

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

長 敬三^{†a)} 山口 良[†] 蔣 恵玲[†]

Base Station and Terminal Antenna Technologies Required for Next Generation Mobile Communication Systems

Keizo CHO^{†a)}, Ryo YAMAGUCHI[†], and Huiling JIANG[†]

あらまし 本論文では次世代移動通信システムを実現するための基地局アンテナ及び端末アンテナの技術について述べる。基地局アンテナについては特に伝送速度の高速化に伴う所要電力増加、及びマイクロ波帯利用に伴う損失増加に起因して要求される高利得・低損失アンテナの実現に向け、アンテナの給電系の損失を低減する方法としてRF回路一体型アンテナに着目するとともに、RF回路ごとに必要となるダイプレクサの小形・低損失化を行う一手法としてフィルタ一体型アンテナ構成について述べる。また端末アンテナについては、端末として代表的である携帯電話アンテナに注目し、特に高速データ伝送実現において重要となるマルチアンテナ実現に向けた課題、マイクロ波帯で携帯電話アンテナを構成する上での課題について述べたのち、携帯電話アンテナの検討を行う上で重要となるアンテナの評価法に関する今後の方向性について述べる。

キーワード 基地局アンテナ, 携帯電話アンテナ, RF回路一体型アンテナ, マルチアンテナ

1. ま え が き

2001年に第3世代の移動通信システムであるIMT-2000のサービスが開始され、2006年にはHSDPA (High Speed Downlink Packet Access) サービスが開始されるなど、移動通信システムは高速化に向け絶え間なく開発が行われてきている[1], [2]。近年は、IMTの周波数帯で最大100 Mbit/s程度的高速データ通信を可能とするLTE (Long Term Evolution) やWiMAXなど、データ伝送速度をより高速化するシステムの開発が本格化している[3], [4]。更に次世代の移動通信システムとして、IMT-Advancedと呼ばれる20~100 MHz程度の帯域幅で屋外100 Mbit/sから屋内1 Gbit/s程度的高速伝送の実現を目標としたシステムの研究も既に開始されており、屋外移動環境において数Gbit/sのデータ伝送を行った試験結果も報告されている[5]。

次世代移動通信をサービスする周波数帯についてもITUにおいて議論が進められており、2007年11月に

行われたWRC (World Radio Conference) において3.4~3.6 GHz帯の周波数が新たにIMT用周波数として特定され、3 GHz以上の周波数帯を用いた移動通信システムの実現可能性について模索され始めている。

移動通信において高速データ伝送を実現する上では、多値変調やMIMO多重伝送のための信号処理技術、誤り訂正技術、各ユーザの電波環境を考慮したスケジューリング技術などの無線伝送技術の技術開発も重要な課題であるが、本論文では特に電波の出入口である基地局アンテナ及び端末アンテナについて、高速データ伝送を実現するための技術に着目する。本論文では基地局アンテナ及び端末アンテナのそれぞれについて、まずアンテナに要求される性能及び現状のアンテナ技術を概観する。その後、次世代移動通信システムにおいて更なる高速データ伝送を実現する上でアンテナに求められる技術課題について述べる。基地局アンテナについては特に伝送速度の高速化に伴う所要電力増加・マイクロ波帯利用に伴う損失増加に起因して要求される高利得・低損失アンテナを実現するための技術に着目する。また端末アンテナについては、端末として代表的である携帯電話アンテナに注目し、特に高速データ伝送実現において重要となるマルチアンテナ実現に向けた課題、マイクロ波帯で携帯電話アンテナ

[†](株)NTTドコモ, 先進技術研究所, 横須賀市

Research Laboratories, NTT DOCOMO, INC., 3-6 Hikarino-oka, Yokosuka-shi, 239-8536 Japan

a) E-mail: cho@m.ieice.org

ナを構成する上での課題について述べたのち、携帯電話アンテナの検討を行う上で重要となるアンテナの評価法に関する今後の方向性について述べる。

以下、本論文の構成は 2. 及び 3. において基地局及び携帯電話アンテナへの要求条件と、これまでに検討されたアンテナ技術について概説する。次に 4. において次世代移动通信システム実現に向けた基地局アンテナの課題及び課題解決に向けた要素技術について述べ、5. において携帯電話におけるマルチアンテナ実現に向けた課題、マイクロ波帯用携帯電話アンテナ実現の課題及びアンテナ評価技術の動向について述べる。6. において本論文のまとめを述べる。

2. 基地局アンテナへの要求性能

移动通信用の基地局アンテナとしては、屋外に設置されるものや建物内に設置されるもののほか、トンネルなどのように屋外の電波の届きにくい場所をエリア化するためのアンテナなどがあるが、本論文では移动通信用基地局として代表的なアンテナである屋外に設置されるアンテナに着目する。

基地局アンテナの性能に要求される主な項目、要求条件、及び実現技術をまとめたものを表 1 に示す。基地局アンテナに要求される主な項目としては下記の四つが挙げられる。

- (1) 指向性
- (2) 動作帯域
- (3) ダイバーシチ
- (4) その他(小形・軽量化, 受動相互変調ひずみ等)

以下、各項目について要求条件及びこれまでに検討さ

れているアンテナ技術について概説する。

2.1 指向性

基地局アンテナの指向性としては、基地局のエリア内は十分な電界強度となり、同一周波数を使用するエリア方向へは不要な放射を行わない指向性が要求される。例えば IMT-2000 のように符号分割多重アクセス (CDMA) 方式を採用し、隣接するセル及びセクタで同じ周波数を使用する場合、各セクタにおける水平面内指向性を図 1 (a) の点線で示すようにセクタ全体を覆う指向性とする、隣接セクタ同士が重なるエリアでは干渉が大きくなりエリア全体で見たときの加入者容量が低下する。よって、エリア全体での加入者容量を最大とするため、実線で示すように電力半値角をセクタ角よりも狭くした指向性が用いられる [6]。垂直面内についても、隣接セル方向への干渉を低減するため、図 1 (b) に示すように主ビーム方向をセル端方向に傾け(チルトさせ)、隣接セル方向の指向性利得を低減

表 1 基地局アンテナへの要求条件と実現技術

Table 1 Requirements and solutions for base station antennas.

項目	要求条件	実現技術等	
指向性	水平面	隣接セクタ間干渉低減 狭ビーム化	
	垂直面	サービスエリア内照射 隣接セクタ間干渉低減 ビーム成形(コセカント二重ビーム, ノルフィル, サイドロープ低減等) ビームチルト	
動作帯域	マルチバンド 広帯域	システム帯域入力特性の満足 素子間結合抑圧(スタブ装荷)	マルチバンド共振構造(無給電素子等)
		セクタへの適合	周波数間指向性整合
ダイバーシチ	相関低減	2方向ビーム共通化 偏波ダイバーシチ構成	
その他	小形・軽量化	2方向ビーム共通化 偏波ダイバーシチ構成 円面反射板	
	IM低減	金属接合時の考慮等	
	景観適合	街路燈一体化等	

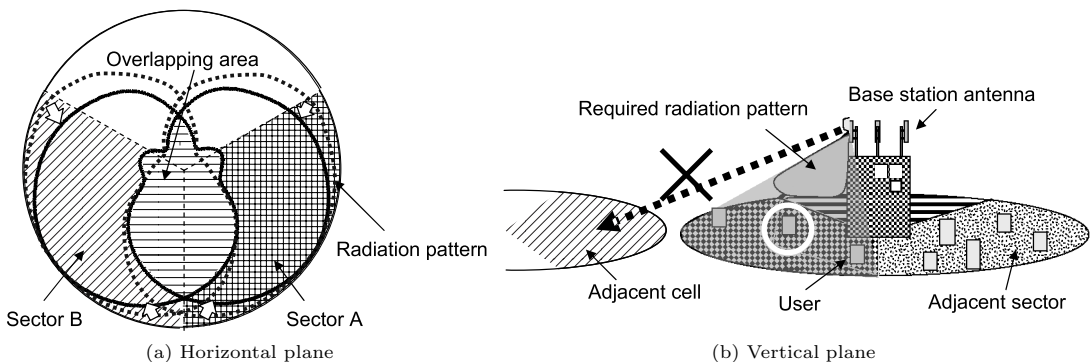


図 1 基地局アンテナに求められる指向性
Fig. 1 Required radiation pattern for base station antenna.

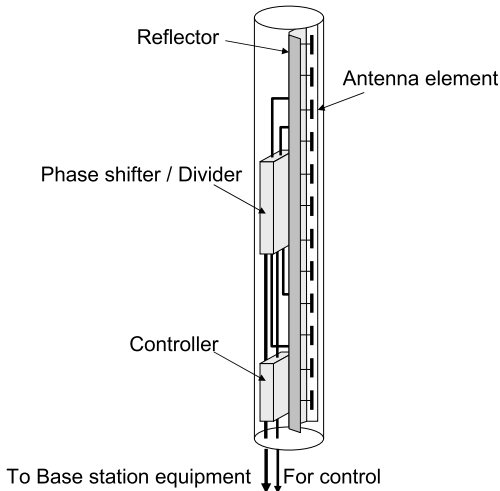


図 2 基地局アンテナの構成例

Fig. 2 Typical base station antenna configuration.

した指向性が用いられる。

図 2 に基地局アンテナの構成例を示す。現在はセクタセル構成が一般的であるため、水平面内指向性を単一指向性とするために、アンテナ素子としては反射板付ダイポールアンテナやパッチアンテナが用いられる。垂直方向はアレー構成となっており、移相器を配置してチルト角を可変とした構成が一般的である。移相器をすべての素子に配置すると、移相器が大きくなりアンテナが大型化するとともにコストが高くなるため、いくつかの素子を単位としたサブアレーごとに位相を制御する構成が用いられる。サブアレーを構成する素子数を増やすとアレー間隔が広くなりグレーティングローブの発生や利得劣化が生じるため、サブアレー内の素子数はグレーティングローブや利得などの特性と移相器数とのトレードオフになる [7]。サブアレー単位で励振位相を制御する構成としたときに、グレーティングローブや利得劣化を抑えることが可能な励振位相の設定法に関する検討結果も報告されている [8], [9]。またチルト角は基地局アンテナ設置時に一度設定しても、周辺に新たな基地局が設置されるなど置局状況の変化によって適切なチルト角がしばしば変更となるため、移相器の設定位相を遠隔で制御できる構成も開発されている [10]。更に基地局のエリア内の電界強度を基地局からの距離によらず一定にする目的でアンテナの指向性を cosec^2 特性とする設計法や指向性のヌルを埋める構成なども提案されている [11]。

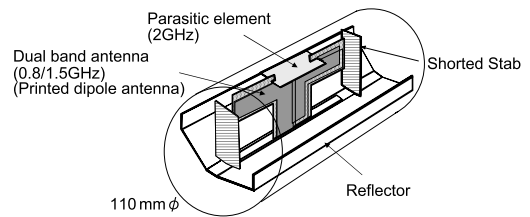


図 3 0.8/1.5/2 GHz 帯共用基地局アンテナ

Fig. 3 Triple band (0.8/1.5/2 GHz) base station antenna.

2.2 動作帯域

基地局アンテナはシステムが使用している周波数帯で、入力インピーダンス特性及び指向性が所望の性能を満足する必要がある。現在の IMT-2000 のシステムは加入者容量を確保するため 0.8, 1.7, 2 GHz 帯と複数の周波数帯 (マルチバンド) でサービスを行っているため、アンテナもマルチバンドで動作する必要がある。また後述するように、屋外に設置するアンテナの本数はできるだけ削減する必要があるため、異なる周波数帯を利用する複数システム用アンテナを統合したのもも開発されている [12], [13]

基地局アンテナの広帯域化・マルチバンド化を実現する方法としては、無給電素子を配置する構成が一般的に用いられている。より広帯域の特性を実現する構成として、板状の無給電素子を配置することにより線状無給電素子を用いた場合に対して倍の帯域を実現した例も報告されている [14]。IMT-2000 導入当初開発された PDC を共存するマルチバンドアンテナでは、800 MHz 帯、1.5 GHz 帯及び 2 GHz 帯で動作する必要があり、無給電素子を配置して 3 周波数で動作するマルチバンド素子構成が実現されている [12], [15]。しかし 800 MHz と 2 GHz では 2 倍以上の周波数差があり、物理的な素子の位置が同じ場合電気的な素子間隔が倍以上異なる。よって 2 GHz 帯におけるグレーティングローブを低減するように素子間隔を狭く設定すると、800 MHz 帯では素子間隔が狭すぎて相互結合が大きくなり効率が劣化する。この結合を抑える構成として、図 3 に示すように反射板に片端を終端したスタブを素子間に配置する構成が提案されている [16]。この構成により 1.5 GHz 帯及び 2 GHz 帯の入力インピーダンス特性に影響を与えず、800 MHz 帯の結合特性の改善を実現している。また広帯域に指向性を一定にするアンテナ構成として、反射板の構造を工夫するこ

とにより 600 MHz 程度から 2 GHz の間でほぼ 120 度一定の電力半値角を実現するアンテナ構成や、更に無給電素子の形状を円筒状にすることによって入力インピーダンス特性と電力半値角の両方の広帯域化を実現するアンテナ構成が報告されている [17], [18] .

2.3 ダイバーシチ

移動通信システムではフェージングによる伝送特性劣化を補償するため、ダイバーシチ構成が必須である。屋外に設置される基地局アンテナでは 2 ブランチの空間ダイバーシチ構成及び偏波ダイバーシチ構成が広く用いられている。ダイバーシチで重要となるブランチ間の相関特性は電波の到来特性に依存し、空間ダイバーシチ構成の場合、到来波の角度広がり狭くなるほどブランチ間の相関を下げるために必要なアンテナ間隔が広がる。東京における測定結果では素子間隔を 5 波長以上とするとブランチ間相関を 0.6 以下にできることが報告されている [19]。空間ダイバーシチ構成ではアンテナを二つ配置する必要があるが、設置スペースの削減を目的としたアンテナ構成として、隣接するセクタ方向を向くアンテナを 1 本のアンテナに収納し、アンテナ間隔を確保しながらスペースの削減を行ったアンテナも開発されている [10]。

偏波ダイバーシチ構成は特に市街地では建物等による反射・散乱により十分低いブランチ間相関を得ることができる。偏波ダイバーシチ構成は二つのアンテナを一体構成することができるため、設置スペースを削減できること、設置がしやすいという観点から特に都市部に設置されるアンテナに有効である。偏波ダイバーシチのアンテナ構成としては、反射板付きダイポールアンテナを用いて垂直・水平偏波で構成したもの [20]、更に水平偏波のダイポール素子形状を変形させて細径化したもの [21], [22]、パッチアンテナを用いて構成したもの [23] などの開発例が報告されている。

2.4 その他 (小形細径化, 受動相互変調ひずみ等)

屋外設置用の基地局アンテナは、鉄塔や自立柱、建物の屋上などに設置される。特に建物の屋上に設置する場合、屋上の強度条件に適合するようにアンテナ設置に必要な強度を低減することが重要となる。アンテナ設置強度を考える上では、アンテナが受ける風によって設置基部にかかる風圧荷重が問題となる。風圧荷重低減のため、風圧係数の小さい円筒形状がアンテナ形状としてよく用いられる [24]。また前述したアンテナのマルチバンド化やダイバーシチアンテナの一体化によるアンテナ本数削減も設置場所における強度低

減に有効である。アンテナ自体を細径化する検討としては、反射板付ダイポールアンテナの反射板形状を円筒状にすることにより、従来構成に比較してアンテナ径を半分にできることが報告されている [17]。

小形・細径化以外の条件としては、受動相互変調ひずみ (PIM : Passive Inter-Modulation) により発生する送信信号の受信系への回り込みの低減も重要な課題であり、金属部分の不完全な接合がないようにするなどの対策を十分行う必要がある [25], [26]。また近年では景観に適合したアンテナ概観の実現も要求されており、街路灯に一体化したアンテナなども開発されている [27]。

3. 携帯電話アンテナへの要求性能

移動通信に用いられる端末としては、携帯電話、カード型端末、ノート型 PC 内蔵モジュール、通信モジュール等様々な形態が存在するが、本論文では移動通信において代表的な端末である携帯電話のアンテナに着目して議論を進める。

携帯電話アンテナの性能に要求される主な項目、要求条件、及び性能改善技術をまとめたものを表 2 に示す。携帯電話アンテナの性能に要求される主な項目としては下記の四つが挙げられる。

- (1) 放射効率
- (2) 指向性
- (3) 動作帯域 (マルチバンド)
- (4) 人体による影響

以下、各項目について要求条件及びこれまでに検討されているアンテナ技術について概説する。

3.1 放射効率

携帯電話のアンテナとしては、ホイップアンテナなどの外部に引き出すアンテナや、固定ヘリカルアンテナなどの筐体から突出した形状のアンテナが広く用いられてきたが、近年では携帯電話のデザイン性を考

表 2 携帯電話アンテナへの要求条件と実現技術

Table 2 Requirements and solutions for handset antennas.

項目	要求条件	性能改善技術等
放射効率	小形・内蔵化 金属部品等による劣化低減	筐体上電流の利用 アダプティブ整合
指向性	様々な使用状態での性能確保 到来波方向と指向性の整合	マルチアンテナ切替
動作帯域	マルチバンド動作	分岐構造線状アンテナ
人体による影響	頭部・手等による性能劣化低減 電波防護指針の充足	筐体電流低減 (折返構造) マルチアンテナ切替 アダプティブ整合

慮し、逆Lアンテナなどの内蔵型のアンテナが主流になってきている。よってアンテナは筐体内の限られた空間に配置する必要があるため、小形なアンテナが必要になるとともに、アンテナ近傍に回路部品やカメラ、ディスプレイなどの金属部品が配置される。これらが放射効率の劣化要因となっており、この放射効率の劣化を低減することが携帯電話アンテナの性能改善において重要となっている。放射効率の劣化を抑えるためには、アンテナの大きさを可能な限り大きくするとともにアンテナ周辺に金属部品をできるだけ配置しないような部品配置や筐体設計が必要となる。携帯電話にアンテナを配置すると、携帯電話の回路基板にも電流が流れるという現象を積極的に利用し、筐体全体をアンテナとして利用してアンテナの大きさを確保する構成も提案され、実用アンテナとして用いられている [28]。また使用状態の違いに起因するインピーダンスの不整合による効率劣化を改善する手法として、整合条件を適応的に調整する手法も提案されている [29], [30]

3.2 指向性

携帯電話アンテナの指向性としては、図 4 (a) に示すように携帯電話を使用する状態で電波が到来する方向に指向性を有することが求められる。しかし携帯電話は待受け、通話、メールやインターネットを見るブラウジング等、様々な状態で使用される。このようなあらゆる使用状態における性能を規定することは不可能であるため、一般には通話などの代表的な使用状態において、電波の到来特性を考慮してアンテナ性能を

評価し、これら代表的な使用状態で高いアンテナ性能を実現できるように筐体構成、回路部品配置やアンテナ構成が調整される。

電波の到来特性を考慮してアンテナ性能を評価する指標としてパターン平均化利得 (PAG: Pattern Averaging Gain) や平均実効利得 (MEG: Mean Effective Gain) が提案され、広く用いられている [31], [32]。パターン平均化利得は参照アンテナで受信した値との比で定義され、平均実効利得は絶対的な値として定義される。平均実効利得 G_{meg} は式 (1) で与えられる。

$$G_{meg} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left\{ \frac{XPR}{1 + XPR} G_\theta(\theta, \phi) P_\theta(\theta, \phi) + \frac{XPR}{1 + XPR} G_\phi(\theta, \phi) P_\phi(\theta, \phi) \right\} \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$

式 (1) において、XPR は ϕ 成分の偏波の到来波の平均電力に対する θ 偏波の到来波の平均電力比、 G_θ 、 G_ϕ はそれぞれ θ 、 ϕ 成分の指向性利得、 P_θ 、 P_ϕ はそれぞれ θ 、 ϕ 成分の到来波の分布を示す。携帯電話周辺では電波が水平面内の一様な方向から到来するという伝搬特性の評価結果に基づき、到来波の分布としては水平面内の指向性利得を平均した値がよく用いられている。しかし近年は特に都市部においてセルがマイクロセル化し、電波の到来方向は水平よりもやや上方になるという結果も報告されており [33]、使用環境に適した到来波分布を適切に考慮していく必要がある。

携帯電話のアンテナの指向性は、筐体内の回路基板

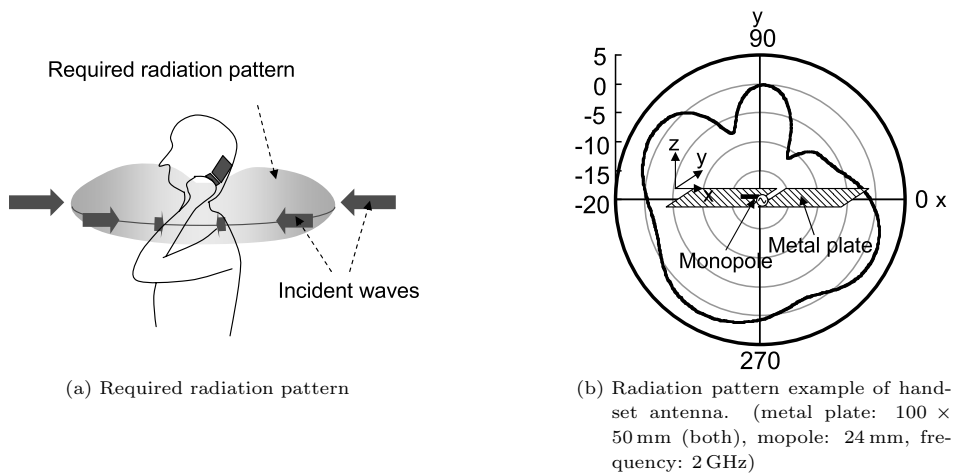


図 4 携帯電話用アンテナの指向性への要求条件
Fig. 4 Requirement for radiation pattern of handset antenna.

に流れる電流の影響により、特に筐体の長さが 0.5 波長を超える周波数帯では、筐体の長手方向を含む面の指向性がひずんだ形状となる。図 4 (b) は折畳み型 (クラムシェル型) の携帯電話筐体を 2 枚の金属板でモデル化し、ヒンジ部にモノポールアンテナを配置したときの放射特性をモーメント法により計算した結果を示している。筐体の全体長は約 1.3 波長となっている。携帯電話の使用時に、指向性利得が低い方向が電波の到来方向と一致するとパターン平均化利得が低下するため、このヌル方向が使用時に電波の到来方向とならないように調整される。また様々な使用状態でのアンテナ性能を向上する方法として、複数のアンテナを配置し、使用状態に応じてアンテナを切り換える構成も用いられている。

3.3 動作帯域 (マルチバンド)

2. で述べたように IMT-2000 はマルチバンドシステムであるため、携帯電話にもマルチバンドアンテナが必要となる。マルチバンドを実現するアンテナ構成としては、逆 L アンテナをもとにして分岐構造を用いるものなどが提案されている [34] ~ [36]。更に近年の携帯電話には移動通信システムによる通信機能のみならず、デジタルテレビ波受信、GPS 受信、非接触型 IC カードや、GSM や WLAN, Bluetooth など別の通信システムまで、様々な機能を実現するための無線応用システムを搭載することが求められている。そのため携帯電話には数多くの周波数帯域での動作が求められ、現状では複数のアンテナを携帯電話の中に配置している。アンテナ容積の削減のため高誘電体で小形化したチップアンテナが GPS や Bluetooth 用アンテナ等に用いられており、また IMT-2000 (UMTS) と GSM, Bluetooth, WLAN まで含めたマルチシステムを共用可能なアンテナ構成なども報告されている [37], [38]。

3.4 人体による影響

携帯電話は、通話状態やブラウジング状態では頭部や手がアンテナ特性に影響するため、指向性や入力インピーダンス特性を評価する上では人体の影響を十分考慮する必要がある。また携帯電話から放射される電波は、電波法によって規定された電波防護指針を満足する必要がある。電波防護指針を満足するとともに頭や手などによるアンテナ性能の劣化を避けるように、アンテナ構成や携帯電話内におけるアンテナ配置位置が選定される。最近の折畳み型の携帯電話では、携帯電話を保持したときの手による性能の劣化が小さく、

かつ通話状態で頭部からの距離が比較的とれるヒンジ部へアンテナが配置される。また手によるアンテナ特性への影響を低減するため、折返し構造のように回路基板に電流が流れにくいアンテナ構造の適用や [39]、前述したようにインピーダンス変動に起因する整合損失を補償するために、インピーダンス変動を適応的に検出し適切な整合条件に調整する整合回路構成についても提案されている [29], [30]。回路基板の電流低減は、手の影響を低減する上では有効であるが、効率や帯域の確保が課題になる。

4. 次世代移動通信システム実現に向けた基地局アンテナ技術

4.1 基地局アンテナに要求される課題

図 5 に次世代移動通信システム用基地局及び携帯電話アンテナに要求される技術課題を示す。次世代移動通信システムでは、限られた周波数資源を有効に利用しながら高速データ伝送をできるだけ広いエリアで実現することが要求される。また前述したように次世代移動通信システム用の周波数帯としてマイクロ波帯 (3 ~ 4 GHz) も想定されており、マイクロ波帯では PDC や IMT-2000 で用いられている周波数 (0.8 ~ 2 GHz) に比較して伝搬損や給電回路の損失が増加する。また新しいシステムを導入する際には、従来システムとの共存も重要となる。このような環境でシステムを実現する上での基地局アンテナへの要求条件としては以下が考えられる。

(1) 周波数利用効率を上げるため、信号多重・干渉低減を空間領域で実現

(2) データ速度の高速化に伴うビット当りの電力を確保するための、アンテナ・無線回路を含めた RF 系の高出力・高利得特性

(3) 高速伝送を実現するための広帯域特性

(4) 従来システムとの共存のためのマルチバンド特性

上記 (1) の空間領域における信号多重・干渉低減は、MIMO 多重伝送技術やアダプティブアレーアンテナ技術により達成される。また (2) の高出力・高利得特性実現のためには、アンテナ利得の増加及びアンテナ・給電系での損失の低減が必要となる。上記を考慮すると次世代移動通信システム用基地局アンテナとしては、アレーアンテナ構成が必須と考えられる。更に (3) の広帯域特性及び (4) のマルチバンド特性を考慮すると、アレーアンテナの性能は周波数特性を有す

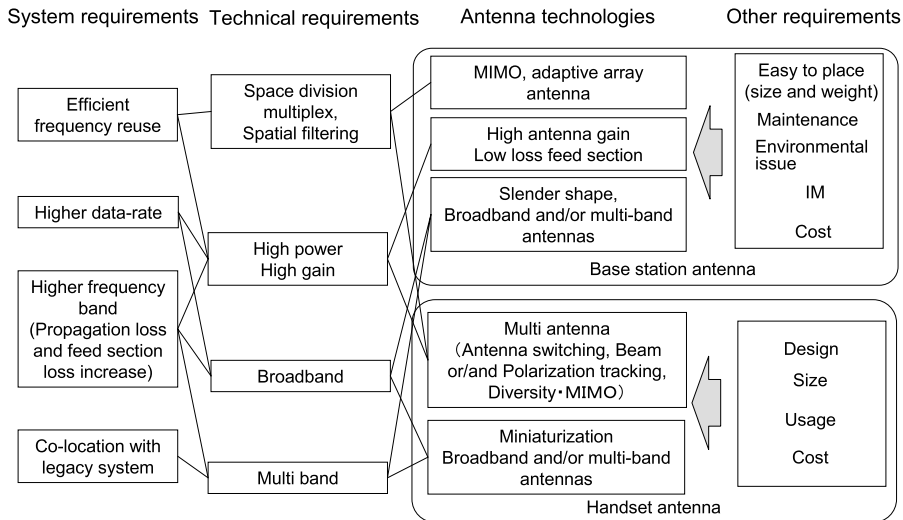


図 5 次世代移動通信用基地局及び携帯電話アンテナに要求される技術

Fig. 5 Required technologies for base station and handset antennas used in next generation mobile communication system.

るため、従来システムとの共存や高速データ伝送のための広帯域・マルチバンド特性をどのように両立するかが重要な検討課題になる。また 2. で述べたダイバーシチ構成や小形・細径化、受動相互変調ひずみなどは同様に考慮する必要がある。最終的なアンテナ構成は、システム要件、上記の要求条件、設置するアンテナ装置全体の大きさや導入コスト等を総合的に勘案して決定される。

現時点では、次世代移動通信システムの具体的な条件が明確でないため、本論文では以下、特に上記の(1)と(2)の要求条件に着目した要素技術について述べる。上記(1)(2)を実現する技術として、まず利得増大や干渉低減を行うためのアレーアンテナに必要な技術について述べるとともに従来の検討例を概説する。次に給電系における損失の低減に向け筆者らが検討している RF 一体型アンテナに適用するフィルタ一体型アンテナについて述べる。

4.2 利得増大・干渉低減のための基地局アレーアンテナ技術

アンテナ利得を増大させるためには指向性を絞る必要があるが、2. で述べたように基地局アンテナの指向性は、自局のエリア内ではシステムにより要求される電界強度を満足するように形成する必要がある。よってサービスエリアを一つのビームで覆う場合には、その指向性利得の最大値はサービスを行いたいエリアの形状や大きさによって決定される。そのため、それ以

上の指向性利得が必要となる場合は、指向性がサービスエリアに比較して絞られるため、目的のエリア全体をカバーするためには、エリア内に異なる方向のビーム(マルチビーム)を用意して、目的の端末方向のビームを選択したり、端末を追尾する機能が必要になる。一方移動通信システムでは各基地局のエリア内に定期的に制御用の信号を報知する必要がある。よって指向性を絞ることによりアンテナ利得を増加させると、前述したようなマルチビームを順に切り換えながら報知信号を送信する方法、または報知信号のみ送信電力を増大させる方法、符号化利得により報知信号強度を増大する方法が必要となる。マルチビームで報知信号を切り換えて送信するとシステムへの接続遅延が生じ、報知信号のみ送信電力を上げる場合には、送信アンプはその分出力の大きいものが必要になる。また、符号化利得を用いる方法では伝送速度が下がるなどの課題があり、信号の報知と利得増大や干渉低減のための狭ビーム化をいかに実現するかはシステム全体の課題である[40]。

利得増大・干渉低減を目的としてマルチビームアンテナやアダプティブアレーアンテナを基地局に適用する試みは 1990 年代後半から 2000 年代前半にかけて活発に検討され、GSM や IMT-2000 のようなセルラシステムへの適用検討や PHS のような TDD システムへの適用検討などが報告されている[41],[42]。

MIMO 多重伝送を用いた高速データ伝送実現に関

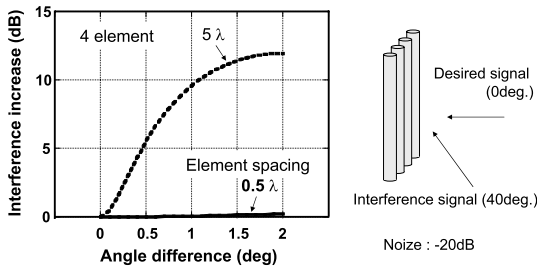


図 6 ヌル方向のずれに伴う干渉増大
Fig. 6 Interference increase caused by wrong null angle.

するアレーアンテナ関連技術としては、特にアレーアンテナで送受信するための信号処理方法や伝搬チャネルに関する研究が数多く報告されている [43]。MIMO 多重伝送で重要となるブランチ間相関低減のためには、基地局環境のように到来波の角度広がり狭い場合広い素子間隔が必要となり、市街地における測定では相関係数を 0.6 以下にするためには 5 波長程度の素子間隔が必要となることが報告されている [19]。一方、アダプティブアレーアンテナとして動作させるためには素子間隔を広くすると角度に対する位相変動が大きくなり、特にヌリングの精度に影響する。この影響は特に送信時に指向性により干渉を与えないようにする場合に問題となる。図 6 に素子間隔が 0.5 波長と 5 波長の 4 素子直線アレーアンテナにおいて、ブロードサイド方向から 40 度の角度から到来する干渉波を除去する指向性を形成したときに、角度方向のずれに対する干渉の増大を示す。各アンテナでの入力 SNR は 20 dB としている。図より分かるように素子間隔が 5 波長の場合、角度方向が 1 度ずれると 0.5 波長間隔アレーに対して干渉量が約 10 dB も増大することが分かる。

MIMO 多重伝送機能とアダプティブアレーアンテナ機能は伝搬環境に応じて使い分けて使用されるが、アンテナ構成は同一であるため、アレーアンテナの素子間隔の設定が重要な設計項目になる。またアレーアンテナ構成は従来のアンテナに比較して大きさが大きくなるために、アンテナを小さくしながら MIMO 多重伝送や干渉除去を行う目的で、直交偏波を用いる手法や [44]、垂直面内のアレー指向性を制御する手法も報告されている [45]。また、アレーアンテナの送受信指向性を一致させる構成法なども提案されている [46]。

4.3 給電損失低減にむけた基地局アンテナ技術

次世代移動通信システムではデータ伝送速度の高速

化に伴い、ビット当りの電力を確保するために所要電力が増大する。また前述したように、次世代移動通信システム用の周波数帯の一候補としてマイクロ波帯が考えられており、マイクロ波帯では IMT-2000 で使用されている周波数帯に比較して伝搬損や給電損が増加する。これらの所要電力や伝搬損・給電損の現在のシステムに対する増加量を試算すると、HSDPA における最大データ伝送速度 14 Mbit/s を基準に考えた場合、データ伝送速度が 100 Mbit/s、1 Gbit/s の場合はユーザ当りの所要電力は 8.5 dB、18.5 dB 増加する。また屋外環境において基地局から放射される電波の伝搬損の周波数特性は $20 \log f$ で表されることが報告されており [47]、現在 IMT-2000 で用いられている 2 GHz 帯に対して搬送波周波数が 3.5 GHz の場合、伝搬損が約 5 dB 増加する。給電系の損失について考えると、給電線損失は導線の表皮効果等により損失が大きくなる。また周波数が高くなり波長が短くなると、アンテナ物理サイズが小さくなりレドーム内部に配置する給電ケーブルの径も大きくできず、損失が増大する。例えば外径 3.5 mmφ 程度のセミリジッドケーブルで 3.5 GHz における損失は 0.7 dB/m 程度と 2 GHz に対して 0.2 dB/m 程度増大する。その他 RF コンポーネントにおいても損失増加が想定されるため、2 GHz に対して数 dB 程度損失が増大することが想定される。よってマイクロ波帯において HSDPA と同じサービスエリアで 100 Mbit/s、1 Gbit/s のデータ伝送を実現する場合、現在のシステムに対してそれぞれ 15 dB 及び 25 dB 以上大きな電力が必要となる。上記の要因としてはデータ伝送速度の増大による所要電力の増加、及び伝搬損の増大に起因する部分が多いが、仮にアンテナ給電系において 2 dB 損失が増加すると、その利得を補償するために必要なアンテナの大きさは 1.6 倍程度になる。給電系の損失低減はアンテナの小形化の観点からも重要であるとともに、受信系においては NF 特性の改善送信系においては所要のふく射電力の低減、基地局消費電力の低減に有効である。

アンテナ給電系の低損失化を行う方法としては、導波管のような低損失線路を用いて給電線路損を低減する方法とアンテナの直後にアンプなどの RF 回路を配置する RF 回路一体構成型のアンテナ構成とする方法の二つが考えられる。特に RF 回路一体構成型の場合、アンテナ直後のアンプなどの出力を調整することでアレーアンテナの指向性を柔軟に制御できるという利点がある。そこで本論文では以後 RF 回路一体型構成に

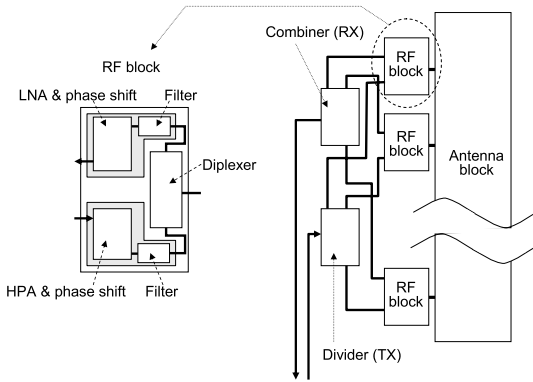


図 7 RF 一体化アンテナの構成
Fig. 7 Block diagram of RF integrated antenna.

絞って議論を進める。

近年の移動通信システムの基地局構成では屋外のアンテナの近くに送受信機を配置し、給電損を低減した構成も用いられているが [2], ここで述べる RF 回路一体型構成とは、アンテナ素子の直後に RF 回路が配置された構成であり、給電損を理想的に除去することができる。RF 回路一体型のアンテナは従来準ミリ波帯やミリ波帯のような高い周波数帯で広く用いられているが [48], [49], 2.6 GHz 帯の航空機用のフェイズドアレーアンテナとして適用した例や [50], GSM の基地局アンテナに適用した例も報告されている [51]。

RF 回路一体型構成の基地局アンテナの構成イメージを図 7 に示す。RF 回路一体型構成ではアンテナの直後に RF 回路が配置されるため、RF 回路ごとに送受信を分けるダイプレクサを配置する必要がある。アレーアンテナ構成におけるチルト位相制御などの指向性制御は、受信系では低雑音増幅後、送信系では電力増幅前に位相制御部を配置することにより実現し、振幅制御については増幅器の利得を制御することで実現できる。各 RF 回路単位の振幅・位相によりアレーアンテナ全体の指向性が決定されるため、配置される RF 回路の振幅・位相については同期・校正が必須となる。同期制御や装置サイズ、指向性への影響などを総合的に考慮して RF 回路を配置する素子単位 (サブアレー数) を決定する必要がある。その他放熱、電源供給法、送受信系の結合の低減も重要な課題となる。

RF 回路ごとに配置するダイプレクサの要求性能緩和に向けて、比較的空間的に広い容積を用いて構成されているアンテナ側にフィルタ機能を付加することが考えられる。ダイプレクサの要求フィルタ性能緩和に

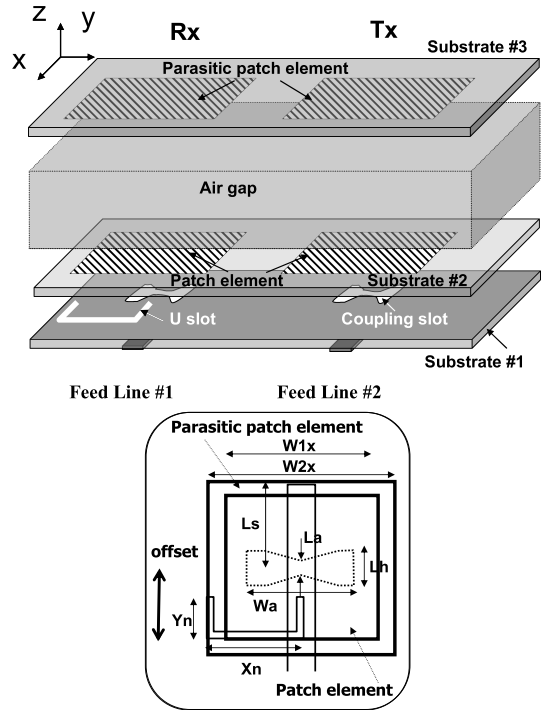
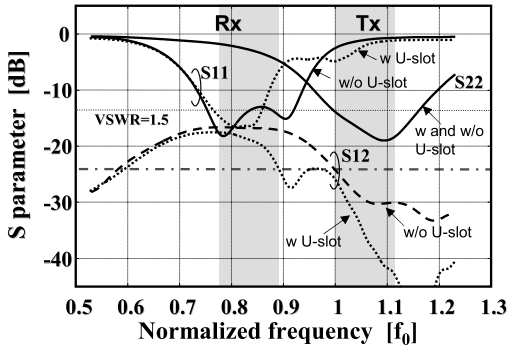


図 8 U 字スロットを用いたフィルタ一体化アンテナ
Fig. 8 Filter integrated antenna with U-slot.

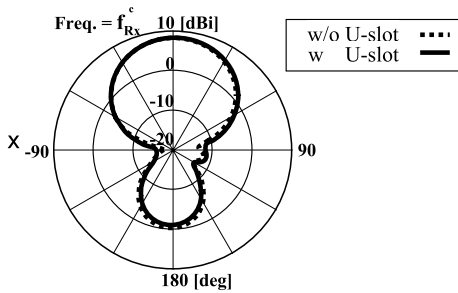
より、ダイプレクサの小形・低損失化に寄与すると考えられる。

アンテナにフィルタ機能をもたせる検討としては [52] や [53], [54] などが報告されている。文献 [52] はアンテナの給電線路にフィルタを配置する構成であり、[53], [54] は放射素子に切込みを入れることによりノッチフィルタ特性を実現している例である。

筆者らはダイプレクサ機能を実現する構成例として、電磁結合給電マイクロストリップアンテナを用いて送信用アンテナと受信用アンテナを別々に設け、送信用アレー素子の間に受信用アレー素子を配置する構成を想定し、受信アンテナの励振パッチの下の給電線路付近に U 字型のスロットを配置して送信アンテナから送信される信号の受信アンテナへの回り込みを抑圧するフィルタ機能を実現した構成を提案している [55]。図 8 にアンテナの構造図を、図 9 に相互結合特性及び放射特性の計算値を示す。ここでは相互結合低減特性の基本的な特性を確認するため、送信用アンテナ及び受信用アンテナがそれぞれ 1 素子の場合で検討している。送信及び受信のシステム周波数帯域としては、送信側の下限周波数を基準に考え、規格化周波数で送信



(a) Input impedance



(b) Radiation pattern

図 9 入力インピーダンス及び放射特性

Fig.9 Input impedance and radiation pattern.

帯域 1 ~ 1.1, 受信帯域が 0.77 ~ 0.88 を想定している。計算には CST Microwave Studio Suit 2006 を使用した。アンテナの構造パラメータを表 3 に示す。本アンテナではボータイ形状のスロットで給電するとともに無給電素子を配置することにより U 字型スロットを配置しない場合, 受信帯域に要求されるほぼ 14% の比帯域特性を $VSWR=1.5$ で実現している。送信信号の受信アンテナへの回り込みとなる S_{21} は U 字スロットを配置することにより, 送信帯域の上限周波数で 10 dB 以上低減できている。また U 字スロットをパッチ素子の下に配置したことにより放射パターンに影響がないことが確認できる。しかし, この構成では送信帯域の下限は 2 dB 程度の改善量しかなく, かつ受信帯域の比帯域が約 10% 程度に減少する。本特性を改善する構成として, 受信側素子の励振パッチを短冊状にしてフィルタ機能を実現する構成についても提案し, 受信アンテナの比帯域を 20% 以上確保するとともに, 送信帯の信号の結合をフィルタ機能のないアンテナに対して 6 dB 以上低減可能な構成も実現している [56]。

フィルタ性能についてはシステムで実際に使用する周波数帯域と要求される抑圧性能に応じて設計・調整

表 3 アンテナ構造パラメータ
Table 3 Antenna configuration parameters.

Feed line	width	$0.05\lambda_0$
Substrate #1	ϵ_r	3.3
	thickness	$0.02\lambda_0$
Substrate #2	ϵ_r	3.3
	thickness	$0.03\lambda_0$
Radiation patch	Rx	$0.27\lambda_0$ sq.
	Tx	$0.19\lambda_0$ sq.
Air gap	thickness	$0.1\lambda_0$
Substrate #2	ϵ_r	3.3
	thickness	$0.03\lambda_0$
Parasitic patch	RX	$0.33\lambda_0$ sq.
	TX	$0.23\lambda_0$ sq.
Bwo-tie slot	W_a	$0.18\lambda_0$
	L_p	$0.03\lambda_0$
	L_a	$0.03\lambda_0$
	L_h	$0.06\lambda_0$
	X_n	$0.15\lambda_0$
	Y_n	$0.07\lambda_0$
	offset	$0.13\lambda_0$

が必要あり, 実用に向けては更に詳細な検討が必要である。

5. 次世代移動通信システム実現に向けた携帯電話アンテナ技術

前述したように, 次世代移動通信システム実現に向けた携帯電話アンテナへの課題について図 5 に示している。携帯電話に用いられるアンテナには, 携帯電話への更なる小形・薄型・高機能化の要求を満足するため, 3. に示した課題が引き続き求められる。更にデータ伝送速度の高速化に向け, アンテナを複数配置したマルチアンテナによるダイバーシチ・MIMO 多重伝送機能が携帯電話にも必須となる。

ここでは, まず今後 LTE でも導入が検討されているダイバーシチ・MIMO 多重伝送を実現するためのマルチアンテナ構成に着目し, その実現に向けた課題について述べる。次に次世代移動通信システムで想定されるマイクロ波帯で携帯電話アンテナを構成する際の課題について述べる。最後にマルチアンテナを含め, 携帯電話アンテナの検討において重要である評価法に関する今後の方向性について述べる。

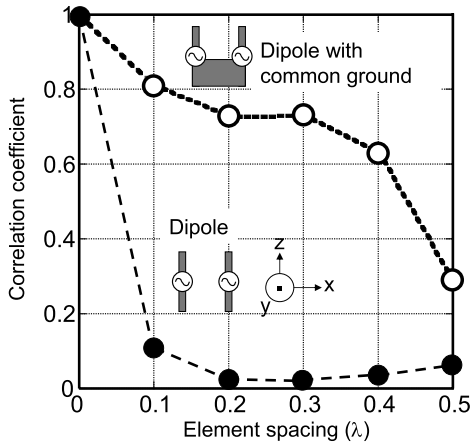


図 10 地板共通化による相関係数への影響

Fig. 10 Influence on correlation coefficient by common ground plane.

5.1 マルチアンテナ技術

マルチアンテナを用いたダイバーシチや MIMO 多重伝送機能は電波の到来環境に応じて選択的に用いられる。ダイバーシチ機能は今までも携帯電話に導入された実績があるが、今後はより小形・薄型な携帯電話に収納可能で、かつマルチバンド動作可能なマルチバンド・マルチアンテナ構成が求められる。

マルチアンテナの性能を評価する指標としては、ダイバーシチで重要となる相関係数、MIMO 多重伝送では加えて MIMO 伝送容量、更に見通し環境下でのアンテナ性能としてビームフォーミング利得が考えられ、携帯電話のマルチアンテナには、これらの指標が同時にそれぞれの要求条件を満たすことが求められる [57]。

携帯電話アンテナをマルチアンテナ構成としたときに第 1 に課題になるのが、アンテナ間の相互結合に起因する放射効率の劣化である。特に周波数が低くなるとアンテナ間の電気的な素子間隔が狭くなるため相互結合が大きくなり、一方のアンテナから放射された電力が他方のアンテナの終端抵抗で損失しアンテナ効率が劣化する。第 2 の課題はアンテナ間の相関特性である。素子間隔が狭くなるとアンテナで受信する信号の相関が大きくなりダイバーシチ及び MIMO 多重伝送特性が劣化する。図 10 に 2 素子の半波長ダイポールアンテナが平行に配置されたとき、及びダイポールアンテナの片側の素子部分同士を接続して共通の地板に見立てたときの素子間隔に対する相関特性をモーメント法により計算した結果を示す。指向性の計算には Zeland 社の IE3D を用いている。相関特性は図中の

xy 面内から θ 成分の電界が一様に到来する条件で求めている。半波長ダイポールアンテナの場合、相互結合により素子間隔が 0.1 波長程度でも相関係数は低下するが、携帯電話のように地板を共通化すると地板上に流れる電流の影響により相関係数は、例えば素子間隔 0.2 波長では 0.1 以下から 0.7 程度へと大きく上昇することが分かる。よって筐体上の電流の低減が重要となるが、筐体電流の低減はアンテナの大きさの減少につながり、アンテナ自体の放射効率の低下や狭帯域化を招くため、アンテナ構成については総合的な調整が必要となる。

相関係数は 3. の式 (1) に示したように電波の到来特性に依存する。携帯電話アンテナの評価にあたり、従来電波の到来特性は水平面内の一様な方向から到来するモデルが一般的に用いられていた。しかしマルチアンテナを用いた通信では前述したように、ダイバーシチや MIMO 多重伝送機能が、瞬時の電波の到来特性を判定しながら選択的に適用される。よってマルチアンテナを用いた際の伝送性能を評価するためには、より瞬時的な到来特性を用いながら、かつ携帯電話アンテナの実際の指向性を考慮して評価する必要がある。より詳細な到来特性のモデル化に関してはこれまで種々の検討結果が報告されており、文献 [58] に詳細にまとめられている。また筆者らも含め、実際の携帯電話に搭載されたアンテナの指向性を考慮するとともに、到来分布の影響を考慮して IMT-2000 で用いられている周波数帯におけるマルチアンテナの性能を評価した検討結果も報告されている [59], [60]。

5.2 マイクロ波帯携帯電話アンテナ

次世代移动通信システムで想定されているマイクロ波帯で携帯電話アンテナを実現する場合、波長が現在の IMT-2000 で用いられている 2GHz 帯に対して約半分になるため、アンテナの物理的な大きさは小さくなるとともに、マルチアンテナ構成時の電気的なアンテナ間隔は広くなり、相互結合や相関特性の観点では、現在のシステムに対して設計が容易になる。指向性は、筐体の電気的な長さが 2GHz 帯よりも長く見えるため、2GHz 帯の指向性よりもリプルを多く有する形状となり、パターン平均化利得で評価したときのアンテナ性能は 2GHz 帯と大きな違いは生じない。表皮効果に伴う損失増大も生じるため、放射効率の改善については現在のアンテナと同様に必要となる。また 4.3 で述べたように HSDPA と同じセルサイズを仮定したときの所要電力は 100 Mbit/s 伝送を想定した場合

で 15 dB 以上大きくなるため、基地局アンテナのみでなく携帯電話アンテナの利得もできるだけ大きくすることが望まれる。アンテナ利得を向上する方法としては、アンテナ素子及び波長が短くなる利点を生かし、アレー合成による利得を向上する方法が考えられるが、特に送信時における追尾誤りによる利得劣化などが課題となる。

5.3 携帯電話アンテナの評価法

近年、携帯電話の無線装置の性能について、アンテナ性能と RF 回路性能を独立に評価するのではなく、携帯電話から放射される全放射電力 (TRP: Total Radiated Power) で送信性能を評価し、各角度から到来する電波を受信したときの最低受信感度を全空間で平均した受信感度 (TRS: Total Radiated Sensitivity) で受信性能を評価する方法が提案されている [61]。TRP, TRS の測定は全方向の測定が必要となるため、測定時間の短縮が課題となる。文献 [61] では自由空間、及び通話状態を想定し頭部ファントムに近接した際の測定が提案されているが、今後、手の影響の考慮やブラウジング状態での測定の規定も実用上重要な課題となる。TRP, TRS で必要となる全空間測定を効率的に行う方法として、筆者らは緯度方向と経度方向を同時に回しながら測定することによって測定時間を短縮する手法を提案している [62]。

マルチアンテナの性能を評価する上では、各アンテナの指向性や放射効率、相関特性を精度よく測定することが必要となるが、特に相関特性を評価するためにはアンテナごとの位相特性を測定する必要がある。位相特性の測定には一般にベクトルネットワークアナライザが用いられるが、ベクトルネットワークアナライザとアンテナを接続するケーブルがアンテナ特性に影響するという問題がある。このケーブルの影響を除去するため、電気・光変換を行い、光ファイバを用いて測定系とアンテナを接続する手法が多く用いられている [62], [63]。また、マルチアンテナで実現されるダイバシチや MIMO 伝送性能を測定により評価する上では、実際のアンテナ性能及び伝搬環境を考慮して評価する必要があり、従来は実伝搬環境において実際に信号を伝送して伝送性能を評価している。しかし、マルチアンテナ伝送性能を確認しながらのアンテナ構成の検討や調整は、実伝搬環境における試験による方法では困難である。そこで移動通信における電波の到来環境を電波暗室などの室内の試験系を用いて評価可能な測定系の構築が今後の重要な課題となっている。室

内において電波の到来環境を模擬する方法として、一様な方向から電波が到来する環境を模擬したランダムフィールド法 [64], [65], Reverberation Chamber [66] や多数の直交アンテナを配置した 20 面体電波暗箱 [67] などの測定手法が提案されている。また見通し環境や一様な方向からの到来環境などを様々な電波の到来環境を電波暗室内で模擬可能な測定系についても提案されている [68]。

6. む す び

本論文では移動通信用基地局アンテナ及び携帯電話アンテナ性能に要求される条件と現状の技術について概説するとともに、今後データ伝送速度を更に高速化する上でアンテナに求められる技術課題について概説した。

基地局アンテナについては、データ伝送速度の高速化に伴う所要電力の増大や、マイクロ波帯利用に起因する各種損失の増加量を試算するとともに、特にアンテナの給電系の損失を低減する手法として RF 回路一体型アンテナに着目し、RF 回路ごとに必要となるダイプレクサの小形・低損失化を行う一手法として、フィルタ一体型アンテナ構成について紹介した。基地局アンテナの高利得化や低損失化は今後引き続き検討していくべき重要な課題である。また基地局アンテナの開発にあっては、設置の容易性、保守性及びコストを十分勘案する必要がある。

携帯電話アンテナについては、今後加入者容量を確保しながらデータ伝送速度の高速化を実現する上で必要となるマルチバンド・マルチアンテナ実現に向けた課題、及び評価方法についての今後の方向性について述べた。携帯電話には、データ伝送速度の高速化やテレビ視聴やカメラ機能に代表される通信機能以外の高機能化などの性能への要求に加え、デザイン性や携帯性などを考慮した小形・薄型化への要求が絶え間なく求められる。よって、アンテナを様々な機能で共用しながらアンテナ総数の削減を行い、高性能化と小形・薄型化を両立していく試みが重要である。

文 献

- [1] 永田清人, 入江 恵, “IMT-2000 サービス特集 (1) — モバイル新世紀の先駆け「FOMA」誕生— サービス概要”, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.9, no.2, pp.6–11, July 2001.
- [2] 後藤善和, 松谷英之, 大矢根秀彦, 深澤賢司, “HSDPA の概要および無線ネットワーク装置開発”, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.14, no.3, pp.6–13, Oct.

- 2006.
- [3] 中村武宏, 安部田貞行, “Super 3G の技術動向その 1 Super 3G の概要および標準化活動状況,” NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.14, no.2, pp.50-54, July 2006.
- [4] B. Li, Y. Qin, C.P. Low, and C.L. Gwee, “A survey on mobile WiMAX,” IEEE Commun. Mag., vol.45, no.12, pp.70-75, Dec. 2007.
- [5] 田岡秀和, 樋口健一, “ブロードバンド無線アクセスにおける MIMO 多重法を用いた 5 Gbit/s 超高速パケット信号伝送屋外実験,” NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.15, no.2, pp.25-30, July 2007.
- [6] 岩村幹生, 石川義裕, 大野公士, 尾上誠蔵, “W-CDMA 方式におけるセクタアンテナのビーム幅最適化,” 1999 信学総大, B-5-157, March 1999.
- [7] M. Kijima, Y. Ebine, and Y. Yamada, “Development of a dual-frequency base station antenna for cellular mobile radios,” IEICE Trans. Commun., vol.E82-B, no.4, pp.636-644, April 1999.
- [8] 新宅正佳, 恵比根佳雄, “移動通信用基地局アンテナ構成に関する検討,” 1999 信学ソ大(通信), B-1-78, Sept. 1999.
- [9] 山根貴宏, 長 敬三, “移動通信用基地局アレーアンテナの低サイドロブ化に関する一検討,” 2005 信学総大, B-1-85, March 2005.
- [10] 恵比根佳雄, “移動通信用基地局 2 周波共用 120° ビームアンテナの設計,” 信学技報, A-P97-73, July 1997.
- [11] 大山隆幸, 大室統彦, 倉本晶夫, 葛屋亮司, 草野光裕, “BTS 用広角スルフィルアンテナ—第 2 報,” 2005 信学総大, B-1-88, March 2005.
- [12] 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, July 1999.
- [13] 中野雅之, 佐藤敏雄, 茶谷嘉之, 宮下和仁, 古野孝允, “移動通信基地局用マルチシステムアンテナ,” 信学'94 秋大, B-88, Sept. 1994.
- [14] 掛札祐範, 新井宏之, “幅広無給電素子を配置したコーナリフレクタアンテナの設計,” 信学論(B), vol.J90-B, no.9, pp.837-843, Sept. 2007.
- [15] 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, April 2000.
- [16] 恵比根佳雄, “片側短絡スタブ付コーナレフレクタアンテナのインピーダンス特性,” 1997 信学総大, B-1-59, March 1997.
- [17] 恵比根佳雄, “次世代移動通信用(IMT-2000)基地局アンテナの設計,” 信学技報, A-P2000-4, April 2000.
- [18] H. Jiang, F. Kira, and K. Cho, “Printed dipole antenna comprising partially cylindrical parasitic element,” 2005 Asia-Pacific Conference Proceedings, vol.3, Dec. 2005.
- [19] Y. Yamada, K. Kagoshima, and K. Tsunekawa, “Diversity antennas for base and mobile stations in land mobile communication systems,” IEICE Trans. Commun., vol.E74, no.10, pp.3202-3209, Oct. 1991.
- [20] 守安慎吾, 松岡 徹, 中野雅之, 新井宏之, “変形した無給電素子を配置した反射器付ダイポールアンテナ,” 1999 信学総大, B-1-150, March 1999.
- [21] 杉本由紀, 恵比根佳雄, “水平面内 60° ビーム幅を有する移動通信用偏波ダイバーシチアンテナの設計,” 信学技報, A-P98-136, Jan. 1999.
- [22] 菊込正敏, 志村 剛, 恵比根佳雄, “C 形ダイポール素子を用いた水平偏波コーナリフレクタアンテナ,” 信学技報, A-P2003-21, May 2003.
- [23] 伊藤幹浩, 安藤敏之, 田崎 修, 高橋良至, “IMT-2000 基地局用アンテナおよび周辺装置,” 工業技術研究誌日立電線, vol.21, pp.25-28, Jan. 2002.
- [24] 電子情報通信学会編, アンテナ工学ハンドブック, 9.7.3 節, オーム社, 1980.
- [25] Y. Yamada, Y. Ebine, and K. Tsunekawa, “Base and mobile station antennas for land mobile radio systems,” IEICE Trans., vol.E74, no.6, pp.1547-1555, June 1991.
- [26] 久我巨裕, 遠藤充哲, “アンテナ近傍界を用いた電気接点の非接触 PIM 特性測定法,” 信学技報, EMD2007-10, May 2007.
- [27] 杉本由紀, 恵比根佳雄, “部分球面を反射器とする移動通信用基地局アンテナの設計,” 信学技報, A-P99-165, Jan. 2000.
- [28] 西木戸智昭, 斉藤 裕, 春木 宏, 小柳芳雄, 江川 潔, “携帯無線機用分配給電アンテナの通話状態放射特性,” 信学技報, A-P2003-158, Nov. 2003.
- [29] I. Ida, J. Takada, T. Toda, and Y. Oishi, “An adaptive impedance matching system for mobile communication terminals,” IEICE Technical Report, A-P2003-306, Feb. 2004.
- [30] B.K. Lau, “Antenna matching for performance optimization in compact MIMO systems,” MWE2007 Microwave Workshop Digest, WS8-2, pp.243-248, Nov. 2007.
- [31] T. Taga and K. Tsunekawa, “Performance analysis of a built-in planar inverted F antenna for 800 MHz band portable radio units,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.SAC-5, no.5, pp.921-929, June 1987.
- [32] T. Taga, “Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radio environments,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.26, no.4, pp.117-131, May 1990.
- [33] 今井哲郎, 北尾光司郎, “市街地における移動局側到来波分布特性,” 信学技報, A-P2007-135, Jan. 2008.
- [34] K. Sekiya, T. Ono, K. Tanabe, A. Kuramoto, and S. Kitano, “3/4-wavelength multi-bent single wired antenna for mobile phone,” 2004 International Symposium on Antennas and Propagation, 4A2-1, Aug. 2004.
- [35] 岡野由樹, 長 敬三, “マルチバンド逆 L アンテナを用いた PDA 端末用マルチアンテナの基本特性,” 信学技報, A-P2006-98, Dec. 2006.
- [36] M. Ali, G.J. Hayes, H.-S. Hwang, and R.A. Sadler, “Design of a multiband internal antenna for third

- generation mobile phone handsets,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.51, no.7, pp.1452–1461, July 2003.
- [37] X. Jing, Z. Du, and K. Gong, “A compact multiband planar antenna for mobile handsets,” IEEE Trans. Antennas Propag. Lett., vol.5, pp.343–345, 2006.
- [38] R.A. Bhatti and S.O. Park, “Hept-band internal antenna for personal communication handsets,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.55, no.12, pp.3398–3403, Dec. 2007.
- [39] Y. Kim, H. Morishita, Y. Koyanagi, and K. Fujimoto, “A folded loop antenna system for handsets developed and based on the advanced design concept,” IEICE Trans. Commun., vol.E84-B, no.9, pp.2468–2475, Sept. 2001.
- [40] 井原泰介, 樋口健一, 浅井孝浩, 佐和橋衛, “マルチビームアンテナ送信を用いた下りリンク共通制御チャネル送信法の特性評価,” 信学技報, SAT2002-103, Jan. 2003.
- [41] Y. Ogawa and T. Ohgane, “Advances in adaptive antenna technologies in Japan,” IEICE Trans. Commun., vol.E84-B, no.7, pp.1704–1712, July 2001.
- [42] N. Kikuma and M. Fujimoto, “Adaptive antennas,” IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.3, pp.968–979, March 2003.
- [43] 大鐘武雄, 西村寿彦, 小川恭孝, “MIMO チャネルにおける空間分割多重方式とその基本特性,” 信学論 (B), vol.J87-B, no.9, pp.1162–1173, Sept. 2004.
- [44] 小宮一公, 西森健太郎, 長 敬三, 堀 俊和, “指向性と偏波を制御する SDMA 構成の提案,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.7, pp.1289–1299, July 2005.
- [45] 西森健太郎, 長 敬三, “垂直面指向性と偏波を制御するスマートアンテナを用いた SDMA の提案,” 信学技報, A-P2002-92, Oct. 2002.
- [46] 山口 良, 寺田矩芳, “等比間隔オフセット給電アレーアンテナの送受同一ビーム特性,” 信学技報, A-P2006-75, Sept. 2006.
- [47] 北尾光司郎, 市坪信一, “第 4 世代移動通信システムの市街地伝搬損失推定式,” 第 485 回電波研連 F 分科会資料, June 2004.
- [48] T. Seki, F. Nuno, T. Atsugi, M. Umehira, J. Sato, and T. Enoki, “25 GHz band active integrated antenna for broadband mobile wireless access systems,” IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.8, pp.1520–1526, Aug. 2003.
- [49] 庄木裕樹, 堤由佳子, 関根秀一, “超高速無線実現のためのミリ波アンテナ技術,” 信学論 (B), vol.J90-B, no.9, pp.810–820, Sept. 2007.
- [50] 小西喜彦, 福島知朗, 尾崎 裕, 飯田昭夫, 野町芳夫, 小野隆, 新田和正, 安藤智浩, 辻 剛史, “航空機搭載用 S 帯衛星移動電話,” 信学技報, A-P2002-12, May 2002.
- [51] B. Johannisson, “Adaptive base station antennas for mobile communication systems,” 1998 IEEE-APS Conference on Antennas and Propagation for Wireless Communications, pp.49–52, Nov. 1998.
- [52] 堤由佳子, 金谷晴一, 吉田啓二, “CPW フィルター一体型スロットループアンテナの設計,” 2004 信学ソ大 (エレクトロニクス), C-2-72, Sept. 2004.
- [53] 梅壽政徳, 山内潤治, 中野久松, “阻止帯域を有する楕円形アンテナの測定,” 2007 信学ソ大 (通信), B-1-122, Sept. 2004.
- [54] W.S. Kang, H.K. Yoon, and Y.J. Yoon, “Flexible monopole antennas for UWB systems,” IEICE Technical Report, A-P2007-159, Jan. 2008.
- [55] H. Jiang, R. Yamaguchi, and K. Cho, “Investigation of mutual coupling reduction of slot-coupled planar antenna,” 2007 International Symposium on Antennas and Propagation, 3B2-4, Aug. 2007.
- [56] 蒋 惠玲, 山口 良, 長 敬三, “短冊状素子によるスロット励振パッチアンテナの送受信間結合低減特性,” 信学技報, A-P2007-83, Sept. 2007.
- [57] Y. Okano and K. Cho, “Monopole antenna array arrangement for card-type mobile terminal,” 2004 IEEE Radio and Wireless Conf., pp.415–418, Sept. 2004.
- [58] 阪口 啓, 高田潤一, “MIMO 伝搬特性の測定装置・測定方法・解析方法・モデル化,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.9, pp.1624–1640, Sept. 2005.
- [59] 岡野由樹, 長 敬三, “携帯端末用マルチバンドマルチアンテナに関する MIMO 伝送容量の水平面内到来波分布依存性,” 信学技報, A-P2007-121, Dec. 2007.
- [60] 小川晃一, 山本 温, 林 俊光, “ストリートマイクロセル環境における端末 MIMO アンテナのチャネル応答解析,” 信学技報, A-P2007-97, Oct. 2007.
- [61] CTIA Certification, “Test plan for mobile station over the air performance Rev.2.2.”
- [62] 岡野由樹, 長 敬三, “端末アンテナの高速・高精度 3 次元パターン測定に関する基本検討,” 信学技報, A-P2006-137, Feb. 2007.
- [63] 深沢 徹, 下村健吉, 大塚昌孝, “小形無線端末用のアンテナ測定における高精度測定法,” 信学論 (B), vol.J86-B, no.9, pp.1895–1905, Sept. 2003.
- [64] 前田忠彦, 諸岡 翼, “屋内ランダムフィールド法による小形アンテナ放射効率測定法—測定精度の実験的検討とその改善法,” 信学論 (B), vol.J71-B, no.11, pp.1259–1265, Nov. 1988.
- [65] M. Murase, Y. Tanaka, and H. Arai, “Propagation and antenna measurements using antenna switching and random field measurements,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.43, no.3, pp.537–541, Aug. 1994.
- [66] P.-S. Kildal, “Overview of 6 years R&D on characterizing wireless devices in Rayleigh fading using reverberation chambers,” 2007 IEEE International Workshop on Antenna Technology, pp.162–165, March 2007.
- [67] 山口 良, 尾崎健治, 川合秀紀, 上林真司, “20 面体電波暗箱を用いた携帯電話放射効率測定法の実験的検討—8 GHz スケールモデルの部分試作,” 信学技報, A-P2004-129, Sept. 2004.
- [68] 岩井 浩, 坂田 勉, 山本 温, 小川晃一, 梅田快貴, 阪口啓, 荒木純道, “移動体端末アンテナ評価用フェージング

エミュレータの提案 ; 信学技報 A-P2004-35, May 2004.
(平成 20 年 2 月 2 日受付, 4 月 26 日再受付)



長 敬三 (正員)

昭 61 横浜国大・工・電気卒。昭 63 東工大大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。以来、主として移動通信用アンテナ、アダプティブアンテナに関する研究開発に従事。平 15 (株)NTT ドコモに転籍。現在同社総合研究所グループリーダー。工博。平 7 年度本会学術奨励賞, 平 14 本会通信ソサイエティ功労感謝状, 平 19 本会通信ソサイエティ功労賞, 平 15 APMC Best Paper Award 受賞。著書「アンテナ・無線ハンドブック」(編主任)など。IEEE Senior 会員。



山口 良 (正員)

昭 63 九大・工・電気卒, 平 6 東北大学院博士課程了。同年 NTT 移動通信網(株)入社。現在(株)NTT ドコモ総合研究所主任研究員。この間、移動通信アンテナ, EMC の研究に従事。平 6 年度本会学術奨励賞受賞。平 19 本会通信ソサイエティ功労賞受賞。工博。



蔣 恵玲 (正員)

平 9 横浜国大・工・電子情報卒。平 14 同大学院博士課程了。同年(株)NTT ドコモ入社。以来、基地局用アンテナの研究開発に従事。博士(工学)。IEEE 会員。