

1K07 低軌道衛星バス系通信機器用 小型フェーズドアレーアンテナの提案

瀬在俊浩 (宇宙航空研究開発機構)

Proposal of small phased array antennas for LEO satellite bus communication systems
Toshihiro Sezai (JAXA)

Key Words: phased array antenna, LEO, TTC, DT

Abstract

Broad beam antennas have been used for LEO satellite bus communication systems. The beamwidth of the broad beam antennas is very wide and it makes the system structures simple. However, radio waves are radiated widely and large transmission power is required. In this paper, the use of small scaled phased array antennas instead of broad beam antennas was studied in order to reduce the transmission power. The specifications of the phased array antennas applicable to TTC and/or DT systems were made clear. It turned out that the transmission power is reduced greatly.

1 はじめに

低軌道衛星バス系通信機器には、テレメトリ・コマンド・トラッキング用のTTC(Telemetry, Tracking & Command)機器や地球観測衛星の場合には観測データを伝送するDT(Direct Transmission)機器がある。これらの機器と地上局との通信に使用されるアンテナには、ブロードビームアンテナ(以下「BB-ANT」と略す)が多い。BB-ANTのビーム幅は広い為、ビーム走査が不要という利点はあるが、電波を広範囲に放射する為、送信電力が大きくなるという欠点がある。DT用アンテナでは、アンテナ開口長を大きくしてビームを絞ったアンテナが使用される場合がある。しかし、その場合にはビームを機械的に走査する機構が必要であり、重量の増加、信頼度低下を招く。このようなBB-ANT、機械走査アンテナの欠点に対応する為、筆者はフェーズドアレーアンテナ(Phased Array Antenna: PAA)の使用を考えた。

PAAは素子と呼ばれる小さなアンテナを複数配置し、それらの電波を合成し、1つのアンテナとして機能させるものである。PAAでは素子の給電位相を制御することにより、そのビームを電氣的に走査することが出来る。PAAは複数の素子から構成され、その位相制御を行う為、システムは複雑で大規模であると一般的に考えられている。しかし、TTCやDTに使用されるアンテナは、通信ミッションや電波センサに使用されるアンテナと比較すると、アンテナへの要求は高くなく、規模の小さなPAAでも、TTC・DT用アンテナとして使用することが出来ると考えられる。そこで筆者は数値シミュレーションで小型PAAの諸元とビーム照射領域との関係を明らかにし、TTC・DT用アンテナとしての適用性、並びに送信電

力を検討した。

本論文の構成は次の通りである。2章で低軌道衛星バス系通信機器用アンテナの概要、並びにBB-ANTの欠点を説明し、その解決策として小型PAAの適用を提案する。3章では数値シミュレーションにより小型PAAのビーム照射領域を検討し、TTC・DT用アンテナに使用可能な諸元を示す。又、送信電力に関して、BB-ANTとの比較を行う。4章はまとめである。

2 低軌道衛星バス系通信機器用アンテナ

2.1 BB-ANTの概要

低軌道衛星の場合、軌道上から見る地表周縁部のオフナディア角は約60度である為(軌道高度が1,000kmの場合)、低軌道衛星に搭載されるTTC、DTで使用される地上通信用アンテナのビーム幅は、約120度に設定される。120度のビーム幅はパラボラアンテナや八木宇田アンテナのような指向性を有するアンテナのビーム幅と比較すると非常に広い。

低軌道衛星からオフナディア角が60度の範囲で電波を放射すれば、ビームを走査しなくても、地上局ではその可視範囲にある衛星の電波を受信出来る。その為、ビーム幅が120度あれば、アンテナの構成を簡略化させることが出来る。

2.2 BB-ANTの欠点とその解決策

BB-ANTのビーム幅は120度と広い為、電波は広い領域へ放射される。それ故、地上局での電波強度を一定値以上にする為には、ビームを絞ったナロービームアンテナの場合よりも送信電力を大きくしなければならない。これにより送信機消費電力も大きくなる。又、通信相手以外へも電波を放射する為、第三

者へ電波干渉を与える危険性、並びに通信相手以外からの電波も受信することによる電波干渉を受ける危険性がある。更に、通信内容の第三者への漏洩の危険がある。

BB-ANTには2.1で説明した利点はあるが、上述の欠点もある。この欠点を解決する為には、アンテナビームを絞ることが必要であり、アンテナ寸法が大きくなる。これにより、アンテナの占有領域や重量が増加する。又、ビーム走査も必要となる。

ビームを走査する方式には、機械走査と電子走査がある。機械走査はアンテナを可動部に搭載し、アンテナ全体を機械的に走査する方式である。可動部が存在する為、更なる重量の増加、信頼性の低下を招く。又、アンテナを機械的に走査する為、衛星姿勢へ影響を与え、光学観測機器のように指向精度要求の高い機器の運用に支障となる場合もある。このように機械走査にも解決すべき課題がある。

電子走査はPAAを使用してビームを走査する方式である。PAAは複数の素子から構成され、各素子、或いは幾つかの素子毎に移相器を設置し、給電位相を制御することにより、ビームを走査する。PAAは電氣的にビームを走査する為、機械走査のように衛星姿勢へ影響を与えることなく、高速に走査することが可能である。又、ビーム形成(アンテナパターン)の形を変えることを行うことも出来、干渉波除去等も可能となる。

PAAは複数の素子、複数の移相器、及び位相制御装置から構成される為、規模は大きく、複雑なシステムであると一般的に考えられている。又、移相器の電力損失や発熱が問題となる場合もある。

PAAは高速ビーム走査が可能であるが、低軌道衛星の地上局からの可視時間は最長約15分で、この間に120度のビーム走査を行えばよく、高速ビーム走査の必要はない。又、TTC・DT用アンテナとして使用する場合、ビーム形成機能は必須ではない。これらの点を考慮すると、規模が小さく、性能を絞ったPAAでも、TTC・DT用アンテナとして使用することが可能で、占有領域や重量の増加、並びにシステムの複雑さ、損失、及び発熱を抑えつつ、BB-ANTの欠点を解決出来ると期待される。

3 小型PAAの諸元・送信電力

PAAのアンテナパターンの計算式、並びにビーム走査を行う位相量に関して最初に説明にする。次に、PAAの素子配置として四角配列を扱い、PAAパラメータとビーム照射領域との関係を検討し、TTC・DT用

小型PAAの諸元を明らかにする。最後に、得られた諸元のPAAとBB-ANTの送信電力の比較を行う。

3.1 アレーファクタ・アンテナパターン[1]

図1に示す様に、1つの素子がx軸上で位相基準点から d_x 離れて位置している時、素子からz軸から θ 方向に放射される電波と位相基準点から放射される電波との間には、

$$\Delta l = d_x \sin \theta \quad (1)$$

で表される経路差が発生する。この経路差は

$$\phi_x = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin \theta = k d_x \sin \theta \quad (2)$$

で表される位相差に相当する。ここで λ は電波の波長、 k は波数である。よって、図1の位置の素子から θ 方向に放射される平面波は

$$e(\theta) = \exp(j\phi_x) = \exp(jk d_x \sin \theta) \quad (3)$$

で表される。ここで j は虚数単位である。この関係を図2に示すxy平面上の任意の位置(d_x, d_y)に配置されている素子に適用すると、極座標で(θ, ϕ)方向に放射される平面波は、

$$e(\theta, \phi) = \exp(jk d_x \sin \theta \cos \phi + jk d_y \sin \theta \sin \phi) \quad (4)$$

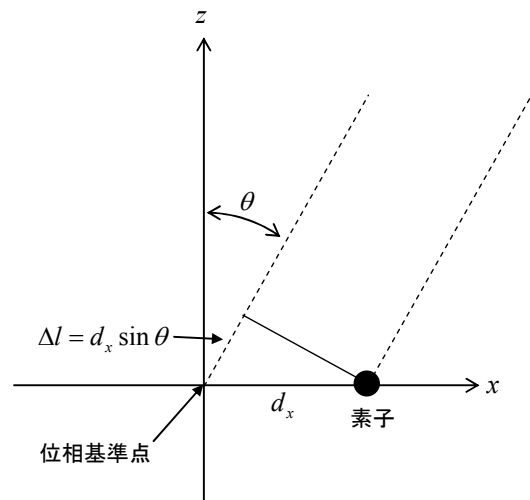


図1 素子から放射される電波の経路差

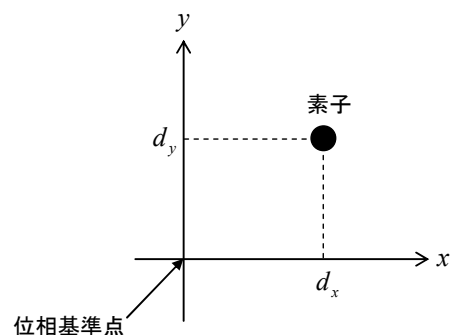


図2 xy平面上の素子の配置

で表される。PAAのように複数の素子が存在する場合、PAA全体から放射される平面波は各素子から放射される平面波の和で表される。通常、位相基準点はPAAの中心点に設定される。このようにして求めたものをアレーファクタと呼ぶ。PAAが N 個の素子から構成されている場合、アレーファクタは

$$F(\theta, \phi) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp\{jkd_x(n) \sin \theta \cos \phi + jkd_y(n) \sin \theta \sin \phi\} \quad (5)$$

で表される。ここで、 $d_x(n)$, $d_y(n)$ は n 番目の素子の位置を示す x, y 座標の値である。(5)式よりアレーファクタは素子の位置から計算出来ることが分かる。

素子がすべて同じアンテナである場合、PAAのアンテナパターンは、素子のアンテナ電界パターン $a(\theta, \phi)$ とアレーファクタ $F(\theta, \phi)$ の積で与えられる。

$$E(\theta, \phi) = a(\theta, \phi) \cdot F(\theta, \phi) \quad (6)$$

これを指向性乗積原理という。(6)式は電界表示のアンテナパターンであるので、これを二乗した次式が通常使用される電力表示のアンテナパターンとなる。

$$G(\theta, \phi) = \{E(\theta, \phi)\}^2 = \{a(\theta, \phi) \cdot F(\theta, \phi)\}^2 \quad (7)$$

PAAのビームの走査は各素子の位相を制御することで実施する。ビームを (θ_o, ϕ_o) 方向に走査する場合、 n 番目の素子に次式で示される $\phi_{xo}(n) + \phi_{yo}(n)$ の位相を与えればよい。

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \exp\{jkd_x(n) (\sin \theta \cos \phi - \sin \theta_o \cos \phi_o) + jkd_y(n) (\sin \theta \sin \phi - \sin \theta_o \sin \phi_o)\} \\ = \sum_{n=1}^N \exp\{jkd_x(n) \sin \theta \cos \phi - j\phi_{xo}(n) + jkd_y(n) \sin \theta \sin \phi - j\phi_{yo}(n)\} \quad (8)$$

3.2 小型PAAのビーム照射領域

図3に示す様に、 x, y 方向に等間隔に配列された四角

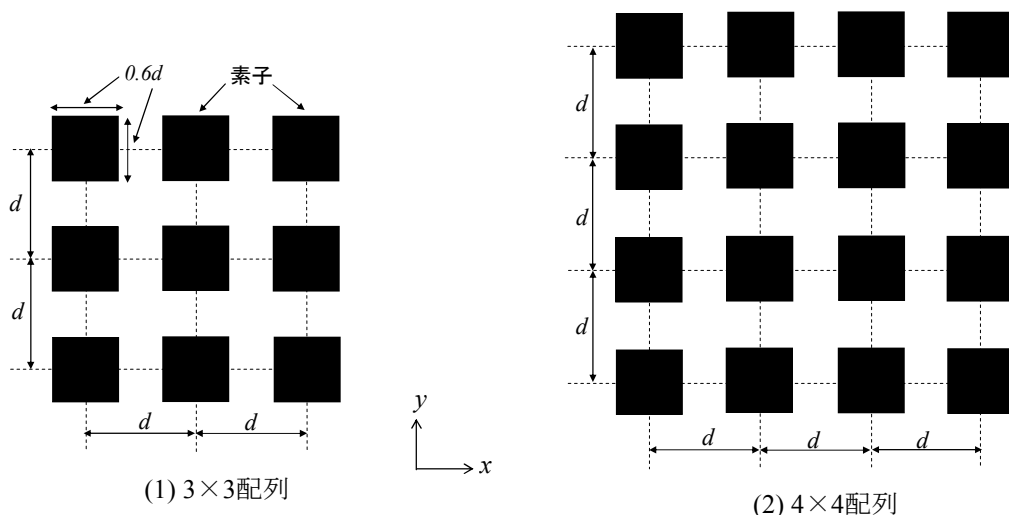


図3 小型PAA配列

(格子)配列PAAのパラメータとビーム照射領域との関係を検討し、好ましいパラメータを選定する。

PAAのパラメータには、素子数(配列)、素子間隔 d 、移相器bit数がある。本論文は小型PAAを扱うのが目的である為、素子数(配列)は、 $9(=3 \times 3)$ と $16(=4 \times 4)$ とした。素子寸法に関しては、ビーム照射領域への影響は小さい為、パラメータとはせず、一辺の長さを $0.6d$ に固定した。又、開口面分布は一樣とした。尚、一辺の寸法が a_x, a_y の一樣分布矩形アンテナのパターンは以下で表される[1]。

$$a(\theta, \phi) = \frac{\sin\left(k \frac{a_x}{2} \sin \theta \cos \phi\right)}{k \frac{a_x}{2} \sin \theta \cos \phi} \cdot \frac{\sin\left(k \frac{a_y}{2} \sin \theta \sin \phi\right)}{k \frac{a_y}{2} \sin \theta \sin \phi} \quad (9)$$

(1) 移相器bit数の検討

PAAのパラメータの内、最初に移相器bit数の検討を行った。 3×3 配列、 $d=0.5\lambda$ の時、bit数=4,5,6と変化させながら、ビーム照射領域を検討した。その結果を図4に示す。これはビームを表1に示した10方向に指向させた場合の3dBビーム幅領域を半球面上に重ねて表示したものである。ここでは半球面の内の1/4の領域にビームを指向させた場合を示している。図の中心は z 軸方向、径方向は θ 方向である。よって、円周は $\theta=90$ 度である。赤で示した円周は $\theta=61$ 度を示している。TTC・DT用アンテナのビームで照射する領域を $\theta \leq 60$ 度とし、図の赤の円周内でビーム照射領域に抜けが発生しないことをPAAパラメータ選定条件の1つとした。図中の値はビームを走査した場合に、その位置を照射するビームの数を示している。よって、赤の円周内の値が1以上であれば、ビーム照射抜けは発生しない。

図4より、bit数が4から5へ変化すると、ビーム照射領域は大きく変化するが、5から6へ変化しても、殆ど変化しないことが判る。bit数が大きい程、位相制御精度が高くなるが、ここで扱っている小型PAAでは、bit数は5で十分であることが判る。

(2)素子間隔の検討

3×3配列、bit数=5の時、 $d=0.4\lambda, 0.5\lambda, 0.6\lambda$ と変化させながら、ビーム照射領域を検討した。その結果を図5に示す。 $d=0.5\lambda, 0.6\lambda$ の時のビーム指向角度は表1と同じで、 $d=0.4\lambda$ の時のビーム指向角度は表2である。

表1 ビーム指向角度(3×3配列、 $d=0.5\lambda$)

ビームNo	θ_o [deg]	ϕ_o [deg]
1	0	0
2	25	0
3	43	0
4	43	20
5	43	36
6	25	45
7	43	54
8	43	70
9	25	90
10	43	90

表2 ビーム指向角度(3×3配列、 $d=0.4\lambda$)

ビームNo	θ_o [deg]	ϕ_o [deg]
1	0	0
2	40	0
3	40	30
4	40	60
5	40	90

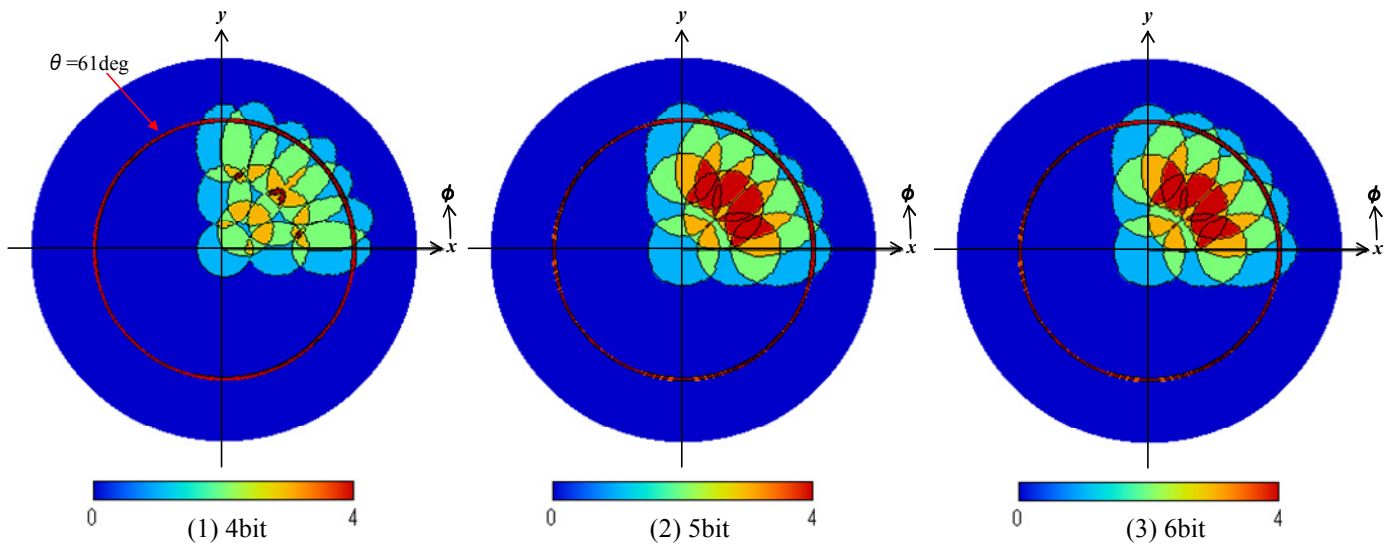


図4 移相器bit数とビーム照射領域(1/4領域)との関係(3×3配列)

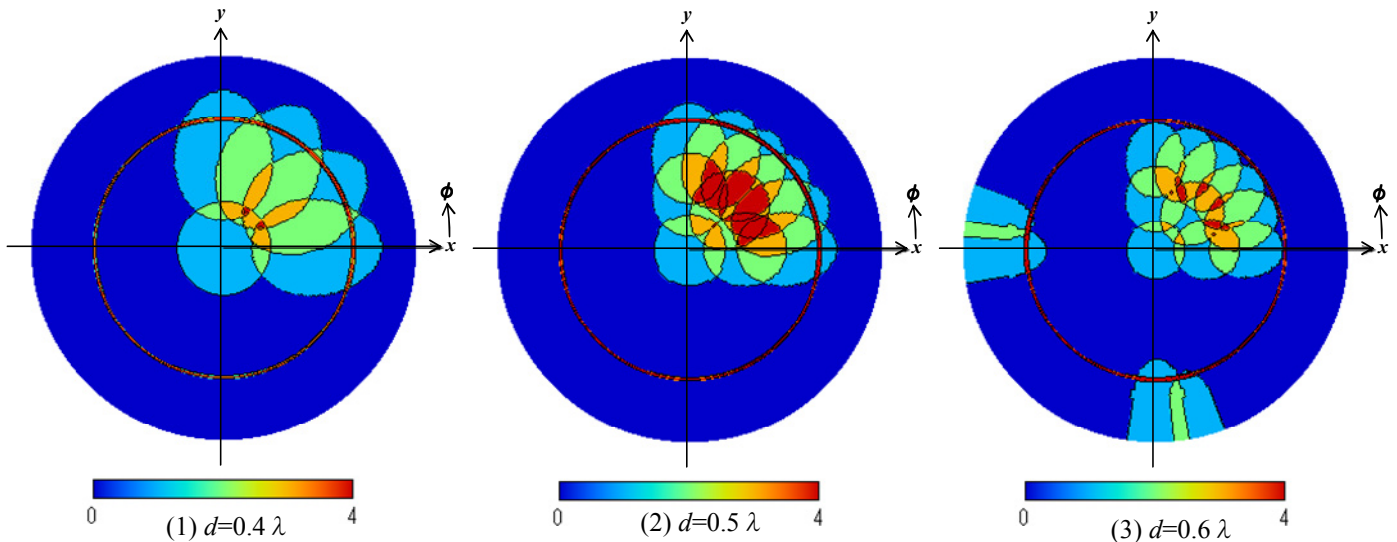


図5 素子間隔とビーム照射領域(1/4領域)との関係(3×3配列)

$d=0.4\lambda$ の場合は、PAA全体の寸法が $d=0.5\lambda$ の場合よりも小さい為、ビームは広がり、表2の5方向にビームを指向させるだけで、照射領域の抜けを防止することが可能である。 $d=0.6\lambda$ の場合は、半球面の1/4の領域にビームを指向させているにも関わらず、別の領域も照射することが判る。 $-x$ 軸方向が照射されるのはビームが表1のビームNo.3,4の場合で、 $-y$ 軸方向が照射されるのはビームが同じくビームNo.8,10の場合である。指向している方向から離れた方向に発生するビームのことをグレーティングロブと言う。素子間隔が 0.5λ を超え、ビーム走査角度が大きい場合には、グレーティングロブが発生する[1]。ビームが指向方向以外に放射されることは好ましくない為、 $d=0.6\lambda$ は採用出来ない。よって、素子間隔として好ましいのは $0.4\lambda, 0.5\lambda$ である。

(3)提案PAAの諸元とビーム照射領域

3×3 配列のPAAでは、移相器bit数=5、 $d=0.4\lambda, 0.5\lambda$ の場合は、TTC・DT用アンテナとして使用出来る見込みとなった。このPAAの半球面ビーム照射領域を図6に示す。図より、好ましい照射領域が得られることが判る。

4×4 配列に対しても、 3×3 配列と同様の検討を実施した。その結果、移相器bit数=5、 $d=0.4\lambda, 0.5\lambda$ の場合は、TTC・DT用アンテナとして使用出来る見込みとなった。 $d=0.4\lambda, 0.5\lambda$ で、ビーム指向角度をそれぞれ表3,4とした場合のPAAの半球面ビーム照射領域を図7に示す。図より、好ましい照射領域が得られることが判る。

TTC・DT用PAAとして提案する諸元を表5に示す。

表3 ビーム指向角度(4×4 配列、 $d=0.4\lambda$)

ビームNo	θ_o [deg]	ϕ_o [deg]
1	0	0
2	25	0
3	45	0
4	45	30
5	25	45
6	45	60
7	25	90
8	45	90

表4 ビーム指向角度(4×4 配列、 $d=0.5\lambda$)

ビームNo	θ_o [deg]	ϕ_o [deg]
1	0	0
2	25	0
3	50	0
4	50	15
5	25	30
6	50	30
7	50	45
8	25	60
9	50	60
10	50	75
11	25	90
12	50	90

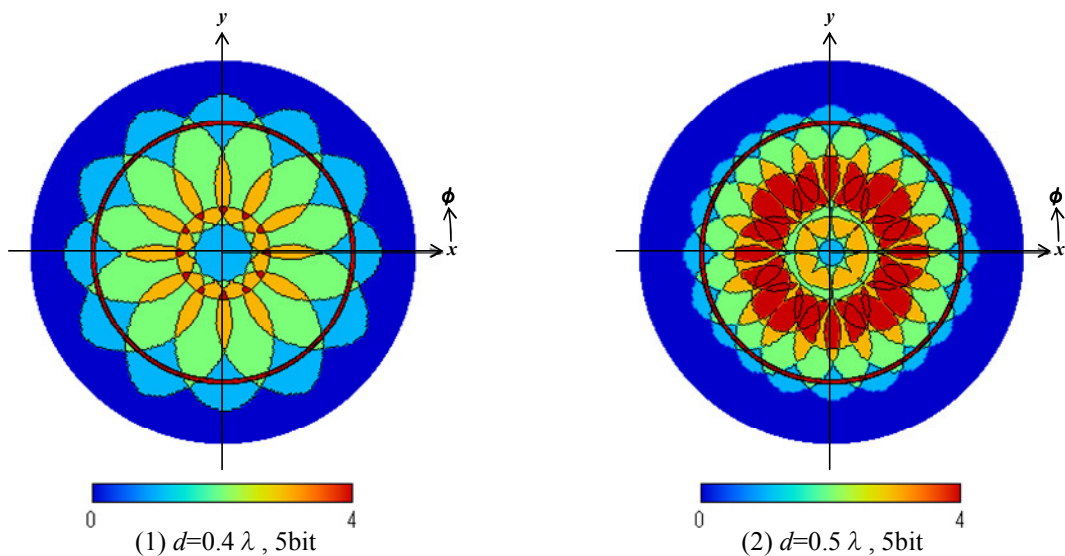


図6 提案PAAのビーム照射領域(3×3 配列)

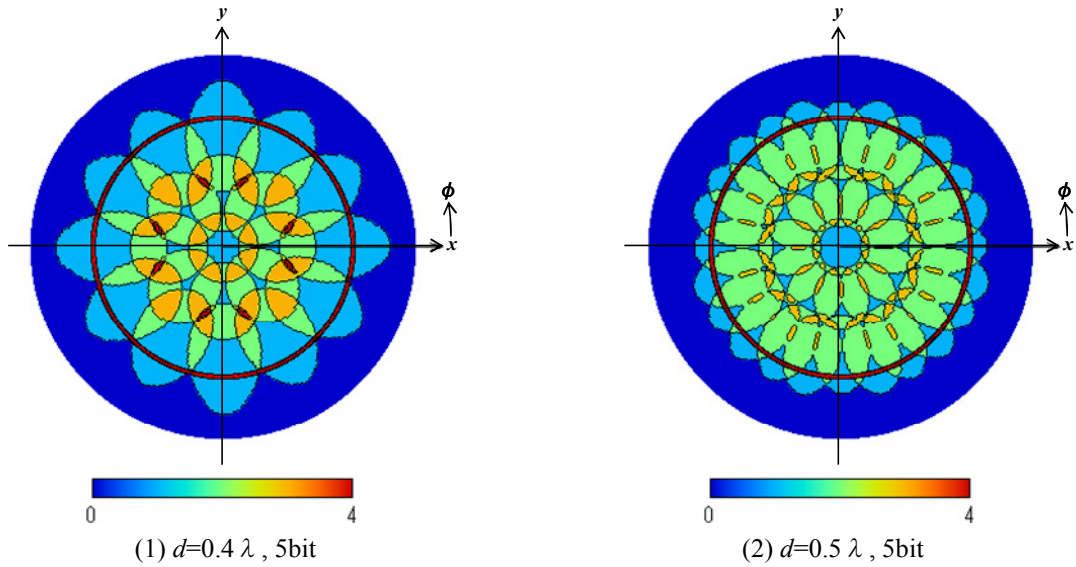


図7 提案PAAのビーム照射領域(4×4配列)

表5 提案PAAの諸元・送信電力比

素子数 (配列)	9 (3×3)	9 (3×3)	16 (4×4)	16 (4×4)
移相器bit数	5	5	5	5
素子間隔	0.4λ	0.5λ	0.4λ	0.5λ
ビーム走査数	13	29	21	37
平均ビーム幅[Sr]	0.816	0.459	0.492	0.275
送信電力比[%]	25.9	14.6	15.6	8.7

3.3 送信電力

3.2で得られた諸元のPAAにより、BB-ANTと比較して、送信電力をどの程度低減出来るかの検討を行った。BB-ANTのビーム幅は120度であるので、ビームの立体角は π [Sr]である。BB-ANTの送信電力を P_{BB} [W]とし、ビーム幅内に均等に電波が放射されるとすると、送信電力密度(=単位立体角当りに放射される電力)は P_{BB}/π [W/Sr]となる。PAAはBB-ANTのビーム幅内をビームを走査しながら電波を放射する。ビーム幅はビーム指向方向により異なるので、それらを平均し、立体角 Ω [Sr]を算出した。その結果を表5に示す。PAAの送信電力を P_{PAA} [W]とすると、送信電力密度は P_{PAA}/Ω [W/Sr]となる。BB-ANTとPAAの送信電力密度を等しくする P_{PAA} を求めると、

$$P_{PAA} = \frac{\Omega}{\pi} P_{BB} \quad (10)$$

となる。これよりBB-ANTの送信電力に対するPAAの送信電力の比を求めると、表5の様になる。表より、提案PAAを使用することにより、送信電力をBB-ANTの8.7~25.9%に低減出来ることが判る。

4 まとめ

本論文ではTTC・DT用アンテナとして使用可能な小型PAAの諸元を検討した。諸元をパラメータとして変化させ、ビーム照射領域を数値シミュレーションにより検討した。その結果、素子配列が3×3、並びに4×4の小型PAAの諸元を示すことが出来た。又、この諸元のPAAの送信電力を検討した結果、BB-ANTの8.7~25.9%で済むことが判った。

小型PAAは素子数が少ない為、ビーム走査時には通信を停止することが必要と考えられる。しかし、1周回中のビーム走査は4回程度で、計画的に実施出来る為、運用上の支障とはならないと考えられる。

今後は、現実的なPAAの回路構成とその具体的な性能を考慮した検討を行い、TTC・DT用小型PAAシステムの諸元・性能を明確化して行きたい。

参考文献

- [1]電子通信学会編：アンテナ工学ハンドブック、オーム社、1980.10