

簡易衛星追尾型 2 周波共用三角形パッチアレーアンテナ

田中 憲光^{†a)} ヨサファット テトオコ スリ スマンティヨ^{††}
 金子 謙一[†] 石出 大輔[†]
 高橋 応明^{††} 伊藤 公一^{††}
 山本 伸一^{†††} 三浦 周^{†††}

A Simple Satellite-Tracking Dual-Band Triangular-Patch Array Antenna

Toshimitsu TANAKA^{†a)}, Josaphat TETUKO SRI SUMANTYO^{††}, Kenichi KANEKO[†],
 Daisuke ISHIDE[†], Masaharu TAKAHASHI^{††}, Koichi ITO^{††},
 Shin-ichi YAMAMOTO^{†††}, and Amane MIURA^{†††}

あらまし 本論文では、ETS-VIII を利用した移動体衛星通信実験に用いる移動局用アンテナとして開発した 2 周波共用三角形パッチアレーアンテナと、衛星通信実験へ向けて行われた衛星通信模擬実験について述べる。はじめに送受信の 2 周波共用と 20 dB 以上のアイソレーション、更に 5 dBic 以上の利得を確保するために、給電の ON, OFF のみで方位角方向のみにビーム切換を行うアンテナについて、モーメント法を利用した数値計算と測定から検討した。次に実際に使用した場合における放射特性を把握するため、アンテナを実験車両の屋根に搭載し、高さ 32 m の建物に設置した模擬衛星局からの電波を利用して衛星通信模擬実験を行った。実験によるデータの解析結果により、車両搭載時においても給電の ON, OFF のみによりビーム切換が可能であることを確認し、本アンテナが有効であることを示した。

キーワード 移動体衛星通信, ETS-VIII, ビーム切換, 三角形パッチアレーアンテナ, 2 周波共用

1. ま え が き

近年、移動通信需要の高度化や、災害対策などの点から堅牢な通信への要求が高まっており、いつでも、どこでも、だれでも通信可能な移動体衛星通信の実現が求められている。一般に衛星通信は、地上災害時にも使用可能な点や、サービスエリア内であれば広範囲において一定の通信品質を確保できる点など多くのメ

リットがあるため、民間事業者による整備が見込めない過疎地域の通信手段や、遠隔教育、医療、山岳、海上救助のための通信インフラとして、今後も重要な利用が考えられる。しかしながら現状では、地上局システムが煩雑であることや、サイズ、コストの面から、衛星通信の利用者並びに技術の普及は進んでおらず、商用化されている可搬形の衛星携帯電話に関しても限られた機関での利用にとどまっている。このような背景を受け、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) により打上げ予定の技術試験衛星 VIII 型 (Engineering Test Satellite-VIII, ETS-VIII) [1], [2] では、この移動体衛星通信の技術開発、また医療、災害対策など数多くのアプリケーションに対する実証実験が行われる予定である。我が国においては、既に S 帯を用いた可搬形端末による音声を中心とした移動体衛星通信や、動画を含む放送サービス [3] が行われているが、近い将来このシステムを更に発展させたものとして、一般乗用車や、バス、トラックなどの商用車に手軽に装備し、CD 並の音声や画像、

[†] 千葉大学大学院自然科学研究科, 千葉市
 Graduate School of Science and Technology, Chiba University, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{††} 千葉大学電子情報基盤技術研究施設, 千葉市
 Center for Frontier Electronics and Photonics, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{†††} 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター, 千葉市
 Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{††††} 独立行政法人情報通信研究機構鹿島宇宙通信研究センター, 鹿嶋市
 Kashima Space Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, 893-1 Hirai, Kashima-shi, 314-8501 Japan

a) E-mail: toshi.tanaka@m.icece.org

インターネットなどを含めた双方向通信も利用可能な車載用の移動体衛星通信システムの実現が期待される。

この移動体衛星通信の実現には、移動体に取り付けるアンテナの形状及び特性が非常に重要である。具体的には用途やシステムにより異なるが、広範囲の角度で利得が高く、小型、薄型、軽量であることが要求される。このような特性をもつ車載用アンテナは、これまでに多くの検討が行われており [4]、主に円錐ビームアンテナ [5] ~ [7] と衛星追尾型アンテナ [8] ~ [12] が挙げられる。円錐ビームアンテナは、衛星の仰角方向において、水平面内では無指向性であり、垂直面内のビーム幅が広く衛星追尾が不要である利点をもつが、水平面内では無指向性であるため一般的に高い利得を実現しにくい。ピーク利得では円錐ビームアンテナでも 6 dBic 程度の利得を得られるが、仰角方向のビーム幅に限界がある。また、送受信ポート間のアイソレーションを確保するアンテナについては報告がない。一方、衛星追尾型アンテナは、移動局の方位が変わった際にも衛星の方向にビームを向ける衛星追尾機能をもつため、円錐ビームアンテナに比べて高い利得を実現し、外来からの雑音を受けにくい特長をもつ。更に、素子構造を工夫することで送受信のポート間のアイソレーションを確保することも可能であり [18]、移動体衛星通信システム全体の負担を軽減できる利点がある。アンテナの追尾機構には、モータ等を用いてアンテナ自体を回転させて衛星追尾を行う機械追尾 [8] と、移相器やスイッチング回路、近年では DSP によるリアルタイム演算で電子的にビーム操作を行う電子追尾 [9] ~ [12] などがある。特に電子追尾は、機械追尾に比べて小型・軽量化に向けており、モータ等の動作部分がないため、高速追尾やメンテナンスフリーなどの利点がある。しかしながら電子追尾は、機械追尾に比べて電力分配器及び移相器、若しくは信号処理回路等が必要となるため、一般的に給電回路及び付加回路が複雑になる。またアンテナの素子数が増えるとともに、各素子の給電を制御する移相器やスイッチング回路の数、それに伴うコストが増加することから、素子数が少ない簡易な給電回路で構成する衛星追尾型アンテナが求められる。

本論文では、ETS-VIII を利用した移動体衛星通信実験用として、車載を対象とした簡易衛星追尾型 2 周波共用三角形パッチアレーアンテナの構造、及び特性について述べる。アンテナは図 1 のように車両の屋根に設置し、3 方向の少ないビーム切換により簡易衛

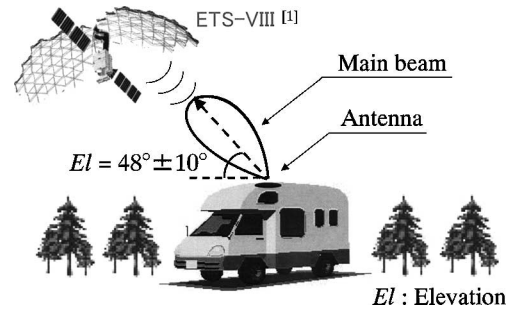


図 1 車載用移動体衛星通信アンテナ
Fig. 1 Mobile satellite communications antenna for vehicle application.

星追尾を実現する。2. では、本研究にて対象とした ETS-VIII 利用による移動体衛星通信の仕様と移動局用アンテナの目標値について説明し、開発したアンテナの構造と諸特性について、数値計算と実験の両面から述べる。3. では、開発した本アンテナを実験車両に搭載し、高さ 32 m のビル屋上に設置した模擬衛星局から送信される電波を移動しながら受信する衛星通信模擬実験について、その概要を説明し、実環境においても本アンテナが有効であることを述べる、最後に 4. にてむすびとする。

2. 簡易衛星追尾型三角形パッチアレーアンテナ

2.1 アンテナの仕様

表 1 に、今回目標とした ETS-VIII を用いた通信実験における移動体衛星通信用アンテナの仕様を示す。簡易なシステムで移動体衛星通信を実現することを念頭に、目標とする伝送レートを数百 kbit/s 程度とし移動局側のアンテナ利得は 5 dBic を目標とした。衛星側のアンテナ利得を 41 dBic、送信出力を 20 W として回線設計した場合、本アンテナ利得で伝送レート 128 kbit/s、誤り率 1×10^{-5} で回線マージンを 5 dB 確保することができる。また、通信を対象とするため送受 2 周波共用とし、なおかつ通信システムに搭載するダイプレクサの負担を軽減するために、アンテナで 20 dB のアイソレーションをとることを目標とした。アンテナの開発にあたり想定したシステムを図 2 に示す。アンテナ系にはスイッチング回路を付属し、追尾系からの信号を受けて素子アンテナへの給電を ON, OFF 制御することで所望のビームを形成する。アレーアンテナは、仰角 48° 、方位角 $\pm 60^\circ$ の広い範囲において 5 dBic のビームを形成し、水平面内の 3 方向に

表 1 アンテナの仕様と目標

Table 1 Specifications and objectives on the antenna for mobile satellite communications.

仕様		
周波数帯域	送信(Tx)	2655.5 MHz ~ 2658.0 MHz 帯域幅 25MHz (0.09%)
	受信(Rx)	2500.5 MHz ~ 2503.0 MHz 帯域幅 25MHz (0.10%)
偏波	送受ともに左旋円偏波	
目標		
角度範囲	仰角 (El)	東京都内48° (全国使用の場合38° ~58°)
	方位角 (Az)	0° ~ 360°
最低利得	5 dBic	
最大軸比	3 dB	
アイソレーション	20 dB	

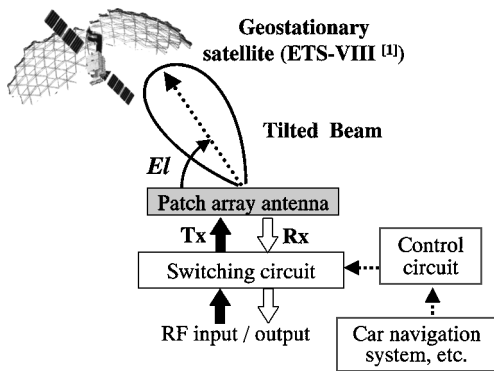


図 2 簡易衛星追尾型アンテナシステムの概要

Fig. 2 Outline of the simple satellite tracking system.

ビーム切替を行うことで全方位角を 5 dBic 以上でカバーする方式とした。これまで提案されてきたフェイズドアレーアンテナ [9] ~ [13]、及びその追尾方式 [14] などとは異なり、切り換えるビームの数が 3 方向のみであるため、高い衛星追尾精度をもつ必要はない。追尾系は、近年急速に普及しているカーナビゲーションシステムなどを利用して、現在の車の方向を基準とした相対的な衛星方向及び最適なビーム方向を判断する。また、通信システム全体の負荷を軽減するために、アンテナ自身にフィルタの特性をもたせ、送受信の入出力ポート間で 20 dB 以上のアイソレーションを確保できることを目標とした。以下、開発したアンテナのモーメント法 (Ansoft 社 Ensemble Ver 8.0) による数値計算結果、並びに試作したアンテナの測定結果について述べる。なお、地板は無限として数値計算を行った。

2.2 素子アンテナ

素子アンテナには、2 点給電型円偏波正三角形パツ

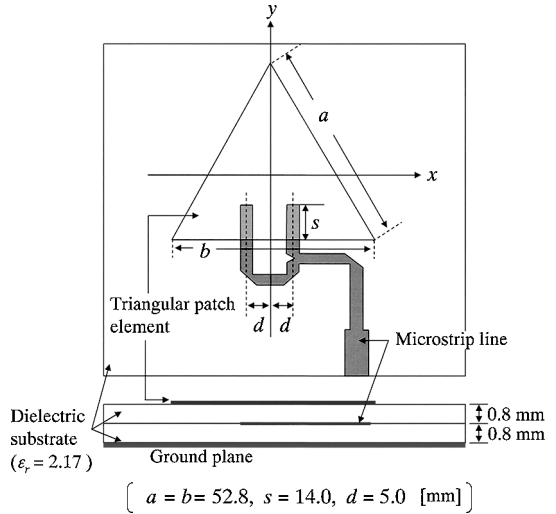
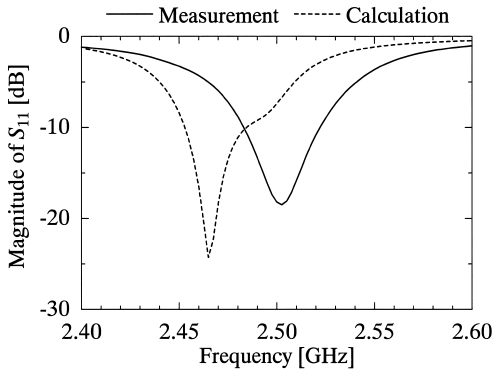


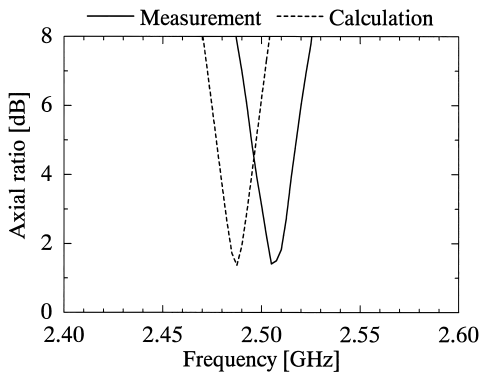
図 3 三角形パツチアンテナの構造

Fig. 3 Configuration of the triangular-patch antenna element.

チアンテナを採用した。検討した三角形パツチアンテナは、同一周波数で動作する 2 点給電型円偏波四角形パツチアンテナと比較して、放射素子の面積を 78% に小型化でき、なおかつ円形配列を行った際にも四角形より素子間隔及びアレーアンテナ全体のサイズを縮小することが可能である。素子アンテナの構成を図 3 に示す。車の屋根に搭載することを目的としているため、厚さ 1.6 mm の薄い平面構造とした。更に製作の簡略化と低価格化を図るため、アンテナの給電には、放射素子と導体地板の間にマイクロストリップ線路を挿入し、電磁結合を利用して給電を行う方式を採用した [15]。そのため、背面給電のようにスルーホールなどの立体構造やはんだ付けを必要とせず、プリント基板の積層のみでアンテナを構成することが可能である。また、給電部とアンテナ素子が同一平面にないため、共平面給電に比べて不要放射が少なく、アレーアンテナの設計が容易になることも特長である。三角形パツチアンテナの円偏波化には、素子を二等辺三角形として縮退分離を利用する方法など [16], [17] が知られているが、三角形の底辺と斜辺 (図 3 の a, b) 及び給電点位置の合計三つのパラメータを最適化する必要がある。アレー化の際に設計が困難となる。そこで本アンテナでは、設計を容易にすることを目的として素子の形状を正三角形とし、2 本のマイクロストリップ線路を用いた 2 点給電で円偏波化を行った。なお、マイクロストリップ線路は、線路長を一方だけ $1/4 \lambda_g$ 延長



(a) Reflection characteristics



(b) Axial ratio characteristics

図 4 三角形パッチアンテナの入力特性及び軸比の周波数特性

Fig. 4 Frequency performances of reflection and axial ratio.

させることで、2本の線路間に約 90° の位相差を設け、円偏波を得る構造とした。図 4 に 2.50 GHz 用に設計された 1 素子三角形パッチアンテナの反射特性及び軸比の周波数特性を示す。測定値における反射係数が -10 dB 以下となる帯域幅は 1.4%、天頂方向にて軸比が 3 dB 以下となる帯域幅は 0.5% であり、実験に必要な帯域幅を満たす。実験値と計算値は、傾向が一致しているものの、実験値は計算値に比べ周波数が 1% 弱低くなっている。この原因は製作誤差、若しくは数値計算に含まれていないコネクタや、有限地板などの影響である。図 5 に素子アンテナの放射指向性を示す。図に示す放射特性は、前途のような周波数ずれを考慮し、図 4 の軸比が最小となる周波数において評価を行った。最大放射方向で利得 6.2 dBic、軸比 1.3 dB であり、円偏波放射素子として良好に動作している。仰

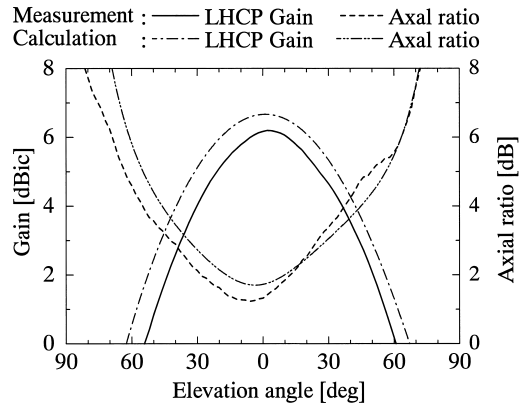


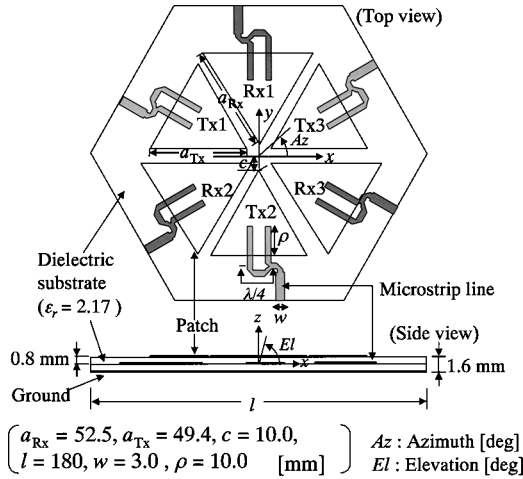
図 5 三角形パッチアンテナの垂直面内放射指向性 ($A_z = 90^\circ$, 測定: $f_m = 2.5025$ GHz, 計算: $f_c = 2.485$ GHz)

Fig. 5 Radiation characteristics in the elevation plane ($A_z = 90^\circ$, Measurement: $f_m = 2.5025$ GHz, Calculation: $f_c = 2.485$ GHz).

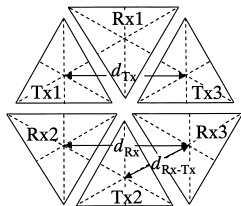
角 48° 方向における軸比は 4 dB 程度あるが、アレー化した際にはシーケンシャル配列により軸比特性が改善されるため、3 dB 以下に抑えることが可能である。

2.3 2 周波共用三角形パッチアレーアンテナ

実験用に開発した 2 周波共用三角形パッチアレーアンテナの構造を図 6 に示す。衛星通信を目的としたパッチアンテナの 2 周波共用化には、積層構造によるセルフダイプレキシングアンテナ [18] がよく知られているが、構造が複雑であることから、本アンテナでは、アレー化の際に受信 2.50 GHz 用と送信 2.65 GHz 用のパッチ素子を同一平面へ交互に配列し、送受 2 周波共用化を行う方法を採用した。素子アンテナには前述した三角形パッチアンテナを採用し、アレー化した際に素子間隔並びにアンテナ全体のサイズを最小になるよう設計した。素子配列には、ビーム切替特性をもたせるため、送信・受信ともに三つの円偏波素子を 120° ずつ回転させ、等しい素子間隔で円形に配列した。このように配列することで同相給電でも素子間には相対的な回転角分の位相差が与えられるため、3 素子のうち一つの素子を 50Ω 負荷へ接続 (以後、この状態を給電 OFF と略記する) すると、 120° の位相差をもった 2 素子のみ給電されることとなり、給電 OFF した素子の方位角から -90° の方向に、低仰角方向へチルトしたビームが形成される。これにより給電 OFF にする素子を切り換えることで、水平面内に 120° ずつ 3 方向にビームを切替が可能となる。給電 OFF にする素子と形成されるビーム方向の対応関係について



(a) Configuration



$$d_{Rx} = 69.82 \text{ mm } (0.58 \lambda_{Rx}), \quad d_{Tx} = 66.72 \text{ mm } (0.59 \lambda_{Tx})$$

$$d_{Rx-Tx} = 39.45 \text{ mm } (0.34 \lambda_0) \quad * f_0 = (f_{Rx} + f_{Tx})/2$$

(b) Spacing between the elements

図 6 2周波共用三角形パッチアレーアンテナの構造
Fig. 6 Configuration of the dual-band triangular-patch array antenna.

は表 2 に示した．本アレーアンテナの設計にあたっては，アンテナの直径を $1.5 \lambda_0$ 程度の小さなサイズに収めることと，仰角 48° 円錐面内の覆域 120° 以上で 5 dBic 以上の利得と 3 dB 以下の軸比が得られることを目的に，素子間隔，素子サイズ，マイクロストリップ線路長などの各パラメータを数値計算によって求めた．なお，本論文にて示す計算値並びに実験値は，アンテナ素子自身の動作と特性を議論するため，スイッチング素子やケーブル等の挿入損は含まれていない．本アンテナの給電回路には，電力 2 分配器と 2 分配された電力を三つの素子へ切り換えるスイッチング回路を必要とするが，システムに最適なスイッチング回路については別途検討を行っている．現在は，スイッチング回路による挿入損及びアイソレーションを，PIN ダイオードを利用した電子スイッチ [19] の値を参考に，

表 2 給電 OFF にする素子とビーム方向
Table 2 Inactivated element and beam direction.

給電OFFにする素子		Patch #1	Patch #2	Patch #3
ビーム方向 (方位角: Az)	受信 (Rx)	0°	120°	240°
	送信 (Tx)	60°	180°	300°

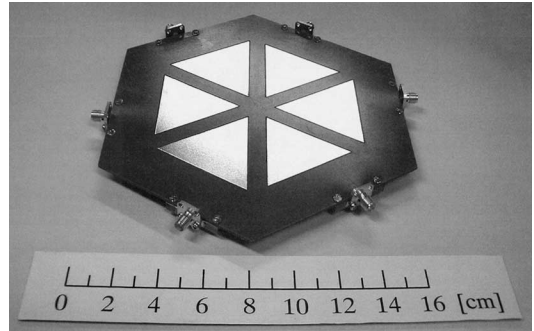
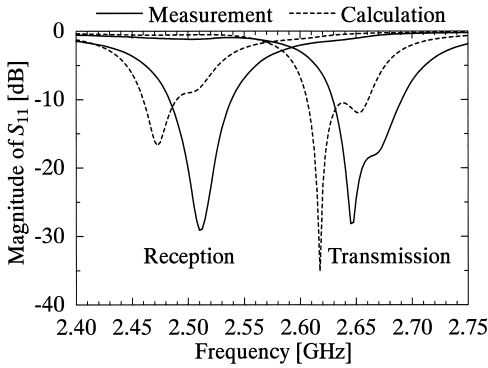


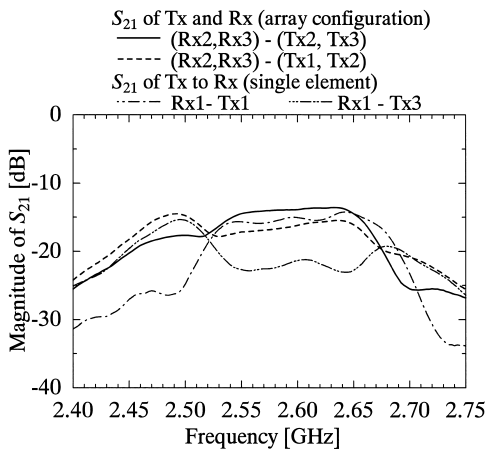
図 7 試作したアンテナの外観
Fig. 7 External view of the fabricated antenna.

挿入損 1.0 dB，アイソレーション 30 dB 程度と見込んでおり，電力分配器は市販の製品の値を参考に 0.3 dB と考えている．追尾系には，素子数並びに切り換えるビーム数が少ないのでカーナビゲーションシステムなどの情報を利用した簡易な追尾で実現可能である．

図 7 に試作した 2 周波共用三角形パッチアレーアンテナの外観を示す．アンテナは直径 180 mm，厚さ 1.6 mm，基板には比誘電率 2.17 の PTFE 基板を利用した．図 8 にアンテナの反射・アイソレーション特性を示す．図 8 (a) より，受信 2.50 GHz，送信 2.65 GHz 帯での反射係数はともに -10 dB 以下であった．アイソレーション特性の測定値には，送信素子単体と受信素子単体のアイソレーションのほかに，実際に使用した場合を想定し，分配器を通した送信 2 素子，受信 2 素子のアレーアンテナ間のアイソレーションの値を示した．その際，他の素子は 50Ω 負荷へ接続し，測定結果には分配器及びセミリジットケーブルの損失を差し引いた値を示した．送受信アレー間のアイソレーションは帯域内で 15 dB 以上を達成している．これは，隣り合う送受信素子における重心同士の間隔が $0.34 \lambda_0$ と非常に狭いことから，素子間の相互結合が強くなったためであり，素子間隔を広げることで改善可能である．送受信素子の重心同士の間隔を $0.43 \lambda_0$ とした場合，サイドローブレベルが上昇するが，20 dB 以上



(a) Reflection characteristics



(b) Isolation characteristics (Measurement)

図 8 アンテナの反射・アイソレーション特性
Fig. 8 Frequency performances of reflection and isolation.

のアイソレーション, 利得 5.5 dBic 以上が得られている [20].

図 9 にアンテナの素子 Rx1, Tx2 を給電 OFF とし てビームを形成した際の仰角 48° 方向における軸比の周波数特性を示す. 図の測定結果より軸比が 3 dB 以下となる帯域は, 2.5 GHz 帯で 0.8%, 2.65 GHz 帯で 0.47% であり, シーケンシャル配列により軸比が改善されている. 素子 1 を OFF にした場合の, 垂直面内の放射指向性を図 10 に示す. 給電の ON, OFF のみで送受ともに低仰角方向へチルトしたビームが形成されている. 次に東京都内から見た静止衛星の方向である仰角 48° 方向の円錐面内指向性を図 11 に示す. 2.2 と同様, 軸比が最小となる周波数にて評価した. 数値計算及び測定結果は一致しており, 方位角 0°, 180°

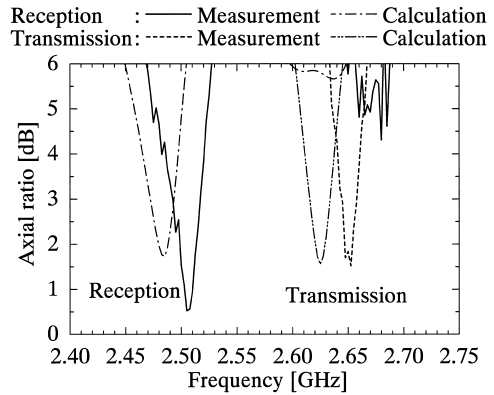
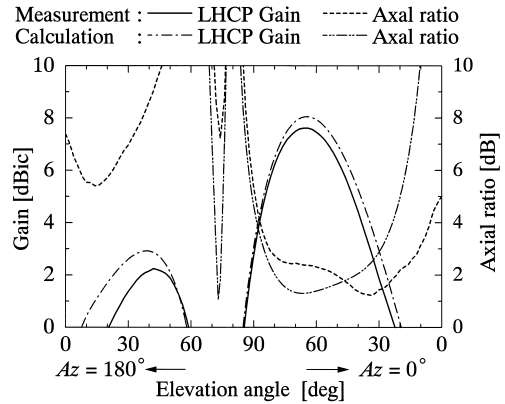


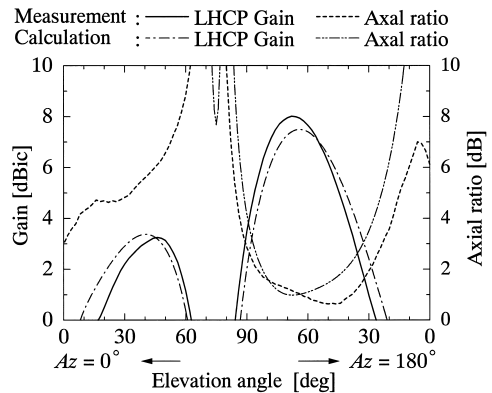
図 9 仰角 48° 方向における軸比の周波数特性 (受信 : $Az = 0^\circ$, 送信 : $Az = 180^\circ$)

Fig. 9 Frequency performances of axial ratio for an elevation $El = 48^\circ$ (Reception: $Az = 0^\circ$, Transmission: $Az = 180^\circ$).



(a) Reception (Rx1 OFF, $Az = 0^\circ$)

(Measurement : $f_m = 2.5025$ GHz, Calculation : $f_c = 2.4850$ GHz)

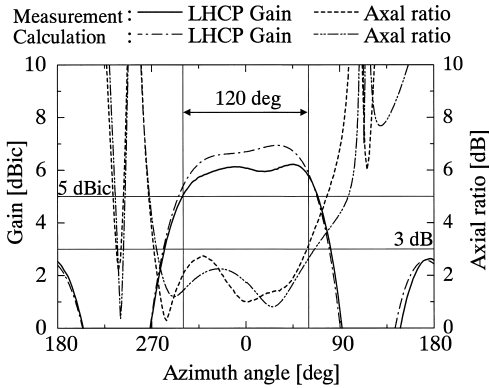


(b) Transmission (Tx2 OFF, $Az = 180^\circ$)

(Measurement : $f_m = 2.6575$ GHz, Calculation : $f_c = 2.6250$ GHz)

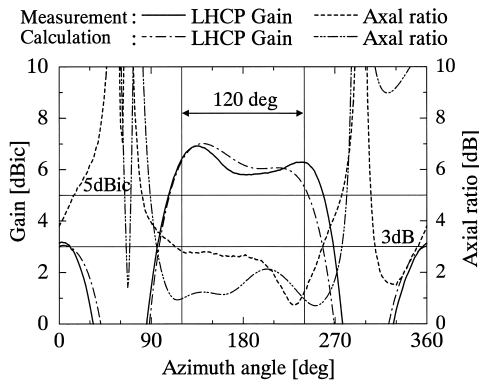
図 10 垂直面内放射指向性

Fig. 10 Radiation characteristics in the elevation plane.



(a) Reception (Rx1 OFF)

(Measurement : $f_m = 2.5025$ GHz, Calculation : $f_c = 2.4850$ GHz)



(b) Transmission (Tx2 OFF)

(Measurement : $f_m = 2.6575$ GHz, Calculation : $f_c = 2.6250$ GHz)

図 11 仰角 48° における円錐面内放射指向性

Fig. 11 Radiation characteristics in the conical-cut direction for an elevation $E_l = 48^\circ$.

方向を中心に 120° の範囲において利得 5 dBic 軸比 3 dB 以下を実現している．アンテナの構造は対称であるため，OFF する素子を切り換えれば，水平面内 3 方向のビーム切替が可能である．以上より本アレーアンテナが，仰角 48° の全方位角において利得 5 dBic 以上を確保できることを数値計算，測定の両面から確認した．なお数値計算より得られた本アレーアンテナの放射効率率は，受信 92%，送信 97%であった．

3. 衛星通信模擬実験

3.1 衛星通信模擬実験のシステムの構成

実際に衛星通信に利用した場合の仰角 $48^\circ \pm 10^\circ$ 方向における放射特性を把握するため，模擬的な衛星通信実験を行った．なお，本アンテナは，送受信 2 周波

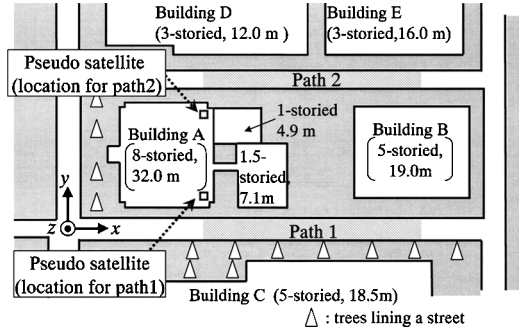


図 12 模擬衛星局送信アンテナと測定路の位置関係
Fig. 12 Location of pseudo satellite station and experimental path.

共用機能をもっているが，無線局免許の関係で，ダウンリンク（受信）のみ実験した．実験は図 12 に示す地図の測定路 1，2 の 2 個所で行った．模擬衛星局側のシステム及びアンテナは，ビル A（8 階建て，高さ 32 m）の屋上に設置し，模擬衛星局アンテナからの到来波が仰角 $48^\circ \pm 10^\circ$ となる道路を測定路とした．また，模擬衛星局の送信アンテナには半幅幅の広い 1 素子円偏波スパイラルアンテナ（Marconi 社 ASM-1874A）を使用し，アンテナの最大放射方向を測定路上の仰角 48° ポイントへ向けることで，仰角 $38^\circ \sim 58^\circ$ の範囲内における利得の変化が 0.3 dB 以内となるよう設定した．模擬衛星局及び，車載局（通信実験車両）に搭載された通信，測定系の構成は図 13 に示す．模擬衛星局並びに車載局の U/C，D/C ユニットの製作は，ETS-VIII を利用した通信実験用に製作し，IF を 140 MHz，RF を 2.5025 GHz とした．なお 2.45 GHz 帯における無線 LAN の影響を避けるため，受信アンテナ直下へ帯域フィルタを挿入した．通信回線は，実験に使用したモデム，及び将来行われる移動体衛星通信を考慮して表 3 のように設定した．なお，無線局免許の許可する伝送レートが 288 kbit/s であったため，必要な C/N_0 を得るために想定した衛星側の送信出力を 50 W と設定した．車載局側は，2. で説明したパッチアレーアンテナを通信実験車両の屋根に設置し，図 14 のように半球状のレドームを被せた．

3.2 仰角特性

車載局に搭載されたパッチアレーアンテナの素子 Rx1 を給電 OFF として方位角 0° 方向にビームを形成し，図 12 の $+x$ 方向へ実験車両を走行しながら受信電力を測定することで，実際の使用に近い状態での仰角方向の受信特性を測定した．本測定では利得

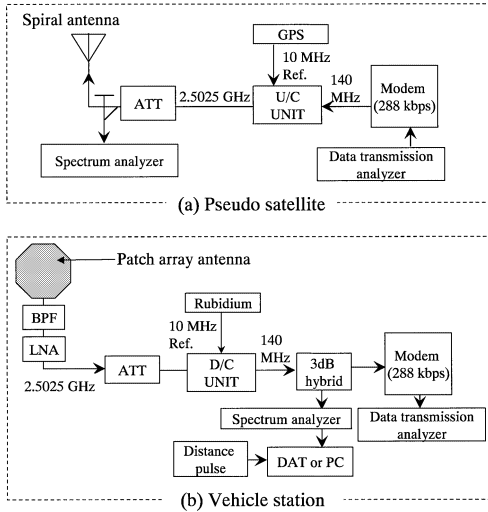


図 13 測定構成の概要

Fig. 13 Diagram of the measurement system.

表 3 回線諸元 (ダウンリンク)
Table 3 Link budget (Downlink).

	単位	想定した衛星回線	模擬実験での回線
周波数	GHz	2.5025	2.5025
送信電力	dBW	16.99	-43.15
給電損失(衛星側)	dB	1.00	17.75
送信アンテナ利得	dBi	40.40	0.16
送信EIRP	dBW	57.39	-60.74
衛星局と車載局間の距離	km	37207.83	0.041
伝搬損失	dB	191.80	72.65 (計算値)
偏波損失	dB	0.20	
フェージングマージン	dB	2.50	
G/T (測定値 仰角 48°)	dB/K	-20.21	-20.21
受信 C/N_0	dBHz	71.28	75.50 (測定値) 75.00 (計算値)



図 14 実験車の屋根に搭載されたアンテナと半球状レドーム

Fig. 14 Antenna mounted on the test vehicle and hemispherical radome.

のピーク付近に衛星が見えることを想定し、図 12 の $-x$ 方向にビームが形成されるようにアンテナを設定した。測定の様子を図 15 に示し、測定路 1, 2 における測定結果と計算値の結果を図 16 に示す。計算値は、モーメント法によって求めた受信アンテナの利得を利用し、送信電力、給電損、自由空間伝搬損などの回線パラメータをもとに導出した。なお、図に示す測定結果は、すべて仰角 58° における計算値で規格化している。両測定路での測定結果は、ともに計算結果と傾向が一致しており、アンテナが車両上でも正常に動作していることを確認できる。仰角 48° 付近での受信レベルにリップルが見られるが、その変動の周期から、直接波と伝搬距離が非常に近い反射波が原因であると考えられる。実験では車載の回転台を利用した都合上、車の屋根から 53 cm の高さに本アンテナが設置されているため、車両の屋根からの反射波を受けている可能性が高い。したがって、このような傾向は、アンテナを屋根に密着させて設置すれば大幅に軽減できると考えている。

一方測定路 2 は、反射波により約 10 λ 周期でレベルが変動しているが、測定路沿いに街路樹はなく、建物も少ないため、測定路 1 のような細かな変動はわずかであり、比較的安定した受信レベルが得られた。測定値と回線設計により得られた受信電力との差異は、測定路 1 で最大 6.1 dB、測定路 2 でも最大 5.4 dB であり、全体的な傾向は、回線設計により得られた受信電

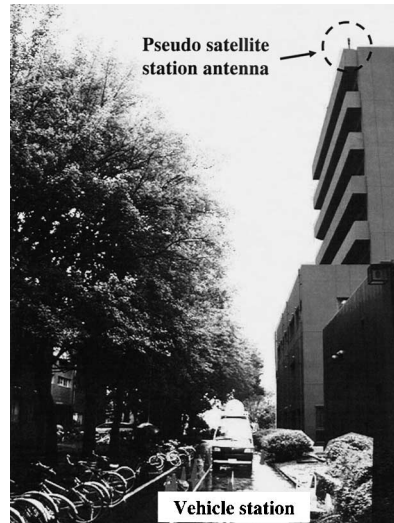
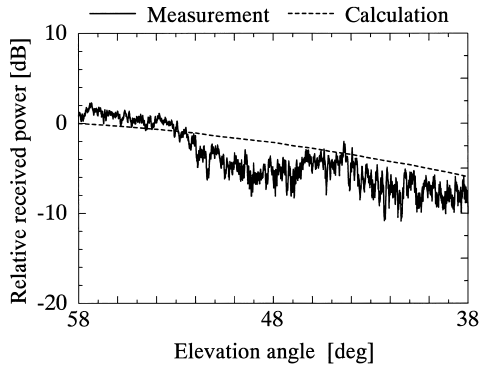
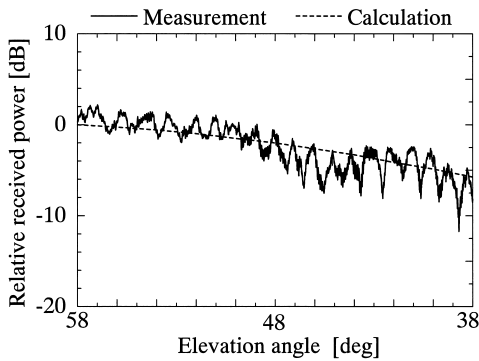


図 15 測定の様子 (測定路 1)

Fig. 15 Photograph of the experiment (Path 1).



(a) Path 1



(b) Path 2

図 16 仰角 38° ~ 58° における受信電力 ($f = 2.5025$ GHz)

Fig. 16 Relationship between relative received power and elevation angle ($f = 2.5025$ GHz).

力とほぼ一致した。伝搬路や移動時のフェージングなどによる受信電力の変動は、使用するアンテナにより受ける影響が大きく異なることが知られているが [22]、今回の実験結果では、測定路 1 で 3.8 dB、測定路 2 で 3.0 dB のマージンをとることで、90%以上の確率で計算値より受信電力が高くなることを確認した。これより、本アンテナを使用した場合、回線マージンを 4 dB 以上確保すれば、移動中（シャドーイング、ブロッキングを除く）の回線を高い確率で確保できると予想される。

3.3 アンテナの放射指向性とビーム切換の確認

図 12 の測定路 2 にて、仰角 48° におけるアンテナ放射指向を実験車両及び伝搬環境を含めた状況で測定した。模擬衛星局の送信アンテナが設置されている方向を方位角 0° とし、実験車両に搭載されている回転台を利用して受信電力を測定した。なお、アンテナ

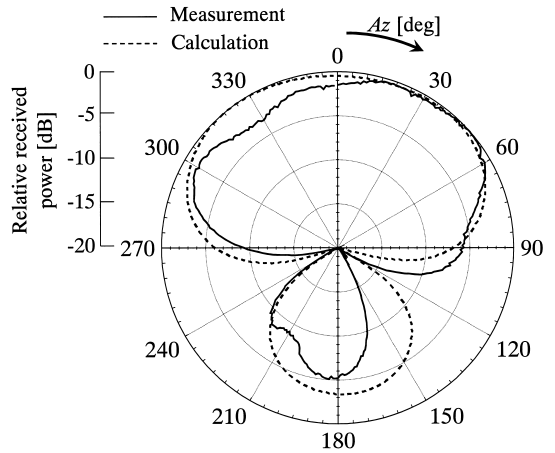


図 17 仰角 48° 円錐方向放射指向性 ($f = 2.5025$ GHz, 測定路 2, 図中の Az は図 6 に準ずる)

Fig. 17 Experimental results of radiation characteristics in the conical-cut direction for an elevation angle 48° ($f = 2.5025$ GHz, Path2, Az as in Fig. 6).

の素子 Rx1 を給電 OFF にして方位角 0° にビームを形成した。結果を図 17 に示す。グラフの値は測定結果、計算結果それぞれの最大値で規格化したものであり、計算値はモーメント法を用いた数値計算による結果を利用した。測定結果より、メインビームの幅や、ヌル方向など数値計算による結果の傾向をとらえており、実際の使用環境においても円錐方向に幅の広いビームが形成されることが確認できる。方位角 330° 方向にリプルが見られるが、仰角特性測定時に生じたリプルと同様に車両の屋根からの反射波による影響であると考えられる。図 18 には、試作アンテナのビーム方向を 3 方向に変えた場合の放射指向性を、給電を OFF とする素子と併せて示した。(a) は電波無響室内での測定値、(b) 測定路 1 での仰角 48 度における測定値である。なお模擬実験による測定結果はビームの最大値で規格化した。本アンテナはビーム切換を行うことで、車両の方向が変わった際にも受信電力の変動幅を 5 dB 以内に収め、安定した受信特性を得ることが可能であることが分かる。また OQPSK (伝送レート 288 kbit/s) でのビット誤り率測定も同時期に行ったが、測定値が一定にならず、本項目の測定時には 1×10^{-4} 以上であった。図 12 におけるビル C 内では、無線 LAN のサービスエリアを広くとっているため、その影響と考えているが、詳しい原因については現在調査中である。

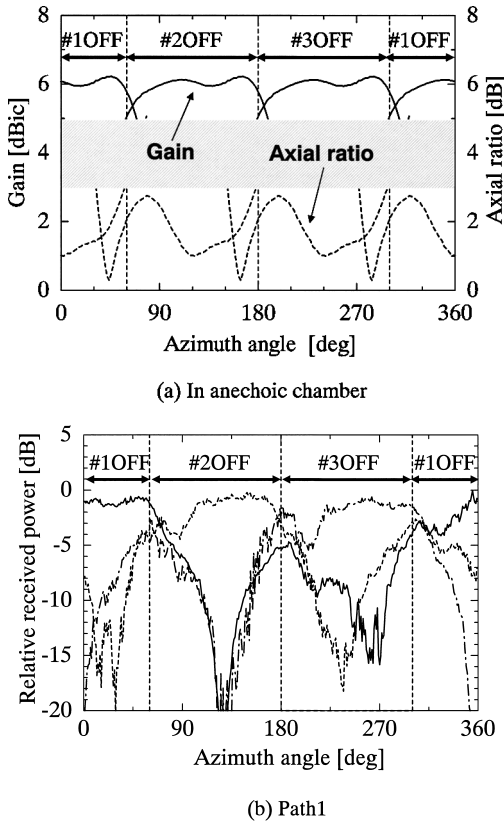


図 18 ビーム切換時の仰角 48° 円錐方向放射指向性 ($f = 2.5025$ GHz, 測定路 1, 図中の Az は図 6 に準ずる)
 Fig. 18 Radiation characteristics of beam switching in the conical-cut direction for an elevation angle 48° ($f = 2.5025$ GHz, Path1, Az as in Fig. 6).

4. むすび

ETS-VIII を用いた移動体衛星通信実験に向けて、送信と受信の 2 周波に対応する三角形パッチアレーアンテナを開発した。給電の ON, OFF 制御によって水平面内の 3 方向へビームの切換が行える点、更にビーム切換によって、送受帯域ともに利得 5 dBic 以上、軸比 3 dB 以下の特性を全方位角にて確保できることを、試作アンテナによる実験と数値計算の両面から実証した。更に衛星通信模擬実験を行うことで、アンテナを搭載する自動車、野外伝搬環境、通信システムなどを含め総合的に特性評価を行った。実験では仰角 $48^\circ \pm 10^\circ$ の方向から到来波が来るような測定路を走行しながら受信電力の測定を行った結果、ほぼ設計どおり動作することを確認した。今後は、本アンテナ

に最適なスイッチング回路や、基板の比誘電率及び素子間隔とアイソレーションの詳細な関係について検討を進める予定である。ETS-VIII が打ち上がり次第、実際に衛星を使った通信試験を行うことで、簡易衛星追尾方式の実証、並びに移動体衛星通信の普及及び技術発展へ貢献できると期待される。

謝辞 本研究の一部は、平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究 (B) (2) 課題番号 16360185) により行われた。

文 献

- [1] JAXA ホームページ, “技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII)” http://www.jaxa.jp/missions/projects/sat/tsushin/ets8/index_j.html
- [2] i-Space ホームページ, “ETS-VIII の概要” <http://i-space.jaxa.jp/satellite/ETS-VIII.htm>
- [3] 山口慶剛, 板倉 誠, “モバイル・デジタル衛星放送サービス—世界初, 移動体・個人向けマルチメディア衛星放送サービス” 信学技報, A-P2004-102, July 2004.
- [4] S. Ohmori, “Vehicle antennas for mobile satellite communications,” IEICE Trans., vol.E74, no.10, pp.3210–3221, Oct. 1991.
- [5] K. Ito, J.P. Daniel, and J.M. Lenormand, “A printed antenna composed of strip dipoles and slots generating circularly polarised conical patterns,” IEEE AP-S International Symposium, pp.632–635, 1989.
- [6] H. Ohmine, Y. Sunahara, and M. Matsunaga, “An annular-ring microstrip antenna fed by a coplanar feed circuit for mobile satellite communication use,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.45, no.6, pp.1001–1005, June 1997.
- [7] 山口 良, 恵比根佳雄, “衛星携帯・自動車電話用車載ヘリカルアンテナの設計” 信学技報, A-P-97-64, July 1997.
- [8] A. Kuramoto, T. Yamane, and N. Endo, “Mechanically steered tracking antenna for land mobile satellite communications,” 1988 IEEE AP-S International Symposium, vol.26, pp.1314–1317, June 1988.
- [9] K. Tanaka, S. Yamamoto, H. Wakana, S. Ohmori, M. Matunaga, and M. Tsuchiya, “Antenna and tracking system for land vehicles on satellite communications,” Proc. IEEE VTS, vol.2, pp.878–882, May 1992.
- [10] 堀 俊和, 寺田矩芳, 鹿子嶋憲一, “ビーム走査の可能なスイッチングアレーアンテナ” 信学論 (B), vol.J69-B, no.11, pp.1400–1407, Nov. 1986.
- [11] 西川訓利, 佐藤和夫, 藤本美俊, “自動車搭載衛星通信電子走査アンテナ” 信学論 (B-II), vol.J72-B-II, no.7, pp.323–329, July 1989.
- [12] 三浦 龍, 田中豊久, 堀江章夫, 関口高志, 井上 隆, 唐沢好男, 猪股英行, “車載 DBF セルフビームステアリングアレーアンテナによる衛星電波の追尾受信実験” 信学論 (B-II), vol.J80-B-II, no.7, pp.547–557, July 1997.
- [13] Y. Konishi, “Phased array antennas,” IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.3, pp.954–967, March 2003.

- [14] 山本伸一, 田中健二, 若菜弘充, 大森慎吾, “陸上移動衛星通信用アンテナ追尾方式,” 信学論 (B-II), vol. J77-B-II, no. 6, pp. 307–316, June 1994.
- [15] G. Splitt and M. Davidovitz, “Guidelines for design of electromagnetically coupled microstrip patch antennas on two-layer substrates,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 38, no. 7, pp. 1136–1140, July 1990.
- [16] Y. Suzuki, N. Miyano, and T. Chibach, “Circularly polarized radiation from singly-fed equilateral-triangular microstrip antenna,” Proc. IEE, vol. 134 (Pt.H) pp. 194–198, 1987.
- [17] J.H. Lu and K.L. Wong, “Singly-fed circularly polarized equilateral-triangular microstrip antenna with a tuning stub,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 48, no. 12, pp. 1869–1872, Dec. 2000.
- [18] M. Nakano, H. Arai, W. Chujo, M. Fujise, and N. Goto, “Feed circuits of double-layered self-diplexing antenna for mobile satellite communications,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 40, no. 10, pp. 1269–1271, Oct. 1992.
- [19] 石出大輔, 田中憲光, 吉村博幸, 高橋応明, 伊藤公一, “ETS-VIII 用 4 素子パッチアレーアンテナの電子スイッチによるビーム切替特性,” 映像学技報, vol. 28, no. 33, pp. 5–8, June 2004.
- [20] ヨサファット テトオコ スリ スマンティヨ, 伊藤公一, “ETS-VIII を用いた簡易衛星追尾型三角形パッチアレーアンテナ,” 信学技報, A-P2003-243, Jan. 2004.
- [21] 伊藤公一, 田中憲光, ダビッド・ドゥローン, 大西輝夫, ヨサファット・テトオコ・S.S., “ETS-VIII を用いた移動体衛星通信実験用簡易衛星追尾型アンテナ,” 第 46 回宇宙科学技術連合講演会, pp. 1156–1161, Oct. 2002.
- [22] 小園 茂, 吉川 誠, 細谷良雄, “衛星を用いた陸上移動体搬実験報告,” 信学技報, A-P80-1, April 1980.
(平成 17 年 1 月 7 日受付, 4 月 8 日再受付)



田中 憲光 (学生員)

平 13 千葉大・工・電気電子卒。平 16 同大大学院博士前期課程了。現在同大学院博士後期課程在学中。小型・平面アンテナの高機能化及び移動体衛星通信に関する研究に従事。IEEE 会員。

ヨサファット テトオコ スリ
スマンティヨ (正員)

平 7 金沢大・工・電気・情報卒。平 14 千葉大学大学院博士後期課程了, 平 14 千葉大学電子光情報基盤技術研究施設・講師(中核的研究機関研究員), 現在千葉大学環境リモートセンシング研究センター・助教授。日本リモートセンシング学会, 日本写真測量学会, IEEE 各会員。



金子 謙一 (学生員)

平 16 千葉大・工・都市環境システム卒。現在, 同大大学院博士前期課程在学中。移動体衛星通信用アンテナ及び追尾システムに関する研究に従事。



石出 大輔 (学生員)

平 16 千葉大・工・都市環境システム卒。現在, 同大大学院博士前期課程在学中。平 16 映像情報メディア学会研究奨励賞受賞。移動体衛星通信用アンテナ及び給電システムに関する研究に従事。



高橋 応明 (正員)

平元東北大・工・電気卒。平 6 東工大・大学院博士課程了。同年武蔵工大・工・電気・助手。同大講師を経て, 平 12 東京農工大・工・電気電子・助教授。平 16 千葉大・フロンティアメディカル工学研究開発センター・助教授。衛星放送受信アンテナ, 平面アンテナ, 小型アンテナ, RLSA, 環境電磁工学, 人体と電磁波との相互影響の研究に従事。工博。IEEE シニア会員。



伊藤 公一 (正員)

昭 49 千葉大・工・電子卒, 昭 51 同大大学院修士課程了。同年東工大・工・助手。昭 54 千葉大・工・助手, 平元同助教授, 平 9 同教授, 平 15 同大・フロンティアメディカル工学研究開発センター・教授となり現在に至る。主に, プリントアンテナ, 小型アンテナ, ハイパーサーミア用アプリケーション等アンテナの医療応用, 人体と電磁波との相互影響の研究に従事。工博。IEEE フェロー, AAAS, 映像情報メディア学会, 日本ハイパーサーミア学会各会員。



山本 伸一 (正員)

昭 50 都立鳥山工高・電子科卒。同年郵政省通信総合研究所(現,独立行政法人情報通信研究機構)入所。以来,周回衛星の管制並びに姿勢決定法,ETS-V,ETS-VI 及び COMETS 衛星を用いた陸上移動体衛星通信におけるアンテナ追尾技術並びに伝搬特性の研究に従事。現在同所鹿島宇宙通信研究センター・モバイル衛星通信グループ主任研究員。



三浦 周 (正員)

平 5 東北大・工・通信卒。平 10 同大学院博士課程了。同年郵政省通信総合研究所(現,独立行政法人情報通信研究機構)入所,衛星通信,アンテナの研究に従事。博士(情報科学)。現在同所鹿島宇宙通信研究センター・モバイル衛星通信グループ主任研究員。