

## アレーアンテナの指向性制御における素子特性の影響

藤元 美俊      堀 俊和

福井大学 工学部 〒910-8507 福井市文京 3-9-1

E-mail: {fujimoto, hori}@fuis.fuis.fukui-u.ac.jp

**あらまし** 移動通信システムの伝送容量をより高めるために、アダプティブアレーや MIMO システムなどの利用が検討されている。アレーアンテナを移動端末側に搭載する場合、素子特性がアンテナ単体時と異なることから、指向性制御能力が変化する。本報告では、移動端末にアレーアンテナを搭載した場合の指向性制御能力に対する素子特性の影響について解析した。数値例を通して、素子指向性の影響はアルゴリズムおよび到来波間の相関により大きく異なることを示し、特に、遅延が長いあるいは高速伝送時に素子特性の影響が大きいことを明らかにする。さらに、これまで MMSE と MRC は等価であるとされてきたが、素子特性が大きく変動する移動端末において安定した効果を得るためには MMSE を採用することが適切であることを示す。

**キーワード** アレーアンテナ, 移動端末, 素子特性, 最大比合成, MMSE, SINR

## Effect of Antenna Element characteristics on Antenna Pattern Control of Array Antenna

Mitoshi FUJIMOTO      Toshikazu HORI

Faculty of Engineering, University of Fukui, 3-9-1, Bunkyo, Fukui-city, 910-8507 Japan

E-mail: {fujimoto, hori}@fuis.fuis.fukui-u.ac.jp

**Abstract** Spatial control schemes such as adaptive arrays and MIMO systems are promising technology to improve the transmission capacity of mobile communication. But, the ability of the array antenna is fluctuated when these schemes are applied to mobile terminals because the characteristics of the array elements are changed from the original characteristics of the elements. In this paper, the effect of element characteristics on antenna pattern control of array antenna is analyzed and evaluated. The numerical results show that the influences of the element characteristics depend on both the control algorithm and correlation between the arrival waves. It is also shown that the MMSE algorithm is suitable for mobile terminals, in which the element characteristics are fluctuate, for obtaining the robust performance.

**Keyword** Array Antenna, Mobile Terminal, Element Characteristics, MRC, MMSE, SINR

## 1. まえがき

携帯電話やPHSに代表される陸上移動通信システムの爆発的な普及を経て、さらに高速高品質な通信の実現が望まれている。高速移動通信の実現には、遅延波や干渉波による通信品質劣化に対する対策が不可欠であり、その一技術として複数のアンテナ素子を使用するアダプティブアレーアンテナ[1]や、送受信双方でアレーアンテナを使用し互いに機能的に動作させるMIMOシステム[2]が注目されている。これらのシステムでは複数のアンテナ素子で送受信する信号に対して適応的に重み付けを行うことにより、アンテナシステム全体としての伝送特性を電波環境に適應して制御するものである。複数のアンテナ素子を使用することから、アンテナ1素子の場合に比べ当然、広い空間を使用する。従って、これまでアダプティブアレーに関するほとんどの研究では無線通信システムの基地局への応用を前提としている[3][4]。

一方筆者らは、アレーアンテナを用いた指向性制御における素子指向性の影響について解析し、素子指向性が偏り、なおかつ十分な素子間隔を確保できない場合でもDUR(希望波対不要波電力比)やCNR(搬送波電力対雑音電力比)を大きく改善できることを示している[5]。ただし、文献[5]では、複数の到来波は互いに無相関であり、また、アンテナ素子の放射効率は常に100%と仮定している。しかし、実際の移動通信伝搬環境は到来波間の相関が高い多重波環境であり[6]、アンテナ素子の放射効率についてもその設置状況により変化する[7]。

本報告では、遅延波など相関の高い到来波が存在し、かつアンテナ素子の放射効率が低下する場合など、実際のアンテナ素子の設置状況を考慮して、アレーアンテナの性能を解析的に検討する。解析に当たっては、干渉抑圧能力とCNR改善効果の両方を総合的に評価するためにSINR(Signal to Interference plus Noise power Ratio)により評価することとし、最大比合成やMMSE(Minimum Mean Square Error)など、代表的な制御アルゴリズムを用いた場合の通信品質改善効果について検討した結果を示す。

## 2. 指向性制御における素子特性の影響の解析

### 2.1 解析モデルとSINR

図1のように、 $N$ 素子からなるアレーアンテナに対して所望波 $D$ (Desired wave)と干渉波 $U$ (Undesired wave)の2波が、それぞれ $\theta_D, \theta_U$ 方向から到来しているとする。所望波および干渉波の振幅を $A_D, A_U$ とし、位相をそれぞれ $\phi_D, \phi_U$ と表すと、到来波 $V_{Din}, V_{Uin}$ は、それぞれ次式で表される。

$$V_{Din} = A_D e^{j\phi_D} \quad (1)$$

$$V_{Uin} = A_U e^{j\phi_U} \quad (2)$$

ここでは簡単のため、到来方向、素子指向性ともに、2次元の場合を考える。第 $n$ 素子の複素指向性を $E(n, \theta)$ とし、何らかのアルゴリズムに基づいて最適化した後の重み係数を $W_{opt}(n)$ とおくと、アレーアンテナの合成指向性 $E_0(\theta)$ は次式となる。

$$E_0(\theta) = \sum_{n=1}^N E(n, \theta) \cdot W_{opt}(n) \quad (3)$$

従って、 $\theta_D$ 方向から到来する所望波および $\theta_U$ 方向から到来する干渉波をアレーアンテナで受信するとき、合成後の信号に含まれる所望信号成分 $V_{Dout}(\theta_D)$ 、および干渉信号成分 $V_{Uout}(\theta_U)$ は、それぞれ以下ようになる。

$$V_{Dout}(\theta_D) = A_D e^{j\phi_D} \cdot E_0(\theta_D) \quad (4)$$

$$V_{Uout}(\theta_U) = A_U e^{j\phi_U} \cdot E_0(\theta_U) \quad (5)$$

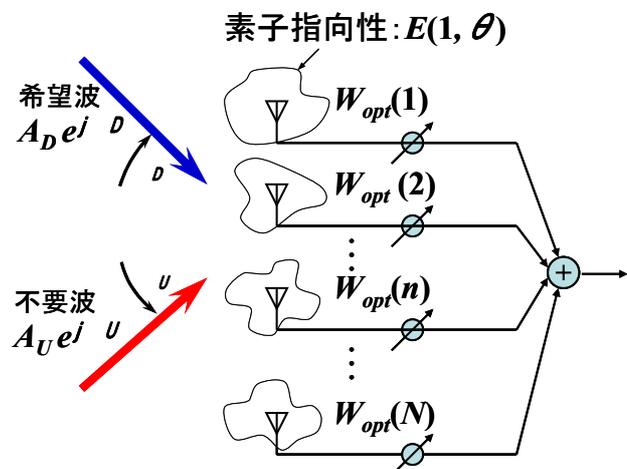


図1 解析モデル

ここで、所望波と干渉波の相関について考える。電波伝搬環境として多重波環境を想定し、干渉波は所望波と同一波源から放射された遅延波であるとする。所望波と干渉波との相互相関係数を  $\rho$  とすると、合成出力に含まれる所望信号成分  $V_S$  は所望波そのものの干渉波に含まれる所望信号成分の和であり、

$$V_S = V_{Dout}(\theta_D) + \sqrt{\rho} \cdot V_{Uout}(\theta_U) \quad (6)$$

と表される。一方、合成出力に含まれる干渉信号成分  $V_I$  は残りの成分であり、

$$V_I = (1 - \sqrt{\rho}) \cdot V_{Uout}(\theta_U) \quad (7)$$

である。また、各アンテナ素子出力における熱雑音は無相関とし、その平均電圧  $N_0$  は全ての素子で等しいと仮定すると、合成後の雑音電力  $P_N$  は次式となる。

$$P_N = \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{2} |W_{opt}(n) \cdot N_0|^2 \right\} \quad (8)$$

従って、合成後の出力信号の SINR は、式(6)、式(7)および式(8)より次式で表される。

$$\begin{aligned} SINR &= \frac{\frac{1}{2} V_S^2}{\frac{1}{2} V_I^2 + P_N} = \frac{\frac{1}{2} \{V_{Dout}(\theta_D) + \sqrt{\rho} \cdot V_{Uout}(\theta_U)\}^2}{\frac{1}{2} \{(1 - \sqrt{\rho}) \cdot V_{Uout}(\theta_U)\}^2 + \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{2} |W_{opt}(n) \cdot N_0|^2 \right\}} \\ &= \frac{\left\{ V_{Din} \cdot \sum_{n=1}^N E(n, \theta_D) W_{opt}(n) + \sqrt{\rho} \cdot V_{Uin} \cdot \sum_{n=1}^N E(n, \theta_U) W_{opt}(n) \right\}^2}{\left\{ (1 - \sqrt{\rho}) \cdot V_{Uin} \cdot \sum_{n=1}^N E(n, \theta_U) W_{opt}(n) \right\}^2 + \sum_{n=1}^N |W_{opt}(n) \cdot N_0|^2} \end{aligned} \quad (9)$$

## 2.2 最適重み係数と SINR の期待値

式(9)の重み係数  $W_{opt}(n)$  は、制御アルゴリズムにより異なる。移動端末への搭載を考慮し、ここでは、比較的演算量の少ないアルゴリズムとして、最小自乗誤差法 (MMSE: Minimum Mean Square Error) および最大比合成 (MRC: Maximal-Ratio Combining) を取り上げる。また、比較対象として、一般的に MRC と同じダイバーシティ技術として分類される等利得合成 (EQG: Equal-Gain Combining) および選択合成 (SC: Selection Combining) を考える[8]。各アルゴリズムにより決定される重み係数は以下のように表される。なお、添字 \* は複素共役を表す。

MMSE (最小自乗誤差法) の場合: 各アンテナ素子から出力される所望信号成分が同位相で合成される。従って、MMSE による重み係数は次式で表される。

$$W_{MMSE}(n) = \{V_{Din} E(n, \theta_D) + \sqrt{\rho} \cdot V_{Uin} E(n, \theta_U)\}^* \quad (10)$$

MRC (最大比合成) の場合: 各アンテナ素子から出力される信号が同位相となるように、かつ、振幅は信号強度に比例して重み付けされたのち合成される。すなわち、MRC による重み係数は次式となる。

$$W_{MRC}(n) = \{V_{Din} E(n, \theta_D) + V_{Uin} E(n, \theta_U)\}^* \quad (11)$$

EQG (等利得合成) の場合: 各アンテナ素子から出力される信号が同位相となるように合成される。ただし、重み係数の振幅は全て等しい。従って、重み係数は次式で表される。

$$W_{EQG}(n) = \frac{W_{MRC}(n)}{|W_{MRC}(n)|} \quad (12)$$

SC (選択合成) の場合: 各アンテナ素子から出力される信号の振幅が最大の素子のみを選択し (重み係数 1)、その他の素子の重み係数は 0 とする。すなわち、次式とする。

$$W_{SC}(n) = \begin{cases} 1, & |W_{MRC}(n)| \text{ が最大の素子} \\ 0, & \text{上記以外の素子} \end{cases} \quad (13)$$

式(10)から式(13)の重み係数を式(9)に代入することにより各アルゴリズムを用いた場合の SINR を求めることができる。

SINR の値は、到来波の強度、方向、到来波間の相関など電波の到来状況だけでなく、アンテナ素子の特性や重み係数を決定するアルゴリズムによっても異なる。本報告では、アンテナ素子特性の影響を明

らかにするために，到来方向については全方向に一樣分布していると仮定し，次式に示す SINR の期待値  $\overline{SINR}$  によって評価する．

$$\overline{SINR} = \iint_{\theta} SINR d\theta_U d\theta_D \quad (14)$$

### 3. 数値例

ここでは，具体的なアンテナ素子特性のモデルを取り上げ，アンテナ素子特性がアレーアンテナの指向性制御能力に対してどのように影響するか，数値例を基に検討する．

#### 3.1 アンテナ素子指向性モデル

数値計算に用いたアンテナ素子の指向性を図 2 に示す．第  $n$  素子の素子指向性は  $\theta_0(n)$  方向で最大の電界  $E_0$  を持ち，その他の方向に対する電界  $E(n, \theta)$  は次式で表されるものとした．

$$E(n, \theta) = \begin{cases} E_0 \cdot \cos\{k(\theta - \theta_0)\}, & |k(\theta - \theta_0)| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & |k(\theta - \theta_0)| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (15)$$

ただし  $\theta_0(n) = 2\pi n / N$ ，すなわち，各素子の最大方向は  $\theta = 0 \sim 2\pi$  の範囲で等間隔に離れているとしている．式(15)の定数  $k$  により指向性の偏りの程度が変わる．ここでは， $k$  を変えて素子指向性を変化させ，そのときの電力半値幅 HPBW (Half Power Beam Width) と SINR との関係を明らかにすることで素子指向性の影響を評価することとした．

また，アンテナ素子の放射効率については，以下の 2 つの場合を考える．

a)放射効率が 100%の場合：指向性の歪により効率が変化しないように，次式の  $E_0$  に基づいて電界を規格化する．

$$E_0 = \frac{1}{\int_{\theta_0 - \pi/k}^{\theta_0 + \pi/k} \cos^2\{k(\theta - \theta_0)\} d\theta} \quad (16)$$

これは，アンテナ素子単体そのものが指向性を持ちながらも効率は 100%としており，自動車の周囲に指向性アンテナを配置する場合などを想定している．

b)放射効率が低下する場合：式(15)において  $E_0$  は常に一定とし，HPBW が狭いほど放射されるエネルギーは少なくなるものとする．アンテナ周辺の物体によりエネルギーが吸収されると仮定しており，携帯端末などにアンテナ素子を搭載する場合などを想定している．

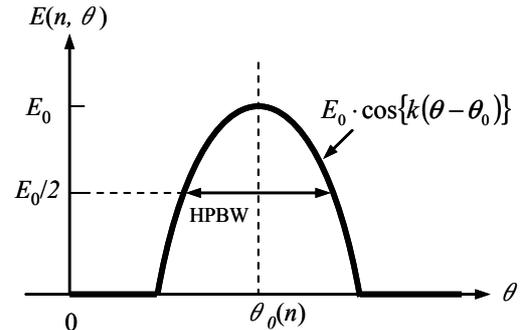


図 2 解析モデル (素子指向性)

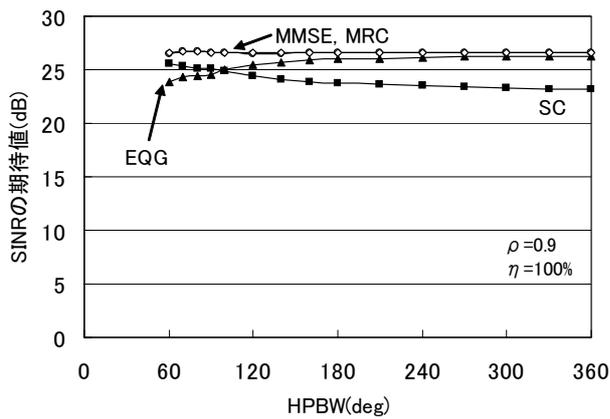
#### 3.2 アンテナ素子の放射効率の影響

主波と遅延波の遅延時間が短く到来波間の相関が大きい ( $\rho = 0.9$ ) 場合の，アンテナ素子の電力半値幅 HPBW と SINR の期待値の関係を図 3 に示す．図 3 (a) は放射効率が 100% の場合であり，図 3 (b) は効率が低下する場合である．横軸は素子指向性の電力半値幅 HPBW である．縦軸は式(10)から式(13)により決定した重み係数を式(9)に代入し，さらに式(14)に基づいて得られた SINR の期待値である．その他の条件は表 1 に示すとおりである．

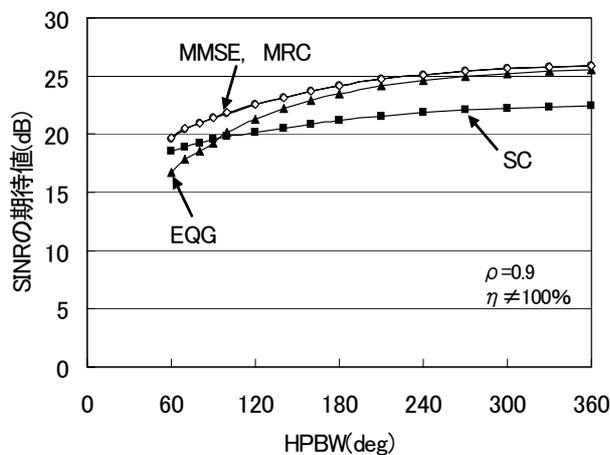
表 1 解析条件

アンテナ素子数 N	4
素子間隔 d	0.5 波長
到来波強度比 DURin	3dB
主波 (D 波) の SNR	20dB

図 3 より，放射効率が 100% の場合 (図 3(a)) は SINR に対する素子指向性の影響は少ないが，放射効率が低下する場合 (図 3(b)) は，効率の低下に伴い SINR も低下することが分かる．また，アルゴリズム間の比較については，従来から知られている通り MMSE と MRC は等価であり [9]，EQG および SC よりも優れていることが確認できる．



(a)放射効率を 100%とした場合

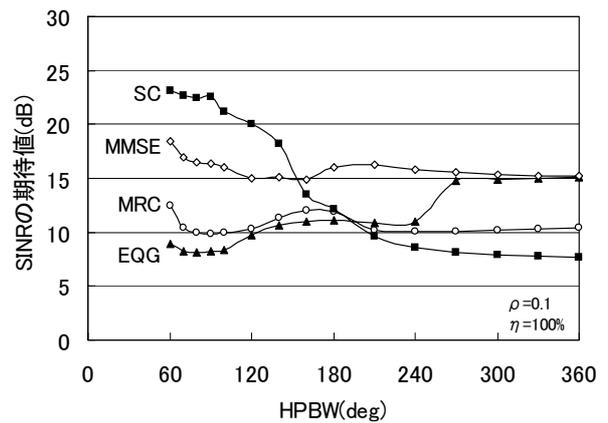


(b)放射効率が低下する場合

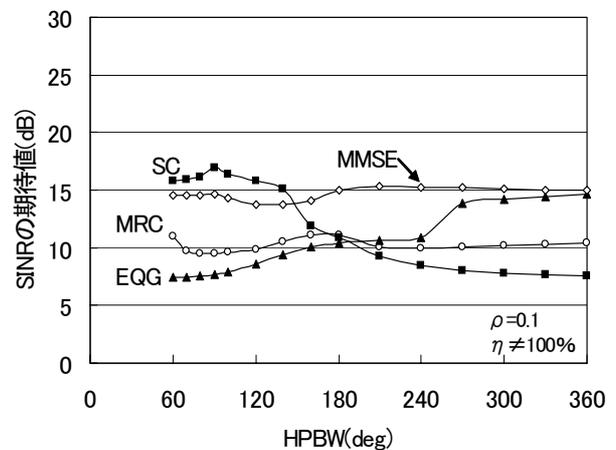
図 3 SINR の期待値に対する素子指向性の影響 (到来波間相関が大きい場合:  $\rho = 0.9$ )

次に、遅延波の遅延時間が長く、到来波間の相関が低い ( $\rho = 0.1$ ) 場合の SINR を図 4 に示す。図 3 と同様に、横軸は素子指向性の電力半値幅 HPBW であり、縦軸は SINR の期待値である。その他の条件は表 1 に示したとおりである。

図 3 に比べると、全体的に SINR が低下しており、さらに重み係数決定のアルゴリズムにより、素子指向性の影響が大きく異なることが分かる。特に、HPBW が広い場合には、EQG と MMSE はほぼ同等の性能であるが、HPBW が狭くなる、すなわち指向性の歪が大きくなると EQG の性能は劣化する。さらに、HPBW が 120deg 以下の場合には、SC であっても良好な SINR が得られることが分かる。従って、素子指向性の歪が少ない場合は EQG を使い、素子指向性の歪が非常に大きい場合は SC と使い分けることも可能である。ただし、アンテナ周辺物体の影響によ



(a)放射効率を 100%とした場合



(b)放射効率が低下する場合

図 4 SINR の期待値に対する素子指向性の影響 (到来波間相関が小さい場合:  $\rho = 0.1$ )

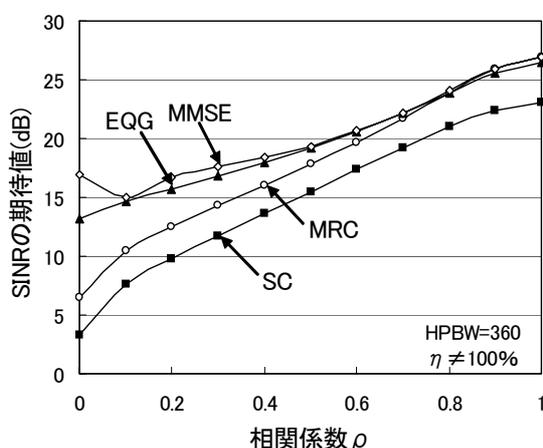
り、素子指向性が時間と共に変動する場合においても安定した SINR を得るためには MMSE を採用することが適切であるといえる。

### 3.3 到来波間相関の影響

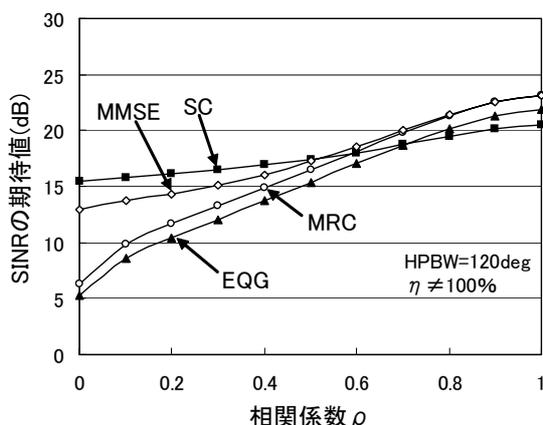
一般に、主波と遅延波の相関は、伝送シンボル長  $T$  に対する到来波間の遅延時間差  $\Delta\tau$  の比、いわゆる、 $\Delta\tau/T$  によって決まる。図 4 に示したように、到来波間の相関によって SINR に対する素子指向性の歪みの影響が異なる。そこで、相関係数による指向性制御能力の違いを調べた。その結果を図 5 に示す。図 5 (a)は HPBW が 360deg、すなわち各素子はほぼ無指向性であり、図 5 (b)は HPBW が 120deg と歪が大きい場合である。

到来波間の相関  $\rho$  が大きい場合、すなわち遅延時間が短い、あるいは伝送速度が遅い場合は MMSE と

MRC はほぼ同じ特性であるが、到来波間の相関が小さくなると MRC の特性は劣化することが分かる。また、素子指向性が無指向性に近い場合(図 5(a))は到来波間の相関に関わらず MMSE と EQG は同等の性能であるが、素子指向性が歪み(図 5(b)), かつ到来波間の相関が低いと EQG の性能は低下する。さらに、SC は HPBW が狭い場合は良好な特性を示すが、素子が無指向性に近いと十分な特性が得られない。以上のことから、移動通信における移動端末にアレーアンテナを搭載し、素子特性や到来波の遅延時間が大きく変動する場合には、MMSE を採用することが安定した効果を得るためには適切であるといえる。



(a)素子指向性歪が少ない場合



(b)素子指向性歪が大きい場合

図 5 SINR の期待値に対する到来波間相関の影響

#### 4. むすび

移動通信における通信品質改善あるいは通信容量向上を目的として、移動端末にもアレーを搭載することが検討されている。本報告では、移動端末にアレーアンテナを搭載した場合の指向性制御能力に対する素子特性の影響について解析した。

はじめに、素子特性や到来波環境の影響をも含めて指向性制御能力を評価する指標として、SINR の期待値について説明した。

次に、素子指向性の影響はアルゴリズムおよび到来波間の相関により大きく異なることを示し、特に、遅延が長いあるいは高速伝送時に素子特性の影響が大きいことを、数値例を通して明らかにした。

最後に、これまで MMSE と MRC は等価であるとされてきたが、素子特性が大きく変動する移動端末においては MMSE を採用することが適切であることを示した。

#### 文献

- [1] 菊間信良, アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, 1998.
- [2] 唐沢好男, “MIMO 伝搬チャネルモデリング,” 信学論(B), vol.J86-B, no.9, pp.1706-1720, Sept. 2003.
- [3] 袁 浩, 前山利幸, 内堀淳一, 横田知好, 谷口敏夫, “PHS 用アダプティブアレーアンテナ基地局における素子間隔の検討,” 1998 信学ソ大, B-5-75, 1998.
- [4] 長 敬三, 西森健太郎, 堀 俊和, “遅延波の到来方向を考慮したストリートマイクロセル用アダプティブ基地局アンテナ構成法,” 信学技報, AP97-85, Aug. 1997.
- [5] 藤元美俊, 堀俊和, “アレーアンテナの指向性制御における素子指向性の影響,” 信学技報, AP2004-156, Oct. 2004.
- [6] 奥村善久, 進士昌明(監), 移動通信の基礎, (社)電子情報通信学会, 1986.
- [7] 小川晃一, 上野伴希, “移動通信環境における携帯電話用ダイバーシティアンテナの平均実効利得解析,” 信学論(B-II), vol.J81-B-II, no.10, pp.897-905, Oct. 1998.
- [8] 野本真一, ワイヤレス基礎理論, (社)電子情報通信学会, 2003.
- [9] 高田潤一, 太郎丸真, “MMSE 合成によるアダプティブアレーと空間ダイバーシテチの等価性 - 干渉除去と電力合成の観点から見た伝搬モデル -,” 信学技報, RCS97-248, Feb. 1998.