのホッピング範囲を分割し、その間にガードバンドを設けることによってダイバーシチ利得の劣化が改善される。しかし、この場合ガードバンドはチップとして使用しないのでガードバンドが広がる程劣化が少なくなるが、使用できるチップ数は減少する。そこで拡散帯域全てをチップとして使用し、且つガードバンドを設ける手段として新たにホッピング範囲を細分割する方法を考える。

(iii) ホッピング範囲を細分割する方式

この方式は例えば図3(a)のように拡散帯域 $B$ を4つに分割し、一方のチップは $B_1$ より他方のチップは $B_2$ より選び（この時 $B_2$ はガードバンドの役目をする）、又、同様に $B_2$ と $B_4$ から一つずつチップを選び2チップとする（この時 $B_3$ がガードバンドの役目をする）というものである。図3(a)を一般化し $2n$ 個に等分割した場合を考える。図3(b)にその分割法が示されているが、チップ1のホッピング範囲を $n$ 等分、チップ2のホッピング範囲を $n$ 等分、合わせて拡散帯域を $2n$ に等分割する。2チップの選び方をチップ1の1の部分（斜線部）とチップ2の1の部分（斜線部）、一般にチップ1の $i$ の部分とチップ2の $i$ の部分（ $i=1 \sim n$ ）との組合せとする。そのようにすると拡散帯域全体で $n$ 組の組合せができ、チップ間に $(n-1)B/2n$ のガードバンドができる。又、2チップで1デー



(a) Divided number is 4.



(b) Divided number is  $2n$ .

図3 拡散帯域の細分割  
Fig.3-Subdivision of spread band.

タであり、それを1組のチップとするとチップの組の総数はデータ数あるいは情報量と考えられる。すると拡散帯域に存在する情報量は、 $n \times (B/2n)^2 = B^2/4n$ となる。(ii)の方式の場合、 $\alpha$ と $\beta$ は無関係すなわちガードバンドは拡散帯域とは関係なく独立に定められたが、この方式では $n$ を一定とすると拡散帯域を大きくする程ガードバンドも広がり、拡散帯域に存在するガードバンドの割合は一定となる。

この方式のチップ間の周波数差 $s$ の確率密度関数 $p(s)$ は次式となる。

$$p(s) = 0 \quad \left( 0 \leq s \leq \frac{n-1}{2n} B, \frac{n+1}{2n} B \leq s \leq B \right) \quad (18)$$

$$p(s) = \frac{s - \frac{n-1}{2n} B}{\left(\frac{B}{2n}\right)^2} \quad \left( \frac{n-1}{2n} B \leq s \leq \frac{B}{2} \right) \quad (19)$$

$$p(s) = \frac{\frac{n+1}{2n} B - s}{\left(\frac{B}{2n}\right)^2} \quad \left( \frac{B}{2} \leq s \leq \frac{n+1}{2n} B \right) \quad (20)$$

従って相関係数 $\rho$ は式(3)より次式となる。

$$\rho = \frac{4n^2}{\alpha^2} \left\{ \frac{\alpha}{2n} \left[ (n+1) \tan^{-1} \frac{\alpha(n+1)}{2n} + (n-1) \tan^{-1} \frac{\alpha(n-1)}{2n} - 2n \tan^{-1} \frac{\alpha}{2} \right] \right\}$$

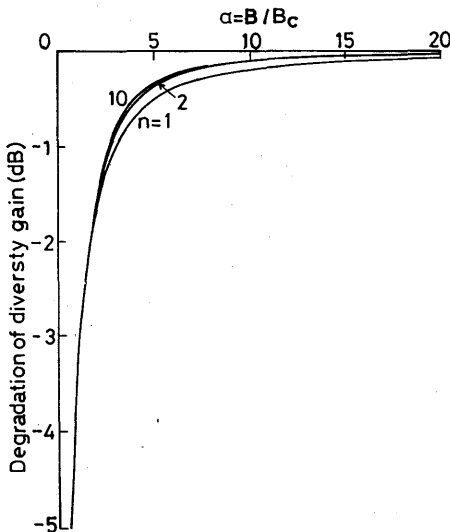


図4 細分割方式のダイバーシチ利得の劣化量 (振幅分布0.1%値において)

Fig.4-Degradation of diversity gain vs.  $\alpha = B/B_c$  at 0.1% value of amplitude distribution in a system with subdivided spread band.

$$+ \frac{1}{2} \ln \frac{\left(1 + \frac{\alpha^2}{4}\right)}{\left\{1 + \frac{\alpha^2(n+1)^2}{4n^2}\right\} \left\{1 + \frac{\alpha^2(n-1)^2}{4n^2}\right\}} \quad (21)$$

この式は $\alpha$ と $\rho$ の関係を表わしているが、これを式(11)( $M=2$ )に代入することにより $\alpha$ をパラメータとした振幅分布を得る。文献(3)と同様に、振幅分布0.1%値におけるチップ間無相関の場合の正規化信号レベルから各 $\alpha$ におけるレベルを引いてチップ間無相関の場合からのダイバーシチ利得の劣化量を得て、 $n$ をパラメータとした結果を図4に示す。図4より $n$ を大きくするに従い劣化量が小さくなるのがわかる。

次にホッピング範囲を分割するのではなく、つまりガードバンドを固定せず、単に2チップの周波数差を制限する方法を考える。

(iv) 2チップの周波数差を制限する方式

図5に示すようにチップ1とチップ2の周波数差を常に $\Delta$ 以上となるようなチップの割当てを行う方式で

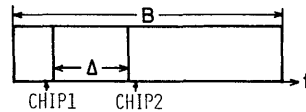


図5 2チップの周波数差を制限する方式  
Fig.5-Restrictions on frequency difference of two chips.

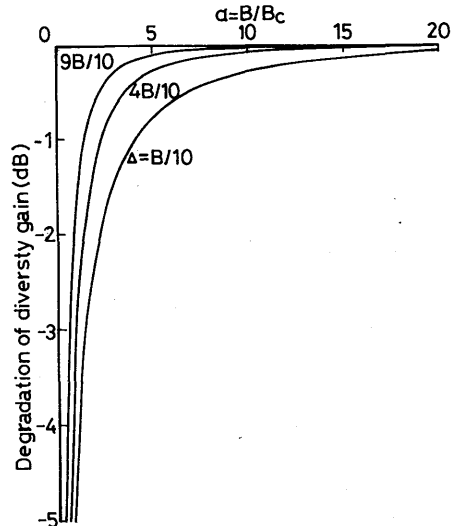


図6 2チップの周波数差を制限する方式のダイバーシチ利得の劣化量

Fig.6-Degradation of diversity gain in a system with restrictions of frequency difference of two chips.

ある。チップの組合せ数  $(B-D)^2$  となり、確率密度関数  $p(s)$  は次式となる。

$$p(s) = \frac{2(B-s)}{(B-D)^2} \quad (D \leq s \leq B) \quad (22)$$

従って相関係数  $\rho$  は式(3)より次式となる。

$$\rho = \frac{2}{(1-m)^2 \alpha^2} \left\{ \alpha (\tan^{-1} \alpha - \tan^{-1} m\alpha) - \frac{1}{2} \ln \frac{1+\alpha^2}{1+m^2 \alpha^2} \right\} \quad (23)$$

$$D = mB \quad (0 \leq m < 1)$$

(iii)と同様な方法で  $D$  をパラメータとしたチップ間無相関の場合からのダイバーシチ利得の劣化量を図6に示す。図6より  $D$  を大きくするに従い劣化量が小さくなる。なお、 $D \leq B/2$  の範囲では拡散帯域を全てチップとして使用するが、 $D > B/2$  の範囲では一部チップとして使用しない帯域が生じる。

### 3.2 最適分割に関する考察

(iii), (iv)の方式において、分割数及び周波数差を大きくするに従いチップ間のガードバンドが広くなるから相関が低くなり、ダイバーシチ利得の劣化が改善される。しかし、その反面2チップの組合せ数が減少するため拡散帯域内に存在する情報量も減少する。そこで最適な分割数及び周波数差を決定する評価基準としてデータ1ビット、つまり2チップ当りの劣化量を考え

る。この値は劣化量と情報量との比、すなわち伝送される情報量当りの劣化量である。拡散帯域をコヒーレント帯域幅の20倍の範囲以内、すなわち  $\alpha \leq 20$  で分割数及び周波数差をパラメータとしたデータ1ビット当りの劣化量を求めた。その結果細分割の場合2又は4分割が最も小さくなり、周波数差の制限の場合周波数差を約  $4B/10$  以上、すなわち  $D = 0.4B$  とした時が最も小さくなることがわかった。図7に固定しない、 $\beta = 0$ 、分割数4 ( $n=2$ ) 及び  $D = 0.4B$  の各場合のデータ1ビット当りの劣化量を示す。なお固定しない場合の情報量を1とすると  $\beta = 0$  の場合は0.25、分割数4の場合は0.125、 $D = 0.4B$  の場合は0.36の情報量である。図7において、 $\beta = 0$  の場合(ガードバンド幅が零であるから、すなわち分割数2の場合となる)と分割数4の場合を比較するとコヒーレント帯域幅の約13倍以下の拡散帯域では  $\beta = 0$  が、約13倍以上の拡散帯域では分割数4が低くなる。又、約  $\alpha \geq 3$  の範囲では  $D = 0.4B$  の場合が他の場合よりもデータ1ビット当りの劣化量が低く、最適となる。以上の結果から拡散帯域の大きさあるいはホッピング範囲の制限の種類によって単位ビット当りの劣化量は変化することがわかる。そのため最適な方式をこの結果のみから決定することはできないが、この評価基準では  $\alpha$  のかなりの範囲において周波数差を制限する方が優れていると言える。参考のため図8に4つの方式のチッ

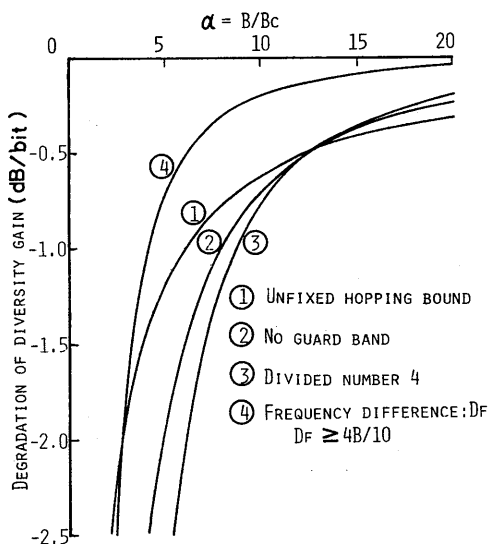


図7 種々の方式のデータ1ビット当りのダイバーシチ利得の劣化量  
Fig.7-Degradation of diversity gain per bit of a datum in various methods.

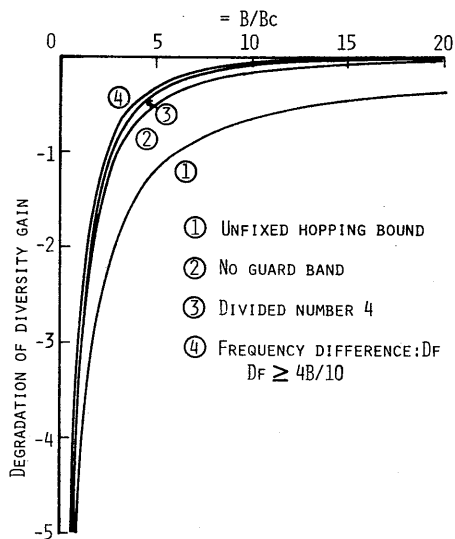


図8 種々の方式のダイバーシチ利得の劣化量  
Fig.8-Degradation of diversity gain in various methods.

ブ間無相関の場合からのダイバーシティ利得の劣化量を示す。従来の方式よりも細分割及び周波数差を制限する方式の方が劣化量が低く、ダイバーシティ利得の劣化が改善されていることがわかる。

4. チップ数が有限の場合の考察

前章(及び文献(3))では簡単のためにチップの帯域幅を無視し、チップ数が無限で拡散帯域内に一様に分布することを前提としていた。しかし実際にはチップは帯域幅を持つ。従って隣り合うチップ間もある間隔が必要となり、チップ数も有限となる。そのためチップ数が有限の場合従来の結果(文献(3))及び前章の結果(劣化量等)がどのようになるか調べる必要がある。そこで、ここではチップ数が有限で拡散帯域内に離散的に分布する場合と前章での結果を比較することにする。

図9に示すように拡散帯域内にチップがL個存在すると仮定し、各チップは点線で区切られた帯域の中央に位置し、各チップ間隔は等しいとする。離散的に分布している各チップ間の差を $\tau$ とすると2チップの周波数差 $s$ は次式で表わされる。

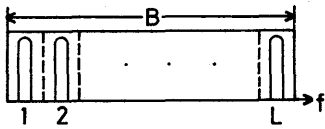


図9 離散的なチップ列  
Fig.9-Sequence of discrete chips.

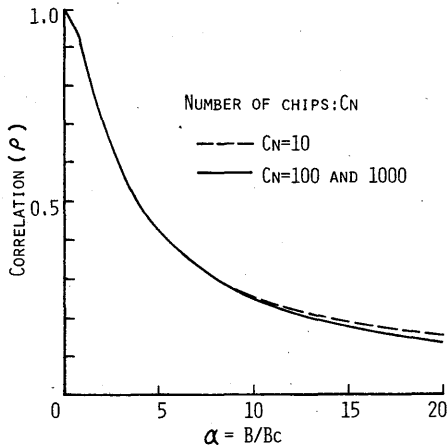


図10 チップが臨散的な場合の相関係数  
Fig.10-Correlation in the case with discrete chips.

$$s = \frac{\tau}{L} B \quad (0 \leq \tau \leq L-1) \quad (24)$$

周波数差 $s$ の代わりにチップ間の差 $\tau$ で4つの方式の相関係数 $\rho$ は離散的な和の形式で表わされ次のようになる。

(i) ホッピング範囲を固定しない方式

$$\rho = \frac{1}{L} + \sum_{r=1}^{L-1} \frac{2(L-r)}{L^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau}{L}\alpha\right)^2} \quad (25)$$

(ii) ホッピング範囲を分割し、ガードバンドを設ける方式

$$\rho = \sum_{r=K+1}^{K+N} \frac{r-K}{N^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau}{L}\alpha\right)^2} + \sum_{r=K+N+1}^{L-1} \frac{L-r}{N^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau}{L}\alpha\right)^2} \quad (26)$$

(iii) ホッピング範囲を細分割する方式

$$\rho = \sum_{r=N(I-1)+1}^{NI} \frac{r-N(I-1)}{N^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau}{L}\alpha\right)^2} + \sum_{r=NI+1}^{N(I+1)-1} \frac{N(I+1)-r}{N^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau}{L}\alpha\right)^2} \quad (27)$$

(iv) 2チップの周波数差を制限する方式

$$\rho = \sum_{r=D}^{L-1} \frac{2(L-r)}{(L-D)(L-D+1)} \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau}{L}\alpha\right)^2} \quad (28)$$

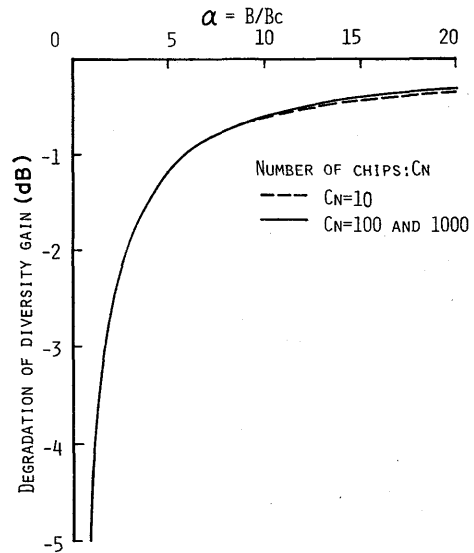


図11 チップが離散的な場合のダイバーシティ利得の劣化量  
Fig.11-Degradation of diversity gain in the case with discrete chips.

$K$ はガードバンド幅に相当するチップ数、 $N$ は分割された各帯域内に存在するチップ数、 $I$ は片側( $B/2$ 内)の分割数、 $D$ は限定した2チップの差( $A$ に相当)を表わす。図10にホッピング範囲を固定しない場合におけるチップ数をパラメータとした $\alpha$ と $\rho$ の関係を、図11にチップ間無相関の場合からのダイバーシチ利得の劣化量を示す。点線がチップ数10の場合、実線が100及び1000の場合である。チップ数無限の場合はこのグラフ上では実線と一致した。 $\alpha$ が大きくなるに従いチップ数10とチップ数100、1000の場合に差が認められる。チップ数が無限の場合の相関係数及び劣化量と比較するとチップ数10の場合には有効桁が2桁一致し、チップ数100、1000の場合にはそれぞれ有効桁が3桁及び5桁一致する。方式(ii), (iii), (iv)の場合もこの場合とほぼ同様な結果が得られた。従って、チップ数が無限で拡散帯域内に様に分布すると仮定して数値計算を行ってもチップ数100以上の場合には有効桁が3桁以上一致することがわかった。

### 5. 1データ多チップ方式のダイバーシチ利得の改善

これまでの結果は1データに2チップ割当てる方式であった。1データに $M$ チップ( $M > 2$ )割当てる場合はチップ間の相関係数によって種々の場合が考えられ複雑となる。文献(3)ではこの場合について示唆されているが具体的な結果を示していなかった。ここではその基礎の場合としてチップ数が無限で拡散帯域内に様に分布する場合について検討を行う。

1データ $M$ チップのFH方式を考えると、1データ伝送されるごとに拡散帯域内に $M$ 個のチップが存在することになる。その中の任意の2チップに着目すると拡散帯域内での2チップの組合せ数は $B^2$ となり、チップ間の周波数差が $s$ である組合せ数は対称性を考慮して $2(B-s)$ となる。

従って、 $M$ チップの内の任意の2チップ間の周波数差 $s$ の確率密度関数 $p_{(s)}$ は次式となる。

$$p_{(s)} = \frac{2B^{M-2}(B-s)}{B^M} = \frac{2(B-s)}{B^2} \quad (0 \leq s \leq B) \quad (29)$$

故に相関係数 $\rho$ は次式となり、

$$\rho = \frac{2}{\alpha^2} \left\{ \alpha \tan^{-1} \alpha - \frac{1}{2} \ln(1+\alpha^2) \right\} \quad (30)$$

(i)の方式の相関係数と等しくなる。すなわち、 $M$ チップの内の任意の2チップの平均の相関係数が式(30)となり、従ってそれぞれのチップ間の相関が等しくなる。

それぞれのチップ間の相関係数が等しい場合、共分散行列の固有値は式(31)の $\lambda_1$ (単根)、 $\lambda_2$ ( $M-1$ 重根)となり、分布関数は式(12)となる。

$$\lambda_1 = 1 + (M-1)\sqrt{\rho}, \quad \lambda_2 = 1 - \sqrt{\rho} \quad (M \geq 2) \quad (31)$$

又、最も簡単な場合としてチップ間無相関の場合(共分散行列の固有値は1( $M$ 重根)となる)の分布関数は式(16)となる。

式(16)より $M$ をパラメータとした振幅分布を図12に示す。チップ数が多くなるに従い任意の正規化信号レベルにおけるそのレベルを下回る確率が低くなる。振幅分布0.1%値において2チップの場合の正規化信号レベルと比較すると3チップの場合約4.3 dB 低く、10チップの場合約10.6 dB 低い。

図13、14に振幅分布0.1%値における $M$ に対するチップ間無相関の場合の正規化信号レベルを示す。但し、図14は $M$ が小さい場合の拡大図である。図13も $M$ に関して離散値をとるが実線で示してある。正規化信号レベルを-10 dB以内にするにはチップ数が5

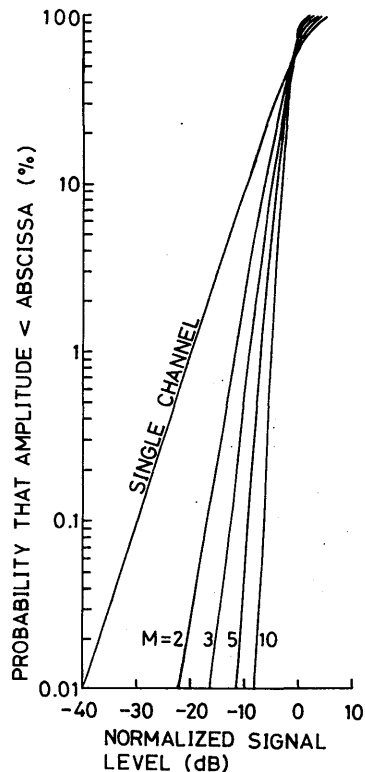


図12 チップ数をパラメータとして振幅分布  
Fig.12-Amplitude distribution with various chips number.

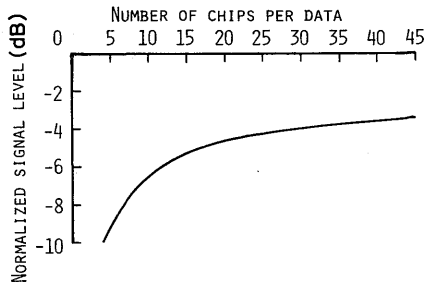


図13 振幅分布 0.1% 値での単位データ当りのチップ数に対する正規化信号レベル  
Fig.13-Normalized signal level vs. number of chips per data at 0.1% value of amplitude distribution.

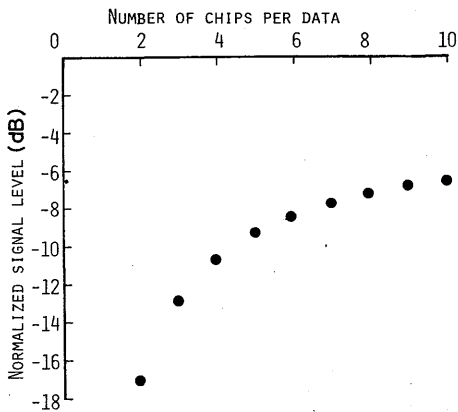


図14 チップ数が少ない場合の正規化信号レベル  
Fig.14-Normalized signal level vs. chips in small number of chips.

以上必要となり、 $-5$  dB以内にするには20以上必要となる。又、1データ当りのチップ数を多くするに従いチップ間無相関の場合の正規化信号レベルは高くなるが、その割合は減少する。これは相関係数がチップ数にかかわらず等しい時、データを構成するチップ数がふえるに従いチップ間無相関の場合からのダイバーシチ利得の劣化が改善されるが、その改善の割合は減少することを示している。

## 6. むすび

1データ2チップのFH方式においてホッピング範

囲の細分割や周波数差の制限を行うことによって従来の結果よりもさらにダイバーシチ利得の劣化が改善されることを示し、最適な分割数及び周波数差に関する考察を行った。又、チップ数が有限の場合についても検討を行った。最後にデータ当りのチップ数を多くした場合について考察し、データ当りのチップ数とダイバーシチ利得の劣化量との関係について検討を行った。

今後の課題としては細分割や周波数差の制限を実現するようなホッピング系列についての検討及びデータ当りのチップ数と拡散帯域との関係を明らかにし、最適な方式(その評価基準も含めて)に関する検討を行う必要がある。

なお、計算はMELCOM-COSMO 700 IIを使用した。

謝辞 本研究の一部は文部省、科研費、一般研究(C) 56550226(昭56)の援助によった。

## 文 献

- (1) Cooper, G. R. and Nettleton, R. W. : "A spread spectrum technique for high-capacity mobile communications", IEEE Trans. Veh. Technol., VT-27, 4, pp.264-275 (Nov. 1978).
- (2) Mikulsky, J. J. : "Mobile radio : to spread or not spread", IEEE Commun. Mag., 17, 4, p.2 (July 1979).
- (3) 水野, 角川 : "コヒーレント帯域幅を考慮した周波数ホッピング方式のダイバーシチ効果", 信学論(B), J64-B, 8, pp.753-760 (昭56-08).
- (4) Jakes Jr., W. C. : "Microwave mobile communications", pp.45-52, Wiley, New York (1974).
- (5) Lee, W. C. Y. : "Level crossing rates of an equalgain predetection diversity combiner", IEEE Trans. Commun. Technol., COM-18, 4, pp.417-426 (Aug. 1970).
- (6) Lee, W. C. Y. : "A study of the antenna array configuration of an  $m$ -branch diversity combining mobile radio receiver", IEEE Trans. Veh. Technol., VT-20, 4, pp.93-104 (Nov. 1971).
- (7) Schwartz, M., Bennett, W. R. and Stein, S. : "Communication systems and techniques", McGraw-Hill, New York (1966).
- (8) 松本, 仙石, 阿部 : "ホッピング範囲を制限した周波数ホッピング方式のダイバーシチ効果", 信学技報, CS 82-23 (1982-05).

(昭和58年4月21日受付, 7月5日再受付)