

# デジタル・ビーム形成受信機の プロトタイプ設計

Minseok Kim

第1章ではアダプティブ・アンテナの概要と最近の移動通信システムの動向について説明した。本章ではアダプティブ・アレイの基本動作であるデジタル・ビーム形成法の原理について説明し、プロトタイプのハードウェアの設計について紹介する。  
(編集部)

## 1. デジタル・ビーム形成 (Digital Beamforming : DBF)

移動通信におけるデータ容量の増大やデータそのものの高品質化、広帯域データ伝送への要望が高まるなか、既存の周波数の利用効率を向上させることは、今後は欠かせない要求項目になってきます。

アレイ・アンテナを用いて、空間的に方向性を制御(指

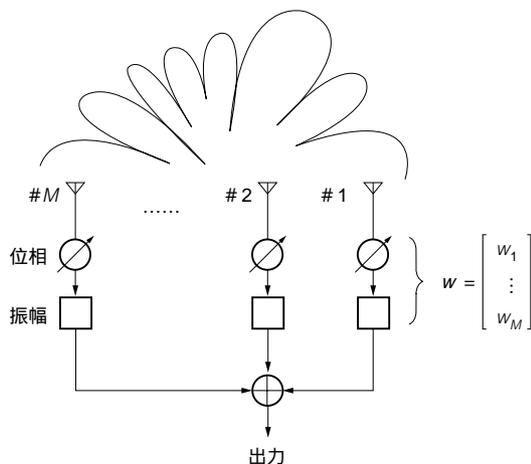


図1 ビーム形成の概念  
各アンテナに到達する信号の位相と振幅をそろえて合成する

向性制御)すれば、所望の方向に送信電力を集中させ、無駄の少ない通信を行えます。送信電力の無駄な放射が抑えられるため、消費電力の低減や隣接のチャンネルに影響する干渉電力の制御も可能になり、結果的に周波数の利用効率を向上することができます。

このようなアレイ・アンテナ信号処理技術を「ビーム形成(Beamforming)」といいます。特にアナログ制御ではなく、デジタル信号処理により行う場合には「デジタル・ビーム形成(Digital Beamforming)」といいます。

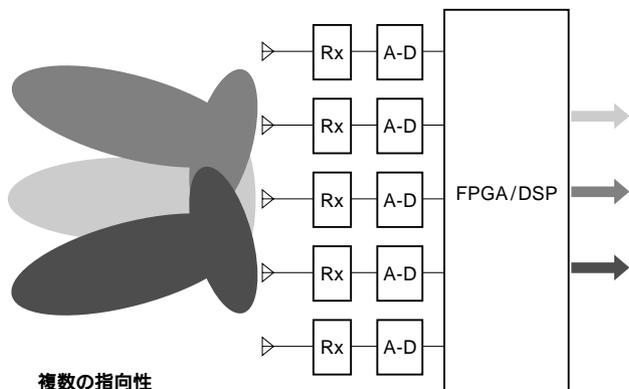
図1にアレイ・アンテナ・システムの概要を示します。M素子のアレイ・アンテナに受信されるそれぞれの信号に位相と振幅の制御を行い、信号対ノイズ比が最大になるように合成することになります。各アンテナ素子は固定的な放射指向性特性をもちますが、ここで位相と振幅の適応制御により仮想的に任意の受信ビームを形成できます。

これをアナログ回路で実現することも考えられますが、図2のようにA-Dコンバータを用いてアナログ信号をデジタル信号に変換し、デジタル信号処理の算術演算により実現することもできます。デジタル信号処理器は汎用のDSP(Digital Signal Processor)あるいは高速で専用の機能が実現できるFPGA(Field Programmable Gate Array)が用いられます。ここでは、デジタル・ビーム形成法について解説します。

### ● アレイ・アンテナの基本原理

原理を説明するために、図3のような狭帯域の簡単な平面波モデルを考えます<sup>(1)</sup>。アレイ・アンテナの構造は半波

**KeyWord** デジタル・ビーム形成, 指向性制御, マルチパス, デジタル受信機, 4倍オーバーサンプリング



Rx : Receiver  
A-D : A-Dコンバータ

図2 デジタル・ビーム形成システム

長の等間隔に配置した  $M$  個のリニア(線形)アンテナ素子とします。各アンテナは無指向性(Omni-directional)で、それぞれ同じ特性を持つことを前提に話を進めます。電波信号が、ある方向から入射したとき、 $k$  番目のアンテナ素子における受信電圧は、基準アンテナにおける電圧から以下のように表現されます。

$$x_k(t) = x_0(t - \tau_k) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\tau_k = \{d(k-1)\sin\theta\}/c$  は到達時間差です。 $\theta$  は到来角(Direction of Arrival : DOA)、 $c$  は光速、 $d$  は素子間隔です。ただし、その信号が十分に狭帯域な信号の場合、各アンテナ素子に到達する時間差は、位相差( $e^{-j\omega\tau}$ )に置き換えて考えられ、以下のように表現できます。

$$x_k(t) = s(t) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d(k-1)\sin\theta\right) + n_k(t) \dots\dots\dots (2)$$

$k=1, 2, \dots, M$

ここで、 $s(t)$  は入射波の包絡線、 $\lambda$  は波長、 $n_k$  は白色ガウスノイズを意味します。各アンテナでの受信信号に対して、位相と振幅の制御を行い、その結果を合成するビーム形成の動作は、次式のように表されます。

$$y(t) = \sum_{k=1}^M \omega_k^* x_k(t) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\omega_k$  は  $k$  素子目の位相や振幅を示す値(重み係数値)で、一般に複素数となります。記号  $*$  は複素共役を意味します。ベクトル表現を使えば以下のように簡単に表現できます。

$$y(t) = \mathbf{\omega}^H \mathbf{x}(t) \dots\dots\dots (4)$$

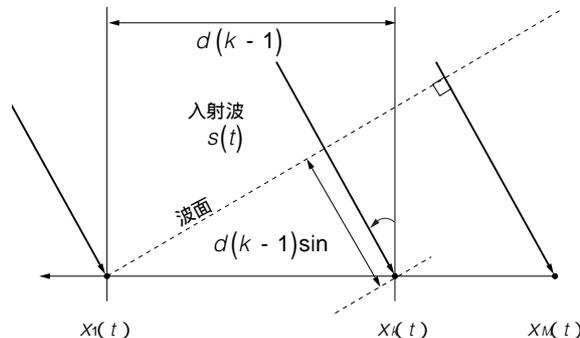


図3 平面波モデルにおける各受信アンテナにおける経路差

ここで記号  $H$  は複素共役転置を意味します。また、

$$\mathbf{\omega} = [\omega_1 \dots \omega_M]^T$$

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(\theta)s(t) + \mathbf{n}(t) \dots\dots\dots (5)$$

$\mathbf{a}(\theta)$  は方向を特定するベクトルで、方向ベクトルあるいはステアリング・ベクトルと呼ばれます。

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[ 1, \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta\right), \dots, \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d(M-1)\sin\theta\right) \right]^T \dots\dots\dots (6)$$

入射信号が平面波として到来することはあくまで理想的な仮定です。実際には見通しの環境は少なく、受信アンテナには多数のマルチパス波からなる合成信号として受信されます。 $N$  個の信号がそれぞれ  $L(t)$  個のマルチパス波を持つ場合について、もう少し一般的に表現したのが次の式です。

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{v}_i(t, \tau) s_i(t) + \mathbf{n}(t) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\mathbf{v}_i(t, \tau)$  はチャネル応答ベクトルと呼ばれ、以下のような関係として表されます。

$$\mathbf{v}_i(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L(t)-1} A_{l,i}(t) e^{j\phi_{l,i}(t)} \mathbf{a}(\theta_{l,i}(t)) \delta(t - \tau_{l,i}(t)) \dots\dots (8)$$

$A_{l,i}$ 、 $\phi_{l,i}$ 、 $\tau_{l,i}$ 、 $\theta_{l,i}$  は、信号  $i$  による受信信号成分  $l$  の振幅、搬送波位相シフト、遅延量、到来方向です。

デジタル・ビーム形成において、式(4)のようにウェイト・ベクトルをうまく制御することによって受信信号の品質(信号対雑音比)を改善できます。原理的には、 $M$  個の素子を使って合成する場合に  $10 \log M$  の利得が得られます。例えば4素子の場合、 $10 \log 4 = 6$  dBの利得になります。

参考として図4に素子数による合成利得を示します。ここで、1素子の場合は無指向性であり、どの方向も同じレ

- 1
- 1 App
- 2
- 2 App
- 3
- 3 App
- 4