

SPS2000の送受電システムと課題

伊藤 精彦*・大宮 学**

Present State and Problems of Microwave Energy Transmission and Receiving System of SPS 2000

By

Kiyohiko ITOH* and Manabu OMIYA**

Abstract : This paper discusses and summaries the microwave energy transmission antenna and receiving antenna systems of SPS 2000. Also, their problems are shown. Concerning on the spactenna, cavity-backed slot antennas are proposed as an antenna element. We develop and clarify the design method of antenna elements with which the specifications for the element are satisfied. Moreover, we confirm the fundamental microwave-beam scanning performance of the spacetenna using an eight-element array antenna. A circular microstrip patch antenna (CMSA) was proposed as a rectenna element. Slits on the patch are helpful for suppressing re-radiation of higher order harmonics generated in the rectifying circuit. Design methods of CMSA with slits are developed. Configuration of rectifying circuits realizing a high efficiency of RF-DC conversion are shown. Problems considered in the future are the direction detection of rectenna sites and microwave beam control skill with high angular precision as well as a technology of SPS 2000 system integration.

概 要

SPS2000送電アンテナおよび受電アンテナについて、これまで行われた研究成果のまとめを行うとともに、今後の研究課題について示す。送電アンテナ素子としてキャビティ付スロットアンテナを提案し、構造条件を満足するアンテナ素子の開発を行い、設計法を確立した。さらに、8素子アレーアンテナを用いた送電アンテナのビーム走査特性に関する基礎的検証を行った。受電アンテナ素子として円形マイクロストリップパッチアンテナの高調波再放射抑圧特性を改

*北海道大学大学院工学研究科

**北海道大学大型計算機センター

善することを目的として、パッチ表面にスリットを入れることを提案し、スリット設計法を明らかにした。また、高効率なRF-DC変換特性を実現する整流回路の構成を示した。今後の課題として、高精度なレクテナ方向の検知とビーム方向制御、SPS 2000 システムインテグレーションについて検討しなければならない。

重要語：スペーステナ，キャピティ付スロットアンテナ，フェーズドアレーアンテナ，レクテナ，スリット入円形マイクロストリップアンテナ

1. はじめに

本稿においては、SPS 2000 [1] の送電および受電アンテナシステムについて、これまで行われてきた研究成果 [2], [3] のまとめを行い、今後の研究課題を示す。

SPS 2000 送電アンテナ用素子としてキャピティ付スロットアンテナの利用を提案した [1]。アンテナ素子が満足すべき構造条件を示し、その条件を満足する形状を有するアンテナ素子の開発 [4] - [6] および設計法を確立した [7] - [15]。さらに、アンテナ素子の薄形化 [16] - [21] および大量生産を可能にする技術の開発 [22] を行った。送電アンテナは約250万素子から構成される巨大なフェーズドアレーアンテナである。マイクロ波ビームの電子的走査を可能にするシステムの構成を示すとともに、8素子アレーアンテナを使用した基礎実験により送電アンテナの機能について実証した [23] - [29]。現在、パイロット信号受信および方向検知システムにDSP (Digital Signal Processor) および周波数拡散通信方式を適用し、高精度なパイロット信号方向検知に関する基礎的研究を行っている [30] - [33]。

一方、受電アンテナとして円形マイクロストリップパッチアンテナ (Circular microstrip patch antenna, 以後CMSAと略称) を利用することとし [34] - [37]、受電アンテナに接続される整流回路の構成を単純化するため、アンテナ素子自体の高調波再放射抑圧特性を改善するスリット入CMSAを提案し、スリット設計法およびその有効性を示した [38] - [43]。また、高効率なRF-DC変換特性を実現する整流回路の構成を提案した [44], [45]。

この他、レクテナアレーの接続方法 [46] - [49] および各種評価法 [50], [51] について検討が行われている。また、開口面アレー形送電アンテナとレクテナ設計に関する報告がなされている [54]。

2. 研究成果の概要

研究成果および課題を表1に示す。研究成果は次のように要約される。SPS 2000 送電アンテナとしてキャピティ付スロットアンテナの利用を提案している。構造条件を満足する形状を有するアンテナ素子の開発および設計法を確立した。さらに、電子的なビーム走査を実現するシステムの構成と実験的な確認を行い、送電アンテナの機能を実証している。また、受電アンテナについて、CMSAの高調波再放射抑圧機能を向上するため、パッチ表面にスリットを入れることが有効であることを示した。さらに、基本共振モードおよび高次共振モードに基づくスリットの設計法を示した。同様に、高効率なRF-DC変換特性を実現する整流回路の構成を示した。ここでは、信号環境に応じてインピーダンス整合回路を整流回路に付加することによって、容易に変換効率を改善することができることを示した。

今後の研究課題として、送電アンテナにおいてマイクロ波ビームをレクテナ方向に正確に向けるためには100分の1程度の高精度なレクテナ方向の検知とビーム方向制御が必要であることを明らかにした。この精度をどのような技術により実現するのか、SPS 2000の実現にとって重大な問題であり、未解決のまま残っている。さら

に、SPS 2000のような巨大で、高効率なマイクロ波無線送電システムを構築するためのシステムインテグレーション技術を開発しなければならない。

以下においては、研究成果についてその内容を示す。

表1 研究成果及び研究課題

研究成果	(1) 送電アンテナ(スペーステナ) <ul style="list-style-type: none"> ・ アンテナ素子の提案および設計法の確立 ・ 電子的ビーム走査に関するシステム構成と実験的検証 (2) 受電アンテナ(レクテナ) <ul style="list-style-type: none"> ・ 高周波再放射抑圧特性に優れたスリット入CMSA ・ 高効率RF・DC変換特性を有する整流回路の構成 ・ レクテナアレー構成法に関する検討
研究課題	(1) 高精度(100分の1程度)なレクテナ方向検知とビーム方向制御 (2) 高効率なマイクロ波無線伝送システム

2.1. 送電アンテナ素子

SPS 2000送電アンテナの要求条件から、送電アンテナ素子が満足しなければならない条件は次のようになる。すなわち、偏波特性は直線偏波、送電周波数として2.45GHzの単一周波数を利用するので、帯域幅は特に指定されていない。アンテナ素子寸法の決定においては次の2つの条件が設定されている。すなわち、

- (1) 送電ビーム走査時にグレーティングローブが発生しないこと
- (2) サブアレーの大きさは3m×3m

以上の条件から、東西方向の素子間隔 dx は75mm、南北方向の素子間隔 dy は約91mmと決定された。アンテナ素子の高さは36mm以下である。この寸法はアレーモジュールを輸送ロケットのフェアリング部に格納するために設定された。もちろん、素子の高さにはアンプ、移相器、フィルタおよびアイソレータ等のマイクロ波回路が含まれている。したがって、キャビティ高さを低くすることができれば、マイクロ波回路部分の寸法条件は緩和される。さらに、全体の高さを低くできれば、ロケットによる輸送回数を減らすことができるので、薄形化に関する検討の意義は大きい。これまでに、図1に示す3つの給電構造を有するアンテナ素子を新たに開発した。すなわち、終端短絡プローブ給電素子、逆F給電素子およびループ給電素子により励振されるキャビティ付スロットアンテナである。アンテナ素子の高さは12mmとして設計を行っているが、さらに薄形化が可能である。

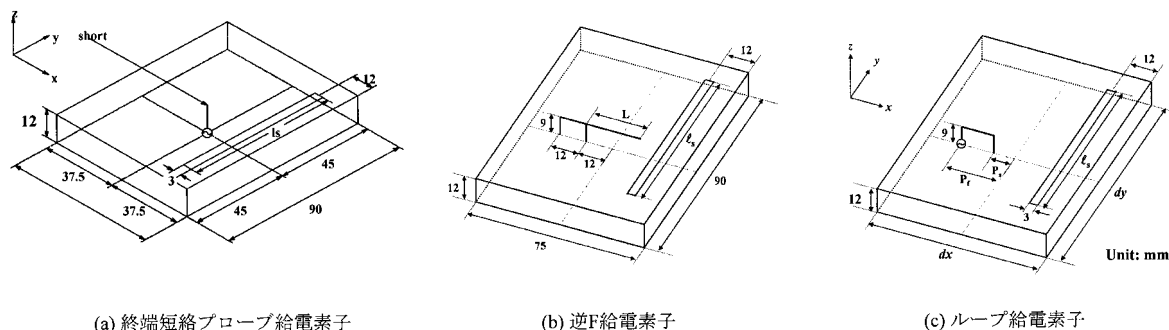


図1 開発を行った送電アンテナ素子および給電構造

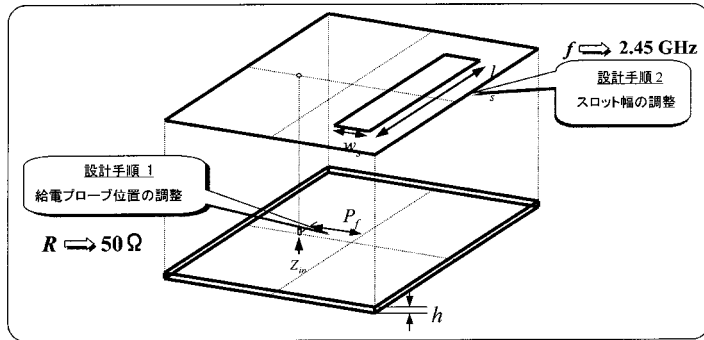


表2 アンテナ設計例

Cavity height h (mm)	12	6	3	1
Probe Location P_f (mm)	0	24	28.5	29.5
Slot width w_s (mm)	3	21	22.5	21.7
Slot length l_s (mm)	63	60		
Bandwidth (MHz) (VSWR < 1.5)	65	56	30	13

図2 終端短絡プローブ給電キャビティ付スロットアンテナの薄形化設計法

図1 (a) に示す終端短絡プローブ給電キャビティ付スロットアンテナについて薄形化のための設計法について詳しく示す。このアンテナ素子構造では設計パラメータとして、プローブ位置 P_f とスロット幅 w_s を調整する。設計手順は、

- (1) 給電プローブ位置 P_f の調整を行うことによって、給電部から見込んだ入力インピーダンス Z_{in} の実部を 50 に一致させる。
- (2) スロット幅 w_s を調整することによって、共振周波数を 2.45 GHz に一致させる。

この設計法においてプローブ位置 P_f とスロット幅 w_s は独立して調整可能なので、アンテナ素子の設計は容易である。以上説明した設計法を用いて、キャビティ付スロットアンテナの薄形化について設計例を表2に示す。キャビティ高さを 12 mm から 1 mm まで薄形化した。薄形化により、インピーダンス整合を実現するためプローブ位置のキャビティ中心からのオフセット量 P_f は増加し、スロット幅 w_s は広くなることからわかる。これは、プローブ位置のオフセットにより電磁界が特定の範囲に集中するので、狭帯域な周波数特性になるためである。

送電アンテナは図1に示したアンテナ素子から構成される巨大なアレーアンテナである。アレーアンテナでは素子間相互結合によりビーム走査特性が劣化する場合がある。アンテナ素子間の結合量を評価することによって、キャビティ付スロットアンテナの素子間相互結合が小さく、アンテナパラメータの再設計が不要であることを明らかにしている [11], [12], [15]。

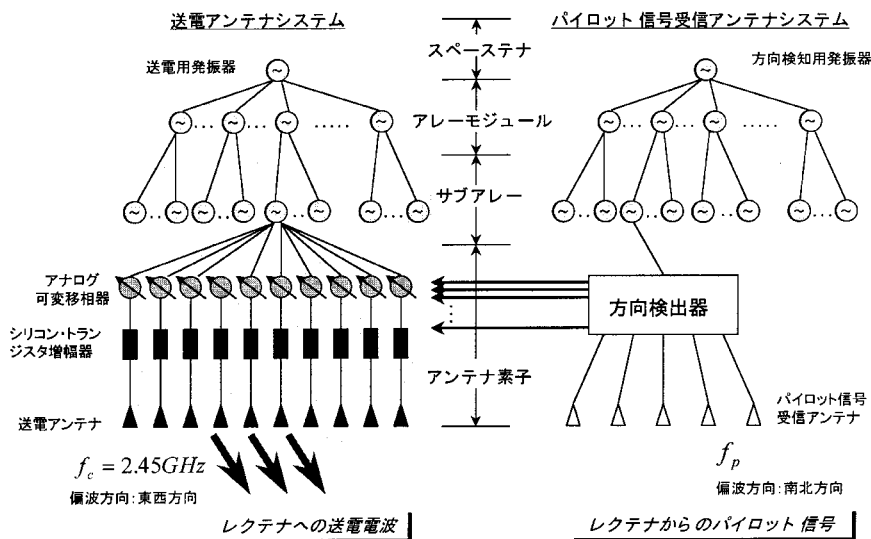


図3 送電アンテナシステムのフェーズドアレーアンテナとしての構成

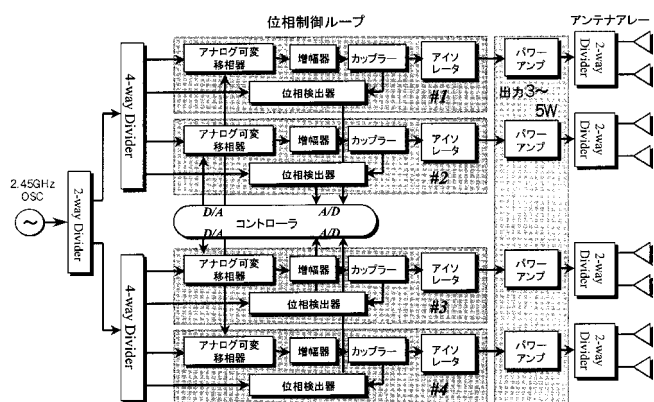


図4 試作実験モデル

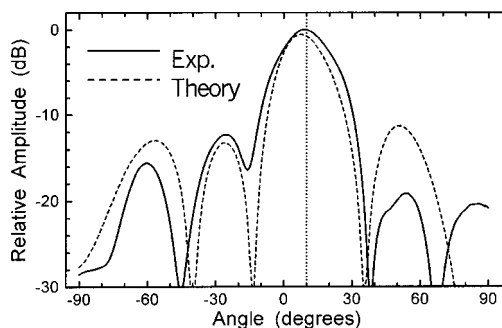


図5 実験結果 (ビーム走査方向: 10°)

2.2. フェーズドアレーアンテナとしての送電アンテナシステム

図3に送電アンテナのフェーズドアレーアンテナとしての構成を示す。送電アンテナは地上のレクテナ施設から送信されたパイロット信号を受信することによって、レクテナ方向を検知し、その方向に送電ビームを走査するフェーズドアレーアンテナである。送電アンテナではレクテナ方向の情報に基づいてアナログ可変移相器を制御してマイクロ波ビームを所望方向に形成する。ここでは、送電アンテナシステムのビーム走査特性の基本的な機能を確認・評価するための機能モデルを試作した。試作した機能モデルの構造を図4に示す。送電アンテナアレーおよび位相制御回路から構成されている。1つの位相制御ループには2個のアンテナ素子が接続され、同相で励振される。このアレーアンテナでは1次元のビーム走査が可能である。位相制御回路では2.45GHzの発振器からの出力を電力分配器で各制御ループに分配する。位相制御ループはアナログ可変移相器、シリコン増幅器、方向性結合器および位相検出器から構成される。アンテナ出力での位相を位相検出器で観測し、特定の方向にビームを走査するために、可変位相器への電力を制御して、所望の位相差を実現する。これら制御はすべてコントローラ(PC)を用いて行う。送電ビームを10度方向に走査したときのアンテナパターンを図5に示す。ただし、実線が実験結果、破線が数値解析結果を示している。主ビームは10度方向に向いており、所望のビーム走査が実現されていることがわかる。

2.3. 受電アンテナ素子

受電アンテナ素子に関する研究成果について説明する。レクテナ素子として、円形マイクロストリップアンテナ(CMSA)が高調波再放射抑圧特性および製造の単純さから有効である。さらに、パッチ表面にスリットを入れることによって高調波再放射抑圧特性を向上させることが可能である。図6に、提案を行っているCMSAおよび2種類のスリット入CMSAの構造を示す。ただし、 a は基本共振周波数を2.45GHzに一致させるためのパッチ半径を表す。CMSA1は高調波周波数付近に発生する高次モードのパッチ表面電流を乱すことを目的として設計を行った[40]。一方、CMSA2は基本モードのパッチ表面電流に着目し、できる限り基本モードの電流分布を乱さないスリット形状である[43]。これらCMSAの2.45GHzおよび高調波周波数におけるリターンロス値を表3に示す。ただし、誘電体基板として中興化成工業株式会社製CGP502(比誘電率2.6, 基板厚0.77mm)を使用した。基本共振周波数2.45GHzにおいてリターンロス値が大きく、高調波周波数においてリターンロス値が小さいほど、高調波再放射抑圧特性に優れたアンテナ素子である。同表から、2種類のスリット入CMSAにおいてほぼ同一の特性であることがわかる。さらに、高調波周波数における2種類のスリット入CMSAのリターンロス値は通常のCMSAに比較して、小さな値になっている。以上のことから、CMSA2は一組のスリットのみで、かつパッチ半径などの再設計を必要としないことから、CMSA1に比較して優れていると結論できる。

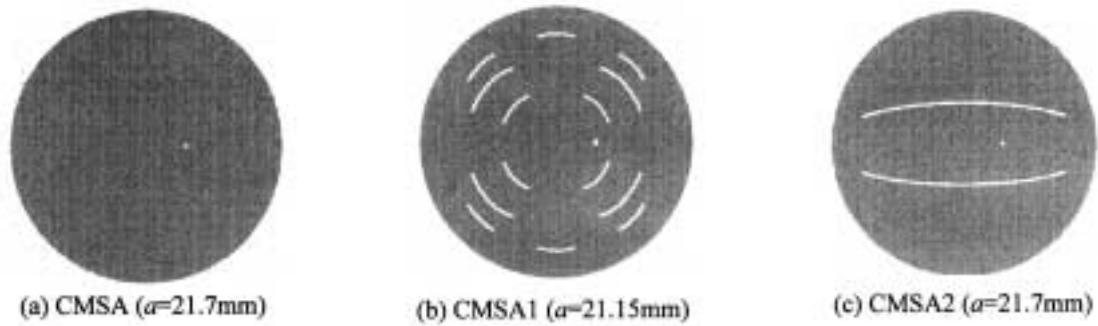


図6 CMSAおよびスリット入CMSAの構成

表3 入力特性 (測定結果)

f (GHz)	CMSA	CMSA 1	CMSA 2
2.45	25.71	25.88	17.26
4.90	1.88	0.73	0.66
7.35	4.30	0.34	0.29
9.80	0.82	0.53	0.46
12.25	2.26	0.89	0.94

2. 4. 高効率なRF-DC変換効率を実現するレクテナ整流回路

高効率なRF-DC変換特性を有する整流回路の構成法について示す。従来の整流回路は入力フィルタ、ダイオードおよび出力フィルタから構成されていた。しかしながら、ダイオードが接続されたポートから負荷側を見込んだときインピーダンス整合が得られていないため、高効率なRF-DC変換特性を実現することは難しい。ただし、入力フィルタは周波数2.45 GHzで十分整合が得られているとする。そこで、図7に示すように入力フィルタとダイオードの間にインピーダンス整合回路を設けることによって、高効率なRF-DC変換特性を実現する。ここで、インピーダンス整合回路はマイクロストリップで構成した4分の1波長変換器である。アンテナ出力端から整流回路側を見込んだ入力インピーダンス Z_{in} は入力電力に依存して変化するので、すべての入力電力に対応してインピーダンス整合を実現する整流回路を構成することは困難である。そこで、変換効率の向上が見込まれる入力電力が100 mW～1 W程度の入力電力に対してインピーダンス整合を実現することを検討した。その測定結果を、図8に示す。大信号モデルにおいては、入力電力100 mWで14 dB程度のリターンロスを実現しており、そこでのRF-DC変換効率は50%程度になっている。一方、小電力モデルでは入力電力の範囲にわたってリターンロスが7 dB以下になっており、RF-DC変換効率の最大値は25%程度である。以上のことから、インピーダンス整合回路を利用することの有効性を確認した。

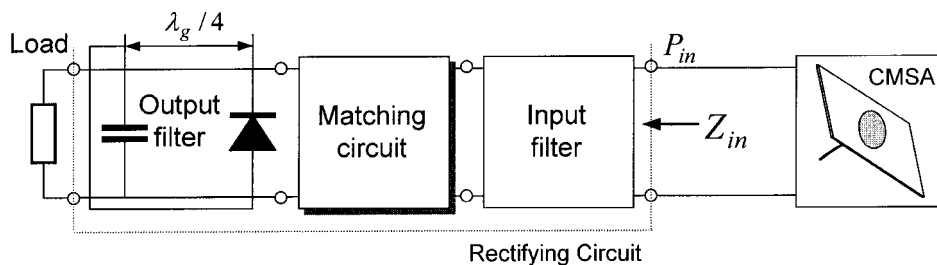


図7 高効率RF-DC変換特性を有する整流回路の構成

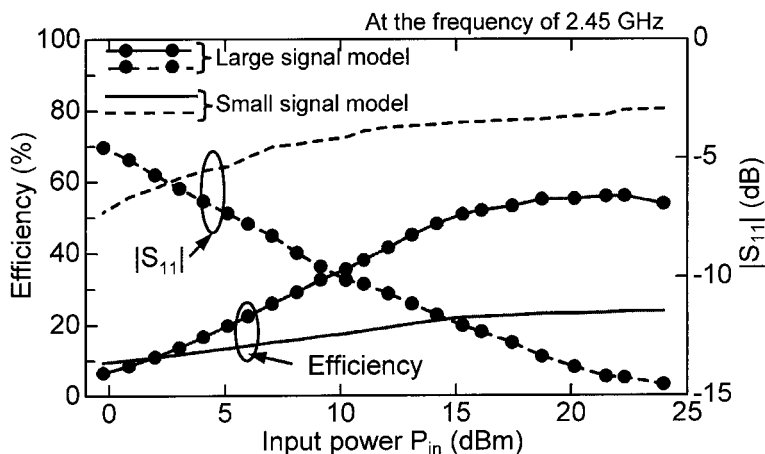
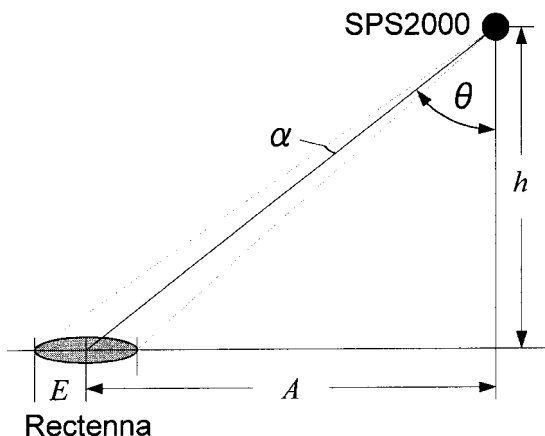


図8 RF-DC変換効率の測定結果

3. 今後の研究課題

SPS 2000 送受電システムで研究課題として未解決のまま残されている事項について説明する．ひとつは，高精度なレクテナ方向検知とビーム方向制御の方法を明確化することである．レクテナ方向の検知には，レクテナ施設から送信されるパイロット信号を用いて行うことが検討されてきた．パイロット信号を用いた場合の方向検知の原理を図9に示す．SPS 2000 衛星の軌道高度 $h = 1,100$ km，レクテナが送電範囲の最も端 ($A = 600$ km) にあるとする．このとき，送電ビーム方向の正しい値はレクテナ中心である．レクテナにおけるビーム中心のずれをレクテナエッジまで許容したとしても，角度検出誤差は 0.04 度以下でなければならない．このような高精度な角度検知は単純な方向検知システムでは実現することができない．したがって，パイロット信号のほかに利用可能な情報を積極的に活用することを検討する必要がある．そのような情報として，パイロット信号に周波数拡散通信方式を適用すること，GPS衛星の利用，さらにSPS 2000 衛星軌道情報およびレクテナ設置場所に関する情報を活用することが考えられる．特に，21個 + 予備3個のGPS衛星が軌道高度2万キロを回転しているので，地上におけるナビゲーションシステムと同様にSPS 2000 にとっても有効な位置決定手段となりえる．



角度検出誤差

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{E \sin^2 \theta}{h}\right)$$

解析パラメータ

SPS2000 軌道高度: $h = 1,100$ km

レクテナの半径: $E = 1$ km

地上における距離: $A = 600$ km

SPS2000 からレクテナを見込んだ角度: $\theta = 30^\circ$

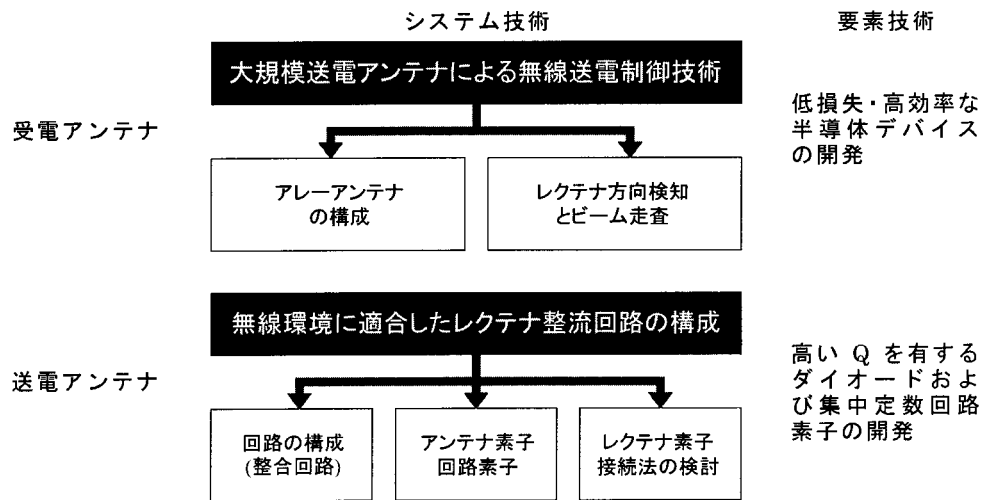
角度検出誤差の予測値

$$\alpha = 0.04^\circ$$

図9 レクテナ方向検出誤差の評価

最後に、高効率なマイクロ波無線送電システムとして、これまで検討が行われてきている要素技術を集積化するシステム技術の確立を行わなければならない。もちろん、要素技術として「低損失・高効率な半導体デバイスの開発」、「高いQを有するダイオードおよび集中定数素子の開発」はこれからも継続的に行われなければならない。システム技術として、送電アンテナにおいては「大規模送電アンテナによる無線送電制御技術」、受電アンテナにおいては「無線環境に適合したレクテナ整流回路の構成」がある。これら研究課題は、すでに明らかにされた要素技術を踏まえ、発展させることによって解決可能である。

表4 今後の研究課題



4. まとめ

本稿においては、SPS 2000 研究においてこれまで行われてきた送受電アンテナに関する研究成果のまとめを行った。送電アンテナ素子についてはキャビティ付スロットアンテナを提案し、寸法条件を満足する給電構造の提案を行った。すなわち、終端短絡プローブ給電素子、逆F給電素子およびループ給電素子について提案を行った。さらに、終端短絡プローブ給電キャビティ付スロットアンテナについて薄形化を検討し、その設計法を示した。この設計法を用いて、キャビティ高さを1mmとしたときの設計例を示した。

送電アンテナは約250万素子から構成される巨大なフェーズドアレーアンテナである。適切な位相制御を実現するための方式について検討し、ハードウェアの試作・評価から動作原理の確認を行った。

受電アンテナ素子として円形マイクロストリップパッチアンテナは基本共振周波数の整数倍で共振しない特徴を有しており、受電アンテナ素子として適している。しかしながら、高次の共振モードの共振帯域幅が広いことから、高調波再放射抑圧特性は十分でない。そこで、CMSAパッチ表面にスリットを入れることを提案し、その設計法を示した。さらに、従来のCMSAに比較して高次共振モードが抑圧されることを示した。

最後に、今後の研究課題として送受電アンテナシステムを実現する上で検討を要する2つの事項を示した。

参考文献

- [1] 宇宙科学研究所太陽発電衛星ワーキンググループSPS2000タスクチーム：SPS2000概念計画書（暫定版），宇宙科学研究所，相模原，1993。

- [2] 伊藤精彦：マイクロ波電力伝送システムにおける送受電電動アンテナの試験研究，平成6年度～平成8年度科学研究費補助金基盤研究(A)(2)(06505002)研究成果報告書，Mar. 1997。
- [3] 伊藤精彦，大宮 学：“無線エネルギー伝送”，1998年電子情報通信学会ソサイエティ大会チュートリアル講演，TB-1-2，Oct. 1998。
- [4] 日景 隆，大野哲生，大宮 学，伊藤精彦：“マイクロ波送電用キャビティ付きスロットアンテナの提案”，電子情報通信学会論文誌B-II，vol. J81-B-II，no. 3，pp. 218-225，Mar. 1998。
- [5] T. Hikage, N. Ohno, M. Omiya, and K. Itoh：“Proposal and Analysis of Cavity-Backed Slot Antennas for Microwave Energy Transmission”，Electronics and Communications in Japan, Part 1, vol. 82, no. 3, pp. 20-27, Mar. 1999。
- [6] 日景 隆，今田瑞樹，大宮 学，伊藤精彦：“ループ給電キャビティ付スロットアンテナの設計”，2000年電子情報通信学会ソサイエティ大会，B-1-58，Sept. 2000。
- [7] 大野哲生，堀口健一，大宮 学，伊藤精彦：“FDTD法を用いたキャビティ付スロットアンテナの設計に関する考察”，電子情報通信学会論文誌B-II，vol. J79-B-II，no. 11，pp. 917-924，Nov. 1996。
- [8] N. Ohno, K. Horiguchi, M. Omiya and K. Itoh：“Design of Cavity-Backed Slot Antennas Using the Finite-Difference Time-Domain Technique”，Electronics and Communications in Japan, Part 1, vol. 80, no. 7, pp. 14-22, Jul. 1997。
- [9] 日景 隆，大野哲生，大宮 学，伊藤精彦：“マイクロ波送電用キャビティ付スロットアンテナ”，電子情報通信学会技術研究報告，A・P97-67，pp. 57-64，Jul. 1997。
- [10] M. Omiya, T. Hikage, N. Ohno, K. Horiguchi, and K. Itoh：“Design of Cavity-Backed Slot Antennas Using the Finite-Difference Time-Domain Technique”，IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 46, no. 12, pp. 1853-1858, Dec. 1998。
- [11] T. Hikage, M. Omiya, and K. Itoh：“FDTD Analysis of Mutual Coupling of Cavity-Backed Slot Antenna Array”，IEICE Transactions on Electronics, vol. E81-C, no. 12, pp. 1838-1844, Dec. 1998。
- [12] T. Hikage, M. Omiya, and K. Itoh：“Evaluation of Mutual Coupling of Cavity-Backed Slot Antennas Using the FDTD Technique”，1998 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings - APMC'98 -, TH3D-4, pp. 1409-1412, Dec. 1998。
- [13] 日景 隆，大宮 学，伊藤精彦：“FDTD法を用いたキャビティ付きスロットアンテナの特性評価法に関する比較検討”，電子情報通信学会論文誌B，vol. J82-B，no. 5 pp. 1038-1045，May 1999。
- [14] T. Hikage, M. Omiya, and K. Itoh：“Performance Evaluation of Cavity-Backed Slot Antenna Using the FDTD Technique”，2000 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, 67.2, July 2000。
- [15] 村上和之，日景 隆，大宮 学，伊藤精彦：“アレーアンテナ素子間相互結合のFDTD解析法に関する比較検討”，電子情報通信学会技術研究報告，A・P2000-39，SAT2000-36，MW2000-39，pp. 53-59，July 2000。
- [16] 日景 隆，大宮 学，伊藤精彦：“キャビティ付スロットアンテナの薄形化に関する検討”，電子情報通信学会技術研究報告，MW98-58，pp. 7-14，Jul. 1998。
- [17] 日景 隆，大宮 学，福地久直，伊藤精彦：“フェーズドアレーアンテナのビーム走査特性に関するFDTD解析”，1998年電子情報通信学会総合大会，B-1-185，Mar. 1998。
- [18] 日景 隆，今田瑞樹，大宮 学，伊藤精彦：“キャビティ付スロットアンテナの薄形化および小形化のための設計法”，電子情報通信学会技術研究報告，AP99-44，SAT99-44，pp. 15-22，Jul. 1999。
- [19] 日景 隆，今田瑞樹，大宮 学，伊藤精彦：“送電アンテナ用キャビティ付スロットアンテナの薄形化”，電子情報通信学会論文誌B，vol. J82-B，no. 10，pp. 1905-1914，Oct. 1999。
- [20] T. Hikage, M. Omiya, and K. Itoh：“Low Profile Cavity-Backed Slot Antennas for Microwave Energy Transmission”，Proceedings of the 2000 International Symposium on Antennas and Propagation, vol. 2, no. 2D4-4, pp. 709-712, Aug. 2000。
- [21] 日景 隆，今田瑞樹，大宮 学，伊藤精彦：“送電アンテナ用薄形キャビティ付スロットアンテナの設計”，電子情報通信学会技術研究報告，A・P99-152，pp. 15-22，Dec. 1999。
- [22] 大宮 学，日景 隆，今田瑞樹，伊藤精彦：“側面をワイヤで構成したキャビティ付スロットアンテナの設計”，1999年

- 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-97, Sept. 1999 .
- [23] M. Omiya and K. Itoh :“ A Fundamental System Model of the Solar Power Satellite, SPS2000 ”, Proceedings of the 1996 International Symposium on Antennas and Propagation, vol. 2, pp. 417-420, Sept. 1996.
- [24] 大宮 学, 伊藤精彦 : “ 太陽発電衛星SPS2000システム機能モデル実験 ”, 1996年電子情報通信学会総合大会, SB-1-6, Mar. 1996 .
- [25] 陳 俊明, 本間克紀, 大野哲生, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ 太陽発電衛星SPS2000用送電アンテナ ”, 電子情報通信学会技術研究報告, SAT96-46, MW96-57, pp. 29-36, Jul. 1996 .
- [26] 本間克紀, 大野哲生, 油谷崇志, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ SPS2000用2.45GHz帯アナログ可変移相器の開発 ”, 電子情報通信学会技術研究報告, SAT96-47, MW96-58, pp. 37-44, Jul. 1996 .
- [27] 本間克紀, 大野哲生, 油谷崇志, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ 太陽発電衛星SPS2000システム機能モデル用アナログ可変移相器に関する検討 ”, 平成8年度電気関係学会北海道支部連合大会, 84, Oct. 1996.
- [28] 油谷崇志, 本間克紀, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ 太陽発電衛星SPS2000用2.45GHz増幅器の設計および試作 ”, 平成8年度電気関係学会北海道支部連合大会, 85, Oct. 1996.
- [29] 本間克紀, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ 太陽発電衛星SPS2000システム機能モデル用アナログ可変移相器の設計法に関する検討 ”, 平成9年度電気関係学会北海道支部連合大会, 173, Oct. 1997.
- [30] 荒川広一, 陳 俊明, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ SPS2000パイロット信号方向検知システムに関する基礎的研究 ”, 平成9年度電気関係学会北海道支部連合大会, 170, Oct. 1997 .
- [31] 荒川広一, 市村光康, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ SPS2000パイロット信号方向検知システムの試作 ”, 平成10年度電気関係学会北海道支部連合大会, 369, Oct. 1998 .
- [32] 久保田敦, 荒川広一, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ パイロット信号方向検知システム用相関器の試作 ”, 平成11年度電気関係学会北海道支部連合大会, 122, Oct. 1999.
- [33] 久保田敦, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ パイロット信号方向検知システムの試作実験 ”, 平成12年度電気関係学会北海道支部連合大会, 165, Oct. 2000 .
- [34] 伊藤精彦, 太陽発電衛星受電用地球局端末素子「レクテナ」に関する基礎的研究, 昭和58年度科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果報告書, 1983.
- [35] 伊藤精彦, 秋葉康弘, 小川恭孝 : “ マイクロストリップアンテナによるレクテナについて ”, 電子通信学会技術研究報告, AP82-98, Jul. 1982 .
- [36] 秋葉康弘, 中島直臣, 小川恭孝, 伊藤精彦 : “ SPS (太陽発電衛星) 受電用レクテナに関する研究 ”, 電子通信学会技術研究報告, MW83-16, Jul. 1983 .
- [37] 秋葉康弘, 小川恭孝, 伊藤精彦 : “ 円形マイクロストリップアンテナを用いた太陽発電衛星受電用レクテナモジュールに関する研究 ”, 電子通信学会技術研究報告, AP83-55, Jul. 1983 .
- [38] 山田裕輔, シャリアル, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ スリット入円形マイクロストリップアンテナの特性 ”, 電子情報通信学会技術研究報告, A-P97-65, pp. 41-48, Jul. 1997 .
- [39] 山田裕輔, シャリアル, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ 高調波の再放射を抑圧するスリット入円形マイクロストリップアンテナに関する考察 ”, 電子情報通信学会技術研究報告, EMCJ97-35, pp. 7-14, Sept. 1997 .
- [40] 山田裕輔, シャリアル, 大宮 学, 伊藤精彦 : “ スリット入円形マイクロストリップアンテナの高調波再放射抑圧特性 ”, 電子情報通信学会論文誌B- , vol. J81-B- , no. 6, pp. 575-583, Jun. 1998 .
- [41] M. Omiya, Syahrial, N. Tamura, Y. Yamada, and K. Itoh :“ Design of Circular Microstrip Patch Antennas with Slits Suppressing Re-radiation of Higher Harmonics ”, The Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 1999), p. 238, Mar. 1999.
- [42] Syahrial, N. Tamura, Y. Yamada, M. Omiya, and K. Itoh :“ Study of Circular Microstrip Patch Antennas with Slits Receiving

- Microwave Energy and Suppressing Higher Order Harmonic Re-radiation", IEEE Organized Session, 337, Oct. 2000.
- [43] シャリアル, 田村尚之, 山田裕輔, 大宮 学, 伊藤精彦: “ レクテナ素子として使用するスリット入円形マイクロストリップアンテナに関する考察 ”, 電子情報通信学会論文誌B, vol. J84-B, no. 2, pp.244-253, Feb. 2001 .
- [44] シャリアル, 大宮 学, 伊藤精彦: “ SPS2000用受電アンテナの整流回路に関する解析 ”, 平成8年度電気関係学会北海道支部連合大会, 87, Oct. 1996.
- [45] Syahrial, N. Tamura, M. Omiya, and K. Itoh :“ Considerations on Matching Circuits for Rectenna Rectifying Circuits ”, 平成11年電気関係学会北海道支部連合大会, 121, Oct. 1999.
- [46] 篠原真毅, 古川正利, 三浦健史, 中井裕二, 松本 紘: “ レクテナの大規模アレイ化に関する研究 ”, 電子情報通信学会技術研究報告, A-P95-15, May 1995 .
- [47] 篠原真毅, 松本 紘: “ レクテナアレイ直流出力のアレイ要素相互接続法依存性の研究 ”, 電気学会論文誌B, vol. 117-B, no. 9, Sept. 1997 .
- [48] 三浦健史, 篠原真毅, 松本 紘: “ マイクロ波電力伝送用レクテナ素子の接続法に関する実験的研究 ”, 電子情報通信学会論文誌B, vol. J82-B, no. 7, pp. 1374-1383, Jul. 1999 .
- [49] 三浦健史, 平山勝規, 篠原真毅, 松本 紘: “ マイクロ波電力伝送用レクテナの大電力化に関する研究 ”, 電子情報通信学会論文誌B, vol. J83-B, no. 4, pp. 525-533, Apr. 2000 .
- [50] 藤野義之, 藤田正晴: “ マイクロ波受電用レクテナの高調波再放射の評価に関する実験的研究 ”, 電気学会論文誌A, vol. 117-A, no. 5, pp. 490-495, May 1997 .
- [51] 藤野義之, 藤田正晴, 賀谷信幸, 日下規男: “ 2重偏波レクテナの偏波角特性に関する実験 ”, 電子情報通信学会論文誌B-II, vol. J80-B-II, no. 11, pp. 963-975, Nov. 1997 .
- [52] 藤野義之, 石井 守, 藤田正晴: “ 成層圏無線中継システム用送電ビーム制御のための到来角検出部に関する基礎実験 ”, 電子情報通信学会論文誌B-II, vol. J80-B-II, no. 9, Sept. 1997 .
- [53] 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, pp. 657-661, Jun. 1998 .
- [54] 村尾洋二, 高野 忠: “ 無線電力伝送における開口面アレー形送電アンテナとレクテナの設計に関する一検討 ”, 電子情報通信学会論文誌B-II, vol. J81-B-II, no. 1, pp. 46-53, Jan. 1998 .