

TR-O-0081

40

セルラ基地局の送受信アンテナ指向性制御による
周波数利用効率の改善

大鐘 武雄

1995. 3. 31

ATR光電波通信研究所

セルラ基地局の送受信アンテナ指向性制御による
周波数利用効率の改善

大鐘 武雄

(1992.7.1～1995.3.31)

復帰先

北海道大学大学院工学研究科
電子情報工学専攻
情報通信エレクトロニクス講座
011-706-2111 (全学代表)

目次

概要	1
1. はじめに	2
2. 基本原理	3
3. セル配置モデル	4
4. 計算機シミュレーションの流れ	5
5. シミュレーション結果	6
6. まとめ	8
謝辞	9
参考文献	10
第1図	11
第2図	12
第3図	13
第4図	14
第5図	15
第6図	16
第7図	17
第8図	18
第9図	19
第10図	20
第11図	21
第12図	22
第13図	23

概要

セルラ方式においてクラスタ数を低減すれば、周波数利用効率を向上することができる。しかし実際には、同一チャネル干渉の影響により信号品質が劣化するため限界点が存在する。アダプティブアレーは狭いナルを形成することにより効果的に干渉波を抑圧することができることから、クラスタ数を低減できる可能性がある。そこで、本論文ではアダプティブアレーをセルラ方式に応用した場合に着目し、同一チャネル干渉除去による周波数利用効率の改善効果を定量的に評価する。具体的には、基地局アンテナのみにアダプティブアレーを適用することとし、上り回線では通常動作により、同一チャネル干渉を軽減し、下り回線では受信時のアンテナパターンで送信することにより不要な放射を軽減することによりクラスタ数の低減を図る。クラスタ数を決定する基準としてSIRの累積分布を採用し、計算機シミュレーションを行った結果、TDD及びFDDの場合においてクラスタ数1が実現できることがわかった。これは無指向性アンテナと比較した場合、16倍の改善となるとともに、複雑な周波数割り当ての問題を解決できる可能性を示している。

1. はじめに

現在、陸上移動通信における周波数の割り当て方法は、サービスエリアを小さいセルに分割し、それぞれ異なった周波数を割り当てるセルラ方式が主流となっている。

セルラ方式では、周波数利用効率を向上させるために、同一周波数を他のセルで繰り返し使用している(1)。この繰り返し数(クラスタ数)を低減すれば、周波数利用効率はさらに向上する。しかし実際には、同一周波数を割り当てたセル間の距離の減少に伴い、同一チャネル干渉の影響により信号品質が劣化することから、規定の信号品質を満足させる限界点が存在する。

このため、近年、セル半径を減少することにより単位面積当たりのチャネル収容数を増加させる方法、すなわち、マイクロセル方式の導入が検討されている。このマイクロセル方式は、伝搬距離が短いために送信電力が小さくて済み、携帯電話のバッテリーの寿命が延びるなどの副次的利点も生じることから、将来的には非常に大きなネットワークを形成するまでに成長することが予想される。しかし、車載局などの高速に移動するユーザはセル境界を頻繁に通過するため、ハンドオーバー手続きが大きな負荷になってしまう。したがって、高速移動用にマクロセルを共存する方法も考えられる。

このような背景の中、従来のセルラ方式では、周波数利用効率の改善のため、指向性アンテナによりセルを複数のセクタに分割する方法が注目されてきた(2)。例えばわが国のデジタルセルラ方式は3セクタセル方式を採用している。この方式は、より理想的な考え方として、無限に細いビームを持つアンテナによるセクタ化へ拡張することができる。このとき、同一チャネル干渉を大きく低減できることから、クラスタ数を低減し周波数利用効率の改善が図られることが報告されている(3)。

しかし、このような細いビームを持つアンテナは大きく、多数使用することは現実的ではない。一方、アダプティブアレーは、狭いナルを形成することにより効果的に干渉波を抑圧することができる。これらの無線通信分野での検討も数多く見られるが(4)(5)、セルラ方式における同一チャネル干渉除去の効果に関しては、具体的な検討は見られなかった。

そこで、本論文ではアダプティブアレーをセルラ方式に応用した場合に着目し、同一チャネル干渉除去による周波数利用効率の改善効果を定量的に評価する。具体的には、基地局アンテナのみにアダプティブアレーを適用することとし、

・上り回線では通常の動作により、同一チャネル干渉を軽減する

・下り回線では受信時のアンテナパターンで送信することにより不要な放射を軽減することによりクラスタ数の低減を図る。

以下、第2章では基本原理を、第3章、第4章では計算機シミュレーションのモデルと流れについて述べる。第5章では最小クラスタ数をSIR（信号対干渉電力比）を用いて評価する。

2. 基本原理

第1図にアダプティブアレーの基本的な構成を示す。アダプティブアレーは空間的に分散して配置された複数のアンテナと各素子のウェイトを制御する制御部分とからなる。ここで、アンテナの入力信号ベクトルとウェイトベクトルをそれぞれ x 、 w とすると、アレーの合成後の出力 y は

$$y = x^T w \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 T は転置を表す。アレー出力 y と希望信号 d との平均自乗誤差(MSE)を最小にするウェイトの最適値 w_{opt} はWiener解(6)

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} r_{xd} \quad (2)$$

で与えられる。ただし、

$$\begin{aligned} R_{xx} &= E\{x^* x^T\} \\ r_{xd} &= E\{x^* d\} \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $*$ は複素共役を、 $E\{\}$ はアンサンブル平均を表す。得られたウェイトの最適値を適用すれば、到来する不要な到来波の方向に深いナルを形成しすることができる。

第2図は簡単な2セルのみを考慮したセルラ配置のモデルである。従来の無指向性アンテナの場合、上下回線とも希望局のみならず、干渉局からの信号も同じアンテナ利得で受信するため、十分にセル間距離をとる必要がある。しかし、アダプティブアレーを

基地局の受信アンテナに採用した場合，上り回線では干渉局の方向にナルを形成し，干渉を軽減できる．

一方，下り回線の場合，端末の受信アンテナとしてアダプティブアレーを使用する方法も考えられるが，コストの点で得策ではない．そこで，上り回線で形成した指向性パターンを基地局送信時に使用することにより，干渉局の方向への不要な放射を軽減するのが，より現実的な方法である(7)．

第3図はこの考え方を実現する1つの例である．各アンテナ素子は送受信で共用され，受信時に得られたウェイトをそのまま送信時に適用することにより，同一パターンを形成することができる．しかし，見かけのアンテナ配置は搬送波周波数によって異なるため，周波数分割複信方式(FDD)の場合には，得られる送信パターンは受信パターンとは一致しない．補償に関する議論は第5章で行う．なお，第3図では送信ウェイトベクトルを最大要素の大きさで規格化しているが，これは送信用増幅器を最大限に利用するためである．

3. セル配置モデル

第4図に示すような6角形セル配置を考える．各セルの形状は円形とする．このとき，同一チャネル干渉セル間の最短距離 D はクラスタ数 N とセル半径 R により

$$D = \sqrt{3NR} \quad (5)$$

と表される．

本論文で用いた計算機シミュレーションは以下の仮定に基づいている．

- ・すべての干渉セルに移動局が存在する．
- ・移動局のセル内における存在確率は一様分布である．
- ・移動局の送受信アンテナは無指向性である．
- ・移動局は基地局から点波源であるとみなせる．
- ・次隣接干渉セルからの干渉は無視できる．
- ・レイリーフェージング変動は準定常的である．

(第5図参照)

- ・アダプティブアレーの動作は理想的である．

これらの仮定の中で、特に問題となり得るのは、移動局の散乱球の大きさと、次隣接干渉である。前者は、高アンテナ高基地局でかつセル半径が大きい場合にのみほぼ点波源とみなすことができると考えられる。後者は、クラスタ数が小さい場合には妥当性が失われる。しかし、広範囲の干渉セルを考えた場合、計算機シミュレーションの規模が大きくなるため、本論文ではこの仮定を採用した。より現実的なモデルについては今後検討する必要がある。

4. 計算機シミュレーションの流れ

4. 1. 上り回線

第4図に示したように、希望のセル ($i=0$) と、干渉セル ($i=1, \dots, 6$) を考える。希望セルの基地局の i 番目のセルの移動局からの受信電力は

$$P_{0i}^{up} = Lp_{0i} Ll_{0i} Ls_{0i} G_0^{up}(\theta_{0i}) P_i \quad (6)$$

で与えられる。ただし、 P_i は送信電力、 θ_{0i} は基地局から見た移動局の方向、 Lp_{0i} , Ll_{0i} , Ls_{0i} はそれぞれ、伝搬ロス、長周期変動、短周期変動を表す。なお、 $G_0^{up}(\theta_{0i})$ は各移動局からの到来電力から(2)式で計算される最適ウェイトを適用したアダプティブアレーの利得を表す。上り回線では希望セルの利得のみ必要となるが、下り回線においては干渉セルの利得も使用するため、隣接干渉セルにおいても、次隣接セルを仮定し、同様の手法により受信時のアンテナ利得を算出する。

これにより希望セルの上り回線の瞬時のSIRは

$$SIR = P_{00}^{up} / \sum_{i=1}^6 P_{0i}^{up} \quad (7)$$

で与えられる。

4. 2. 下り回線

下り回線のシミュレーションも上り回線とほぼ同様である。希望セルの移動局における i 番目の基地局からの受信電力は

$$P_{i0}^{down} = Lp_{i0} Ll_{i0} Ls'_{i0} G_i^{down}(\theta_{i0}) P_t \quad (8)$$

で与えられる。ここで、伝搬ロス、長周期変動は上下回線とも等しい値を用いているが、短周期変動についてはまったく独立な変動するものと仮定した。また、各基地局の送信時のアンテナ利得 $G_i^{down}(\theta_{i0})$ は、送受信周波数が等しい場合においてのみ、上下回線の値が一致する。

これにより希望セルの下り回線の瞬時のSIRは

$$SIR = P_{00}^{down} / \sum_{i=1}^6 P_{i0}^{down} \quad (9)$$

で与えられる。

4. 3. 乱数の発生

上下回線とも瞬時のSIRは短周期変動値を乱数により複数回発生させ平均値を求め、さらに、移動局の位置をセル内で移動させて平均SIRの累積分布を評価した。

一つの移動局の位置において、到来方向、ならびに伝搬ロス（伝搬定数3.5）は一意に決定される。その場所における長周期変動は分散6dBの対数正規分布乱数により定義した。短周期変動はレイリー分布乱数で定義し、一つの場所当たり1000回の試行を繰り返した。場所を与える試行は5000回行っている。

4. 4. パラメータ

アンテナの配置は8素子の円形アレーとした（第6図参照）。アレーの中心からの素子までの距離は受信時の搬送波波長を基準として半波長に設定した。時分割多重複信方式（TDD）の場合は送受信周波数は一致するが、FDDの場合は送信周波数は受信周波数より5%小さい値とした。

実現可能な最小クラスタ数を決定する際の評価の基準として、SIRの累積分布の5%値に着目した。変調方式として $\pi/4$ シフトQPSKを考えた場合、誤り率 10^{-2} を与えるSIRは約13dBである（2ブランチダイバーシチ受信時）(8)。そこで、あるクラスタ数 N を設定し、SIRの5%値が13dB以上の場合には所要品質（すなわち、誤り率 10^{-2} 以下となる場所率95%以上）を満足するものとした。

5. シミュレーション結果

5. 1. 無指向性アンテナ

今後の評価基準としてアダプティブアレーを用いない無指向性アンテナの場合を検討した。第7図に上下回線のSIRの累積分布を示す。上下回線の分布はほぼ一致した。前述の評価基準を考えるとクラスタ数は16以上となる。

5. 2. 指向性パターンの一例

第8図に上り回線における瞬時指向性パターンの一例を示す。三角の矢印が各移動局の方向を示す。Sは希望局の、 I_i はi番目の移動局の到来電力である。このとき、希望局よりも大きな電力で到来する干渉波が存在しているが、ナルの深さは30dB以上あり、十分低い値まで干渉信号を低減していることがわかる。

5. 3. TDDの場合

この場合、送受信周波数が等しいため、受信時と送信時の指向性パターンは完全に一致する。第9図はクラスタ数を1, 3, 4と変化させた場合のSIRの累積分布である。クラスタ数4の場合、SIRの5%値は上下回線ともほぼ22dBであり、第7図の無指向性アンテナの場合と比較して約20dBの利得が得られている。さらに、クラスタ数が1の場合でも、5%値は上り回線で16.5dB、下り回線で17.7dBと13dBの基準を上回っている。

この結果は非常に重要であり、無指向性アンテナの場合と比較して周波数利用効率が16倍改善されているとともに、すべてのセルにおいて同一周波数を割り当てられることから、周波数割り当ての点でも大きな負担軽減となる。

5. 4. セルオーバーラッピング

第9図の結果では、さらにセル間隔を短縮できる可能性が示された。文献(9)ではセル間にオーバーラップする部分を設けることにより、負荷を共有でき、負荷がセル間でアンバランスな場合にはチャンネルの利用効率を改善できることが報告されている。そこで、クラスタ数1の場合のセル間隔を D_1 とし、さらにセル間隔を

$$D = \alpha D_1 \quad (10)$$

まで ($0 < \alpha \leq 1$) 短縮した場合について検討する。

第10図にクラスタ数1で、短縮係数 α を変化させた場合の累積分布を示す。この結果から、 $\alpha = 0.7$ が実現できることがわかる。このとき、第11図に示したようにセルのほとんどの領域は他のセルと重なっており、負荷を共有できることがわかる。

しかし、第3章で述べたように、このシミュレーションでは次隣接セル以遠の干渉は

考慮していないため、特にこのような場合では誤差が非常に大きくなると考えられる。したがって、実際にはセルオーバーラッピングを実現するには、より多くのアンテナ素子が必要になると考えられる。

5. 5. FDDの場合

この場合、送信時の指向性パターンは受信時とやや、異なり、ナルの方向が変化したり、落ち込みが少なくなるなどの現象が生じ、下り回線の特性劣化が予想される。

第12図に、送信周波数/受信周波数=0.95の場合の下り回線のSIRの累積分布を示す。どのクラスタ数の場合においても、第9図の場合と比較して劣化が生じており、特にクラスタ数が小さくなるにしたがい劣化も大きくなる。クラスタ数が1の場合、5%値の劣化は約8.6dBであり、13dB以下となった。したがって実現可能な最小クラスタ数は3となる。

しかし、送受信時の指向性パターンはウェイト値とアンテナ配置とから計算できるため、それぞれを比較し、誤差を少なくするよう、送信ウェイトを調整することが可能である。第13図は最小自乗法で再調整した指向性パターンを用いた場合の累積分布である。ただし、クラスタ数は1とし、短縮係数も導入した。

この結果から、クラスタ数1の場合の5%値は約14.4dBとなり、基準を満足できることがわかる。このように、FDDの場合においても、簡単な補償により周波数利用効率の大きな改善が得られることが示された。また、ATRではビームスペースでのアダプティブ制御を行うことにより、送信パターンの補償を行う方法も提案しており、これによる更なる改善も期待できる(10)。

6. まとめ

セルラ基地局の受信アンテナとしてアダプティブアレーを適用し、送信時には同一のパターンを形成することにより、上下回線ともに同一チャネル干渉を軽減する方法に着目した。クラスタ数を決定する基準としてSIRの累積分布を採用し、計算機シミュレーションを行った結果、TDD及びFDDの場合においてクラスタ数1が実現できることがわかった(11)。これは無指向性アンテナと比較した場合、16倍の改善となるとともに、複雑な周波数割り当ての問題を解決できる可能性を示している。

また、TDDの場合にはさらにセル間距離を短縮し、負荷の共有が図られることがわかった。このことにより、チャネルの利用効率がさらに向上することも期待される。

しかし、このシミュレーションで用いたモデルはまだ簡単なものであるため、今後

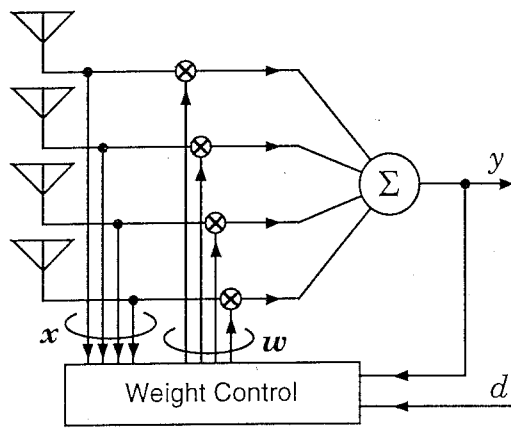
のより詳細な検討が必要であると考えられる。

謝辞

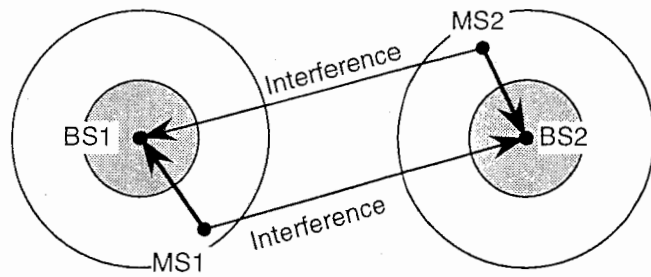
ご指導，ご討論いただいたATR光電波通信研究所猪股社長ならびに小川無線通信第2研究室長に感謝いたします。

参考文献

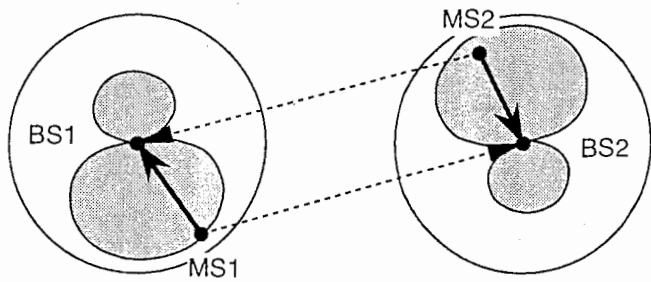
- [1] W. C. Y. Lee, "Spectrum efficiency in cellular," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 38, No. 2, pp. 69-75, May 1989.
- [2] G. K. Chan, "Effects of sectorization on the spectrum efficiency of cellular radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 41, No. 3, Aug. 1992.
- [3] S. C. Swales, et al., "The performance enhancement of multibeam adaptive base station antennas for cellular land mobile radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 39, No. 1, pp. 56-67, Feb. 1990.
- [4] J. H. Winters, "Optimum combining for indoor radio systems with multiple users," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 35, No. 11, pp. 1222-1230, Nov. 1987.
- [5] S. Anderson, et al., "An adaptive array for mobile communication systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, No. 1, pp. 230-236, Feb. 1991.
- [6] R. A. Monzingo and T. W. Miller, *Introduction to adaptive arrays*, New York, Wiley, 1980.
- [7] 青柳他, "送信時におけるLMSアダプティブアレーアンテナの特性" 信学技報, AP86-95, 1986.
- [8] F. Adachi and K. Ohno, "BER performance of QDPSK with postdetection diversity reception in mobile radio channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, No. 1, pp. 237-249, Feb. 1991.
- [9] J. Karlsson and B. Eklundh, "A cellular mobile telephone system with load sharing - an enhancement of directed retry," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37 No. 5, pp. 530-535, May 1989.
- [10] I. Chiba, et al., "Transmitting null beam forming with beam space adaptive array antennas," *IEEE VTC' 94*, pp. 1498-1502, June 1994.
- [11] T. Ohgane, "Spectral efficiency Improvement by base station antenna pattern control for land mobile cellular systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E77-B, No. 5, pp. 598-605, May 1994.



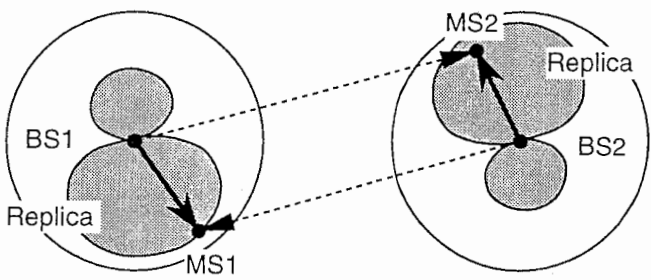
第1図 アダプティブアレーの基本構成



(a) Omni antenna, up-link

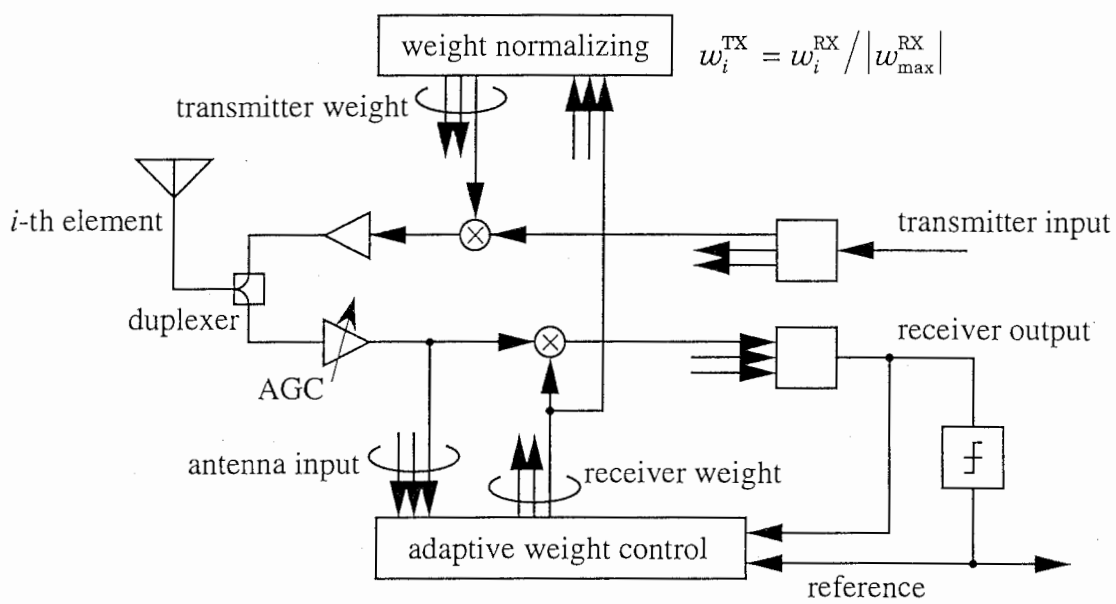


(b) Adaptive array, up-link

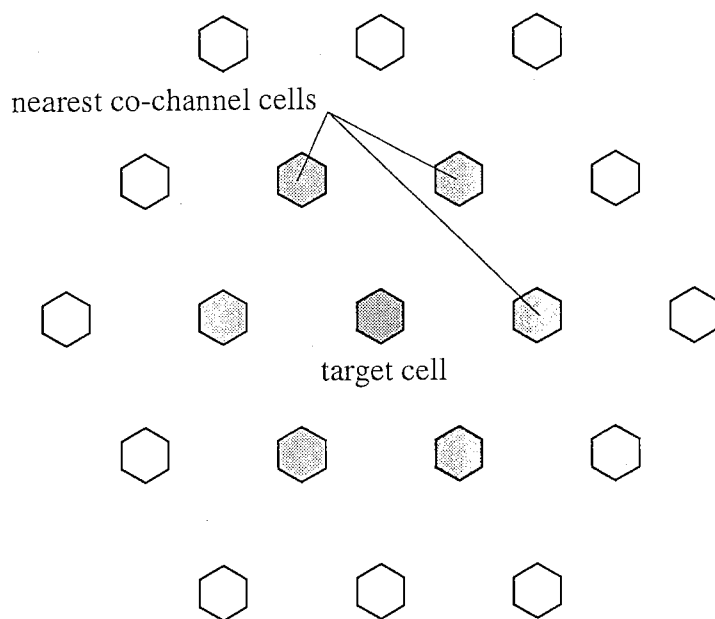


(c) Adaptive array, down-link

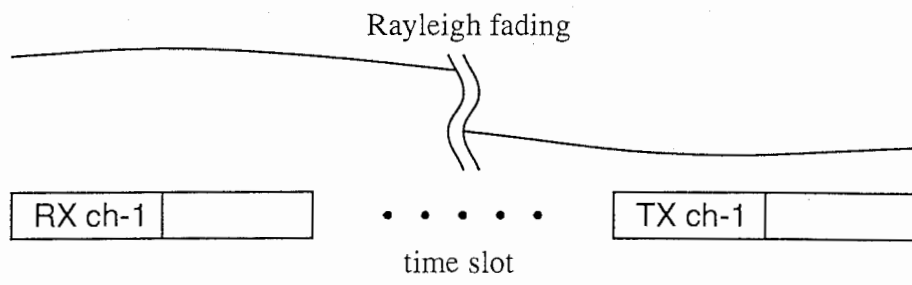
第2図 アダプティブアレーによる同一チャネル干渉除去効果



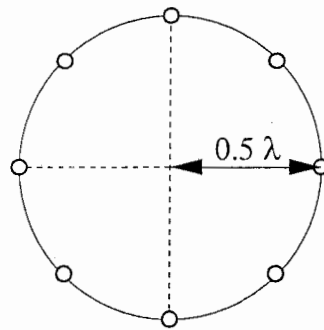
第3図 送受信ウェイト共有の実現例



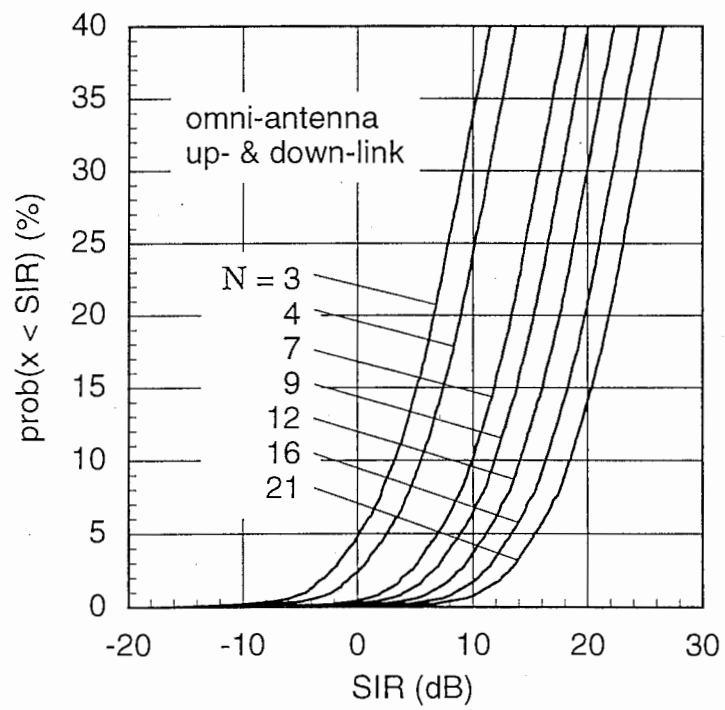
第4図 六角形セル配置



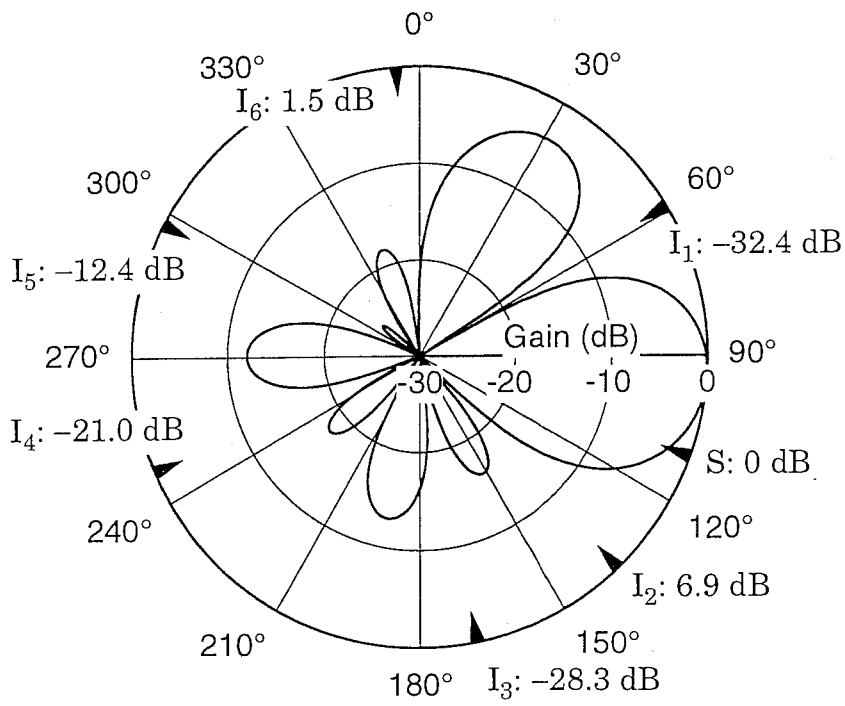
第5図 準定常的フェージングモデル



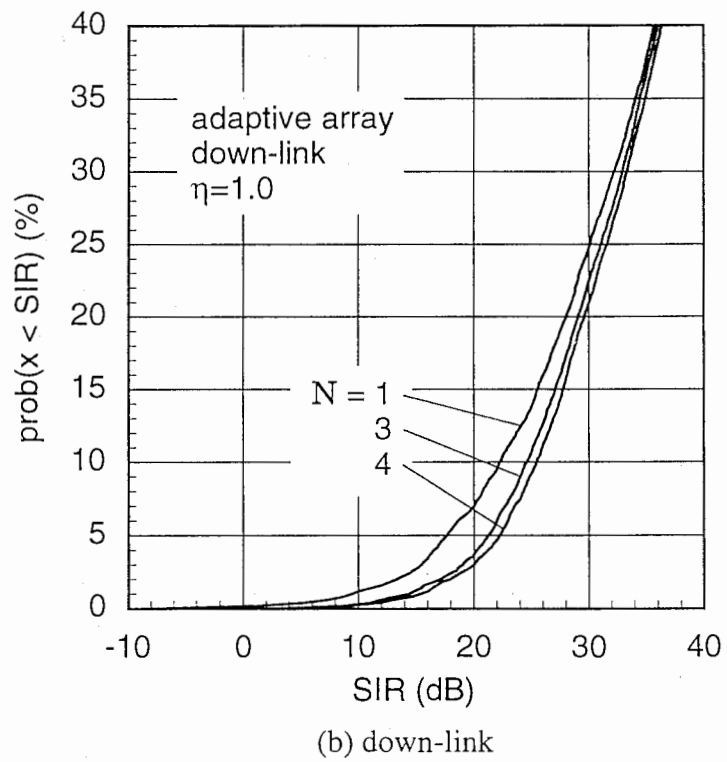
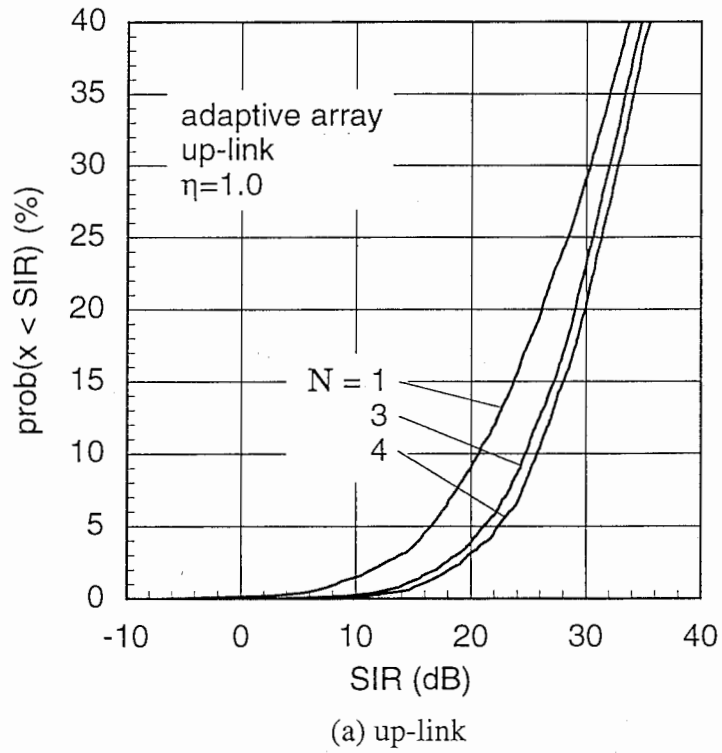
第6図 8素子円形アレー配置



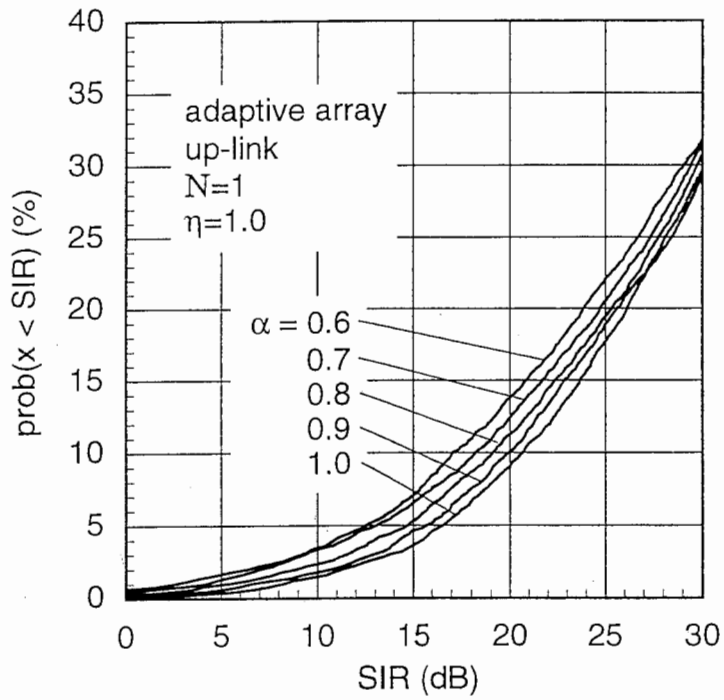
第7図 無指向性アンテナの場合におけるSIR累積分布特性



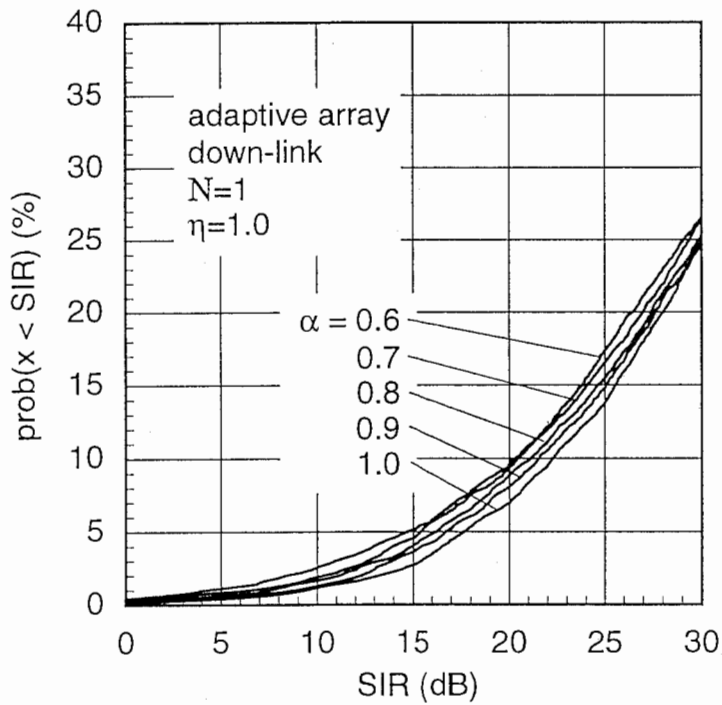
第8図 上り回線における指向性パターンの一例



第9図 TDDの場合におけるSIR累積分布特性

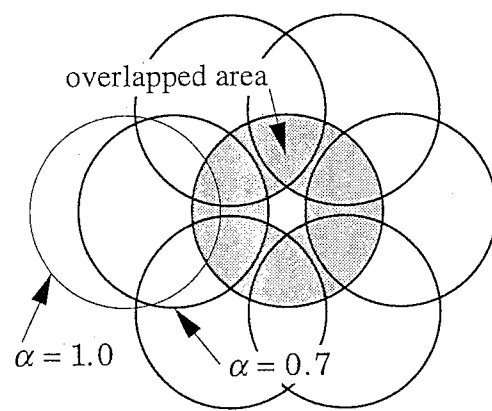


(a) up-link

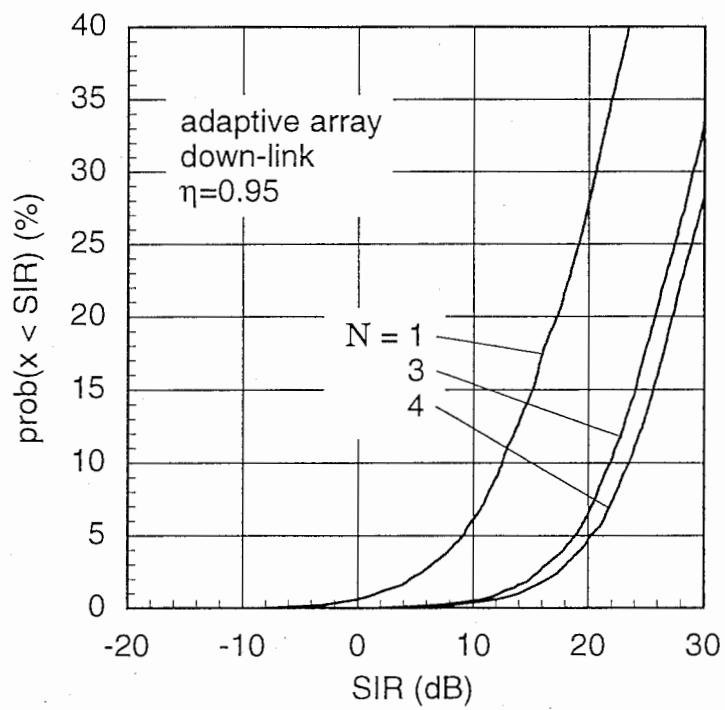


(b) down-link

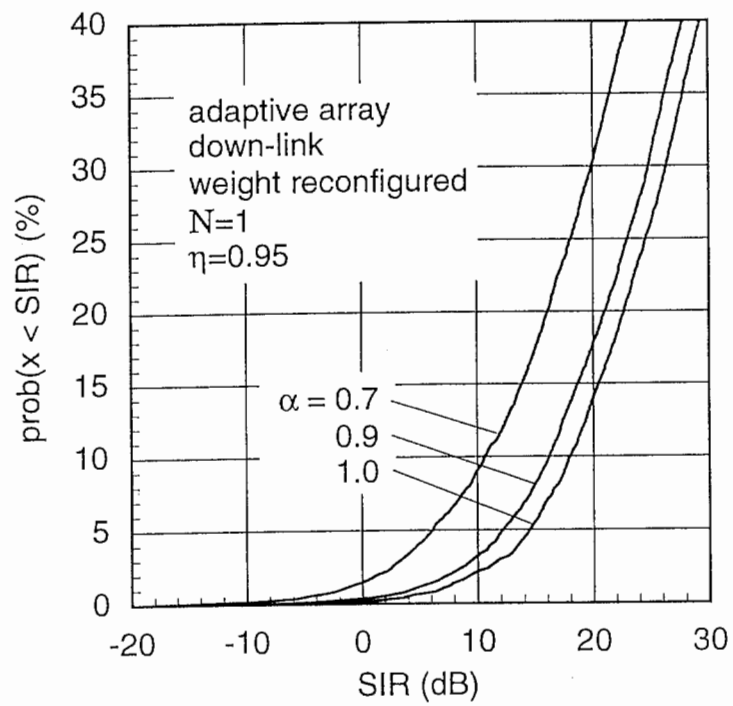
第10図 セルオーバーラッピングを行った場合のSIR累積分布特性



第 1 1 図 セルオーバーラッピング



第 1 2 図 FDDの場合のSIR累積分布特性 (下り回線)



第 1 3 図 送信ウェイト補償を適用した場合の SIR 累積分布特性
 (下り回線, FDD)