

# ビームフォーミングネットワークを用いたマルチビーム衛星の高信頼化の検討

日大生産工(院) ○佐藤 公則

日大生産工 田中 將義

## 1. はじめに

DSP(デジタルシグナルプロセッサ)を用いることにより、フェイズドアレイアンテナの放射パターンをデジタル的に制御する DBF(デジタルビームフォーミング)を実現することができる。この技術を衛星搭載通信機器に適用することにより、通信システムの高機能化、高信頼化、経済化が可能になる[1-3]。

衛星搭載機器は、長期間宇宙環境に晒されるため、構成要素の故障時にも性能を確保する手段を有することが要求される。従来、構成要素に対して冗長系を備える構成が採用されているが、重量増、コスト増となる。DBFは、素子アンテナに供給する信号の重み(振幅と位相)を制御することにより、ビームの指向性を随時制御することができる。この特徴を利用して、RF素子(電力増幅器(HPA)やアンテナ)の故障に対して信頼性の高い DBFシステムを経済的に構築するには、各 RF素子に予備系を設ける構成に代えて、重みを適応制御し性能劣化を補償する方法が考えられる。

そこで、本研究では、構成要素である RF素子が故障した場合のビーム指向性への影響を明らかにするとともに、残存している素子に供給する信号の重みを適応制御することにより、故障による指向性劣化を補償する方法を明らかにし、高信頼化の構成法を検討したので、その結果を報告する。

## 2. DBFについて

DBFの構成図を図1に示す[2]。構成図の下部が、DSPで処理されている部分となっており、ここではすべての信号がデジタルで処理

されている。入力された信号を Divider(分配器)により素子ごとに分配する。そして、それぞれに Wの重み付け(振幅と位相)をする。その後、デジタルアップコンバータを介し中間周波数帯(IF帯)に周波数を上げる。

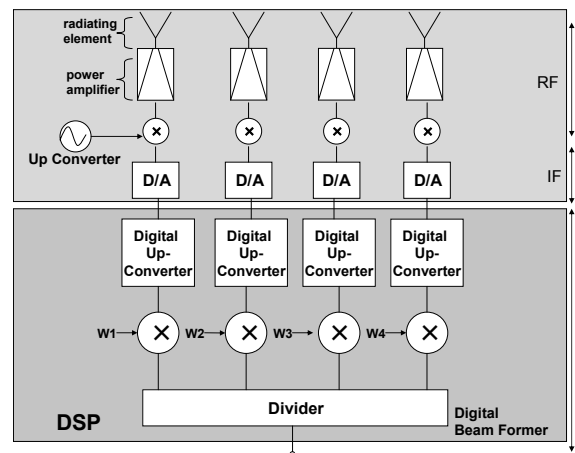


図1 DBFの構成

構成図の上部は、アナログ回路であり、先の信号を D/A変換してアナログ信号にする。その後、再度アップコンバートし周波数を上げた後に、HPAで増幅しアンテナへ出力する。

## 3. 検討システム

### 3.1 マルチビームシステム

本研究では静止衛星を用いた移動体通信を想定している。

検討対象の概念図を図2に示す。上部の黒い丸が衛星を表している。上空 36,000km から  $f_1$ ,  $f_2$  の 2 周波数を使用し、次隣接ビームにおいて周波数の再利用をした 3 ビームを放射するマルチビームシステムである。この際、同一周波数を用いる次隣接ビームへの干渉を抑えるために、出力の無い点(null 点)を干渉を受けるビームの

中心部に配置した。また、1 ビームが地上に放射される範囲(半値幅)を、880km とした。

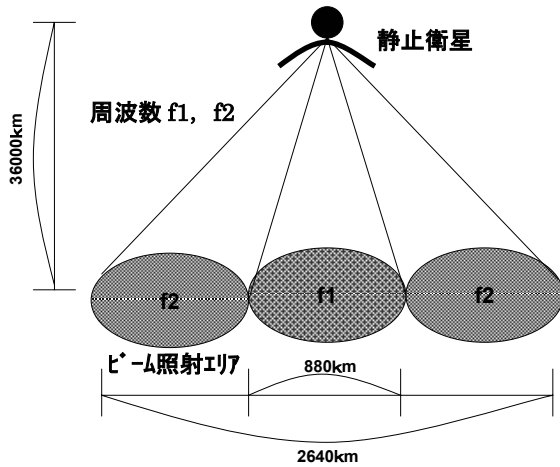


図2 マルチビームシステムの照射エリアと周波数配置

### 3.2 DSP による放射パターンの制御処理

DSPの処理を図式化したものを図3に示す。ビーム数を  $n$ 、素子数を  $m$  とする。入力信号はビーム数  $n$  と同数であり、それぞれの信号ごとに素子の重み付け( $W$ )を施す。その後、対応する素子の出力を、素子ごとに足しあわせることにより、マルチビームを実現している。

また、重み付け決定のために MMSE(最小2乗誤差法)を用いた[4]。

MMSE は、参照信号と実際のレイ出力信号との差を最小にすることによって適切な重みを決定するアルゴリズムである。これを使用して、null 点を作り出し、同一周波数での干渉レベルを下げている。

MMSE のアルゴリズムを以下に記す。

角度  $\theta_s$  の指向性を持つ入力信号を  $s(t)$ 、null 点作成角度  $\theta_u$  に指向性を持つ信号  $u(t)$ 、また、参照信号  $r(t)$  は  $r(t) = s(t)$  とする。  $f$  は信号の周波数、  $d$  は素子の位置を表している。

このとき、入力ベクトル  $\mathbf{X}(t)$  は、

$$\mathbf{X}(t) = s(t) \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j2\pi f(d \sin \theta_s)/c) \\ \vdots \end{bmatrix} + u(t) \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j2\pi f(d \sin \theta_u)/c) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表せる。このときの行列部分はレイ素子ごと

の重み係数である。

相関行列はそれぞれの相関特性から次式のように得られる。

$$R_{xx} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] \quad (2)$$

また相関ベクトルは、

$$r_{xr} = E[\mathbf{X}(t)r^*(t)] \quad (3)$$

となり、最適重み  $\mathbf{W}_{opt}$  は、

$$\mathbf{W}_{opt} = R_{xx}^{-1}r_{xr} \quad (4)$$

と求めることができる。

これが、先に記した重みであり、この重み付けを施すことにより任意の角度に null 点を作り出すことができる。

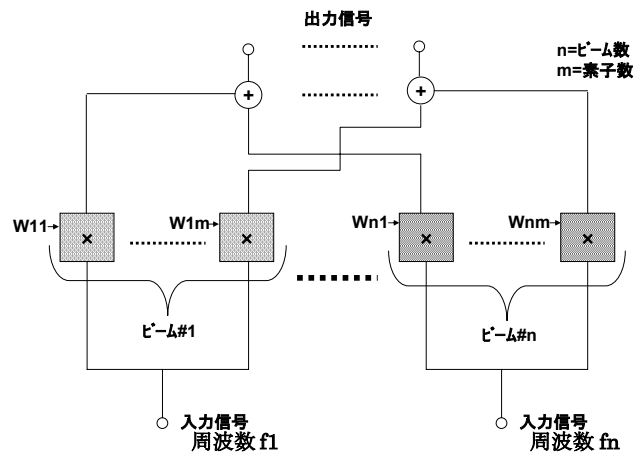


図3 DSP におけるアンテナ放射パターンの制御処理

### 3.3 RF 素子故障時の放射パターン補償アルゴリズム

総素子数を  $M$ 、故障素子数を  $N$  とする。故障が発生した場合、それぞれの素子の重み付けが、 $M$  素子に最適化されているために、故障の影響が大きく現れる。

そこで、素子数  $(M-N)$  の故障素子を除いた等間隔でないレイアンテナとして重み付けを再設定することにより、故障によるパターン劣化の補償を行った。

またパターン制御は、正常時と同じく次隣接ビ

の指向性の中心部に null 点を配置した。

### 3.4 本研究の具体的な諸元

本研究で想定したシステムの具体的な諸元を表 1 に示す。搭載機器の軽量化，経済化をはかるために，素子数を 24 とした。また，1 ビームの半値幅を 1.4 度，同一周波数を用いた隣接ビームとの干渉レベルを  $C/I > 25\text{dB}$  とした。

表 1 具体的な諸元

周波数帯	2.5GHz 帯
素子数	24 素子
素子間隔	1.5λ
素子	ヘリカルアンテナ N=10

## 4. 検討結果

### 4.1 正常時の特性

24 素子のフェイズドアレイアンテナを用いたマルチビームシステムの正常時の放射特性を図 4 に示す。横軸が角度，縦軸が出力レベルである。左から順に指向性を -1.4 度，0 度，1.4 度に向けた場合の放射特性である。破線 #1 と点線 #3 のパターンが同一周波数を用いており干渉が発生するために，それぞれの指向性の半値幅に null 点を配置し，干渉を押さえている。この際，半値幅内の干渉レベル  $C/I$  は 36.3dB である。

### 4.2 1 素子故障時の特性と補償後の特性

図 5 に 1 素子に故障が発生した場合の放射特性を示す。故障が発生した箇所は，故障の影響が最悪になる点である。ビームの配置は図 4 と同じである。このときの，#1 と #3 の半値幅内の干渉レベル  $C/I$  は 21.8dB であり，正常時より劣化していることが分かる。

図 6 に 1 素子に故障が発生した場合に，23 素子の等間隔でないフェイズドアレイアンテナとして再設定を施した放射特性を示す。#1 と #3 の半値幅内の干渉レベル  $C/I$  は 35.4dB であり，再設定を施す前と比較して，放射特性が改善さ

れていることが分かる。また，正常時の干渉レベルに近付いていることもわかる。

### 4.3 2 素子故障時の特性と補償後の特性

図 7 に 2 素子に故障が発生した場合の放射特性を示す。この場合も，故障が発生した箇所は，故障の影響が最悪になる点である。このときの，#1 と #3 の半値幅内の干渉レベル  $C/I$  は 16.7dB であり，1 素子故障時よりも干渉レベルが劣化していることがわかる。

図 8 に 2 素子に故障が発生した場合に，22 素子の等間隔でないフェイズドアレイアンテナとして再設定を施した放射特性を示す。#1 と #3 の半値幅内の干渉レベル  $C/I$  は 34.6dB であり，再設定を施す前と比較して，放射特性が改善されていることがわかる。

以上の干渉レベルの比較を表 2 に示す。

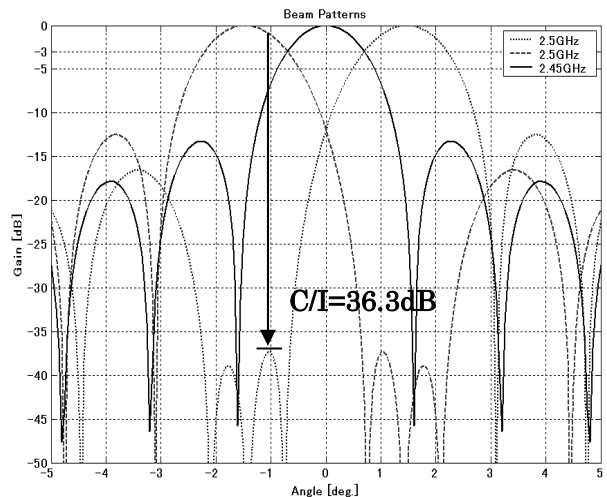


図 4 正常時の放射パターン

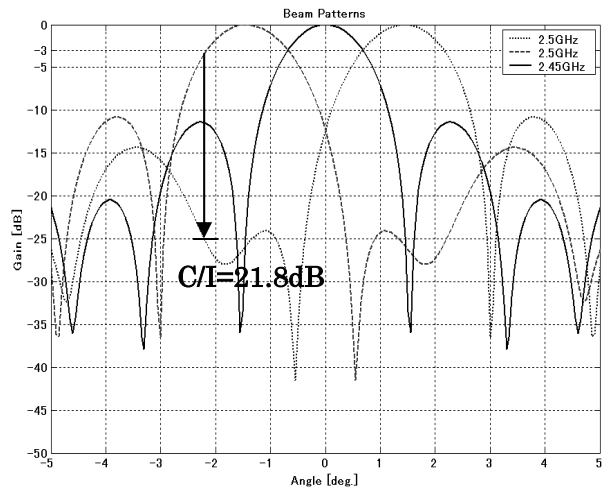


図 5 1 素子故障時の放射パターン

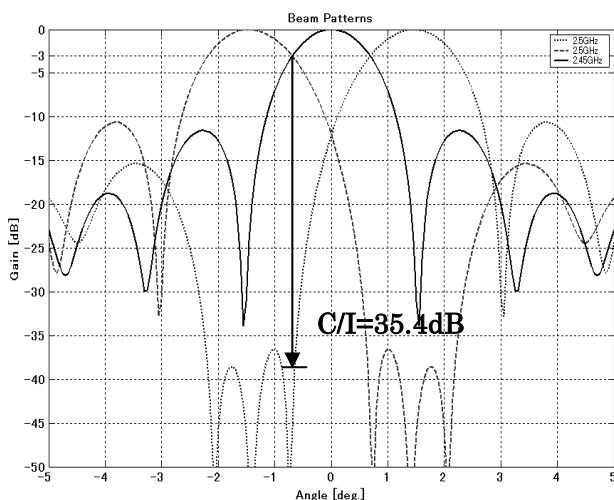


図6 1素子故障時再設定した放射パターン

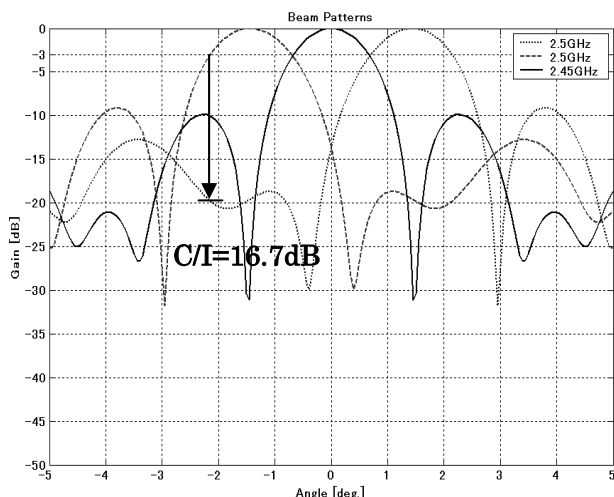


図7 2素子故障時の放射パターン

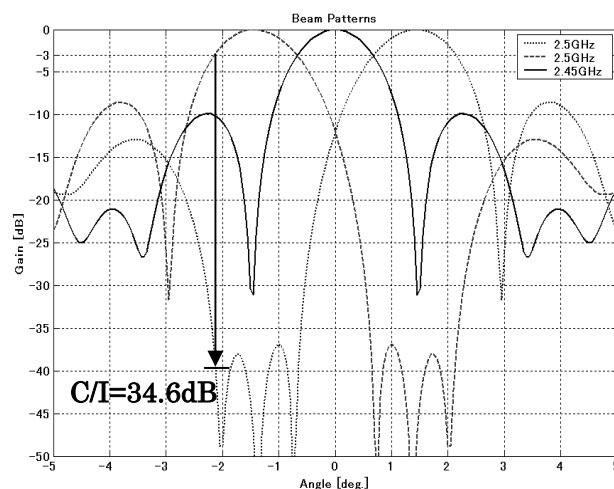


図8 2素子故障時再設定した放射パターン

表2 素子正常時, 故障時の C/I 比較

	初期 C/I[dB]	再設定 C/I[dB]
正常	36.3	N/A
1素子故障	21.8	35.4
2素子故障	16.7	34.6

## 5. 考察

今回の研究では, DBF を用いたマルチビーム衛星システムにおける RF 素子故障の影響と補償方法についての検討を行い, RF 素子故障の性能を明らかにすると共に, 故障時の性能を回復する補償アルゴリズムとその効果を明らかにした。

補償アルゴリズムについては, 故障時に故障箇所を除外した不均一配置のフェイズドアレイアンテナと考え, 放射パターンを再設定することで目標の C/I を満足することを実現した. 故障時には, フェイズドアレイアンテナの素子数が減少しているために, 出力は総素子数を  $M$ , 故障素子数を  $N$  とすると,  $(M-N)/M$  となっており, 故障素子分の出力が低下するものの, 放射パターン, 干渉レベルについては, 正常時と同等の性能を確保でき, 冗長系を備えなくとも高信頼化が実現できることを明らかにした。

## 6. むすび

本検討を通して, DBF における素子故障補償アルゴリズムの実現性を確認することが出来た。

今後の課題として, 今回のアルゴリズムを改良し, 放射パターンのサイドローブを一層低減する方法を検討して行く予定である。

## 参考文献

- [1]佐藤, 田中 “DSP を用いたマルチビーム形成法の検討”, 第36回日本大学生産工学部学術講演会, P95 2-26, 2004
- [2]佐藤, 田中, ” DSP を用いた衛星マルチビームシステムの検討 -可変ビーム可変電力配分-”, 信学総全大, B-3-20, 2005
- [3]佐藤, 田中, ” デジタルビームフォーミングにおける RF 素子故障の影響と補償方法”, 信学通信リハティ, B-3-18, 2005
- [4]菊間信良, ”アダプティブアンテナ技術”, ホーム社