

三角板寄生素子付き超低姿勢ダイポールアレーアンテナの素子間結合の検討

花山 英治* 吉田 智和**

Study on the Electrical Coupling of Ultra Low Profile Dipole Array Antenna with Triangular Parasitic Element

Eiji Hanayama*, and Tomokazu Yoshida**

Abstract: To enable the use of an ultra low profile dipole (ULPD) antenna in communication satellites, this study investigated on the electrical coupling of ULPD array antenna. In order to clear the characteristics of the electrical coupling gain, and the bandwidth for the ULPD array antenna, experiments are performed and the experimental results are verified by numerical simulations. We proposed to evaluate the electrical coupling value from the radiation pattern of the ULPD array antenna. This paper provides a guideline for ULPD array antenna.

Keywords: *ultra low profile dipole antenna, parasitic element, radiation element, array antenna, electrical coupling*

1. まえがき

地球-衛星通信においては、長大な距離間伝送を行う必要があるとともに、衛星に搭載できる送信機の電力の制限のため衛星通信で使用するアンテナには、高利得特性が求められる。また、周回衛星との通信では、地球局に対して衛星の位置が絶えず変化しているため、アンテナの指向性制御が必要である。さらに、通信量の増大、データ速度の高速化のため、使用する周波数帯域の拡大に対応できるよう、アンテナを広帯域化する必要がある。これらの電気的特性に加え、打上げロケットへの積載・収納条件、宇宙空間での特殊な環境下での使用を考慮しなければならない。

以上の条件を満たすアンテナとして、多数の小型アンテナを配列し、全体として一つのアンテナシステムとして動作させるアレーアンテナの利用が有効である^{(1), (2)}。アレーアンテナは、単一素子アンテナでは実現不可能な高利得特性、指向性制御が可能となる。また、物理的变化による電気的特性の変化に対して給電

位相を制御することで補償できるという利点を有する⁽³⁾。

アレーアンテナを搭載した衛星の例として、超高速インターネット衛星「きずな: WINDS」が挙げられる。「きずな」には Ka 帯のフェーズドアレーアンテナが搭載されており、622 Mbit/s の伝送が可能である⁽⁴⁾。

現在、アレーアンテナを構成する素子アンテナとして、反射板付きダイポールアンテナや、マイクロストリップアンテナが実用化されている⁽⁵⁾。しかし、前者はアンテナの高さが高くなり、後者は一素子当たりのアンテナ利得が低いという問題を有している。これらの問題を解決するために、低姿勢で高利得な特性をもつ超低姿勢ダイポール (ULPD: Ultra Low Profile Dipole) アンテナの利用が期待できる^{(6), (7)}。

ULPD アンテナは、反射板から数十分の一波長の低い位置に逆 L スリーブアンテナに無給電素子を取り付けられた構造を有し、移相器などを用いることなく、オフセット給電を行うことで、整合が容易にとれる利点を有する。これまでに、三角形の板状素子を寄生素

子として用いた ULPD アンテナは、アンテナ高が 2.0 mm で比帯域幅 5 % (300 MHz) が得られ、低姿勢を維持したまま、広帯域化を実現することが報告されている⁸⁾。

一般にアレーアンテナを構成すると、ある素子アンテナから放射した電波が他の素子アンテナに受信され、再放射されることにより素子間結合が生じる。アレーアンテナにおける素子間結合は、電気的特性に対して、放射パターンの劣化、素子アンテナの不整合、利得の減少を引き起こす原因となりうる⁹⁾。

三角板寄生素子付 ULPD アンテナは左右非対称の構造を有するため、素子アンテナの配置方向によって、素子アンテナ間の結合が異なる可能性がある。

そこで、本論文では、衛星通信での利用を目指し、低姿勢、高利得、広帯域特性をいう特徴を有した三角板寄生素子付き ULPD アンテナを素子アンテナとした、アレーアンテナを構成する。本アレーアンテナの素子間結合が電気的特性に及ぼす影響について明らかにすることを目的とし、実験的な検討、および数値解析による実験結果の評価を行う、その上でアレーアンテナの設計のための指針を与える。

なお、本論文では、素子間結合の基本的な特性を明らかにするため、二素子のアレーアンテナについてのみ扱う。また、衛星通信で用いることを想定し、周波数は 5.8 GHz を使用する。

2. アンテナの構造

2.1 三角板寄生素子付き ULPD アンテナの構造

三角形板状の寄生素子を用いた ULPD アンテナの構造を図 1 に示す。寄生素子付きダイポールアンテナは、セミリジッド同軸ケーブルの外導体の一部を取り除いた逆 L スリーブアンテナをなす放射素子と、放射素子に取り付けられた寄生素子で構成されている。

寄生素子付きダイポールアンテナを用いることで、入力インピーダンスを高くすることが可能である。さらに、放射素子部の外導体の一部を取り除き、オフセット給電を行うことで、給電線の特異インピーダンスと容易に整合させることができる。

反射板の表面から放射素子の中心までの高さを h 、アンテナ全長を L 、放射素子の外導体を取り除く長さを l とする。アンテナ全長 L は使用周波数によって決まり、 L は 2 分の 1 波長に等しく、5.8 GHz の周波数に対しては、 $L = 25.8 \text{ mm}$ である。また、放射素子に使用するセミリジッド同軸ケーブルの外導体の太さは 1.25 mm である。

寄生素子である三角形板は、長さが 4 分の 1 波長、

開き角度 θ 、厚さ t であり、材質は銅である。ここでは、周波数帯域が最も広がるよう、開口角 θ を 120 度、厚さ t を 0.5 mm とする。放射素子の高さ h は、反射板から 2.0 mm とする

放射素子は反射板を貫通させ、反射板裏面から給電を行う。反射板には、厚さ 8 mm のアルミニウム板を用いる。その寸法は波長、およびアンテナ素子と比べて十分大きくし、一辺の長さが 200 mm × 200 mm の正方形である。

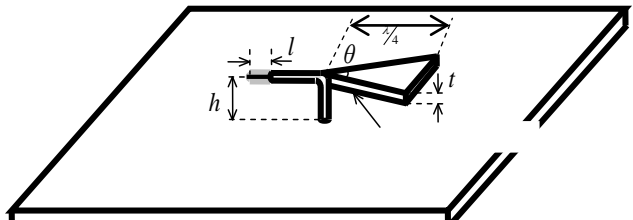


図 1 三角板寄生素子 ULPD アンテナの構造

図 1 三角板寄生素子 ULPD アンテナの構造

2.2 アレーアンテナの構造

三角板寄生素子付き ULPD アンテナを用いたアレーアンテナの構造を図 2 に示す。二つの素子アンテナの間隔を d で表す。本論文では、アレー化した場合の基本的な特性を明らかにするため、配列軸に対して放射素子を垂直方向に配置した二素子アレーアンテナに限定して取り扱う。

各素子アンテナへの給電は、二分配器を用いて信号を二分岐し、片方の経路に移相器を挿入し、給電位相を変化させることができる。給電は等振幅給電とする。

図 3 に、アレーアンテナの配置方向を示す。本アンテナは左右非対称な形状を有しているため、配置方向によって、電気的特性が変化することが予想される。図 2 (a), (b), (c) は、それぞれ寄生素子が同じ方向を向いている場合、離反している場合、対向している場合の配置である。以後、それぞれの場合の配置を、「対向」、「離反」、「対向」と呼ぶ。

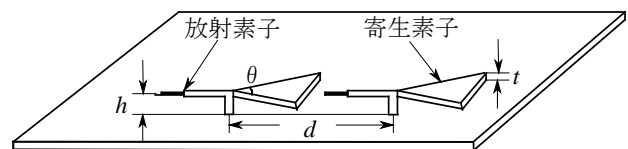


図 2 三角板寄生素子付き ULPD アレーアンテナの構造

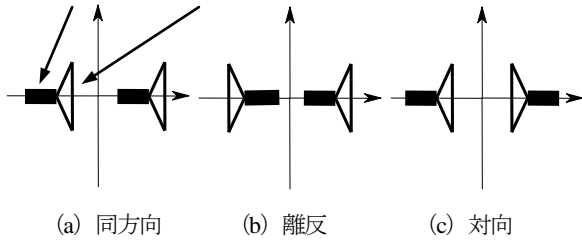


図3 素子アンテナの方向

3. アレーアンテナの素子間結合の影響

3.1 放射パターン

アレーアンテナの素子間結合は、放射パターンに最も顕著に表れる。また、素子間結合は、素子アンテナ間隔が近いほどその結合量は大きいと考えられる。そこで、ここでは、素子間隔 d を 0.6 波長とした場合の放射パターンの測定を行う。

測定は、ベクトルネットワークアナライザ (Agilent E8363B) を用いた放射パターン測定システムを用い、電波暗室内で行う。

図4にE面放射パターンの測定結果を示す。実線がそれぞれの場合の測定結果、細線は素子間結合を含めない理論値を表す。周囲方向は放射角を表し、半径軸方向は最大放射強度を基準とした相対強度を表す。

三角板寄生素子が同方向の場合に、二素子アレーアンテナの理論値に最も近くなり、離反、対向方向の場合は放射パターンの形状が理論値と大きく異なる。この結果から、素子間結合量の影響を少なくするためには、同方向の配列が望ましいことがわかる。

しかし、影響の度合いについては、放射パターンからだけでは、評価できない。そこで、本研究では素子間結合量を定量的に評価する方法を提案する。

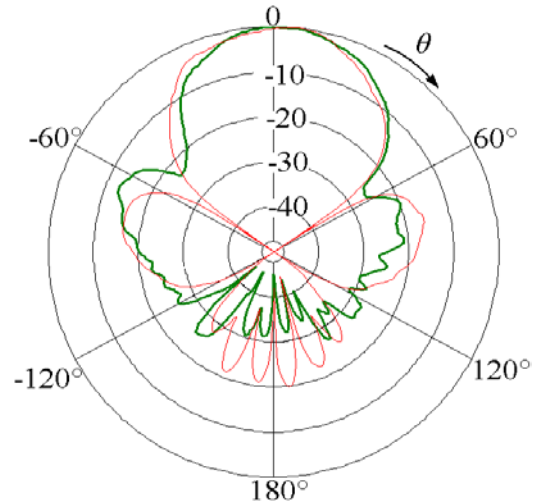
素子間結合を含めない放射パターンの理論値 $G(\theta)$ は、次式で与えられる。

$$G(\theta) = AF(\theta) \times E(\theta) \quad (1)$$

ここで、 $AF(\theta)$ は二素子アレーアンテナのアレーファクタ、 $E(\theta)$ は ULPD アンテナ素子単体の放射パターンを表す。測定された二素子アレーの放射パターン $F(\theta)$ には、この理論値 $G(\theta)$ に素子間結合の影響が、積の形と和の形で加わり、次式のように表されると考えられる。

$$F(\theta) = G(\theta) \times C_1(\theta) + C_2(\theta) \quad (2)$$

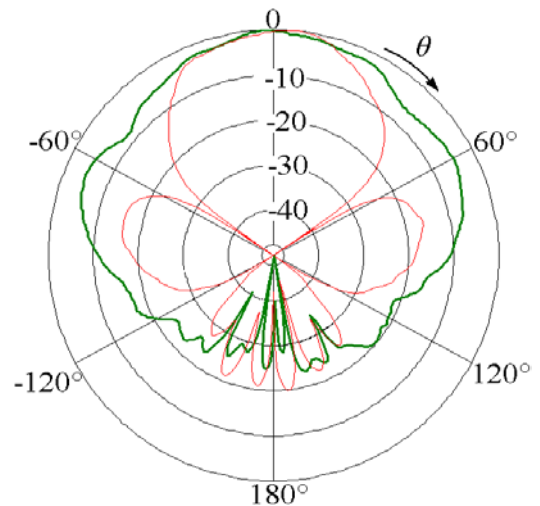
したがって、測定した放射パターンから、式 (2) の $C_1(\theta)$ 、 $C_2(\theta)$ を求めることで、素子間結合の影響量



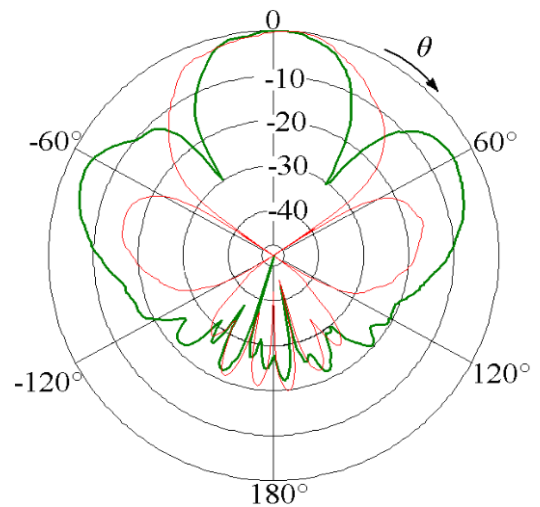
(a) 寄生素子同方向

(b) 寄生素子離反

(c) 寄生素子対向



— Exp. — Calc



Radial Axis: Relative gain (dB)

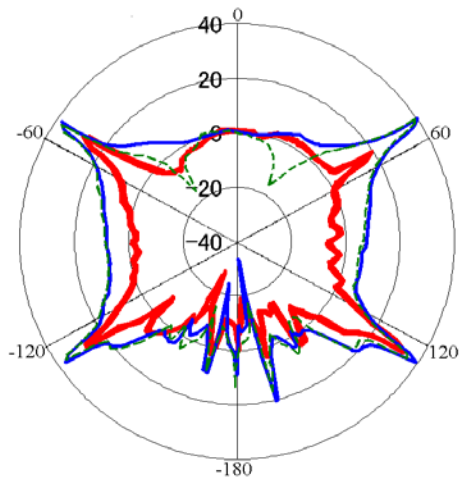
図4 二素子アレーアンテナのE面放射パターン

図5に式 (2) と測定した放射パターンから求めた、素子間結合の影響量 $C_1(\theta)$ 、 $C_2(\theta)$ を示す。影響量

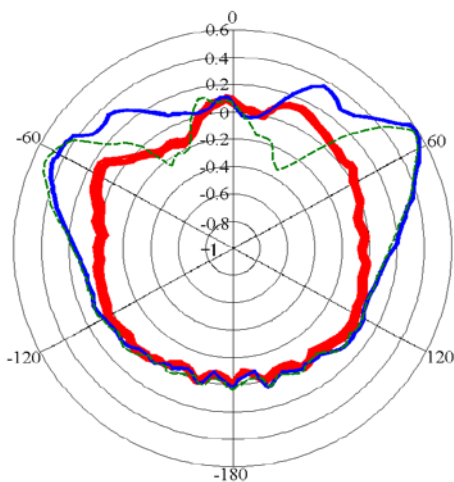
$C_1(\theta)$ は dB, 影響量 $C_2(\theta)$ は真数で表示をしており, ともに 0 に近いほど結合量が少ないことを表している. 図 5 (a), (b) は, それぞれ $C_2(\theta) = 0$ の場合の $C_1(\theta)$, および $C_1(\theta) = 0$ の場合の $C_2(\theta)$ の結果を表す.

素子配置が同方向の場合, $C_1(\theta)$, $C_2(\theta)$ ともに 0 に近い値となり, 結合の影響は小さいと評価できる. これに対し, 離反, 対向では, 60 度の方向で $C_1(\theta)$, $C_2(\theta)$ の値が大きくなり放射パターンを変形させる原因となっていることがわかる.

ここでは, $C_1(\theta)$, $C_2(\theta)$ が単独で影響すると仮定したが, 実際には, $C_1(\theta)$ と $C_2(\theta)$ との割合を考慮する必要がある. 測定した放射パターンだけではこの割合を求めることができないが, 本方法による, 影響量 $C_1(\theta)$, $C_2(\theta)$ を導入することによって素子間結合量の評価が定量的にできることが判明した.



Radial Axis: Coupling Value $C_1(\theta)$ (dB)
(a) $C_1(\theta)$ の角度依存性 ($C_2(\theta) = 0$)



Radial Axis: Coupling Value $C_2(\theta)$
(b) $C_2(\theta)$ の角度依存性 ($C_1(\theta) = 0$)

図 5 素子間結合量の角度依存性 (素子間隔 $d = 0.6\lambda$)

3.2 素子間の伝送係数

アレーアンテナの素子間結合は, 一方の素子アンテナからもう一方の素子アンテナへの伝送係数で評価することができる. ここでは, 伝送係数と前節の放射パターンから求めた素子間結合量との比較, 検討を行う. さらに, 素子間隔 d と結合量の関係を明らかにする.

測定には, ベクトルネットワークアナライザ (Agilent E8363B) を用いる.

図 6 に二つの素子アンテナ間の伝送係数 S_{21} の測定結果を示す. 縦軸が伝送係数 S_{21} , 横軸が素子間隔 d をそれぞれ表す. 伝送係数が大きいほど結合量が大いと考えられる.

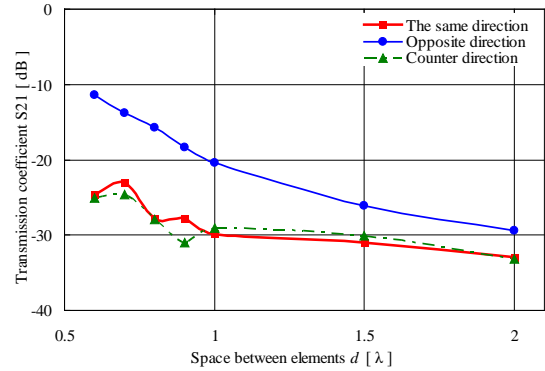


図 6 素子間伝送係数と素子間隔の関係の測定結果

結果より, 素子配置が離反の場合に伝送係数が大きくなり, 同方向, 対向の場合に小さくなる. また, 素子間隔が大きくなると伝送係数が小さくなる傾向にある.

素子配置による伝送係数の違いは, 放射パターン形状より検討した素子間結合量との関係と一致することを示している. そのため, 放射パターンによる素子間結合量の検討方法の有効性が示された.

また, 伝送係数の値が大きくなるのは, 放射素子部が近接する寄生素子離反配置の場合である. このことは, 放射素子部の位置が素子間結合量に大きく影響を及ぼしていると考えられる.

素子間隔による伝送係数の違いは, 距離が離れることによる素子間結合量の減少を表していると考えられる.

実験の妥当性を検討するため, 図 7 に数値解析によって求めた二素子の三角板寄生素子付き ULPD アレーアンテナの素子間隔 d と素子アンテナ間の伝送係数 S_{21} との関係を示す. 計算条件は, 実験に対応するように定める. 数値解析結果においても, 寄生素子離反配置で最も伝送係数が大いこと, および素子間隔による伝送係数の変化の傾向は一致がみられる. したがって, 実験は妥当であるといえる.

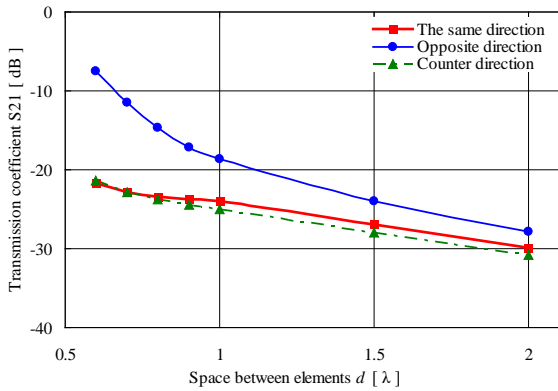


図7 素子間伝送係数と素子間隔の関係の数値解析結果

4. 素子間結合のアンテナ特性への影響

4.1 利得

アレーアンテナの素子間結合はアンテナの電気的特性に影響を及ぼす。ここではまず、アンテナの絶対利得に及ぼす影響を明らかにする。

図8に二素子の三角板寄生素子付き ULPD アレーアンテナの素子間隔と絶対利得の関係の測定結果を示す。測定周波数は 5.8GHz である。横軸は素子間隔 d 、縦軸は絶対利得を表す。

素子間隔、および素子の配置方向によって、6dBi から 8.5dBi の範囲で変化する。最大値は、寄生素子を離反に配置し、素子間隔 d が 1.5λ のときに、8.5dBi、最小値は寄生素子対向に配置し、素子間隔 d が 1.5λ のときに、6.0dBi である。

ここで使用した三角板寄生素子付き ULPD アンテナ単体の絶対利得の測定値は 4.4dBi である。したがって、二素子アレー化によって、2~4dB の高利得化を図ることができる。素子の配置方向、および素子間隔による明確な違いは現れておらず、利得の変化は 3.0dB の範囲にある。したがって、3dB の差を許容できるならば、素子間結合の影響は考慮する必要はないと思われる。

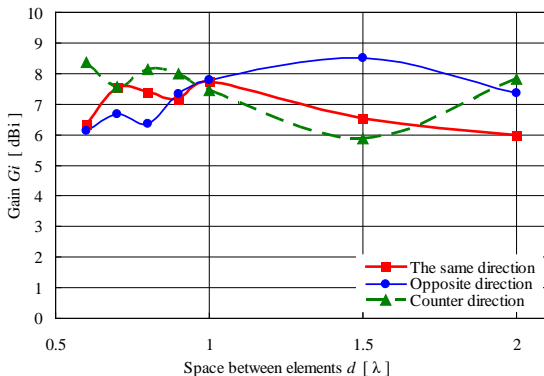


図8 素子間隔と絶対利得との関係の測定結果

4.2 周波数帯域幅

次に、素子間結合とアンテナの周波数帯域幅との関係を明らかにする。図7に二素子の三角板寄生素子付き ULPD アレーアンテナの素子間隔と 10 dB 帯域幅との関係を示す。横軸は素子間隔 d 、縦軸は 10dB 帯域幅を表す。

三角板寄生素子付き ULPD アンテナ単体の 10 dB 帯域幅の測定値は比帯域幅で 5 % (300 MHz) である。二素子のアレーアンテナの測定結果では、素子間隔が 1.0 波長以下では、素子の配置方向によって比帯域幅 5 % (300 MHz) を中心に比帯域幅 0.8 % (50 MHz) の変動がみられる。しかし、50 MHz の差を許容できるならば、素子間結合の影響を考慮する必要はないと考えられる。

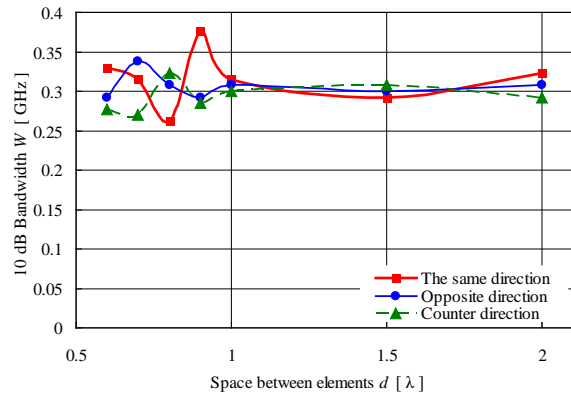


図9 素子間隔と周波数帯域幅との関係の測定結果

5. まとめ

本論文では、三角板寄生素子付き ULPD アンテナを用いたアレーアンテナの設計指針を与えるために、基本的な電気的特性を二素子のアレーアンテナに限定した実験的検討を行い、次のことを明らかにした。

- (1) 寄生素子の配置方向が同方向の場合、放射パターン形状は、素子間結合がない場合に近くなる。
- (2) 寄生素子の配置方向が離反の場合、ビーム幅が広くなり、素子間結合がない場合と大きく異なる。
- (3) 寄生素子の配置方向が対向の場合、ビーム幅が狭くなる。
- (4) 素子の配置方向による放射パターンの変化の原因は、素子アンテナの放射素子部の近傍の素子アンテナの配置に強く影響する。
- (5) 素子間の伝送係数の大きさによって素子間結合量の評価がある程度できることが判明した。

素子間結合が電気的特性に及ぼす影響より、三角板寄生素子付き ULPD アレーアンテナの設計の指針を以

下に示す.

AP2008-161, pp. 67 – 72, 2009 年 01 月

- (1) E 面の放射パターンにおいて、素子の配置方向を寄生素子離反にすることでビーム幅を広くすることが可能である.
- (2) E 面の放射パターンにおいて、素子の配置方向を寄生素子対向にすることでビーム幅を狭くすることが可能である.
- (3) 素子アンテナの配置方向において、放射素子部の近傍の物体が素子間結合に大きく影響を与える.
- (4) アンテナ利得において、3 dB の差を許容できるならば、素子間結合の影響は考慮しなくてよい.
- (5) 周波数帯域幅において、50 MHz の幅を許容できるならば、素子間結合の影響は考慮しなくてよい.

参考文献

- (1) R. Baggen, S. Voccaro, and D. L. del Rio., “Design considerations for compact mobile Ku-band satellite terminals” , Eu CAP2007, pp. 1 - 5, Nov. 2007.
- (2) L. Zaid, G. Kossias, J.-Y. Dauvignac, J. Cazajous, and A. Papiernik, “Dual Frequency and Broad-Band Antennas with Stacked QuarterWavelength Elements”, IEEE Trans. Antennas & Propag., vol. 47, no. 4, pp. 654 - 660, Apr. 1999.
- (3) 高橋, 中本, 大塚, 青木, 小西, 谷島, “衛星搭載用フェーズドアレーアンテナの機械的変形を補正するビーム指向校正方法の校正精度改善に関する検討”, 信学技報, no. AP2008-179, pp. 164 - 174, 2009 年 1 月.
- (4) 安住, 小島, 風間, 橋本, “二層型 MSA を用いたフェーズドアレーアンテナに関する検討”, 信学技報, no. NW2008-122, pp. 25 - 30, 2008 年 11 月.
- (5) 長谷川, 安住, 橋本, 風間, “移動体衛星通信用フェーズドアレーアンテナの一検討”, 信学技報, no. AP2009-40, pp. 19 - 23, 2009 年 6 月.
- (6) A. Thumvichit, T. Takano, and Y. Kamata, “Ultra Low Profile Dipole Antenna with a Simplified Feeding Structure and a Parasitic Element”, IEICE Trans. Comm. vol. 89-B, no. 2, pp. 576 - 580, Feb. 2006.
- (7) T. Imura, M. Okumura, K. Kumamaru, D. Radenamad, Y. Kamata, and T. Takano, “Excitation of Dipole Mode in Asymmetrical Ultra Low Profile Dipole Antenna”, ISAP'06, no. a90-r144, pp. 1 - 4, 2006.
- (8) 花山 英治, 田代 賢趣, 高野 忠, “超低姿勢ダイポールアンテナの広帯域化に関する実験的検討”, 2008 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会通信講演論文集 1, no. B-1-140, p. 140, 2008 年 9 月.
- (9) 島田, 山田, 山口, “アンテナ近傍物体の結合を考慮したブラインドアレー校正手法”, 信学技報, no.