

マイクロ波送電用フェーズドアレーの現状と課題

篠原 真毅[†] 久田 安正[‡] JAXA SSPS WG4 チーム

† 京大生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄
‡ 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
E-mail: † shino@rish.kyoto-u.ac.jp, ‡ hisada.yasumasa@jaxa.jp

あらまし マイクロ波エネルギー伝送技術は宇宙太陽発電所 SSPS のキーテクノロジーであり、既存通信衛星よりも高い効率と高い精度のフェーズドアレーが求められている。これまでに幾多のマイクロ波エネルギー伝送実験が世界中で行われてきたが、SSPS が求める技術レベルにはまだ達していない。SSPS 実現のためには マイクロ波エネルギー伝送技術の現状について、何が成し遂げられ、何が研究課題なのかを把握しなければならない。JAXA は SSPS 検討委員会を 1998 年より組織し、現在は親委員会と 12 のワーキンググループが検討を行っている。我々 WG4 ではマイクロ波エネルギー伝送に関する調査研究を行っており、2005 年度はフェーズドアレーに関する現状調査とロードマップ作成を行った。その結果について報告する。

キーワード 宇宙太陽発電所 SSPS, マイクロ波エネルギー伝送, フェーズドアレー

Status and Roadmap of Phased Array for Microwave Power Transmission

Naoki SHINOHORA[†] Yasumasa HISADA[‡] and JAXA SSPS WG4 Team

† Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan
‡ Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8505, Japan
E-mail: † shino@rish.kyoto-u.ac.jp, ‡ hisada.yasumasa@jaxa.jp

Abstract A microwave power transmission (MPT) System which is a key component for the Space Solar Power System (SSPS) will be required for higher DC-RF conversion efficiency with higher accurate phased array than satellite systems. There were some previous MPT experiments, but not enough to reach the SSPS technologies. To achieve finale goal of the SSPS, we have to make it clear the present problems, such as, which technologies have already been proven and which technologies should developed, and so on. In Japan, a committee for the SSPS has been organized by JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) from 1998. The committee consists of one main steering committee and 12 working groups (WGs) studying elemental issues for the SSPS. The WG-4, which we belong to, focuses on the MPT research and technologies to manage and revise technology development roadmap. In FY2005, the WG-4 focused at research of present status of a phased array and making a roadmap to SSPS.

Keyword Space Solar Power System (SSPS), Microwave Power Transmission (MPT), Phased Array

1. はじめに

宇宙太陽発電所 SSPS(Space Solar Power System)は宇宙空間で発電した電力を地上に無線電力伝送する新しい将来の発電所であり、安定供給可能で CO₂ 排出がほとんどない数少ない発電方式の一つとしてこれまで全世界で検討が行われてきた。無線電力伝送はマイクロ波を用いた方式とレーザーを用いた方式が検討されている。宇宙航空研究開発機構 JAXA では SSPS 検討委員会を 1998 年より組織し、現在はマイクロ波エネルギー伝送を用いた SSPS とレーザーエネルギー伝送を用いた SSPS を検討するそれぞれの親委員会と 12 のワーキンググループが SSPS の検討を行っている。

我々 WG4 ではマイクロ波エネルギー伝送に関する調査研究を行っている。宇宙太陽発電所 SSPS

ではフェーズドアレーアンテナ及びレトロディレクティブ方式目標追尾システムが必須であることを前提として様々なシステム検討・評価が行われている。しかし、現状民生用フェーズドアレーアンテナはそんなに多く存在していない。レトロディレクティブも同様である。本報告では WG 活動で得られたフェーズドアレーアンテナ及びレトロディレクティブの現状の調査結果と問題点の把握、そして今後のロードマップを示す。

2. フェーズドアレーアンテナの現状と課題

JAXA で検討している商用 SSPS の送電アンテナ直径は、周波数 5.8GHz、10dB ガウシアンテーパを付けて直径 1.93km であり、受電レクテナは直径 2.45km、ビーム収集効率は 96.2%である。これは受電レクテナ中心での電力密度が 100mW/cm² 以下、受電レクテナ端での電力密度が 1mW/cm² 以下という条件を満たすよ

うに設計された。周波数 5.8GHz=波長 約 5.2cm でフェーズドアレーとする場合、素子間隔を仮に 0.75 とすると 20 億素子以上のアンテナ素子が必要となる。

これに対し、現在実用化もしくは実証されているフェーズドアレーアンテナは以下ようになる。

(1) 通信衛星用(日本) [1]

- ・ DSCS III (1982) : Xバンド, 送信 19 素子/受信 61 素子, ホーン, RF 出力 40W, 10W

- ・ TDRS (1983) : Sバンド, 送信 19 素子/受信 61 素子, ヘリカル, RF 出力 26W
- ・ ETS-VI(きく 6 号)(1994) (Sバンド, 送信 16 素子/受信 19 素子, MSA, RF 出力 1.26W (図 1))
- ・ IRIDIUM (1997) : Lバンド, 100 × 3 素子, MSA
- ・ ETS-VIII (2006) : Sバンド, 31 素子, MSA, RF 出力 20/10W (図 1)
- ・ WINDS (2007 予定) : 送信 Kuバンド, 受信

ETS-VI(きく6号) 1994



ETS-VIII 2006



WINDS 2007 予定

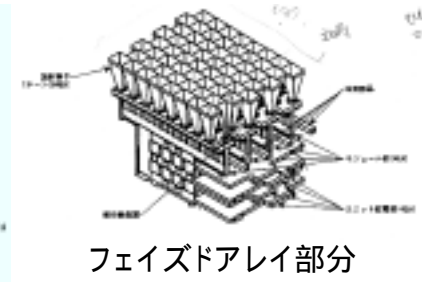
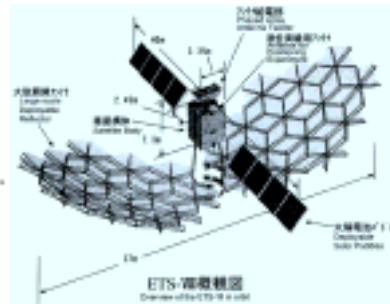
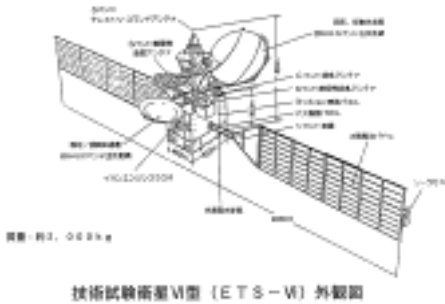


図 1 フェーズドアレーアンテナを搭載した通信衛星の例

表 1 三菱電機社製通信用フェーズドアレーの例 (ヘリコプター搭載用のみ[3])

	航空機搭載用 S帯衛星移動電話	ヘリコプター搭載用 衛星通信装置(送信系)	ヘリコプター搭載用 衛星通信装置(受信系)	NeLS搭載用X帯APAA
アンテナ形式	フェーズドアレーアンテナ	アクティブフェーズドアレーアンテナ	アクティブフェーズドアレーアンテナ	アクティブフェーズドアレーアンテナ
素子数	32 (送信/受信共)	536	624	64
周波数範囲	送信	2,670 ~ 2,690 MHz	14.00 ~ 14.50GHz	---
	受信	2,515 ~ 2,535 MHz	---	12.25 ~ 12.75GHz
偏波	右旋円偏波 (送信/受信共)	直線偏波 (偏波面追尾機能付)	直線偏波 (偏波面追尾機能付)	右旋円偏波
カバーレジア	方位角(AZ)	360° 全周	360° 全周	360° 全周
	仰角(EL)	30 ~ 70° (EL=90°まで走査可能)	30 ~ 90°	30 ~ 90°
アンテナ利得	7.1 dBi (送信, 入力端子基準)	---	---	18.5dBi
送信EIRP	13 dBW/ch (仕様: 11.5 dBW/ch)	35.0dBW (仕様: 34.0dBW以上)	---	---
受信G/T	-15.9 dB/K (仕様: -16.5 dB/K)	---	0.5dB/K@12.25GHz (仕様: 0dB/K@12.25GHz)	---
交差偏波識別度	---	17.0dBms (目標値)	17.0dBms (目標値)	---
外形寸法	L1300 × W450 × H120 mm (ド+ム含)	約600mm × 約500mm × 約200mm (送受別)	約600mm × 約500mm × 約200mm (送受別)	約500mm × 230mm × 8.6mm (アンテナ部)
重量	---	約35kg	約35kg	約0.6kg (アンテナ部)
時期	2001年	2003年	2003年	2000年
メーカー	三菱電機	三菱電機	三菱電機	三菱電機



Ka バンド, 64-128 素子, ホーン (図 1) [2]

(2) 観測衛星・レーダ用 (日本) [1]

- ・ TRMM (1997) : 気象観測用, Ku バンド, 128 素子, 154 スロット導波管サブアレー, アンテナ重量 460kg, 2.1 × 2.1m, RF 出力 10W, 総合 600W
- ・ ALOS(だいち) (2006.1) : 地球観測用, L バンド, 288 × 4 素子, MSA, アンテナ重量 475kg, 9 × 3.5m, RF 出力 2.15kW

(3) 地上用(日本) (表 1)

(4) 軍用(表 2, 図 2)[4]

このようにフェーズドアレーは現在軍用には素子数も数千素子レベルまで到達しており、かなり発達していると言えるが、民生用には 1990 年代から数十素子レベルがスタートし、2000 年代に入り数百素子レベルに到達しかけているという現状である。SSPS の 20 億素子以上のフェーズドアレーを実現するためには今後相当の研究を進める必要がある。

素子数が増加してくると発生する新たな問題に「表面波ブラインドネス」という現象がある。これは素子

表 2 軍用フェーズドアレーの例[4]

TABLE I EXAMPLES OF RADAR PHASED ARRAYS HAVING LARGE PRODUCTIONS					
System	Frequency Band	Number Manufactured	Number of Phase Shifters/Array	Total Number of Elements Manufactured	Manufacturer
AN/TPN-25	X	18	824	14,850	Raytheon
AN/GPN-22	X	60	443	26,580	Raytheon
COBRA DANE	L	1	15,960 (34,760 Eln.)	15,960 (34,760 Eln.)	Raytheon
PAVE PAWS	UHF	4	1,792/face (2,677 Eln.)	14,336 (21,416 Eln.)	Raytheon
BMEWS UPGRADE	UHF	2	2,500/face (3,584 Eln./face)	12,900 (17,920 Eln.)	Raytheon
COBRA JUDY	-	1	12,288	12,288	Raytheon
PATRIOT	C	173	5,000	1,730,000	Raytheon
AEGIS (SPY-1)	S	234	4,000	936,000	Lockheed-Martin
B-1	X	100	1,526	152,600	Northrup Grumman
AN/TPQ-37	S	102	350	35,700	Raytheon
AN/TPQ-36	X	243			Raytheon
FLAP LID	X	> 100 (?)	10,000	> 2 million (?)	Russia

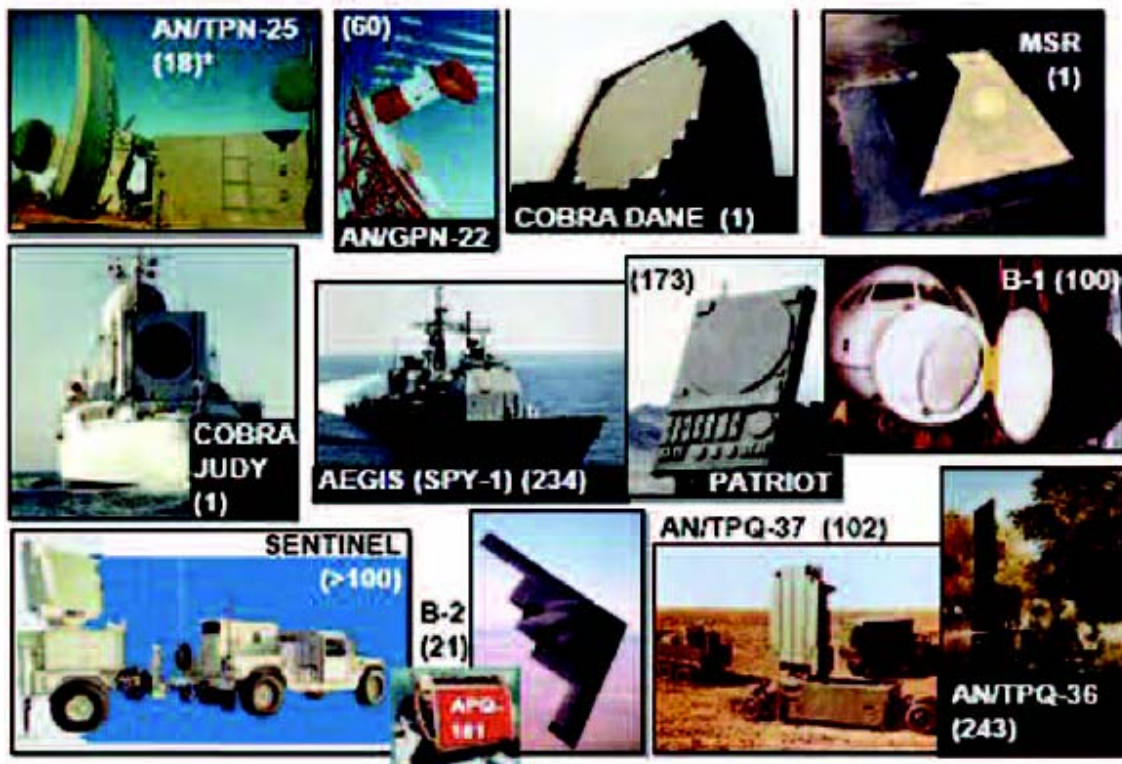


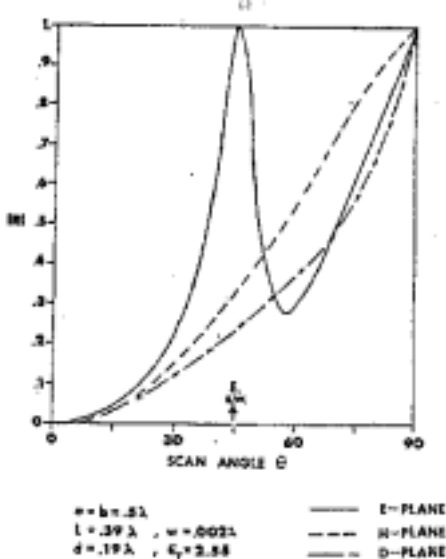
図 2 パッシブフェーズドアレーの例(アメリカ) [4]

数の多いアレーの場合、ある角度にマイクロ波ビームを走査すると突然アレーアンテナ表面に表面波が発生し、エネルギーが走査方向ではなく表面上を流れていってしまうという現象である(図 3(a))[5]。フェーズドアレーではビーム走査角を大きくするとアンテナの相互間結合によっていずれにしてもエネルギーが放射されにくくなるという現象があるが(図 3(b))[6]、表面波ブラインドネスはアンテナ相互間結合とは異なった物理でエネルギーが放射されなくなるという現象である。この表面波ブラインドネスは無限サブアレーでも発生することが言われており[7]、有限アレーの場合の発生条件等、今後の研究が期待される。

3. レトロディレクティブ方式方向推定の現状と課題

レトロディレクティブ方式とは、Van Atta Array[8]を基本とする、パイロット信号の方向へビームを向けるためのフェーズドアレー方式である。レトロディレクティブ方式では受信されたパイロット信号の位相共役を取ることでビームをパイロット信号方向へと

(a) 表面波ブラインドネス発生時[5]



(b) 表面波ブラインドネス非発生時[6]

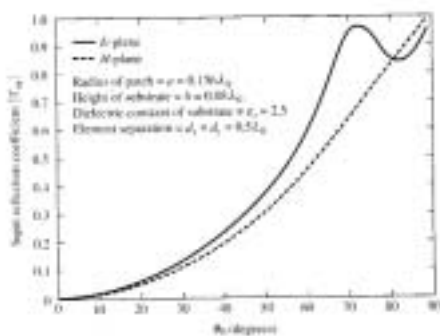


図 3 ビーム走査角と反射率

送信する。レトロディレクティブではアンテナの位置情報を受信パイロット信号の位相情報として得られる為、アンテナの形状にかかわらずパイロット信号方向へ電波を向けることができ、形状がリジットにはできない超巨大アンテナシステムでは必須の技術とされる。

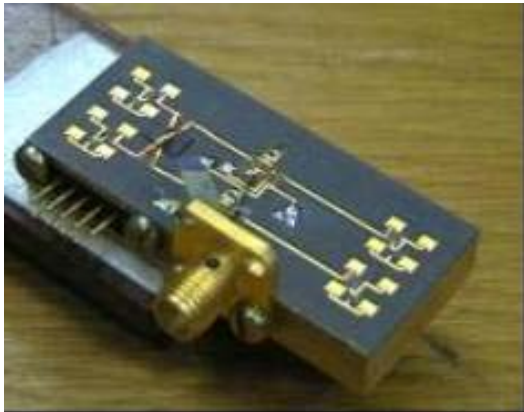
ヘテロダインミキサーを用いて位相共役を生成するレトロディレクティブ方式は 1960 年代には考案されている[9]。ヘテロダインミキサーを用いたレトロディレクティブ方式は局部発信器の周波数とパイロット信号周波数をミキシングすることにより位相共役を作り、同時に周波数変換を行ってマイクロ波ビームを目標へ向ける方式である。通信用途にレトロディレクティブ方式が実際に開発され始めるのは半導体技術が発達する 1980 年代以降である。

様々な研究機関で通信用途のレトロディレクティブ方式が開発されている[10]-[20](図 4)が、有名なのはアメリカの UCLA とイギリスの Queen's University である。これらの通信用途のレトロディレクティブ方式は局部発信器として $2 \omega_0$ を備え、到来パイロット信号 ω_0 とのミキシングで位相共役を生成する方式であり、あまりバリエーションはない。アレーは 1 次元アレーがほとんどである。このタイプはパイロット信号の周波数もしくは局部発信器の周波数が不安定になると正しい位相共役を作り出すことができず、ビーム方向に誤差を生じる。そこで UCLA ではパイロット信号自身を周波数通倍して局部発信器の代わりとし、それぞれの周波数安定度に寄らずビーム方向を制御するレトロディレクティブ方式も開発している[20]。

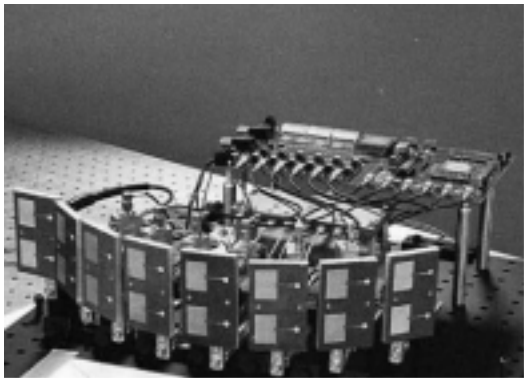
送受分離の問題と方向精度を通信よりも要求される SSPS マイクロ波送電システムを目指し開発されたレトロディレクティブ方式の位相共役回路のバリエーションは多い。京都大学・神戸大学・三菱電機で開発したパイロット信号として $\omega_0 + \Delta$ 、 $\omega_0 + 2\Delta$ の非対称の 2 周波を用いるレトロディレクティブ[21][22][23]、京都大学・日産自動車宇宙開発事業部で開発した送電用マイクロ波の $1/3$ の周波数をパイロット信号として用いたレトロディレクティブマイクロ波送電器[23][24]、USEF・三菱電機で開発した PLL 回路を用いたレトロディレクティブ[25][26]、通信と同じようなミキサー利用のレトロディレクティブも東海大学[27]や神戸大学、Texas A&M 大学[28]等で開発されている。神戸大学では東京大学、ESA と共同で 2006 年 1 月にレトロディレクティブ方式に関するロケット実験も成功させている[29]。

これら位相共役回路を用いたレトロディレクティブ方式に対し、位相検知回路と移相器を組み合わせた方向推定及びビーム制御方式をソフトウェア・レトロディレクティブ方式と呼ぶ。レトロディレクティブ方

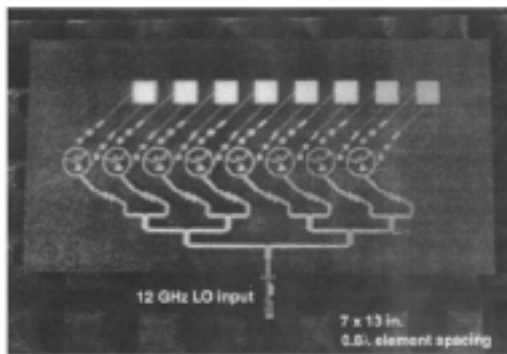
(a) Queen's University (62-66GHz)[16]



(b) Jet Propulsion Laboratory and University of Michigan (2001) (5.9GHz)[19]



(c) UCLA (1995) (6GHz)



(d) UCLA (2000) (6GHz) [11]

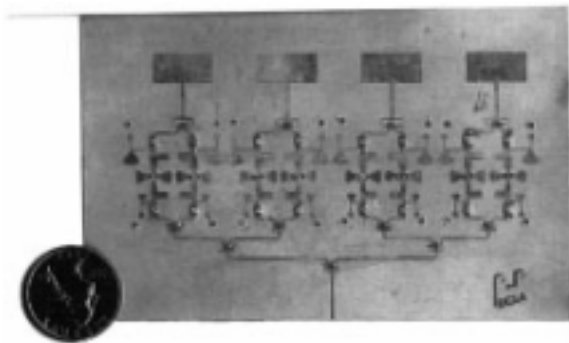


図 4 様々な通信用レトロディレクティブ方式(位相共役回路)

式では送電目標 1 箇所へのみのマイクロ波送電しかできないが、ソフトウェア・レトロディレクティブ方式では複数の目標に対するマイクロ波送電も可能であるという特徴を持ち、ビームフォーミングの際に低サイドロープ化を含めて自由なビーム形成が可能であるという特徴がある。マイクロ波送電や SSPS での長距離の方向推定にはパイロット信号が用いられ、受信アンテナで受信したパイロット信号の位相情報を計測して目標の方向もアンテナ面の角度も同時に計測する。

2つのアンテナで受信する信号の位相差検出に関する理論式は以下のように与えられている[31]。

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{\pi D \cos\phi \sqrt{SN}} \quad (rad) \quad (1)$$

ここで $\Delta\phi$: 検出角度誤差, λ :波長, D :検出アンテナ間隔, ϕ :到来方向, SN :信号雑音比である。 $D=0.5\lambda$ の場合の計算結果が図 5 である。目標位置 0 度方向、 $SN=20dB$ という誤差が図中でもっとも小さい場合でも 4° 程度の誤差が存在する。 1° のずれは、例えば 1km 先であれば約 17m に相当し、20km 先であり、約 350m に相当する。このような理論的な検出誤差に加え、ハードとしての検出誤差も加わる。レトロディレクティブ方式を用いた目標位置検出の精度向上のためには S/N 比の向上と素子間隔 D を広げた際のアンテナ位置計測精度の向上が必要となる。素子間隔 D を広げ、目標位置検出を高精度で行うためには送電アンテナの形状、各アンテナの位置情報を正確に計測する必要があり、そのトレードオフが必要となる。

この S/N 比が悪い場合にも高精度で目標位置推定を行うための様々な数値計算アルゴリズムが存在する。有名なアルゴリズムだけでも MUSIC 法や ESPRIT 法等様々なものが存在する。これらのアルゴリズムの特長を生かし、SSPS での目標位置推定手法として MUSIC 法の応用研究[32]や RBF ニューラルネットワークを用

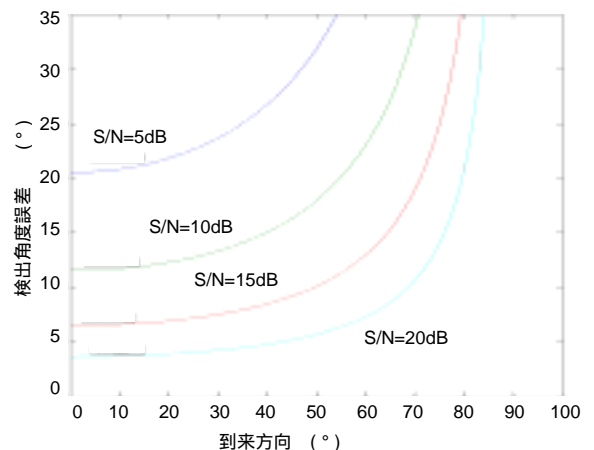


図 5 目標位置と S/N 比と検出角度誤差の関係(検出アンテナ間隔 0.5λ)

いた方向推定法の応用研究[33]が存在する。文献[33]では素子故障が起こった場合でも SPS2000 規模の SSPS であれば高い精度で方向推定が可能であることが示されている。しかし、これらのアルゴリズムの適用は基本的に S/N 比を下げる効果と等しく、劇的に精度を上げるものではない。

4. マイクロ波エネルギー伝送システムの現状

マイクロ波エネルギー伝送はこれまで「技術的な壁はなく、すぐにも実現可能」とされてきた。実際、1960 年代以降、様々な実証実験が存在する。しかし、SSPS への応用を考えた場合、まだ実現は難しいと言わざるを得ない。最大の問題は SSPS で必須のフェーズドアレーである。フェーズドアレーは 2 節でも述べたが、1990 年代に入りようやく民生技術として実用化が始まった。SSPS 用フェーズドアレーには、売電するための経済的理由から高効率(>80%)であると同時に高精度(<0.001°)が求められるが、高精度はともかく、高効率のフェーズドアレーがまだまだ研究途上であり、最大の課題である。今後は高効率フェーズドアレーの開発が必須である。

高効率フェーズドアレーを開発する方向性は 3 つ考えられる。

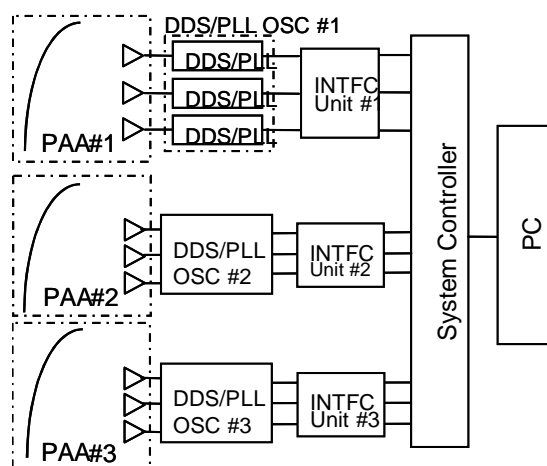
- ・ 高効率半導体増幅器の開発(JAXA SSPS パラメータでは 1 素子あたりの出力は<1W)
 - ・ 現状でも高効率な高出力電子管(マグネトロンや TWT)を利用し、グレーティングロブ抑制のためにアンテナ素子手前に挿入しなければならない低損失移相器の開発
 - ・ 半導体並の低出力(<1W)高効率電子管の開発
- である。さらに別の考え方として
- ・ 高出力電子管を用いてサブアレーを構築し、グレーティングロブが発生しないようにビーム制御角を非常に小さくする(ex. <0.1°)。半導体を用いた場合でも出力が電子管に近くなれば同じ問題を共有する

ことも高効率フェーズドアレーへつながる道である。

高効率フェーズドアレーを開発する際、更に問題となるのが経済性である。フェーズドアレーは複数のアンテナ-回路要素を用いるため、同じものを大量に製作する必要がある。特に SSPS では 20 億素子以上が必要となるため、1 素子が最高の性能を実現できただけでは駄目で、それをラインに乗せ、量産をかけてその性能を維持する必要がある。現在の半導体増幅器を用いたフェーズドアレーは、まだ素子数が数百以下と少ないため、ラインで量産するまでもなく、個別開発に近い。現在の半導体増幅器や移相器は最高性能を実現するために個別開発と調整が必須であるため、量産する

と性能が下がる。そのため非常に高コストであり、逆にそれが民生用フェーズドアレーの普及の壁となっている。将来的にはフェーズドアレーはプリント基板で量産(回路印刷)するので量産効果で安く普及できるという期待は高いが、そのような指向性を持った研究開発はあまり行われていないのが実情である。通信・レーダー用途ではマイクロ波エネルギー伝送ほど高効率でかつ大量の素子を用いないため、通信・レーダーの研究開発だけを待っている SSPS 用高効率フェーズドアレーの実現は難しい。SSPS 用高効率フェーズドアレーは SSPS の研究者がイニシアチブを取り、その成果が通信・レーダー用途にスピノフできるようにすべきである。また、このような現状で、次のマイクロ波エネルギー伝送実証実験に直径数 m 級のフェーズドアレー実験を行うことは、効率を求めない精度のみの検証実験であれば意義はあるが、効率まで同時に求めることはかなりハードルが高い。高効率フェーズドアレーのための「高効率半導体増幅器の開発」もしくは「低損失移相器+電子管の開発」とマイクロ波エネルギー伝送実証実験は当面切り離して考えるべきである。安価な高効率フェーズドアレーを実現するために

(a) パラボラフェーズドアレー [58]



(b) 間引き給電フェーズドアレー [59]

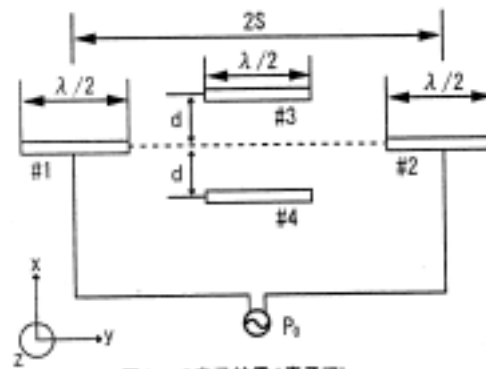


図 6 フェーズドアレーの素子数を減らす手法例

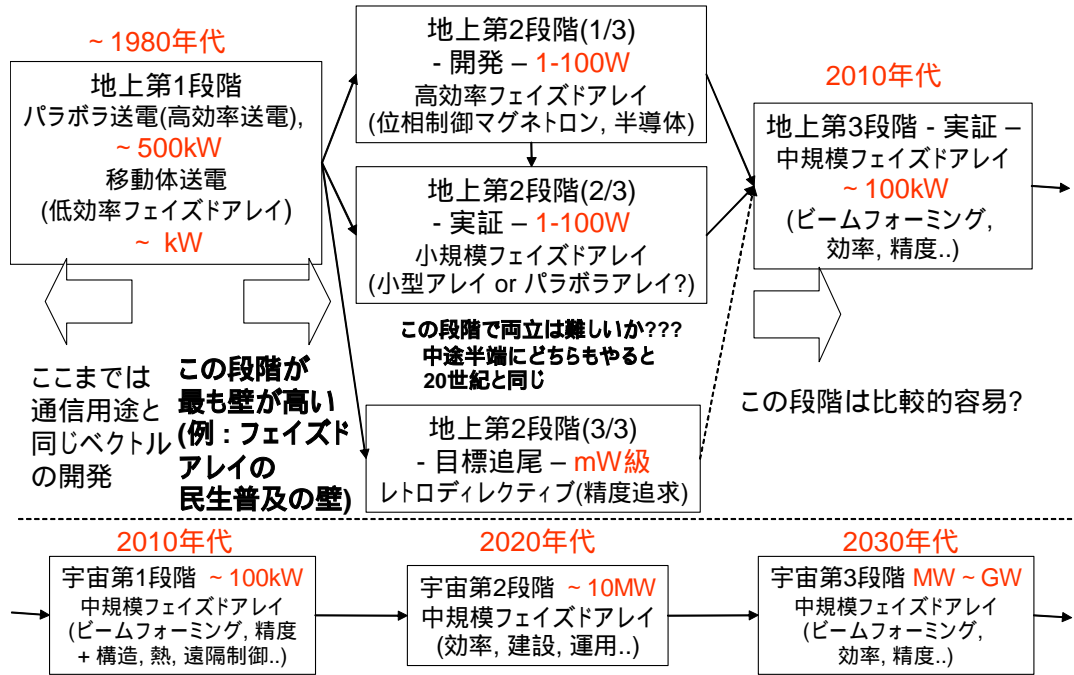


図7 マイクロ波エネルギー伝送実証実験ロードマップ案

は以下のような方法が考えられる。

1. 調整不要な増幅器、移相器等を開発する (ex.現在の民生用マグネトロン)
2. 素子数を減らす = 同時にグレーティングローブ抑制手法の開発が必要
3. 不等間隔アレーの検討 → 現状ではグレーティングローブは抑制できるが、エネルギーがメインローブに寄らずサイドローブに流れてしまう

素子数を単純に減らすだけではビームを制御した場合にグレーティングローブが発生してしまい、エネルギー伝送効率が激減してしまう。これは高出力電子管を用いたフェーズドアレーと同じパラドックスである。そこで現在提案されている素子数を減らしながらグレーティングローブを抑制する手法には

1. パラボラアンテナを用いたフェーズドアレーで素子数を減らし、かつ1次放射器もフェーズドアレーとしてエレメントパターンを走査しグレーティングローブ抑制する手法 (図6(a)) [34]
2. 素子間隔を広くして素子数を減らし、素子間に無給電素子を配置することで擬似的に素子間隔が狭いフェーズドアレーを構築し、グレーティングローブ抑制を期待する手法 (図6(b)) [35]

がある。2の研究はフェーズドアレー素子数を減らせる可能性が高い研究であるが、現段階ではビーム制御時のグレーティングローブの抑制に関し検証しておらず、今後の研究が期待される。

5. まとめ - マイクロ波エネルギー伝送システム

μのロードマップ -

以上のように、マイクロ波エネルギー伝送の現状と課題をまとめると以下ようになる。

- ・ マイクロ波エネルギー伝送技術は1980年代までに原理実証は終わっている
- ・ 次段階では「高効率フェーズドアレー」実現を目指すべき
- ・ しかし、通信・レーダー用のフェーズドアレーが民生化したのは1990年代以降であり、いきなり「高効率で直径数m(数百数千素子)のフェーズドアレーを開発」は困難
- ・ 「高効率半導体増幅器の開発 or 低損失移相器+電子管の開発」と「マイクロ波エネルギー伝送実証実験」は当面切り離して考えるべき
- ・ その中間段階で「高効率電子管小規模フェーズドアレー+パラボラアンテナ」の実証実験は可能性・意義がある

これらを踏まえ、地上実証と宇宙実証も考慮したマイクロ波エネルギー伝送のロードマップを図7のように提案したい。

SSPSの実現は今後人類が生き延びるための解の一つであり、実現に向け今後も不断の努力を要する。特にキーとなるマイクロ波エネルギー伝送技術は近視野での地上応用も可能であり、今後研究裾野の拡大をはかりつつSSPSの実現を目指したい。

謝辞

本報告はJAXA SSPS検討委員会の2005年度活動報告による。WG4関係各位に感謝する。

文 献

- [1] (財)国際衛星通信協会, 衛星通信研究, No.71, pp.19-43
- [2] 谷島正信, 黒田知紀, 高橋卓, 島田政明, 赤石明, 針生健一, “WINDS搭載用Kaアクティブフェーズドアレーアンテナ”, 信学技報 AP2003-1, SAT2003-1, pp.1-6Jan.1979.
- [3] Satoh, M., H. B. Li, Y. Fujino, H. Wakana, A. Miura, Y. Ozaki, H. Satou, E. Watanabe, and M. Sawa, “Helicopter-Satellite Communication System Developed for Transmission of Disaster and Emergency Information”, Proc. of 21st Int. Communication Satellite Conference and Exhibit, AIAA2003-2319, 2003
- [4] Brookner, E., “Phased Arrays and Radars —Past, Present and Future”, Microwave Journal, Cover Feature, 2006.1.
- [5] Pozar, D. M., D. H. Schaubert, “Scan Blidness in Infinite Phased Arrays of Printed Dipoles”, IEEE Trans. AP, Vol. AP-32, No.6, 1984, pp.602-610
- [6] Balanis, C. A., “Antenna Theory: analysis and design”, 2nd Ed., Fig.8.31, Wiley & Sons, Inc., 1997
- [7] Pozar, D. M., “Scanning Characteristics of Infinite Arrays of Printed Antenna Subarrays”, IEEE Trans. AP, Vol. AP-40, No.6, 1992, pp.666-674
- [8] Van Atta, L. C., “Electromagnetic reflector,” U.S. Patent 2 908 002, Oct. 1959
- [9] Pon, C. Y., “Retrodirective array using the heterodyne technique,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-12, Mar. 1964, pp.176-180
- [10] Leong, K. M. K. H., R. Y. Miyamoto, and T. Itoh, “Ongoing Retrodirective Array Research at UCLA”, 信学技報 SPS2002-08 (2002-11), 2002, pp.15-20
- [11] Miyamoto, R. Y., Y. Qian, and T. Itoh, “An active integrated retrodirective transponder for remote information retrieval-on-demand”, IEEE Trans. MTT, Vol.49, No.9, 2001, pp.1658-1662
- [12] Leong, K. M. K. H., Y. Wang, and T. Itoh, “A Full Duplex Capable Retrodirective Array System for High-Speed Beam Tracking and Pointing Applications”, IEEE Trans. MTT, Vol.52, No.5, 2004, pp.1479-1489
- [13] Qian, Y., and T. Itoh, “Progress in Active Integrated Antennas and Their Applications”, IEEE Trans. MTT, vol.46, no.11, 1998, pp.1891-1990
- [14] Brabetz, T., V. F. Fusco, and S. Karode, “Balanced Subharmonic Mixers for Retrodirective-Array Applications”, IEEE Trans. MTT, Vol.49, No.3, 2001, pp.465-469
- [15] Karode, S. and V. F. Fusco, “Retro-Transceiver Array Using Monopole Antennas”, IEEE Trans. MTT, Vol.49, No.3, 2001, pp.565-568
- [16] <http://www.ee.qub.ac.uk/hfe/st173.htm>
- [17] Gallop, J., D. Peden, L. Hao and J. Macfarlane, “A Microwave Phase Conjugating Antenna Using High Temperature Superconductors”, Supercond. Sci. Technol. Vol.16, 2003, pp.1566–1569
- [18] Chang, Y., H. R. Fetterman, I. L. Newberg, and S. K. Panaretos, “Microwave Phase Conjugation Using Antenna Arrays”, IEEE Trans. MTT, Vol.46, No.11, 1998, pp.1910-1919
- [19] DiDomenico, L. D. and G. M. Rebeiz, “Mobile Digital Communications Using Phase Conjugating Arrays”, Proc. of the IEEE Military Communications Conference (MILCOM '98), paper9.4, 1998
- [20] Leong, K. M. K. H., R. Y. Miyamoto, S.-S. Jeon, Y. Wang, and T. Itoh, “A Frequency Autonomous Retrodirective Array Transponder”, 2002 IEEE MTT-S Digest, 2002, pp.1349-1352
- [21] Kaya, N., H. Matsumoto, and R. Akiba, “Rocket Experiment METS Microwave Energy Transmission in Space”, Space Power, Vol.11, No.1&2, 1993, pp.267 – 274
- [22] 松本 紘, 賀谷 信幸, 長友 信人, 中司 浩生, 橋爪 隆, “マイクロ波送電実験におけるレトロディレクティブ方式の検討”, 宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, 1987
- [23] 松本紘, 篠原真毅, 橋本弘藏, “京都大学におけるSPS研究への取り組み”, 信学技報 SPS2002-07, 2002, pp.9-14
- [24] 篠原 真毅, 國見 真志, 三浦 健史, 松本 紘, 藤原 暉雄, “目標自動追尾式マイクロ波送電器のデモンストレーション公開実験”, 電子情報通信学会論文誌 B-II, Vol.J81-B-II, No.6, 1998, pp.657-661
- [25] 水野友宏, 西田和弘, 桶川弘勝, 高田和幸, 池松寛, 佐藤裕之, USEF-SSPS 検討チーム, “ヘテロダイン方式ハードウェアレトロディレクティブアンテナの開発”, 第 48 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2004, pp.98-102
- [26] 財団法人機械システム振興協会, 委託先 財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構, “マイクロ波による情報通信・電力伝送用 電源・アンテナ一体型パネルの開発に関するフィージビリティスタディ報告書—要旨—”, 2004.3
- [27] 仁木洋平, 山田修平, 川崎繁男, 大山龍一郎, 田中孝治, 佐々木進, 七日市一嘉, 篠原真毅, 松本紘, “レトロディレクティブ機能を備えた平面型アクティブ集積アンテナアレーの検討”, 信学技報 SPS2004-02, 2004, pp.7-12
- [28] Little, F. E., S. J. Kokel, C. T. Rodenbeck, K. Chang, G. D., Arndt, and P. H. Ngo, “Development of Retrodirective Control Transmitter for Wireless Power Transmission”, The Radio Science Bulletin, No.311, 2004, pp. 38-46
- [29] Nakasuka, S., T. Funane, Y. Nakamura, Y. Nojiri, H. Sahara, F. Sasaki, and N. Kaya, “Sounding Rocket Flight Experiment for Demonstrating ”FUROSHIKI SATELLITE” for Large Phased Array Antenna”, Proc. of IAC2005, IAC-05-C3.3.01.pdf
- [30] Hashimoto, K., K. Tsutsumi, H. Matsumoto, and N. Shinohara, “Space Solar Power System Beam Control with Spread Spectrum Pilot Signals”, The Radio Science Bulletin, No.311, 2004, pp. 31-37
- [31] Lipsky, S. E., “Microwave passive direction finding”, Wiley-Interscience, 1987
- [32] 堤恒次, “マイクロ波送電におけるパイロット信号到来方向推定法の研究”, 京都大学工学部電気電子工学科卒業論文, 2000
- [33] 桑原義彦, “SPS フェーズドアレーアンテナのための RBF ニューラルネットワークによる到来方向推定”, 信学技報 SPS2003-11, 2004, pp.5-10
- [34] Mikami, I., T. Mizuno, H. Ikematsu, H. Satoh, N. Shinohara, K. Hashimoto, and H. Matsumoto, “Some Proposals for the SSPS Actualization from Innovative Component Technology Standpoint”, Proc. of 2004 URSI EMT-S, 2004, pp.317 – 319
- [35] Takano, T., N. Kamo, and A. Sugawara, “Simplification of an Array Antenna by Reducing the Fed Elements”, IEICE , Vol.E88-B, No.9, 2005, pp.421-424