

携帯電話基地局用 4 周波共用アレーアンテナの設計

伊藤 和也, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科),
井上 真豪 (日立国際八木ソリューションズ (株) 製品設計本部)

概要: 携帯電話基地局アンテナの設置スペースを削減するために, 多周波共用アンテナ技術が有効である. 筆者らは携帯電話基地局用多周波共用アンテナ素子として, これまでにテーパスロットアンテナ (Tapered Slot Antenna; TSA) を用いた 3 周波共用アンテナ素子, および八木・宇田ダイポール素子を用いた 900 MHz 帯用アンテナ素子を提案してきた. 本報告では, 過去に提案した TSA 素子および八木・宇田ダイポール素子を組み合わせ 0.9/1.5/2/2.4 GHz 帯の 4 周波共用基地局アレーアンテナを提案し, 素子間アイソレーションおよび指向性の設計を行った. 提案したアレーアンテナが, 4 周波数帯に亘って, 携帯電話基地局アンテナに要求される性能を満足することを示す.

キーワード: 基地局アンテナ, アレーアンテナ, 多周波共用, 指向性

1. まえがき

近年の移動通信では, 高速化のための移動通信システムの開発が絶え間なく行われてきており, それに伴い移動通信サービスの多帯域化が進んでいる. 一方で, 市街地においては基地局アンテナの設置空間がひっ迫しており, 設置するアンテナの本数を削減することが求められている. また, 基地局は鉄塔上, ビルの屋上などの場所に建設されるため, 景観や耐風圧荷重の観点で, 基地局アンテナを小型化することが重要である.

このように, サービスの多帯域化が進むと同時に, 基地局アンテナの本数削減および小型化という要求がされており, 周波数帯ごとに基地局アンテナを設置することが困難となっている. そこで, 複数の周波数帯を 1 本のアンテナでカバーできる多周波共用アンテナを基地局アンテナに使用することが有効である. 多周波共用アンテナの設計手法としては, 周波数帯の数に対応する多素子構造を用いるものが一般的である [1]. 0.9/1.5 GHz 帯用ダイポール素子と 2GHz 帯用ダイポール素子のそれぞれに無給電素子を取り付けた 3 周波共用基地局アンテナ [2][3] や, 1 本の放射素子の近傍に複数の無給電素子を配置した 3 周波共用基地局アンテナ [4] が提案されている. しかしながら, これらの手法は周波数帯ごとにアンテナ素子あるいは無給電素子を用意し, 多共振により多周波共用を実現する手法であるため, アレーアンテナを設計する際に各周波数帯の素子間で相互結合が発生する. 次世代移動通信システムの開始により, 基地局アンテナにはさらに多くの周波数帯をカバーすることが求められるようになる予想されるため, 多素子構造による手法では相互結合の影響により設計が困難となると考えられる.

このような相互結合の問題に対し, 基地局アンテナ素子として広帯域アンテナを用いることが有効であると考えている. アンテナ素子の広帯域性を利用して複数の周波数帯をカバーすることで, 従来の手法よりも少ない素子数で多周波共用基地局アレーアンテナを構成でき, 相

互結合の影響を解消できるものと考えている. そこで本研究では, 広帯域アンテナ素子を用いた携帯電話基地局用多周波共用アンテナを実現することを目的とする.

筆者らは, 基地局アンテナ素子に適した広帯域アンテナとしてテーパスロットアンテナ (Tapered Slot Antenna; TSA) [5][6] に着目し, これまでに 3 周波共用 TSA 素子を提案してきた [7]. TSA は広帯域特性のほかに, 薄型軽量, 低コスト, 量産が容易といった特徴を持つため, 多周波共用基地局アンテナ用素子に適していると考えている.

本報告では, 筆者らが過去に提案した 3 周波共用 TSA 素子 [7] および 900 MHz 帯用八木・宇田ダイポール素子 [8] を組み合わせ, 0.9/1.5/2/2.4 GHz 帯共用基地局アレーアンテナを構成した結果について述べる. 基地局アレーアンテナの性能を評価し, 所望の性能を実現するべく設計を行った結果を報告する.

2. 4 周波共用基地局アレーアンテナの構造

表 1 に, 本研究で提案する多周波共用基地局アレーアンテナに要求される各種性能を示す. 本研究では, 使用周波数帯を 0.9/1.5/2/2.4 GHz の 4 周波数帯とし, この 4 周波をカバーする基地局アンテナを TSA を用いて実現することを目指す. インピーダンス整合の指標として, 反射係数の絶対値を ≤ -10 dB とする. 基地局アンテナは隣接セルとの干渉を防ぐために前後比を高くすることが求められており, 本研究では前後比の要求値を ≥ 20 dB とする. また, 加入者容量を増大するために 6 セクタ無線セル構成とする. セクタ数が 6 の場合, 加入者容量を最大とするためには, 水平面ビーム幅はセクタの分割角度である 60° よりも小さい値とするべきであるが, ビーム幅を狭くするとセル端でのレベル劣化が大きくなるため, 本研究ではビーム幅の設計目標を $60^\circ - 70^\circ$ の範囲とする. また, 基地局アンテナの省スペース化, 風圧荷重低減の観点でレドームの内径は 200 mm と規定する. したがって, 本研究においてアンテナの設計はこのサイズ制限を受けることになり, アンテナ全体が直径 200 mm の円筒内に収まるよう設計する必要がある.

表 1: 基地局アンテナの要求性能

Frequency Bands	900 MHz, 1.5 GHz, 2 GHz, 2.4 GHz
$ S_{11} $	≤ -10 dB
Front to Back Ratio	≥ 20 dB
Number of Sectors	6
Half-Power Beamwidth (Horizontal Plane)	$60^\circ - 70^\circ$
Size of Radome	$\phi 200$ mm \times 2500 mm

図 1 に, 提案する 4 周波共用基地局アレーアンテナの

構造を示す．提案するアレーアンテナは，八木・宇田ダイポール素子，TSA素子，後方反射板からなる構造である．八木・宇田ダイポール素子は900 MHz帯をカバーし，TSA素子はその広帯域性を利用して1.5/2.4 GHzの3周波数帯をカバーする．900 MHz帯をTSAではなく八木・宇田ダイポールがカバーするようにした理由は，前述したように基地局アンテナの設計においてはレドーム内径によるサイズ制限があり，900 MHz帯用アンテナ素子としてTSAを使用した場合，波長の長い900 MHz帯ではレドーム内にアンテナを納めながら所望の水平面半値幅を得ることが困難であると考えたためである．そこで，TSAより小さなアンテナ径で比較的鋭い指向性を得ることができる八木・宇田ダイポール素子を900 MHz帯用素子として選択した．また，偏波ダイバーシティを行うために水平偏波素子と垂直偏波素子の両方を配列しており，単一指向性を得るためにアンテナ後方には反射板を配置している．その高さはレドームの高さ（表1を参照）と同じく2500 mmとした．各アンテナ素子は反射板の下端から上端まで全体に亘って配置しており，水平/垂直偏波TSAのアレー素子間隔はともに d_T ，水平/垂直偏波八木・宇田ダイポールのアレー素子間隔はともに d_Y としている．アレー素子間隔 d_T および d_Y はアレーアンテナの特性を左右する重要なパラメータであり，その設計については次章で詳しく述べる．

3. 4周波共用基地局アレーアンテナの設計

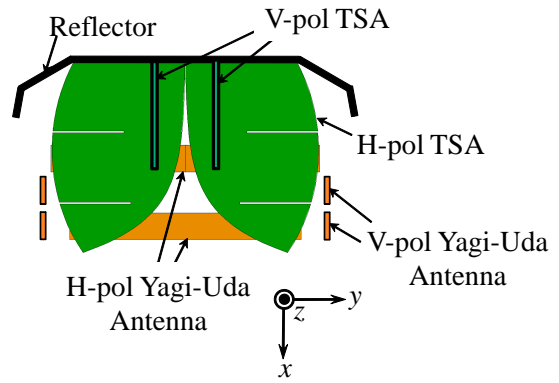
3.1 アレー素子間隔の検討

3.1.1 アレー素子間隔に対する要求事項

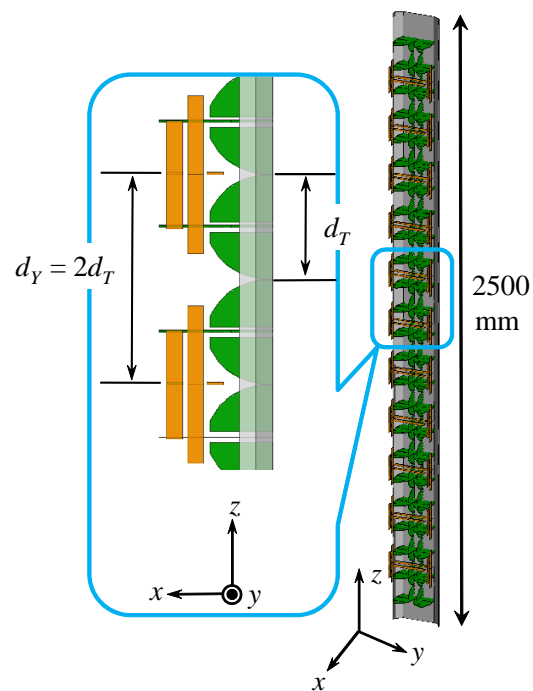
図1に示したTSAアレー素子間隔 d_T および八木・宇田ダイポールアレー素子間隔 d_Y の設計を行うにあたり，アレーアンテナにおいてアレー素子間隔によりアンテナ特性が受ける影響，基地局アレーアンテナのアレー素子間隔を設計する際に考慮する必要がある事項についてまとめる．

まず，一般に，アレーアンテナのアレー素子間隔がある値より広くなると，主ビーム以外の方向にグレーティングローブが発生する．基地局アンテナは垂直方向にアレー化するので，アレー素子間隔を広くしてゆくと垂直面指向性において天頂方向，あるいは大地方向にグレーティングローブが発生することになる．特に天頂方向のグレーティングローブは隣接基地局との干渉の原因となるため，基地局アレーアンテナにおいてグレーティングローブを発生させないことは重要である．グレーティングローブの発生を防ぐためには，アレー素子間隔は1波長程度以下であることが望ましい．

一方で，アレー素子間隔を狭くするとアレー素子間の相互結合が強くなる．単素子の場合について適切に設計した指向性やインピーダンスなどの特性が，アレー化をすることにより相互結合の影響を受けてしまう可能性があるため，アレー素子間隔を狭くしすぎないことが必要である．



(a) 上面図



(b) 斜視図および中央部拡大図

図1: 移動通信基地局用4周波共用アレーアンテナの構造

また，本研究で提案する基地局アンテナは，ダイバーシティの方式として偏波ダイバーシティを採用しており，水平素子と垂直素子の間の相関が小さいことが望まれる．素子間隔を広くとるほど相関は小さくなると考えられるため，この点でもアレー素子間隔を狭くしすぎないことが必要である．

以上のように，アレー素子間隔は広すぎても狭すぎても問題が生じるため，上記の観点を総合的に考慮した設計が必要である．また，本研究で提案するアンテナは4周波共用アンテナであるため，アレー素子間隔を決定する際に，低周波側と高周波側では波長に対する電氣的な素子間隔が異なることになり，この点でも注意が必要である．

3.1.2 アレー素子間隔の設計

本節では、図1の基地局アレーアンテナについて、アレー素子間隔 d_T および d_Y に対するアンテナ特性の変化をモーメント法による数値シミュレーションにより解析し、その設計を行う。

なお、図1中に示したように、八木・宇田ダイポールアレー素子間隔 d_Y は TSA アレー素子間隔 d_T の2倍に固定している。これは、すべてのアンテナ素子を同一空間に配列する都合上、八木・宇田ダイポールのアレー素子間隔は TSA のアレー素子間隔の整数倍であることが好ましいためである。 $d_Y = 3d_T$ とした場合、900 MHz 帯において垂直面指向性にグレーティングローブが発生するがあることを確認したため、 $d_Y = 2d_T$ とした。

はじめに、水平/垂直素子間の相関について検討を行った。3.1.1 節で述べたように、偏波ダイバーシティを行うためには、水平偏波素子と垂直偏波素子間の相関が小さいことが望まれる。そこで、水平/垂直素子間のアイソレーションを相関の評価指標とし、アレー素子間隔がアイソレーションに与える影響をシミュレーションにより調べた。

アイソレーションの計算のために、図2に示すように4つのポートを定義する。ポート1は水平偏波 TSA、ポート2は垂直偏波 TSA、ポート3は水平偏波八木・宇田ダイポール、ポート4は垂直偏波八木・宇田ダイポールの入力端子である。そして、 $|S_{21}|$ を計算することにより TSA 間のアイソレーションを、 $|S_{43}|$ を計算することにより八木・宇田ダイポール間のアイソレーションを評価する。なお、図2の4つのポートに含まれていないアンテナ素子は全て 50Ω で終端している。

TSA アレー素子間隔 d_T を $100 \text{ mm} (\approx 0.80\lambda_{2.4})$ から $130 \text{ mm} (\approx 1.04\lambda_{2.4})$ の範囲で変化させたときの $|S_{21}|$ の周波数特性を図3に示す。また、 $d_Y = 2d_T = 200 \text{ mm} \approx 0.6\lambda_{900}$ のときの $|S_{43}|$ の周波数特性を図4に示す。図3より、素子間隔を広くとるほどアイソレーションが高くなるのがわかる。 $d_T = 100 \text{ mm}$ では低周波帯でのアイソレーションが 20 dB 程度と低い一方で、 $d_T = 120 \text{ mm}$ では3周波数帯に亘って 30 dB 以上の高いアイソレーションが得られた。図4に関しては、使用周波数全体で 40 dB 以上の高いアイソレーションを得ることができた。以上のことから、アイソレーションの観点では $d_T = 120 \text{ mm}$ 以上が好ましいといえる。

つぎに、 $d_T = 100 \text{ mm}$ の場合と 120 mm の場合について、TSA の全素子に同相・同振幅で給電したときの垂直面指向性を計算し、グレーティングローブの有無について調べた。結果の例として、水平偏波 TSA の 2 GHz における垂直面利得パターンを図5に示す。図からわかるように、 d_T の値にかかわらず、主ビームから $\pm 40^\circ \sim 50^\circ$ 程度離れた位置に高いレベルのローブが発生するという結果となった。この原因として、水平偏波 TSA から放射された電波が、水平偏波八木・宇田ダイポールに電流を誘起し、これらからの再放射が生じることで発生したグレーティングローブであると考えた。八木・宇田ダイポールの素子間隔は $d_Y = 2d_T$ であり、図5の条件では、

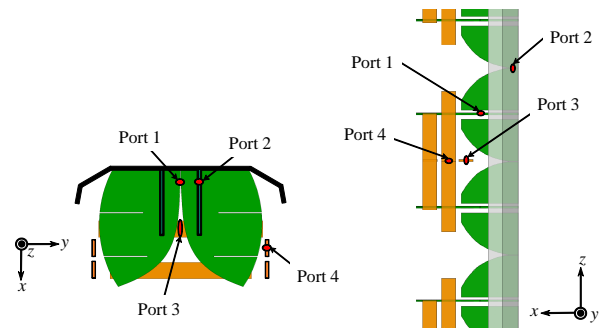


図2: アイソレーション計算のための各ポートの定義

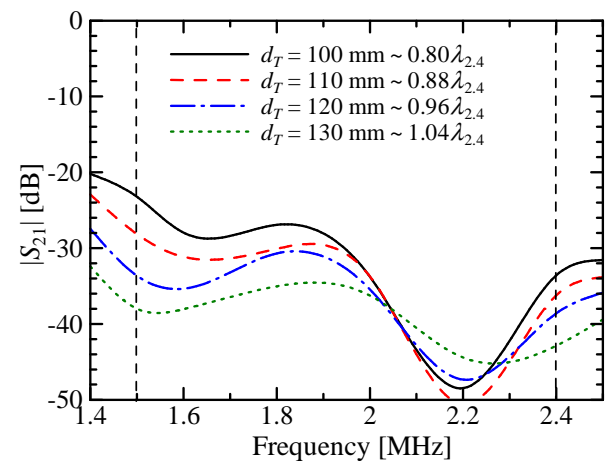


図3: TSA アレー素子間隔 d_T に対する $|S_{21}|$ の周波数特性

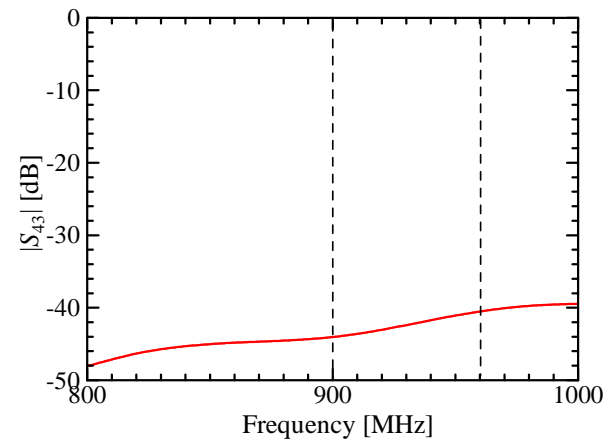


図4: $|S_{43}|$ の周波数特性 ($d_Y = 200 \text{ mm}$)

2.4 GHz の波長である 125 mm よりも広い間隔のため、八木・宇田ダイポールからの放射があるとすればグレーティングローブが発生する。

なお、 $d_T = 100 \text{ mm}$ 、 120 mm のいずれの場合においても、TSA 素子自体からの放射によるグレーティングローブは発生していないことがわかる。したがって、アイソ

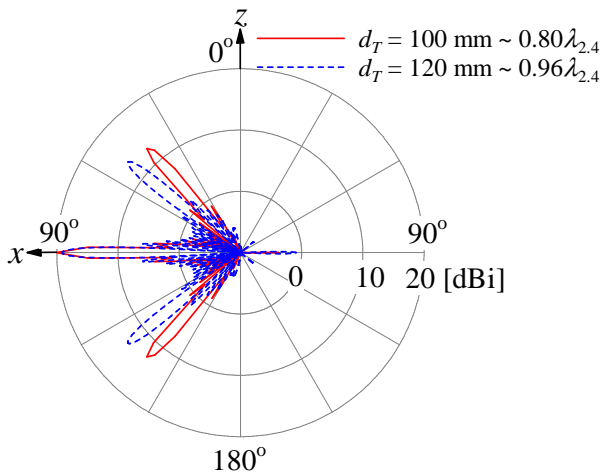


図 5: 水平偏波 TSA の垂直面指向性 (2 GHz)

レーションの検討結果も踏まえると、 $d_T = 120 \text{ mm}$ がより好ましい値であるといえる。

3.2 無給電素子の追加によるグレーティングローブの低減

3.1.2 節の構造では、TSA の動作において、垂直面指向性にグレーティングローブが生じるという問題があった。そして、その原因として、水平偏波八木・宇田ダイポールからの再放射によりグレーティングローブが発生したものと考えた。そこで本節では、このグレーティングローブを低減する目的で、図 6 に示すような構造を提案する。図 6 が図 1 と異なる点は、水平偏波八木・宇田ダイポール素子と全く同じ構造の無給電素子を、水平偏波八木・宇田ダイポール素子の間に配置していることである。これにより、水平偏波 TSA の動作時に、水平偏波八木・宇田ダイポール素子の素子間隔が従来の半分となる効果が得られ、グレーティングローブの低減が実現されるものと考えられる。

無給電素子を追加した構造において、 $d_T = 120 \text{ mm}$ とし、水平偏波 TSA の 2 GHz における垂直面利得パターンを計算した結果を図 7 に示す。無給電素子のある構造では、主ビームから $\pm 40^\circ$ 離れた方向のローブのレベルが、無給電素子がない場合に比べて大幅に低減されていることが分かる。無給電素子の追加により、グレーティングローブを低減可能であることが確認された。

3.3 水平面指向性の評価

本節では、図 6 の基地局アレーアンテナにおいて、各アンテナ素子の水平面における利得パターンを計算し、その結果を考察する。表 1 に示したように、水平面指向性においては半値幅および前後比の要求性能が規定されているため、水平面利得パターンの計算結果から半値幅および前後比を算出し、基地局アンテナのとしての性能を評価する。

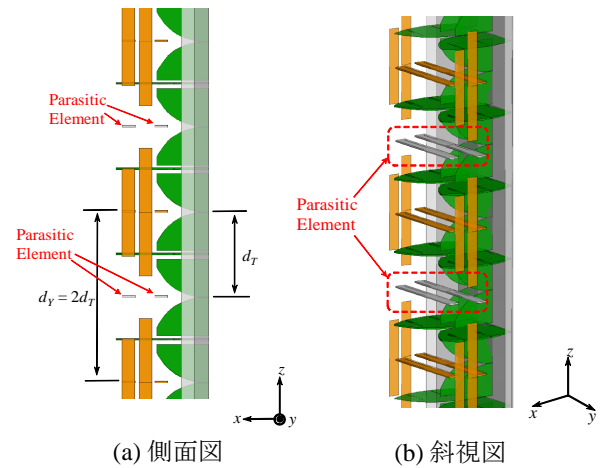


図 6: 無給電素子を追加した基地局アレーアンテナの構造

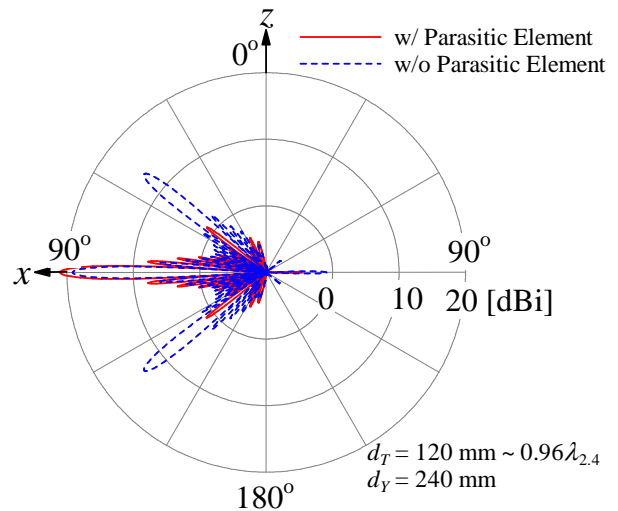


図 7: 無給電素子を追加した場合の水平偏波 TSA の垂直面指向性 (2 GHz)

900 MHz, 1.5 GHz, 2 GHz, 2.4 GHz の各周波数における水平面利得パターンを図 8, 図 9, 図 10, 図 11 に示す。900 MHz のときは水平偏波八木・宇田ダイポールの全素子を、1.5 GHz, 2 GHz, 2.4 GHz のときは水平偏波 TSA の全素子を同相・同振幅で給電し、その他の素子はすべて 50Ω で終端している。図 8 ~ 図 11 より、いずれの周波数においても放射パターンの形状はセクタ形をしており、提案した基地局アレーアンテナが 6 セクタ基地局に適したセクタビームを形成していることがわかる。

また、図 8 ~ 図 11 の結果から、各周波数における半値幅、前後比および最大放射方向における指向性利得の値を算出した。その各値を表 2 に示す。八木・宇田ダイポール動作時 (900 MHz) は前後比がやや劣化し、TSA 動作時 (1.5 GHz, 2 GHz, 2.4 GHz) には半値幅が設計目標をやや外れた値となっていることがわかる。しかしながら、要求値から大幅に逸脱した値となることはないため、各

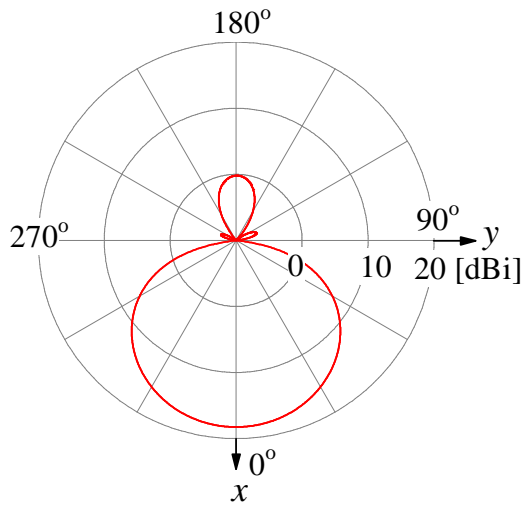


図 8: 水平偏波八木・宇田ダイポールの水平面アレー素子パターン (900 MHz)

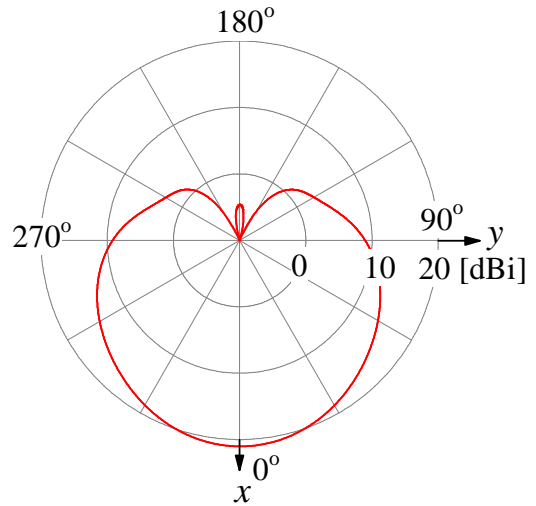


図 10: 水平偏波 TSA の水平面アレー素子パターン (2 GHz)

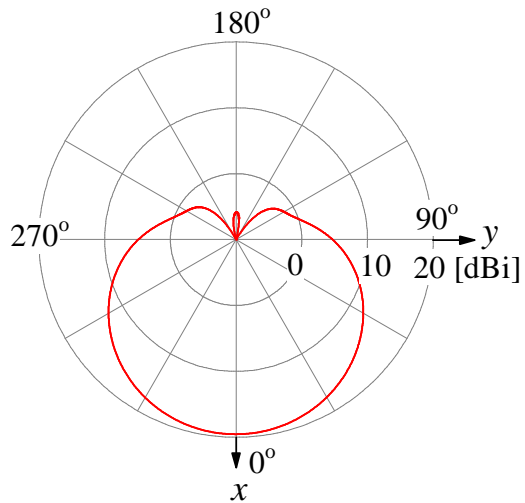


図 9: 水平偏波 TSA の水平面アレー素子パターン (1.5 GHz)

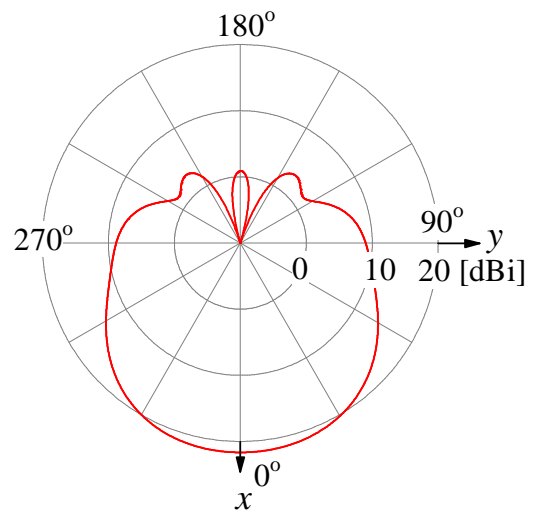


図 11: 水平偏波 TSA の水平面アレー素子パターン (2.4 GHz)

素子や反射板の構造パラメータを微調整することで，指向性の劣化は改善可能であると考えられる。

表 2: 基地局アレーアンテナの半値幅，前後比および指向性利得

Frequency [GHz]	Half-power beamwidth [deg.]	F/B [dB]	Directive Gain [dBi]
0.9	64.0	18.5	18.2
1.5	76.0	25.4	19.5
2	69.1	25.7	21.0
2.4	78.3	20.1	21.7

4. むすび

携帯電話基地局用 4 周波共用アレーアンテナとして、TSA 素子と八木・宇田ダイポール素子を組み合わせた 0.9/1.5/2/2.4 GHz 帯共用基地局アンテナを提案した。素子間アイソレーションや水平面/垂直面指向性の観点から設計を行い、良好な性能を示す基地局アレーアンテナを実現した。

参考文献

- [1] 長 敬三, 山口 良, 蔣 惠玲, “次世代移動通信システム実現に向けた基地局・端末アンテナ技術,” 信学論 (B), Vol. J91-B, No. 9, pp. 886 - 900, 2008 年 9 月 .
- [2] 杉本 由紀, 恵比根 佳雄, “移動通信における 60 ° と 120 ° ビーム幅を有する 3 周波共用基地局アンテナ,” 信学技報, A・P99-47, pp. 35 - 42, 1999 年 7 月 .
- [3] 山口 由紀, 恵比根 佳雄, “水平面 60° ビーム幅を有する移動通信用基地局アンテナの一設計法,” 信学論 (B), Vol. J86-B, No. 6, pp. 951 - 958, 2003 年 6 月 .
- [4] 大嶺 裕幸, 深沢 徹, 宮下 和仁, 茶谷 嘉之, “複数の非励振素子で広帯域化を図った 3 周波数共用ダイポールアンテナ,” 信学技報, A・P2000-6, pp. 37 - 42, 2000 年 4 月 .
- [5] P. J. Gibson, “The Vivaldi Aerial,” Proc. 9th Eur. Microwave Conf., Brighton, U.K., pp.101-105, June 1979.
- [6] K.S.Yngvesson, D.H.Schaubert, T.L.Korzeniowski, E.L.Kollberg, T.Thungren, J.F.Johansson, “End-fire tapered slot antennas on dielectric substrates,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.33, no.12, pp. 1392 - 1400, Dec. 1985.
- [7] K. Itoh, Q. Chen, and K. Tanaka, “Design of Yagi-Uda Antenna in 900 MHz Band for Multi-Band Base Station Antenna,” 平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2A06, 2013 年 8 月 .
- [8] 伊藤 和也, 陳 強, 澤谷 邦男, 田中 健, “携帯電話基地局用多周波共用アレーアンテナ素子の検討,” 2013 年電子情報通信学会総合大会, B-1-100, 2013 年 3 月 .