

7. 成層圏無線中継システム用送電アンテナビーム 制御方式の提案

藤野 義之*¹ 藤田 正晴*²

(1998年6月15日受理)

7. PROPOSAL OF A POWER TRANSMISSION BEAM CONTROL TECHNIQUE FOR A STRATOSPHERE RADIO RELAY SYSTEM

By

Yoshiyuki FUJINO and Masaharu FUJITA

In this paper, we propose an angle and distance measurement technique for beam scanning and focusing of a microwave power transmission antenna that can be used in a stratosphere radio relay system. PN code modulation is applied to the pilot signal transmitted from a flying vehicle in order to obtain accurate and precise positioning. A prototype model for incident angle measurements was developed and tested in order to verify the concept proposed.

[キーワード] 成層圏無線中継システム、マイクロ波電力伝送、送電アンテナ、ビーム制御
Stratosphere radio relay system, Microwave power transmission, Transmitting antenna, Beam steering

1. ま え が き

成層圏無線中継システムでは高度約 20 km に滞空する飛行体へ向けて、地上からマイクロ波を用いて電力を伝送する。カナダにおける同様な検討例⁽²⁾によれば、500-1000 kW の電力の電波を直径 85 m のアンテナから送信し、飛行体の位置で直径約 30 m のビームスポットにエネルギーを集中させる。ビームスポットの直径は飛行体の寸法より若干大きい程度であるから、送電アンテナ

ビームの追尾にはかなりの確度が要求される。送電周波数として ISM 帯（産業・科学・医療用周波数）の 2.45 GHz を仮定すると、20 km 離れた受電点は直径 85 m の送電アンテナの近傍界となるため、飛行体の位置周辺において観測される送電波は球面波となる。したがって、受電点にビームスポットを形成するためには、送電アンテナの位相分布をビーム走査方向のみならず、送電距離に応じて変更し、フォーカシングを行う必要がある。

従来、移動体へのマイクロ波送電用の自動追尾アンテナとしては、開口面アンテナのアレーを使用するシステム⁽³⁾や、レトロディレクティブアレー⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾が想定されており、また、実際のデモンストレーション実験では、テレビカメラにより飛

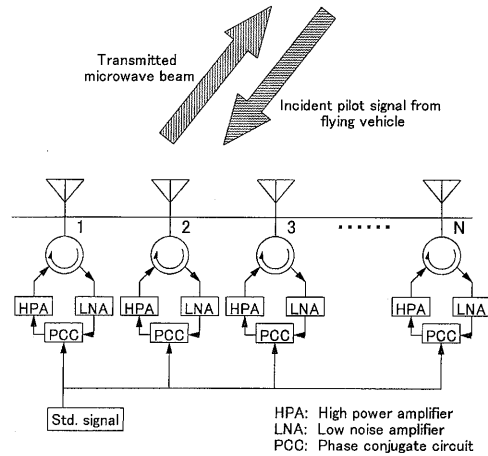
*1 企画部企画課（ATR環境適応通信研究所出向中）

*2 地球環境計測部

本論文の内容は文献(1)で発表したものである。

行体位置を計測する方法⁽⁹⁾が使われてきた。これらのシステムのうち、様々な検討例があるレトロディレクティブアレーに関して、その原理的な構成を第1図に示す。受電用レクテナの位置から、低出力電力のパイロット信号を発信し、これを1からNまでの番号で示される各アンテナ素子で受信する。受信信号は、サーキュレータを通過した後、低雑音増幅器(LNA)で増幅される。この信号は位相共役回路に入力され、受信信号の共役位相波が生成される。この信号はまだ微弱であるので高出力増幅器(HPA)において電力増幅を行ったのち、サーキュレータを通じてアンテナから送信される。位相共役回路を用いて、アレーの各素子の位相差を制御し、パイロット信号の到達時間が早い素子からは遅く、到達時間が遅い素子からは早く送信する。このことで入射波の波面と送信波の波面を一致させることができ、到来波の方向にビームが形成される。ここで、各アンテナ素子に接続される位相共役回路には共通の基準信号が必要となる。レトロディレクティブアレーを使用すると、入射波の到来方向と同一方向に電波を送信することができるが、本方式では原理的に送電アレーの素子数と同数の受信系を必要とするので、成層圏無線中継システム用の送電アンテナのような大規模アレーに適用する場合には、コスト面で問題が生じる可能性がある。また、第1図の構成図についての議論は送信周波数と受信周波数が完全に一致していることを前提としているが、大電力マイクロ波を送電する場合に送電周波数とパイロット信号の周波数を完全に一致させるのは現実的ではない。従って、これらの周波数に僅かに差を持たせることが必要になるが、このために生ずる位相差により送電ビームがパイロット信号の方向を向かず、指向誤差を生ずる。この点を解決するための一つの方法として、2つの異なる周波数のパイロット信号を使用する方式などが提案されている⁽⁹⁾。

レトロディレクティブアレーでは受信機数が増加するので、コスト面に欠点を有しているが、これに代わる方式として、飛行体から送信されるパイロット信号の到来角を求めめるために送電アンテナの位置で測距を行って送電アレーの制御を行う方式が考えられた^{(10), (11)} (以降、この方式を測距・



第1図 レトロディレクティブアレーの原理的構成図

第1表 レトロディレクティブ方式と測距・測角方式の比較

	レトロディレクティブ方式	測距・測角方式
応答速度	優れる	システム設計による
飛行体位置検出	外部付加回路無しでは不可能	可能
パイロット信号受信機数	アンテナ素子数と同じ	3ないし4
フォーカシング	パイロット信号発射位置に自動的に焦点が合う	球面波補正を含めた形で計算を行う

測角方式と呼ぶ)。レトロディレクティブ方式と測距・測角方式の特徴の比較を第1表に示す。レトロディレクティブ方式では計算機を用いた演算が不要であるため、極めて早い応答が得られる。さらに、パイロット信号の送信位置に自動的に焦点が合う構造となっているため、フォーカシングに対し特別な考慮をする必要はない。しかしながら、同方式では送電アレーの素子数と同数の受信機が必要であり、大規模な送電システムの場合、その実現は容易でない。また、外部付加回路なしでは飛行体の位置検出が不可能であるという欠点がある。

これに対し、測距・測角方式では電波干渉計で検出した電波の到来時間差を用いて送電アレーを制御するので、応答速度の検討が必要であるほか、フォーカシングのための特別な工夫も必要であるが、受信機数を3ないし4台まで削減することができるため、大規模アレーではコスト面で有利に

なる可能性がある。しかしながら、本方式では電波干渉計を構成するパイロット信号受信用アンテナの間隔を1波長以上とすると、キャリアの位相項に360度の不確定性が発生するので、基線長を1波長以上とすることができず、測定精度を向上させるには工夫が必要である。また、受信機数を4台以上に増加し、冗長な受信機を用いて送受信機間の時刻を正確に同期させれば、伝搬時間の絶対値を求めることができるので⁽¹²⁾、これにより飛行体の位置検出が可能である。あるいは、追加した受信機を既存の基線上に設置し、位置の異なる受信機のデータの組み合わせから、飛行体の仰角を複数個算出する。これらのデータの違いを用いて飛行体までの距離を算出することで、飛行体の位置を検出できる。

また、コストに関しては、NASAによって行われた高高度プラットフォームシステムに関するフィジビリティ・スタディ⁽¹⁰⁾では、測距・測角方式を1とすると、レトロディレクティブ方式はその1.5倍から3倍程度になると試算されている。

本論文では、パイロット信号として拡散変調された信号を使用することによって、基線長を波長より十分に長くとることができ、電波の到来方向を高精度で測定することのできるシステムを提案するとともに、原理モデルを用いて、基本的な動作を確認した結果について述べる。

2. 成層圏無線中継システムの送電アンテナの追尾性能に関する要求

ここで、実際に電波干渉計を用いた測距・測角方式を構成する際に、どの程度の角度検出誤差が許容できるかについて検討を行う。ここで、飛行体は一定高度を巡航し、ビームスポットも同じ高度にあるとする。飛行体が水平飛行しているとすると、ビーム幅は同じでも仰角が低いほど飛行体位置でのビームスポット領域は拡大されるため、飛行体の角度検出誤差は仰角に依存する。そこで、送電アンテナのビームスポットの水平方向の距離の検出誤差をEとし、送電アンテナの位相中心からみた飛行体の仰角を θ 、高度をhとすると、検出誤差を見込む誤差角 α は次式で示される。

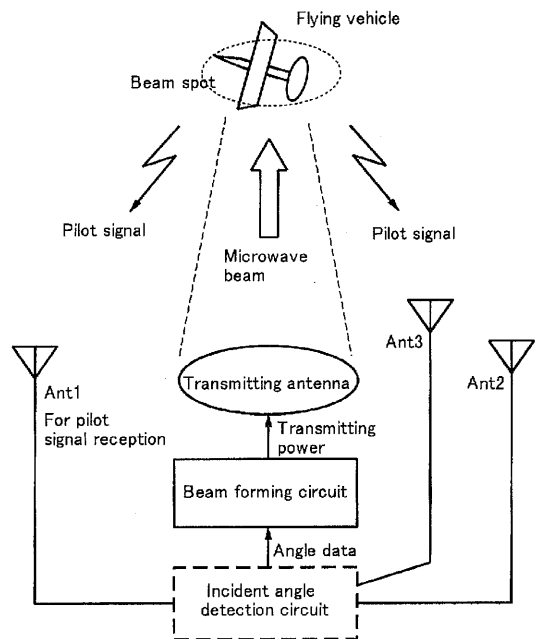
$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{E \cdot \sin^2 \theta}{h}\right) \dots\dots\dots(1)$$

測角精度の要求は α が最小となるときが一番厳しいので、仰角が低いほど高い測角精度が必要になる。いま最小仰角を $\theta=45^\circ$ とし、 $h=20$ km、 $E=10$ mを仮定すると、 $\alpha=0.014^\circ$ を得る。この値が測角精度として望まれる値である。この値を達成するには大まかにいって、伝搬距離28 kmのとき、5 m以内の誤差で相対距離の差を測定しなければならない。

また、飛行体の移動速度は当該高度における風速をもとに最大で50 m/sが想定されている⁽¹³⁾ので、飛行体の位置のビームスポットからのずれとして5 mを許容しても、100 msec以内にビームの方向を修正しなければならず、実時間処理が必要である。

3. 装置の構成

今回提案する送電アンテナの概念図を第2図に示す。飛行体から送信されるパイロット信号は地上の3点で受信され、それぞれ、到来角度検出部(incident angle detection circuit)に入力される。当該検出部において、各アンテナへの信号の到来時間差をもとに3次元測位⁽¹²⁾を行い、送電アンテナから見た飛行体の方位角および仰角を前

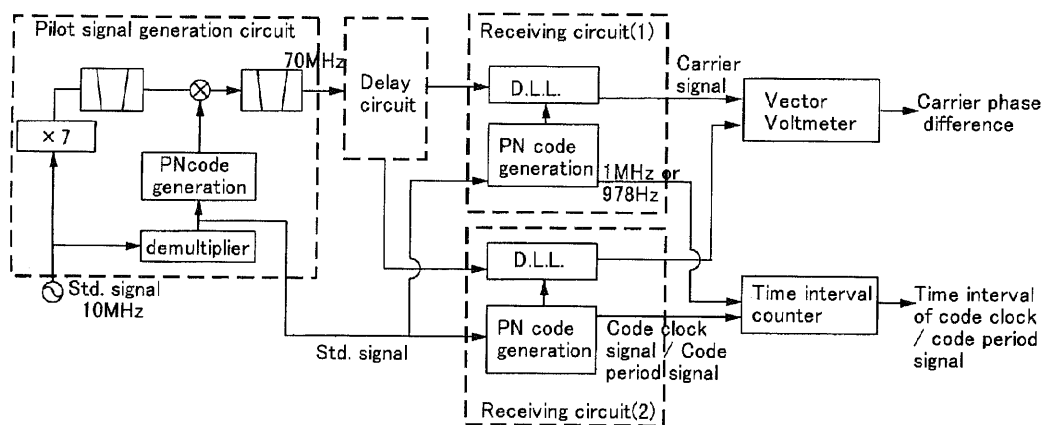


第2図 送電アンテナの概念図

述の誤差範囲内で検出する。フォーカシングを行うためには受信機数を増加して送電アンテナと飛行体間の距離を計測する必要がある。このとき、測距の精度は概ね送電波長の10分の1以内が必要となる。これらの情報は送電制御部 (beam forming circuit) に送られ、飛行体の方向に送電ビームが形成される。ここで、パイロット信号には拡散変調された信号を利用する。これは、干渉計方式を用いて到来角測定を行う場合、キャリアの位相情報の比較のみでは360度の不確実性があるため、受信アンテナ間の基線長を波長以上とすることができず、測角精度の点で問題があるためである。拡散変調を利用すれば、基線長を基準信号の位相が保持できる限界まで伸ばすことができる。成層圏無線中継システムでは直径100m程度の送電アンテナが想定されているので、この周囲に3基の受信アンテナを設置することが現実的であると考えられる。今回、測距・測角方式に基づく送電アンテナのビーム制御のための基礎実験として、システムの一部を構成する角度検出部について検討を行い、基本的な動作特性を原理実験モデルを用いて取得した。

第3図に到来時間差検出の系統図を示す。実際は3次元測位をする必要があるが、今回は原理実験として2次元の構成となっている。実験用の回路は、破線で囲んだ3つの部分に分かれている。まず、パイロット信号送信部 (Pilot signal generation circuit) であるが、これは飛行体に搭載されるパイロット信号発生器を模擬している。基準信号 (Std. signal) を用いてPN符号生成

部 (PN code generation) で擬似M系列のPN (Pseudo Noise) 符号を発生し、これを用いて同じ基準信号を7通倍して得られたキャリア信号に拡散変調をかける。変調ビット率は1.023 Mbpsであり、キャリア周波数は70 MHzである。このようにして生成された信号は、遅延部 (Delay circuit) に入力される。これは、パイロット信号の送信アンテナから受信アンテナまでの伝搬をシミュレーションする部分である。遅延部として第4図に示す2種類を用いた。一つは回路部のみを用いてシステムの動作確認を行うためのもので、パワーデバイダ (Power Divider) とプログラマブルディレイライン (Programmable delay line) を使用して遅延を生じさせた。もう一つは70 MHz帯のパイロット信号送信用アンテナ1基と受信アンテナ2基を使用して、電波暗室内に実際の伝搬路を構成した。アンテナ素子にはダイポールアンテナを使用した。遅延部を経由した信号は、受信部 (receiving circuit) に入力される。ディレイロックループ (D.L.L.) によって拡散復調を行った後、キャリア信号はベクトル電圧計 (Vector voltmeter) で、コードクロックおよびコード周期信号はタイムインターバルカウンタ (Time interval counter) で、それぞれの位相差または遅延時間差を計測する。第2表に、今回使用したパイロット信号の変調形式および周波数をまとめて示す。第2表のそれぞれの信号は、その波長までの距離の計測が可能であるから、977.5 Hzのコード周期信号では約300 kmまで、1 MHzのコードクロック信号では300 m



第3図 到来角度検出部実験回路の構成

第2表 パイロット信号の変調形式および周波数

変調方式	BPSK (PN符号拡散スペクトラム変調)
変調ビット率	1.023Mbps
符号長	1023
コードクロック信号周波数	1MHz
コード周期信号周波数	977. Hz (1MHz/1023)
キャリア周波数	70MHz

第3表 回線設計において仮定した値の一覧

仮定する量	変数	設定値
ビーコン送信電力	P_t	0 dBW
ビーコン送信アンテナ利得	G_t	3 dBi
受信アンテナ利得	G_r	6 dBi
受信アンテナ雑音温度	T_a	160 K
受信機NF	NF	2.0 dB
受信機内部雑音温度	T_r	172 K
伝搬距離	d	30 km
ビーコン周波数	f	2.0 GHz
コードクロック周期	$1/BW$	1 μ s
受信機等価雑音帯域幅	BW_0	± 2 kHz

ルカウンタの確度 (0.1 nsec 程度) より大きなときに、計測が可能である。また、周波数が高いときには、位相差を測定する2つの信号を共通なローカル信号によって中間周波に変換すれば、位相差を保持したまま、時間間隔が拡大されるので計測が可能となる。今回は実験の都合上、受信部のクロック用の基準信号を送信側から供給したが、これは受信信号の再生キャリアからクロックを合成し、基準信号とする回路構成に変更することで不要となる。

また、実際の成層圏無線中継システムを想定した場合の回線設計を行うことで、測距精度の理論値について検討を行った。第3表に回線設計に使用した値を一覧としてまとめた。ここで、成層圏無線中継システムで不明な値は、GPSのシステム値の代表的な値で置き換えた。受信回線品質 (C/N_0) は次式で表される。

$$C/N_0 = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r}{kT_s} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 T_s はシステム雑音で、

$$T_s = T_a + T_r \dots\dots\dots(3)$$

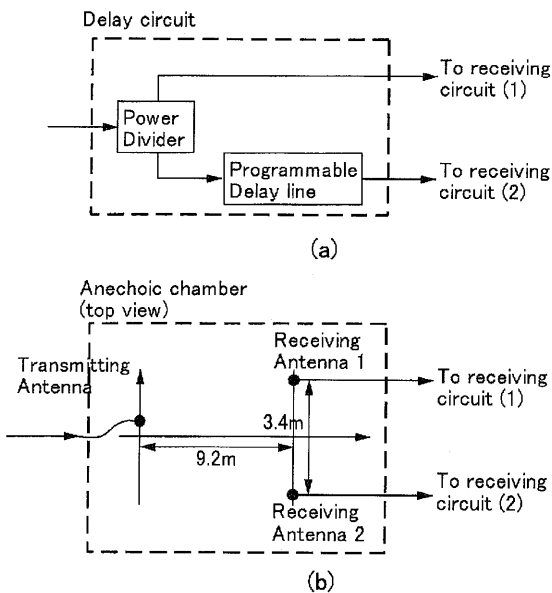
で示される。従って、 $C/N_0 = 84.4$ [dB Hz] となる。測定時間差の精度を σ [sec] とすると、その概算値は次式で表される⁽¹⁴⁾。

$$\sigma \approx \frac{1}{2\pi BW} \sqrt{\frac{BW_0}{C/N_0}} \dots\dots\dots(4)$$

従って、前述の仮定値を代入すると以下のようになる。

$$\sigma = 0.6 \text{ [nsec]} = 0.18 \text{ [m]}$$

このように、回線設計上ではコードクロックのみで1送電波長前後までの測定距離精度が得られると考えられる。しかしながら、これはあくまでも測距精度であり、確度がこの値までとれるかどうかについては実験を行って確かめる必要がある。



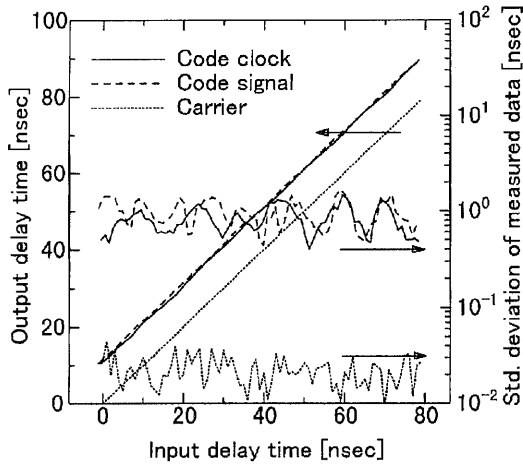
第4図 遅延部の実験回路の構成
(a)回路部による試験時 (b)空間伝搬による試験時

まで、70 MHz のキャリアでは 4.28 m までの距離差の測定をすることができ、各信号の 1000 分の 1 の位相を計測をすることで順次、位相不確定性を除去することが可能である。このような僅かの位相差は、その信号の周波数が低く、2 信号の時間差が現在商用化されているタイムインターバ

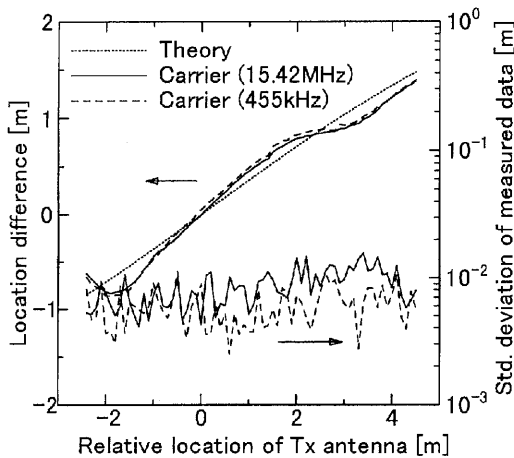
4. 実験結果

まず、回路部での動作確認のため、第3図の実験回路の遅延部に第4図(a)の回路を接続し測定を行った。プログラマブルディレイラインの遅延量を制御して入力遅延時間を変化したときの受信部(1)と受信部(2)の間の出力遅延時間差を、コードクロック信号とコード周期信号、およびキャリア信号のそれぞれについて、ジッタ量とともに第5

図に示す。入出力遅延時間差の間の直線性は良好であり、ジッタ量は距離に換算してコード周期信号とコードクロック信号で0.3 m程度、キャリア信号で0.01 m程度であった。これは、回線品質 (C/N_0) の良い状態でのジッタ量であり、実際の回線では C/N_0 の劣化によってこの値よりも測距精度は落ちると考えられる。次に、実際にパイロット信号を伝搬させた状態で測定を行った。電波暗室内の各アンテナの位置を第3図(b)に示す。2本の受信アンテナを3.4 mの間隔で固定し、両受信アンテナを結ぶ直線と平行で9.2 m離れた直線に沿って送信アンテナを動かした。軸の原点は、それぞれの送受アンテナ間の距離が同じとなる点



第5図 回路部による試験時のコードクロック信号およびコード周期信号の入力遅延対出力遅延特性



第6図 空間伝搬による試験時の距離差対送信アンテナ位置 (キャリア信号)

としている。送信アンテナの位置を変化したときの、キャリア信号位相の比較により算出した距離差の測定値と幾何学的に求めた距離差の理論値を第6図に示す。また、キャリア信号のジッタを同じ図に示す。ジッタ量は距離に換算して0.01 m、すなわち送電波長の12分の1であり、フォーカシングのために10分の1波長以下の測定が必要になったとしても十分であると考えられる。しかしながら、測定値と理論値には最大0.3 m程度の相違があるが、これは電波暗室壁面からの反射波の影響であると考えられ、今後、より反射の少ない環境を使用して必要な精度が得られていることを示す必要がある。

また、空間を伝搬させたときのコードクロック及びコード周期信号の遅延時間差の測定値には前述の反射波によって、理論値と大きな相違が生じたため、そのデータは第6図には示していない。

5. ま と め

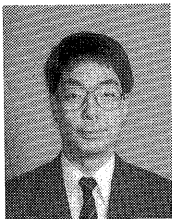
本論文では成層圏無線中継システム用送電アンテナ用として、測距・測角方式によるビームの制御方式を提案し、パイロット信号の到来角計測のための基本的な実験装置を試作し、その特性について検討を加えた。

回路部を用いた試験ではコードクロック信号およびコード周期信号の使用により、0.3 mのジッタ量での距離の計測が可能であり、測角精度として必要な値が得られていることが示された。また、空間を伝搬した試験では0.01 mのジッタ量で距離の計測が可能であり、フォーカシングに必要な1/10波長以内の精度が得られていることを確認した。

ここで提案した方式はレトロディレクティブ方式と比較して実時間でかなりの規模の処理をする必要があり、応答速度の面でも検討が必要であるが、受信機の数的大幅に少なくなるために安価になる可能性がある。また、実際の運用においては航行状況を地上で監視するために飛行体の位置や速度を測定し記録する装置が必要であるが、この装置は本送電ビーム制御装置と共用することができる。今後、パイロット信号のキャリア周波数を実証的な、マイクロ波帯として実証を行う必要がある。

参 考 文 献

- (1) 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”, 信学論 B-II, Vol. J80-B-II, No.9, pp.800-804, Sep. 1997.
- (2) J. J. Schlesak, and A. Alden, “SHARP rectenna and low altitude flight tests”, Proc. of IEEE Global Telecomm. Conf., New Orleans, Dec. 1985.
- (3) T. W. R. East, “A self-steering array for the SHARP microwave powered aircraft”, IEEE Trans. on Antennas and Propag., Vol.AP-40, No.12, Dec. 1992.
- (4) S. N. Andre, and D. J. Leonard, “An active retrodirective array for satellite communications”, IEEE Trans. on Antennas and Propag., Vol.AP-12, pp.181-186, Mar. 1964.
- (5) E. J. Putzer, and R. N. Ghose, “Redirective and retrodirective antenna arrays”, IEEE Trans. on Antennas and Propag., Vol.AP-17, pp.276-279, Mar. 1969.
- (6) 太田堯久, 水沢丕雄, 小野誠, 手塚雅之, 沼崎正, “Lバンドレトロディレクティブアレーアンテナの試作”, 三菱電機技報, Vol.55, No. 4, pp.291-296, 1981.
- (7) 松本紘, 賀谷信幸, 長友信人, 藤田康毅, 伊地知幸一, 永島敬一郎, 橋爪隆, “マイクロ波電力伝送のためのレトロディレクティブシステムの検討”, 第8回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, pp.33-34, 1989.
- (8) 松本紘, 賀谷信幸, 藤田正晴, 藤野義之, 藤原暉雄, 佐藤達男, “MILAX の成果と模型飛行機”, 第12回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, pp.47-52, 1993.
- (9) 片木孝至, 阿部久, 沼崎正, “レトロディレクティブアレーアンテナのビーム指向誤差改善の一方式”, 昭58信学総全大, 3-117, 1983.
- (10) D.L. Bouquet, D.W. Hall, and R.P. McElveen, “Feasibility study of a carbon dioxide observational platform system”, Volume 1 -Technical-, NASA Contractor's report, CR-179225, Dec. 1986.
- (11) M. Ohmiya, and K. Itoh, “Development of a functional system model of the solar power satellite, SPS2000”, Proc. International Symp. on Antennas and Propag., Chiba, pp.417-420, Sep. 1996.
- (12) 測地学会編: “GPS-人工衛星による精密測量システム-”, 日本測量協会, 1989.
- (13) J.J. Schlesak, A. Alden, and T. Ohno, “A microwave powered high altitude platform”, Proc., IEEE MTT-S International Symposium, May 1988.
- (14) 山本稔, 小坂克彦, 浦塚誠, 原田喜久男, “SSRR 拡散変調方式による測距装置”, 電波研季, 21, 112, pp.1-17, 1975.



藤野 義之
Yoshiyuki FUJINO
企画部 企画課 (ATR 環境適応通信研究所出向中)
E-mail: fujino@acr.atr.co.jp



藤田 正晴
Masaharu FUJITA
地球環境計測部
マイクロ波リモートセンシング
E-mail: mfujita@crl.go.jp

.....

