

高機能アンテナ

三浦 周 藤野義之

NICT では、ETS-VIIIを用いた移動体衛星通信システム実験の一環として、車載用の高機能なアクティブフェーズドアレーアンテナ (APAA) を開発した。本アンテナは、薄型・軽量で、電子ビーム走査による自動衛星捕捉追尾機能を有する。衛星信号を用いて本アンテナの基礎特性、走行試験による追尾特性、送信特性を取得し、本アンテナの有効性を確認した。

1 まえがき

アクティブフェーズドアレーアンテナ (Active Phased Array Antenna: APAA) は、ビームを電子的に制御するため、機械的にアンテナを動かすことなく指向方向を可変でき、高速な走査が可能な高機能なアンテナである。さらに、薄型・軽量に構成できることから、移動体衛星通信への応用が期待されている。衛星搭載用としては Ka 帯で実現例^[1]がある。また、移動体搭載用としては、Ku 帯でのヘリコプター搭載通信実験の実績がある^[2]。いずれも、性能は優秀であるが、コスト面の問題もあり、一般に広く普及するには至っていない。これらのことから、情報通信研究機構では様々な形態の APAA に関して実施例を積み重ねており^{[2]-[4]}、その一環として、ETS-VIIIの移動体衛星通信システム実験のために車載用 S 帯アクティブフェーズドアレーアンテナ (APAA) を開発した^[5]。本 APAA の有効性を評価するため、衛星信号を用いて本アンテナの基礎特性、車載状態での走行試験による追尾特性、送信特性を取得したので報告する。

2 S 帯アクティブフェーズドアレーアンテナ^[5]

開発した APAA の外観 (レドームを外した状態) を図 1 に示す。本 APAA は、ユニット構造の採用で量産に適しているほか、車載用として車の屋根への取り付けを想定し、重量 18.7kg、厚さ 117mm の低姿勢に抑えている点に特徴がある。また、ETS-VIIIを用いた実験に使用するため、車の移動範囲による衛星仰角変動と動揺による仰角の誤差を見込んで、仰角 48 度 ± 10 度以内で、所望利得 12dBi 以上を満たす設計となっている。素子アンテナには円形パッチと円環パッチを用いた送受共用のセルフダイプレクシングアンテナ^[6]を採用し、18 素子のアレー構成により衛星方向で 12dBi 以上の利得が得られている。追尾速度は車両の旋回時

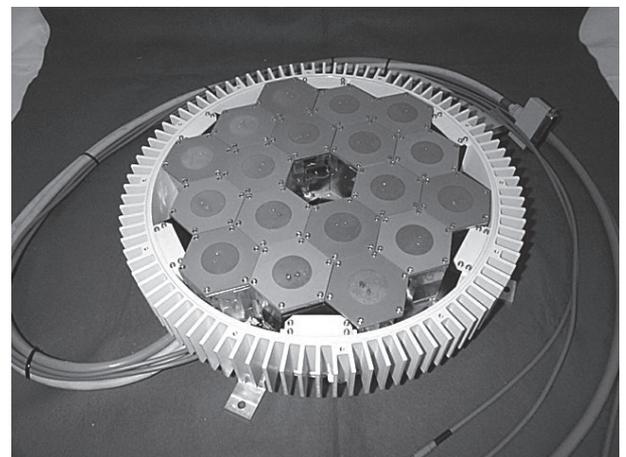


図 1 S 帯アクティブフェーズドアレーアンテナ

の角速度において正常動作するため、30 度/sec を仕様としている。

1 素子相当のユニットを図 2 に示す。特徴は 1 素子相当の送受信アンテナ、送信電力増幅器 (SSPA)、受信低雑音増幅器 (LNA) および送受信移相器を 1 ユニットとし、素子毎に分解が可能なモジュール構造を採用しており、素子の追加、修理等が容易である点である。また、移相器にダブルバランスドミクサを使用した無限移相器を利用している。これにより、量子化誤差が軽減できる。また、移相器の出力レベルを可変することによって各素子信号の振幅を個別に変更できるため、アレーアンテナに非一様な振幅分布を与えることが可能である。これはアレーアンテナの放射パターンのサ



図 2 1 素子相当のユニット

3 移動体衛星通信システム実験

イドローブレベル抑圧などに適用できる⁷⁾。

本 APAA の追尾制御は、受信アンテナにおいて受信信号を用いて衛星信号の自動捕捉追尾を行うクローズドループ方式を採用しており、送信アンテナからの送信は、受信アンテナが追尾状態のときにのみ送信し、自動探索時などの非追尾状態では自動的に送信を停止する。送信アンテナ指向方向は受信アンテナと同一方向である。

クローズドループ追尾の動作フローを図3に示す。特徴は、信号状態に応じた複数の動作モードを用意している点である。まず広域探索モードで衛星方向の初期探索を行い、設定した閾値レベルを検知すると追尾モードに移行する。追尾モードではステップトラック方式で常に方位角、仰角の2軸で指向方向を微小に可変しつつ最大受信レベル方向への追尾を行う。何らかの原因により受信レベルが設定した閾値以下になると信号レベルを消失したと判断する。その場合、効率的に衛星方向の探索を行うため、3つの探索モードで探索範囲を段階的に拡大し、信号レベルを再検知すると追尾モードに戻る。3つの探索モードは、停止探索

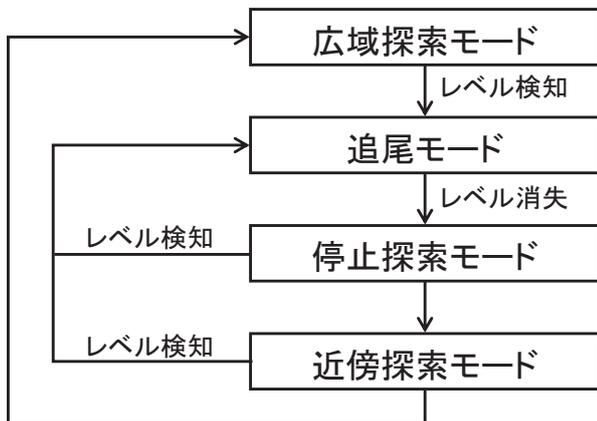


図3 クローズドループ追尾の動作フロー



図4 車載時の外観

モード（アンテナ指向方向は正しいが衛星信号が何らかの原因で瞬断した場合の対策として一定時間、指向方向を保持）、近傍探索モード（車両の場合衛星仰角の変化は小さいことから仰角を変えずに方位角のみ走査して信号を探索）、広域探索モード（方位角、仰角の2軸で衛星方向を探索）である。追尾に使用する信号は、アレー受信信号の総和が最大となるように追尾を行う和パターン信号、およびボアサイト方向にヌルとなるアレーパターンを形成した上でその大きさがゼロになるように制御する差パターン信号のいずれかが選択可能である。これ以外に、外部から衛星方向の方位角、仰角の情報を供給することでオープンループ方式の自動追尾も可能である。本アンテナを図4に示すように車両に搭載し、3に示す追尾特性等の実験を実施している。

3 実験

3.1 基礎特性

(a) 放射パターン

APAA の使用状態における放射パターンを評価するため、ETS-VIIIより送信された無変調ビーコン波を受信し、方位角方向（AZ）の和パターンおよび差パターンを取得した結果を図5に示す。和パターンのビーム幅は約30度であること、和パターンのピークと差パターンのヌルがおおむね同一方向であることから使用状態で正常に放射パターンが形成できていることを確認した。

(b) 基本追尾特性

ETS-VIIIより送信された無変調ビーコン波を方位角方向（AZ）、仰角方向（EL）2軸の回転台に設置したAPAAで受信し、回転台の回転速度を可変することで追尾特性の検証を行った。追尾誤差を回転台の指示値

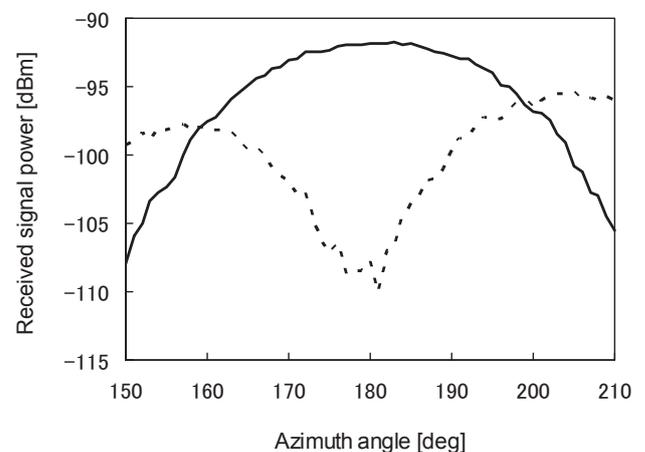


図5 AZ面パターン

と APAA で検出された角度の差と定義し、和パターン追尾、差パターン追尾の追尾誤差を取得した。測定例として、図 6 に和パターンの回転速度 30 度/sec における AZ 角度対追尾誤差を示す。表 1 に各追尾速度における追尾誤差の rms 値を示すように、和パターンにおける追尾誤差は約 2 度、差パターンにおける追尾誤差は 2～3 度であり、いずれもビーム幅と比較して十分小さく、追尾速度依存性もないことがわかる。また、図 7 に追尾誤差の C/N₀ (受信信号電力対雑音電力密度比) 依存性を示すように、受信信号の C/N₀ が高いほど追尾誤差は低減することがわかる。以上の結果から、APAA が十分な基本追尾性能を有することを確認した。

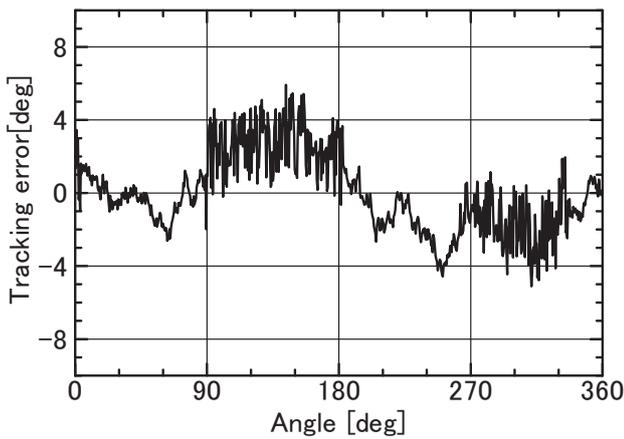


図 6 和パターンの追尾誤差の角度特性の一例

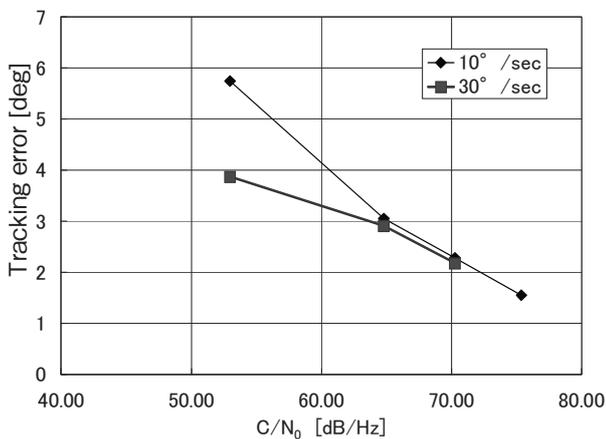


図 7 追尾誤差の C/N₀ 依存性

表 1 追尾誤差測定結果

Tracking angular velocity [deg/sec]	Tracking error [deg] (sum pattern)	Tracking error [deg] (difference pattern)
10	2.3	3.1
20	2.2	2.2
30	2.2	2.9

3.2 走行試験による追尾特性

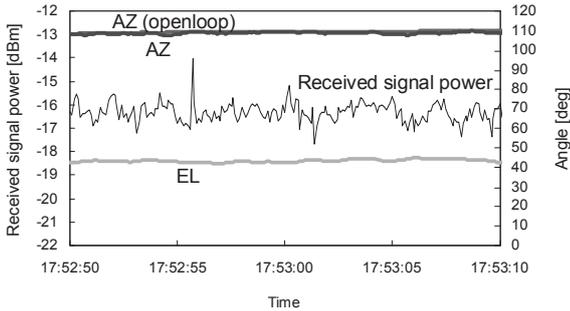
衛星信号を用いた APAA の追尾特性を評価するため、ETS-VIII 衛星から無変調ビーコン波を送信し、茨城県鹿嶋市内の市街地を車載局で走行しながら APAA で受信したときの受信信号の追尾特性を和パターン方式、差パターン方式のクローズドループ方式について取得した。テストコースを図 8 に示す。評価は衛星を見通せる環境、建物・高架橋により衛星からの電波が遮蔽されるブロッキング環境、樹木により衛星からの電波の一部が遮蔽されるシャドウイング環境について実施した。測定値としてはクローズドループ追尾時の受信電力値、APAA のレベルメータ値 (受信電力値と相関。参考値として記録)、ならびにアンテナ指向方向の AZ、EL 値を取得した。また、走行時の衛星方向の参照値として、磁気センサと車速パルス感知器からの衛星方向情報を用いるオープンループ方式^{[8][9]}による追尾系を構築し、衛星方向の AZ 値を取得した (EL 値は平地を走行するためほぼ一定であることから測定を省略)。なお、測定結果において、レベルメータ値と AZ、EL の値は同期している。レベルメータ値と受信電力値は双方の時計の差による 2～4 秒の時刻ずれを有するが、相関がある。

(a) 見通し環境

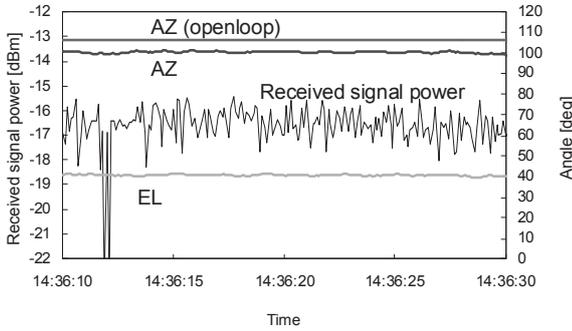
見通し環境における直進時の追尾特性を図 9 に示す。図中、Received signal power、AZ、EL、AZ (openloop) はそれぞれクローズドループ追尾時の受信電力値とアンテナ指向方向の AZ、EL 値、オープンループ追尾による衛星方向の AZ 値を示す。和パターン方式、差パターン方式において、安定した受信電力を記録しており、良好に追尾が行われていることがわかる。受信電力の変動幅は本稿に示していないがオープンループよりクローズドループ方式が大きい。これはクローズドループ方式の追尾モードでは、ステップトラック方式によって常に指向方向を変化させていることによる。



図 8 テストコース (図中の地図はヤフー (株) の許可を得て利用)

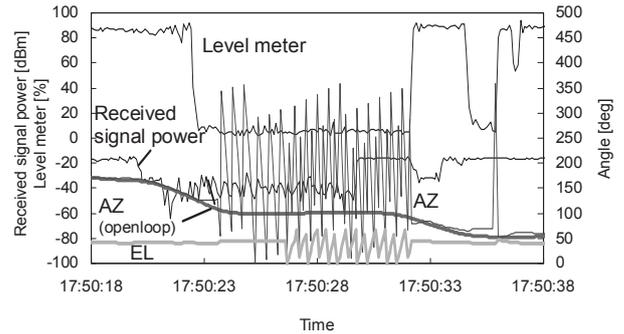


(a)

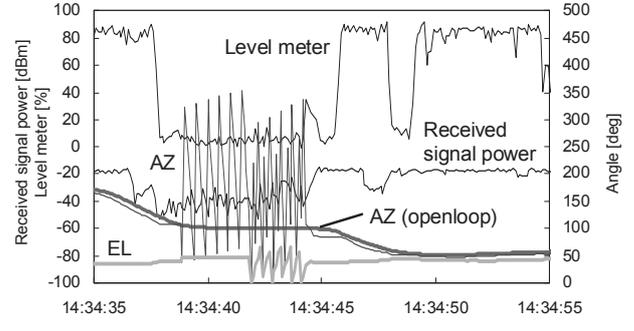


(b)

図9 見通し環境における直進時の追尾特性
(a) 和パターン方式
(b) 差パターン方式



(a)



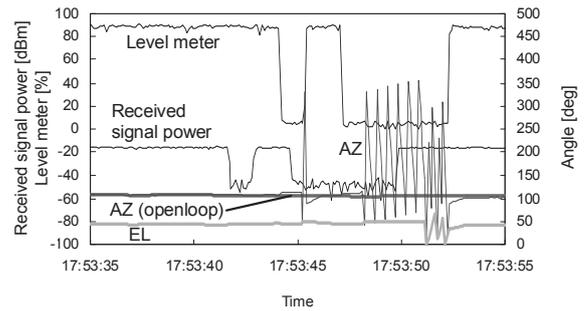
(b)

図10 建物によるブロッキング時の追尾特性
(a) 和パターン方式
(b) 差パターン方式

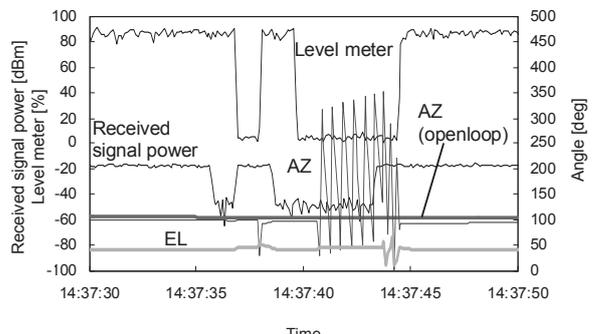
(b) 建物・高架によるブロッキング

建物によるブロッキング時の各種追尾方式の追尾特性を図10に示す。図中のLevel meterはAPAAのレベルメータ値を示す(範囲: 0~100%)。和パターン、差パターン追尾のAZ、ELの変動特性には、建物のブロッキングにより受信電力が低下した後に停止探索モード(同じ位置で追尾を停止)、近傍探索モード(AZのみ自動探索)、広域探索モード(AZ、EL双方の自動探索)の動作が表れている。受信電力が回復した後の和・差パターンのAZ指示値は同時測定したオープンループのAZ指示値とほぼ一致している。以上の結果から、和・差パターンの追尾制御が正常に動作していることを確認した。

高架橋によるブロッキング時の各種追尾方式の追尾特性を図11に示す。2本の高架橋によるブロッキングにより受信電力が2回低下していることがわかる。1回目のブロッキング(1秒間)ではAZ自動探索を1度実施して受信電力が回復している(近傍探索モード)。また、2回目のブロッキング(4秒間)ではAZ、ELの自動探索を行い(広域探索モード)、受信電力が回復している。和・差パターンのAZ指示値は同時測定したオープンループのAZ指示値とほぼ一致している。以上の結果から、和・差パターンの追尾制御が正常に動作していることを確認した。



(a)



(b)

図11 高架下によるブロッキング時の追尾特性
(a) 和パターン方式
(b) 差パターン方式

(c) 樹木によるシャドウイング

樹木によるシャドウイング環境における追尾特性を図12に示す。樹木のシャドウイングにより和・差パターンとも受信電力が低下していることがわかる。後半の受信電力低下量が大きい時間帯において、AZ、EL自動探索を行い（広域探索モード）、受信電力が回復していることがわかり、和・差パターンの追尾制御が正常に動作していることを確認した。また、和・差パターンで自動探索動作に大きな差がないことも確認した。

3.3 送信特性

本 APAA の送信機能の動作を確認するため、ブロッキングによる受信信号レベル低下～回復時の送信動作を評価した。

受信・送信回線を同時測定するため、フォワードリンク（Ka 帯鹿島地球局→ETS-Ⅷ→S 帯 APAA）、リターンリンク（S 帯 APAA →ETS-Ⅷ→S 帯鹿島地球局）の2回線を使用した。フォワードリンクを APAA の追尾に使用し、追尾状態（電力、アンテナ指向方向）を記録した。また、リターンリンクで APAA から送信し、S 帯鹿島地球局で受信し電力を記録した。

情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター構内を走行

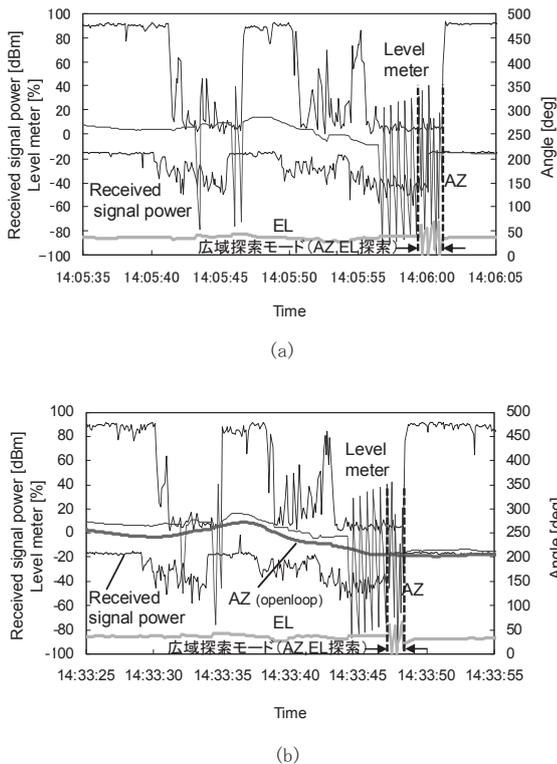


図12 樹木によるシャドウイング時の追尾特性
(a) 和パターン方式
(b) 差パターン方式

して建物によるブロッキング状態を人為的に生成し、クローズドループ追尾（差パターン）と、参考としてオープンループで評価を行った結果を図13に示す。差パターン追尾時は車載局アンテナの受信レベルの断～回復に地球局受信レベルが追従していることから、ブロッキング発生時に送信が停止し、回復時に送信が再開していることが確認できた。アンテナ指向方向の変動特性から、受信レベル断時に追尾が外れ、アンテナ指向方向の探索を行い、その後再捕捉できていることを確認した。

参考として示したオープンループ追尾では、ブロッキングによる受信レベルの低下および回復が車載局 APAA 側で観測されている。これは、オープンループ追尾の場合、高機能アンテナが磁気センサと車速パルス感知器からの情報を用いて計算した衛星方向に常にアンテナ方向を指向しているためである。また、同様の受信レベルの変化が地球局側でも観測されている理由は、オープンループ追尾では送信信号を停止することがないことによる。これに対し、クローズドループ追尾では車載局 APAA 側の受信レベルが閾値以下となると探索モードに入るため、レベル変動が急峻になっている。

以上の結果から、本 APAA の送信機能が有効に動作していることを確認した。

4 まとめ

ETS-Ⅷを用いた移動体衛星通信実験の一環として、

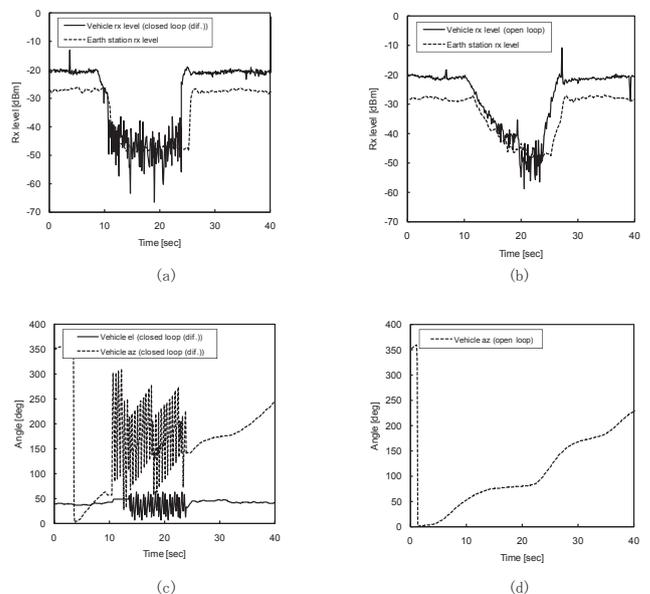


図13 ブロッキング時のアンテナ指向方向と受信レベル
(a) クローズドループ追尾の受信レベル
(b) オープンループ追尾の受信レベル
(c) クローズドループ追尾のアンテナ指向方向
(d) オープンループ追尾のアンテナ指向方向

3 移動体衛星通信システム実験

車載用の薄型・軽量の高機能な APAA を開発した。本 APAA では、衛星方向の自動追尾を行うため和パターンまたは差パターンを用いたクローズドループ追尾方式を適用するとともに、衛星方向の効率的な探索を実現するため探索範囲を段階的に拡大する複数の探索モードを設定した。本 APAA の特性を確認するため、衛星信号を用いて本アンテナの基礎特性、車載状態での走行試験による追尾特性、送信特性を取得した。基礎特性においては、使用状態で放射パターンが正常に形成できていること、回転台を用いた追尾特性試験で追尾誤差がビーム幅と比較して十分小さく、追尾速度依存性もないことから、本 APAA が十分な基礎性能を有することを確認した。追尾特性においては、茨城県鹿嶋市内のテストコースを走行して追尾動作を評価した。その結果、和・差パターン追尾のいずれにおいても、衛星が見通せる環境では追尾モードによる安定した受信電力値を記録し、また、建物・高架橋により衛星からの電波が遮蔽されるブロッキング環境、樹木により衛星からの電波の一部が遮蔽されるシャドウイング環境では3つの探索モード（停止探索モード、近傍探索モード、広域探索モード）に適切に移行して自動探索を行い、信号を回復した。このことから、本 APAA の追尾動作が有効に機能していることを確認した。送信特性においては、建物によるブロッキング状態を人為的に生成し、クローズドループ追尾（差パターン）を行った結果、本 APAA の設計どおりブロッキング発生時に送信が停止し、回復時に送信が再開していることが確認できた。以上の結果から、本 APAA が移動体衛星通信用アンテナとして良好に動作することを確認した。

【参考文献】

- 1 谷島正信, 黒田知紀, 前田剛, 島田政明, 長谷川巧, 北尾史郎, 針生健一, “広域電子走査アンテナ,” 超高速インターネット衛星(WINDS)特集, 情報通信研究機構季報, Vol. 53, No. 4, pp. 49-55, Dec. 2007.
- 2 藤野義之, 佐藤正樹, 永井清二, 平良真一, 尾崎裕, 渡邊栄司, 澤学, 田中行男, “災害・防災情報伝送のためのヘリコプター衛星通信技術の開発,” 信学論, J91-B No.12, pp. 1611-1619, Dec. 2008.
- 3 北尾史郎, 中畔弘晶, 赤石明, 門脇直人, “ギガビット衛星搭載Ka帯アクティブフェーズドアレイアンテナの部分試作モデルの開発結果,” 信学技報, AP98-114, pp. 51-56, Nov. 1998.
- 4 田中正人, 山本伸一, 小原徳昭, 齊藤春夫, “Kaバンド移動体衛星通信用車載アクティブフェーズドアレイアンテナ,” 通信放送技術衛星(COMETS)実験成果報告, 通信総研季報, Vol. 46, No. 4, pp. 127-134, Dec. 2000.
- 5 三浦周, 山本伸一, 佐藤正樹, “車載局,” 技術試験衛星Ⅷ型特集, 通信総研季報, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 145-151, Dec. 2003.
- 6 塩川孝泰, 渡辺文夫, 安永正幸, 後藤尚久, 茶谷嘉之, 阿部久, “航空移動用マイクロストリップアレイアンテナの試作,” 信学技報, Vol. AP86-60, pp. 23-27, 1986.
- 7 Amane Miura, Yoshiyuki Fujino, Shinichi Taira, Noriaki Obara, Masato Tanaka, Takashi Ojima, and Koji Sakauchi, “S-band active phased array antenna with analog phase shifters using double-balanced mixers for mobile SATCOM vehicles,” IEEE Trans. Antennas Propagat.,

Vol. 53, No. 8, pp. 2533-2541. Aug. 2005.

- 8 山本伸一, 田中健二, 鈴木健治, 若菜弘充, “陸上移動衛星通信用アンテナ追尾方式,” 信学技報, SANE94-54, pp. 35-41, Oct. 1994.
- 9 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-2), J77-B-II, No. 6, pp. 307-316, June. 1994.



三浦 周 (みうら あまね)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
博士(情報科学)
衛星通信、アンテナ



藤野義之 (ふじの よしゆき)

東洋大学教授/元ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
博士(工学)
衛星通信、無線電力伝送