

携帯無線機用内蔵アンテナの利得改善に関する検討

齋藤 裕[†] 杉浦 宏和^{††} 長野 勇^{††} 八木谷 聡^{††}
春木 宏志^{†††}

Gain Improvement of a Built-in Antenna for a Radio Terminal

Yutaka SAITO[†], Hirokazu SUGIURA^{††}, Isamu NAGANO^{††}, Satoshi YAGITANI^{††},
and Hiroshi HARUKI^{†††}

あらまし 本論文では、携帯無線機用内蔵アンテナの使用状態における利得改善を目的として、半波長素子とそれを励振するための逆 F 素子を組み合わせた内蔵アンテナについて検討した結果を示す。携帯無線機に内蔵される半波長素子の位置と方向を変化した場合の主偏波方向と指向性の変化について調べ、カード型無線機が胸ポケット内に挿入された（胸装着）状態において高い実効利得が得られるアンテナ構成を検討する。次に、この内蔵アンテナの胸装着状態におけるパターン平均化利得（PAG）及び 2 GHz 帯における実効利得をランダムフィールド測定（RFM）法を用いて測定する。その結果、半波長素子を地板から突起して垂直に配置したアンテナ構成により、主アンテナとして実用上十分な性能である -5 dBd 以上の PAG 及び実効利得が得られることを示す。

キーワード 携帯電話，カード型無線機，実効利得，PAG，RFM 法，逆 F アンテナ

1. ま え が き

移動通信に用いられる携帯無線機用アンテナとして、ホイップアンテナに代表されるような無線機の外装ケースの外部に突起したアンテナ（外付けアンテナ）が主に使用されている。近年、携帯無線機の用途や形状の多様化に伴い、外付けアンテナがないこと、すなわち主アンテナの内蔵化が求められるようになってきている。

主アンテナを内蔵する場合、外付けアンテナ並の利得を内蔵アンテナのみで確保する必要がある。しかし、特に携帯無線機が人体に近接する使用状態においては、ケース内部に内蔵されたアンテナの利得は外付けアンテナの利得に比べて一般に低くなる。実際の使用状態における内蔵アンテナの利得改善が今後の携帯無線機用アンテナ開発において重要である。

このような内蔵アンテナの利得改善に関する研究として、寄生素子を追加する方法により、指向性を人体の反対側へ向けることによる放射効率の改善に着目した方法がある。この方法では、放射素子に対して人体の反対側に導波素子 [1] を配置するか、または人体側に反射素子 [2] を配置するため、これらの寄生素子を含めた内蔵アンテナ全体の厚みが必要となる。また、携帯電話の通話状態ではスピーカが存在する面が必ず耳に密着されるように、使用状態において人体側に向けられる携帯無線機の側面が限定できる場合にのみ上記の放射効率改善効果が期待できる。

他の方法として、主偏波方向と指向性の制御に着目した方法が報告されている。陸上移動通信の市街地環境においては、一般に到来波の垂直偏波電力が水平偏波電力より数 dB 高く [3]、また到来波仰角は 0 ~ 30° に分布する [4]。このことから、特定の使用状態において、内蔵アンテナの主偏波成分を垂直方向とし、垂直面指向性の最大放射方向を仰角 0 ~ 30° の方向へ向けるようにアンテナを構成すれば、高い実効利得が期待できる。平衡給電を用いたループアンテナ [5] やダイポールアンテナ [6] などはこの効果を期待したものであり、放射効率の改善を主な目的としておらず、むしろ携帯電話の通話状態に適した主偏波方向と指向性を得ることをめざしたものである。

[†] 株式会社松下通信金沢研究所，金沢市
Matsushita Communication Kanazawa R&D Labs. Co., Ltd.,
Kanazawa-shi, 920-0024 Japan

^{††} 金沢大学工学部，金沢市
Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa-shi,
920-8667 Japan

^{†††} 松下通信工業株式会社，横浜市
Matsushita Communication Industrial Co., Ltd., Yokohama-
shi, 223-8639 Japan

本論文で検討する内蔵アンテナは、前記の内蔵アンテナと同様に、放射効率改善よりはむしろ特定の使用状態に適した主偏波方向と指向性を得ることをめざすものである。また、平衡不平衡変換素子や整合回路などの追加部品を必要としない簡素なアンテナ構成をめざしている。

簡素な構成を実現するために、従来から内蔵アンテナとして広く利用されている板状逆 F アンテナ (PIFA) [7] に着目する。この PIFA は、板状素子、接地端子及び給電端子から構成され、各端子を含めて一体成型された一つの板金部品のみで構成することができるとともに、インピーダンス整合機能を有しており付加的な整合回路を必要としないという製造コスト面での利点を有する。しかし、携帯電話の通話状態における PIFA の実効利得は外付けされた半波長ホイップアンテナのそれに比べて 2 dB 程度劣ることが明らかにされている [8]。

本論文では、半波長素子を主放射素子として用い、これを励振するための励振器として、上記 PIFA の基本形である逆 F アンテナ (IFA) を用いる構成を検討する。半波長素子の先端部と IFA の開放端はともに高インピーダンスであり、両者を直接接続すれば IFA は半波長素子の励振器として動作する。IFA の素子長が 1/4 波長であるので、このように構成されたアンテナ全体の素子長は 3/4 波長となる。本論文では、このアンテナを 3/4 波長アンテナと記述する。また、アンテナの動作周波数は、今後様々な移動通信システムで利用される 2 GHz 帯に設定する。

本論文の 2. では、カード型無線機に適用した 3/4 波長アンテナにおいて、半波長素子の位置と方向を変化した場合の自由空間における放射特性の変化を IFA 単体のそれと比較して示す。次に、3. では、カード型無線機に適用した 3/4 波長アンテナの胸装着状態 [9] における放射特性の測定結果を示す。利得の評価指標としてパターン平均化利得 (PAG: Pattern Averaging Gain) [10] を用い、3/4 波長アンテナの PAG を従来のアンテナの PAG と比較する。また、4. ではランダムフィールド測定 (RFM) 法 [11], [12] を用いて実際の伝搬環境における実効利得を 2 GHz 帯で測定し、その結果と PAG の結果を比較する。

2. 3/4 波長アンテナ

本章では、3/4 波長アンテナをカード型無線機に適用した構成とその自由空間放射特性について述べる。

カード型無線機の筐体寸法として、筆者らの従来の研究 [9] と同一条件である 90 mm × 55 mm × 10 mm を想定する。この形状に内蔵できる 3/4 波長アンテナ及び地板 (回路基板を想定したもの) の基本形として、図 1 に示す構成を設定した。

図 1 に示す 3/4 波長アンテナでは、地板 (50 mm × 90 mm) の Y 側端部に IFA を垂直に配置し、この IFA の先端に垂直に配置した半波長素子 (75 mm) を接続している。IFA 部は地板から X 方向へ 5 mm 隔てて配置しており、半波長素子は地板と同一面に配置している。また、半波長素子は地板から 5 mm だけ Y 方向へ突起して配置する。IFA 及び半波長素子の幅はいずれも 2 mm である。

図 1 に示す自由空間の指向性において、実線及び点線がモーメント法電磁界シミュレータ IE3D [13] による計算結果、丸点が測定結果をそれぞれ示す。この結果から、XY 面及び YZ 面における主偏波成分はいずれも E_θ 成分であり、最大放射方向が Y 方向であることがわかる。

次に、半波長素子を地板上に配置したアンテナ構成について図 2 に示す。ここでは、半波長素子を地板から突起させずに地板の Y 側端部において地板から 5 mm の高さ配置している。この場合の主偏波成分は 3 平面すべてにおいて E_θ 成分であり、最大放射方

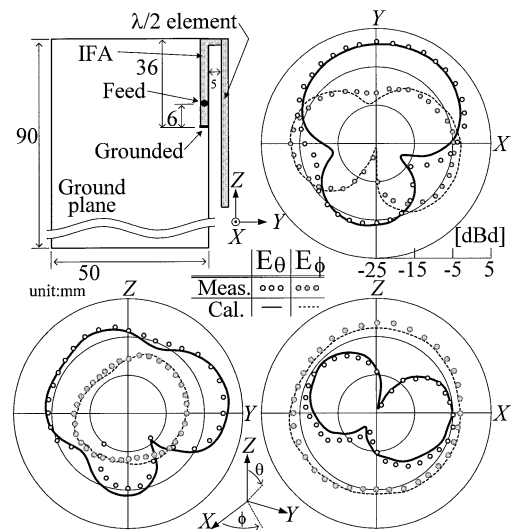


図 1 半波長素子を垂直に配置した 3/4 波長アンテナの指向性

Fig.1 Radiation patterns of the 3λ/4 antenna with a vertical λ/2 element.

向は X 方向と Y 方向の間である。

次に、半波長素子を水平に配置したアンテナ構成について図 3 に示す。図 3 では、半波長素子の 60 mm の長さを Y 方向に配置して他の部分は $-Z$ 方向へに

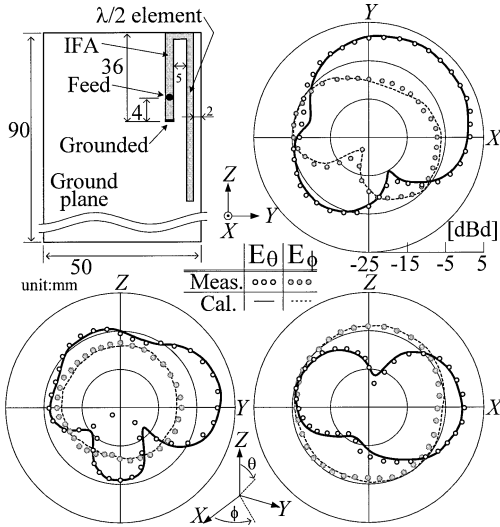


図 2 半波長素子を地板上に配置した $3\lambda/4$ 波長アンテナの指向性

Fig. 2 Radiation patterns of the $3\lambda/4$ antenna with a vertical $\lambda/2$ element on the ground plane.

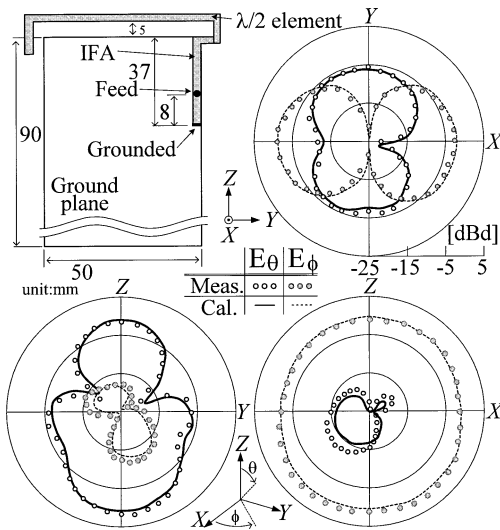


図 3 半波長素子を水平に配置した $3\lambda/4$ 波長アンテナの指向性

Fig. 3 Radiation patterns of the $3\lambda/4$ antenna with a horizontal $\lambda/2$ element.

折り曲げている。この結果から、 XY 面及び XZ 面における主偏波成分はいずれも E_ϕ 成分であり、 XZ 面の E_ϕ 成分はほぼ無指向性である。

更に、半波長素子が放射特性へ与える影響を確認するために、IFA のみの場合の指向性を図 4 に示す。図 4 に比べて、図 1 では Y 方向の E_θ 成分が高くなっており、図 2 では X 方向から Y 方向の E_θ 成分が高くなっている。また、図 3 の場合は、 Z 方向及び $-Z$ 方向の最大利得が高くなっている。

以上の結果から、 $3/4$ 波長アンテナの放射特性は半波長素子からの放射に影響されており、主偏波成分は半波長素子の位置と方向に依存し、最大放射方向は半波長素子と地板との位置関係に依存すると考えられる。

これらの現象を裏付けるために、図 1 に示した半波長素子を垂直に配置した $3/4$ 波長アンテナと図 4 に示した IFA のみの場合の電流分布を IE3D を用いて計算した。その結果を図 5 に示す。

図 5 において、(a) は IFA のみ、(b) は $3/4$ 波長アンテナの電流分布をそれぞれ示している。解析周波数は 2 GHz であり、相対電流振幅の基準 (0 dB) は (a) の IFA 素子上の最大振幅に設定しており、(b) においても (a) と同一の基準値に対する相対値を図示している。

この結果から、 $3/4$ 波長アンテナでは半波長素子に半波長モードの電流が分布していることがわかる。これにより、図 1 ~ 図 3 に示すような半波長素子の方

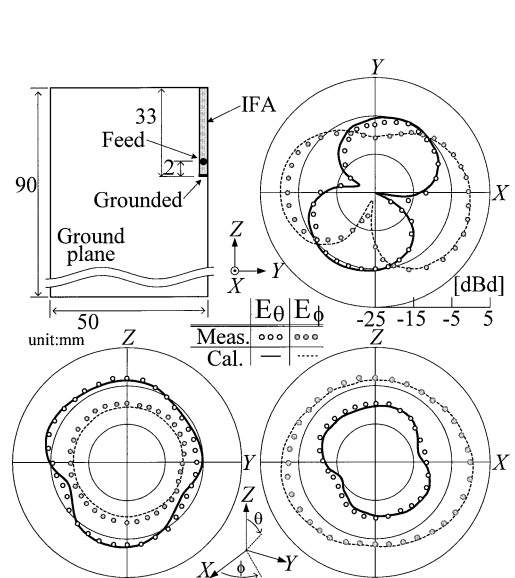


図 4 IFA のみの指向性

Fig. 4 Radiation patterns of the IFA.

向に依存した主偏波特性が得られるものと考えられる。

また、 $3/4$ 波長アンテナの半波長素子に近接する側の地板上電流は IFA のみの場合に比較して高くなっている。地板の半波長素子に沿った方向の長さ (90mm) が半波長以上であるので、上記の半波長素子に近接する側の地板が反射素子として動作することにより、図 1、図 2 に示すような指向性と最大放射方向の変化が発生していると考えられる。

上記のように、 $3/4$ 波長アンテナでは半波長素子の位置と方向を変化することにより、主偏波成分と指向性を変化させることができる。携帯無線機が人体近傍に置かれた使用状態において、半波長素子の適切な配置を選択すれば、効率の低下がない条件において実効利得の改善が可能であると考えられる。

上記の $3/4$ 波長アンテナでは、IFA は半波長素子の励振器であり整合機能を担っている。図 1 ~ 図 3 に示すそれぞれの構成において、IFA の素子長と給電点位置を変化することにより給電点インピーダンスの整合をとった。VSWR が 2 以下の帯域幅は 100 ~ 120 MHz であった。

ここで、IFA が放射特性に及ぼす影響を調べるために、IFA を用いず集中定数素子で構成される整合回路を用いて半波長素子を励振した場合の指向性の測定結果及び計算結果を図 6 に示す。図 6 と図 1 を比較すると、主偏波成分の指向性にはほとんど差が見られず、IFA が放射特性に及ぼす影響は少ないことがわかる。したがって、 $3/4$ 波長アンテナにおける IFA は放射特性の改善には貢献しておらず整合機能を含む励振器としてのみ機能しているといえる。

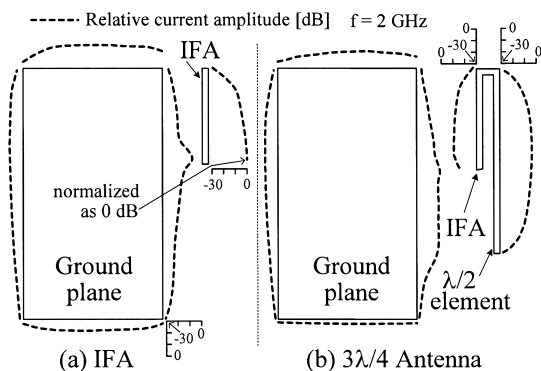


図 5 IFA と $3/4$ 波長アンテナの電流分布
Fig. 5 Current distribution of the IFA and the $3/4$ antenna.

前記のように、IFA を集中定数整合回路に置き換えても放射特性の改善は可能であるが、IFA を含む $3/4$ 波長の構造を採用することにより次のような利点がある。図 7 に $3/4$ 波長アンテナの実際の製造における構成例を示す。図 7 に示すように、1 枚の板金を折曲げ成形した部品を回路基板上の給電点及び接地点の回路パターンに接触させることで IFA を含む $3/4$ 波長アンテナを構成できる。

このような構成によれば、安価な板金部品 1 枚のみにより整合機能を含むアンテナ全体を実現することができるため、付加的な整合回路が不要となりコスト面において有利となる。また上記の構造は、現在携帯電話用内蔵アンテナとして広く使用されている PIFA

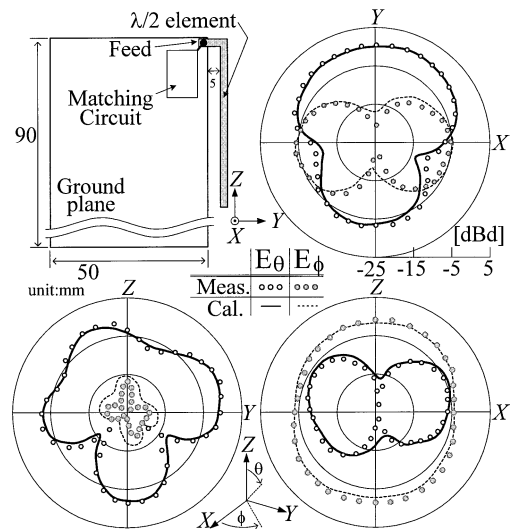


図 6 半波長素子を整合回路で給電した場合の指向性
Fig. 6 Radiation patterns of a vertical $\lambda/2$ element with a matching circuit.

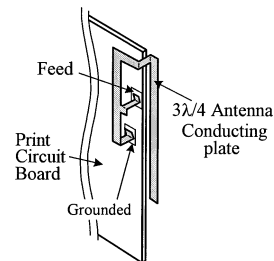


図 7 $3/4$ 波長アンテナの実際の製造における構成例
Fig. 7 An example of structure in actual production of the $3/4$ antenna.

の一般的な実装構造と同様である．この実装構造は，板金部品を筐体樹脂ケースと回路基板との間に挟み込むような簡素な生産行程により製造可能であるという生産性の面での利点を有する．

3. 胸装着状態の放射特性

非音声サービス用カード型無線機の代表的な使用状態は，無線機を胸ポケットに入れた胸装着状態と手で保持した操作状態の二つであると考えられる．従来の1/4波長モノポールアンテナを用いた研究 [9] から，操作状態のPAGに比べて胸装着状態のPAGが低いことがわかっている．この問題はカード型無線機用内蔵アンテナの利得改善を検討するうえで重要であるとの考えから，本章では胸装着状態の利得に着目する．

3.1 従来のアンテナ

本節では，3/4波長アンテナの比較対象となる従来のアンテナとして1/4波長モノポールアンテナとPIFAを取り上げる．

図8は，文献 [9] で報告されているものと同一構造を有する1/4波長モノポールアンテナの自由空間指向性を示している．図8から，垂直面指向性における水平方向にヌルが発生しており，これは筐体電流 [14] に起因するものである．

次に，上記の1/4波長モノポールアンテナの胸装着状態の指向性の測定結果を図9に示す．胸装着状態の測定は，電波暗室において実際の人体を用いて行っ

た．測定において，樹脂製スペーサとベルトを用いることで，無線機の厚み方向の中心と胸との間隔 d_c を20mmに，無線機の位置パラメータを $a = 70\text{ mm}$ ， $b = 200\text{ mm}$ に固定している．垂直面指向性の測定では，アンテナ位置が常に回転中心となるように人体を回転台上に寝かせた．測定精度を高める目的で身長160～180cmの5人に対して指向性の測定を行い，各人の同一面内平均利得の偏差が1dB以内であることを確認したうえで，5人の結果を平均することにより指向性を得ている．また，本章で示す胸装着状態の放射特性は人体への吸収損失とインピーダンス不整合損失を含んでいる．これらの測定条件は筆者らの従来の研究 [9] と同一である．

図9から，人体正面側 (X 側) の指向性は自由空間の指向性の傾向と一致しており水平方向にヌルが発生していることがわかる．そのため， XY 面における最大利得は約 -4 dBd と比較的低い．

次に，他の従来のアンテナとして，一般的なPIFAを用いた場合の特性を示す．図10及び図11に，自由空間及び胸装着状態の指向性をそれぞれ示す．この結果から，PIFAの自由空間の指向性において，水平方向のヌルは存在しないが E_θ 成分と E_ϕ 成分の比が小さいことがわかる．この傾向は胸装着状態においても同様であり， XY 面における E_θ 成分及び E_ϕ 成分の最大利得はともに約 -2 dBd である．

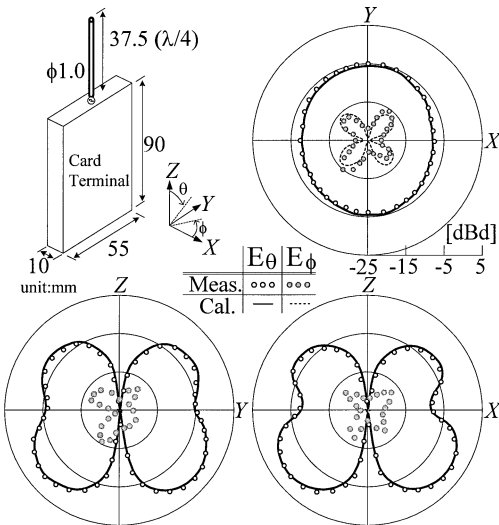


図8 1/4波長モノポールアンテナの指向性
Fig.8 Radiation patterns of the $\lambda/4$ monopole.

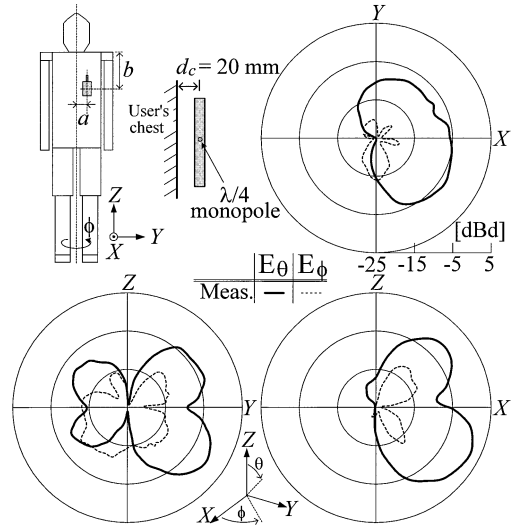


図9 1/4波長モノポールアンテナの胸装着状態の指向性
Fig.9 Radiation patterns of the $\lambda/4$ monopole in wearing on the chest.

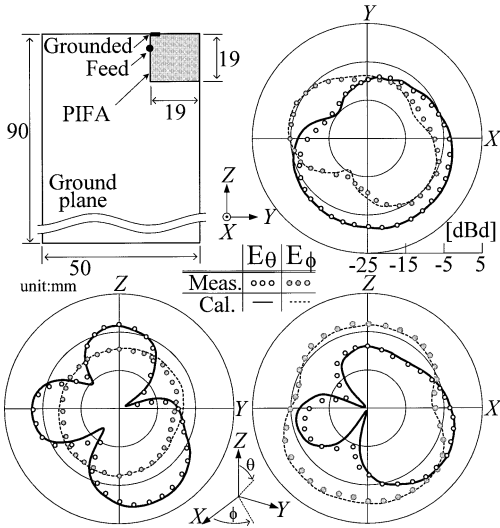


図 10 PIFA の指向性
Fig. 10 Radiation patterns of the PIFA.

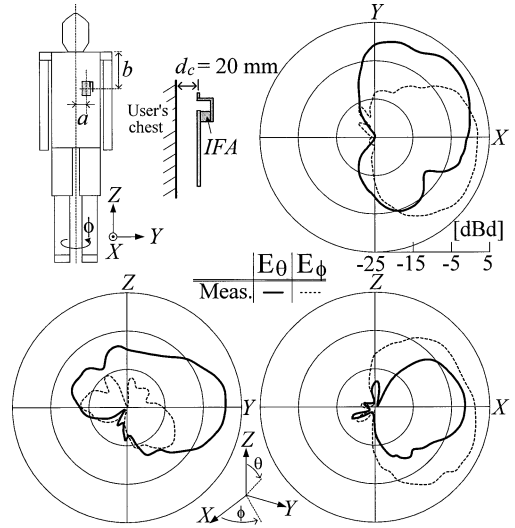


図 12 半波長素子を垂直に配置した 3/4 波長アンテナの胸装着状態の指向性
Fig. 12 Radiation patterns of the $3\lambda/4$ antenna with a vertical $\lambda/2$ element in wearing on the chest.

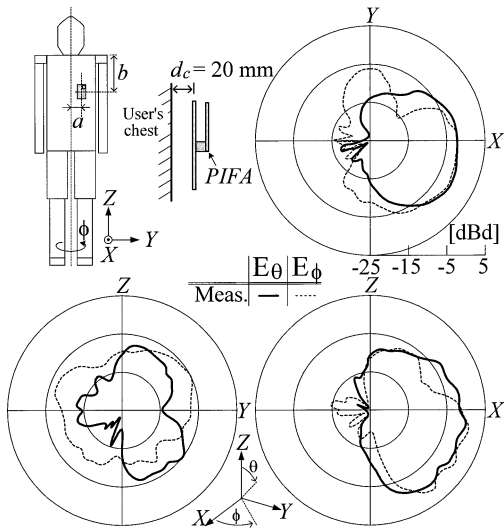


図 11 PIFA の胸装着状態の指向性
Fig. 11 Radiation patterns of the PIFA in wearing on the chest.

なお、ここで示した PIFA 以降の構成においては、地板と胸との間隔 d_c を 20 mm に設定しており、これは厚み 10 mm の樹脂製筐体の厚み方向の中心に地板が存在することを想定したものである。

3.2 3/4 波長アンテナの胸装着状態の放射特性

図 1 で示した半波長素子を垂直に配置した 3/4 波長

アンテナの胸装着状態の指向性を図 12 に示す。この 3/4 波長アンテナの自由空間における VSWR は 1.1 (2 GHz) であったが、胸装着状態では共振周波数が約 30 MHz 低下し、VSWR は 1.4 (2 GHz) に変化した。本節以降で示す放射特性は、上記のようなインピーダンス不整合損失と人体への吸収損失を含んでいる。

図 12 から、YZ 面における主偏波が E_θ 成分であり最大放射方向が水平 (Y) 方向であることがわかる。XY 面では Y 方向から X 方向にかけて E_θ 成分の高い利得が得られており、最大利得は約 2 dBd である。このように XY 面において、1/4 波長モノポールアンテナや PIFA の場合に比べて 4 ~ 6 dB 高い E_θ 成分利得が得られる。

次に、図 3 で示した半波長素子を水平に配置した 3/4 波長アンテナの胸装着状態の指向性を図 13 に示す。この場合は、自由空間と同様に XY 面及び XZ 面の主偏波が E_ϕ 成分となっている。

上記 2 種類の 3/4 波長アンテナの胸装着状態における主偏波と指向性の傾向は、人体正面側においては自由空間の傾向とほぼ一致している。したがって、3/4 波長アンテナにおいても自由空間指向性に着目すれば胸装着状態の指向性をある程度推定できるといえる。

次に、図 2 で示した半波長素子を地板上に配置した 3/4 波長アンテナの胸装着状態の指向性について

述べる．この 3/4 波長アンテナの場合は，半波長素子の X 方向の位置が地板と同一ではないため，地板と胸との間隔 d_c を 20 mm に固定する条件においては，

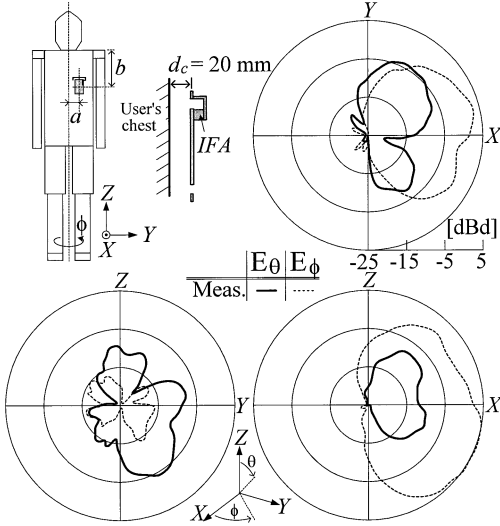


図 13 半波長素子を水平に配置した 3/4 波長アンテナの胸装着状態の指向性
 Fig. 13 Radiation patterns of the 3λ/4 antenna with a horizontal λ/2 element in wearing on the chest.

カード型無線機の向きによって半波長素子と胸との間隔が変動する．そこで，図 14 に示すように 3/4 波長アンテナを人体正面側 (front side) に向けた場合と，図 15 に示すように 3/4 波長アンテナを胸側 (chest side) に向けた場合との 2 種類の状態について測定を行った．

図 14 から，3/4 波長アンテナを人体正面側に向けた場合は，XY 面において E_θ 成分利得が高く最大放射方向が Y 方向と X 方向の間中となり，約 4 dBd の最大利得が得られる．一方，図 15 から，3/4 波長アンテナを胸側 (chest side) に向けた場合は特に E_θ 成分の利得低下が大きい．これは，主放射素子である半波長素子が胸側へ近接し，かつ最大放射方向が胸側に向けられることによる放射効率低下が原因と考えられる．

3.3 効率 η_{ac}

本節では，上記の胸装着状態の放射特性を次式で推定できる効率 η_{ac} [9] を用いて評価する．

$$\eta_{ac} \simeq \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \int_0^\pi [G_\theta(\theta, \phi_i) + G_\phi(\theta, \phi_i)] \sin \theta d\theta \quad (1)$$

ここで， $G_\theta(\theta, \phi_i)$ 及び $G_\phi(\theta, \phi_i)$ は離散的なアジ

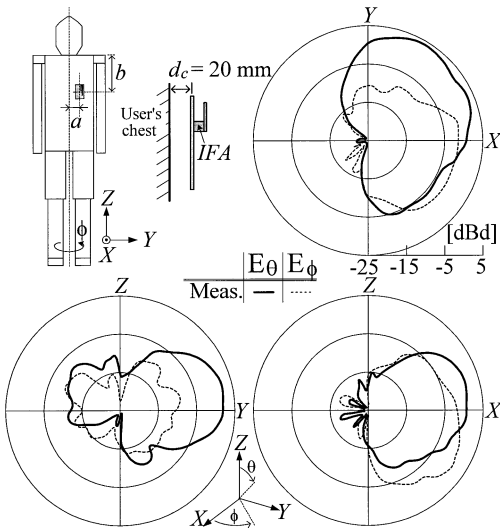


図 14 半波長素子を地板上に配置した 3/4 波長アンテナの胸装着状態の指向性 (アンテナが人体正面側)
 Fig. 14 Radiation patterns of the 3λ/4 antenna on the ground plane in wearing on the chest (front side).

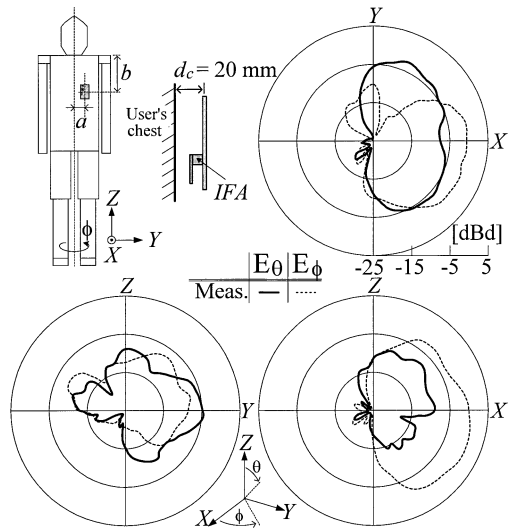


図 15 半波長素子を地板上に配置した 3/4 波長アンテナの胸装着状態の指向性 (アンテナが胸側)
 Fig. 15 Radiation patterns of the 3λ/4 antenna on the ground plane in wearing on the chest (chest side).

マス角度 ϕ_i で分割された垂直面の電力指向性の θ 及び ϕ 成分であり、これらが吸収損失と不整合損失を含むものとする。また、 n は 2 以上の整数であり、 $n/2$ は垂直面数である。本論文では従来の研究 [9] と同様に、垂直面数を 4 ($n = 8$) として、指向性を測定する垂直面は XZ 面及び YZ 面に、アジマス角 ± 45 度方向を加えた計 4 面に設定した。

図 16 に 5 人に対する測定結果を平均して求めた η_{ac} を示す。図 16 の (1), (2) から、 $1/4$ 波長モノポールアンテナの η_{ac} ($= 56\%$) に比べて PIFA の η_{ac} は 78% と高いことがわかる。ここで、PIFA を胸側に付けて装着した場合は η_{ac} が 48.3% まで低下した。これは、PIFA の指向性が比較的 X 方向に偏っていることと、PIFA 素子と胸との間隔が装着方向によって変化することが原因と考えられる。

次に、図 16 の (3), (4) から、図 12 と図 13 に示す $3/4$ 波長アンテナの η_{ac} はほぼ等しく約 75% であった。なお、図 12 に示す $3/4$ 波長アンテナの IFA 側を胸側に向けて装着した場合の η_{ac} は 61.9% であった。

上記のように、図 12 に示す $3/4$ 波長アンテナの装着方向の違いによる η_{ac} の差は PIFA のそれに比べて小さい。この原因は、 $3/4$ 波長アンテナの主放射素子である半波長素子が地板から突起しているため X 方向と $-X$ 方向の指向性がほぼ対称であることと、半波長素子が地板と同一面に位置するため半波長素子と

胸との間隔が変化しないためと考えられる。

次に、図 16 の (5), (6) から、地板上に配置した $3/4$ 波長アンテナにおいて、図 14 に示したアンテナを人体正面側に向けた状態の η_{ac} は 83.2% と最も高い。一方、図 15 に示したアンテナを胸側に向けた状態の η_{ac} は 48.5% と低い。このように装着方向による η_{ac} の差が大きい原因は、主放射素子である半波長素子と胸との間隔及び最大放射方向が装着方向によって変化するためである。

上記の η_{ac} に関する結果から、 $3/4$ 波長アンテナの胸装着状態の効率には従来のアンテナに対する特筆すべき改善は見られないといえる。しかしながら、無線機の装着方向が限定されずアンテナが実装される側が人体に向けられることも考慮する必要がある条件では、半波長素子が地板から突起するように配置された $3/4$ 波長アンテナのほうが PIFA に比べて平均的な効率の面で有利であるといえる。

3.4 パターン平均化利得 PAG

次に、胸装着状態の水平 (XY) 面指向性からパターン平均化利得 PAG (G_a) を次式を用いて求める。

$$G_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[G_\theta \left(\frac{\pi}{2}, \phi \right) + \frac{1}{C_{VH}} G_\phi \left(\frac{\pi}{2}, \phi \right) \right] d\phi \quad (2)$$

ここで、 $G_\theta(\pi/2, \phi)$ 及び $G_\phi(\pi/2, \phi)$ は各偏波成分の水平面電力指向性であり、 C_{VH} はアンテナへ入射する到来波の交差偏波電力比 ($XPR = P_\theta/P_\phi$) に関連した交差偏波成分の補正係数である。ここでは C_{VH} を 0 ~ 12 dB まで変化して PAG を求める。

PAG は 800 MHz 帯においてその有効性が確認されている [10] が、2 GHz 帯における有効性は従来明らかにされていない。本論文では 4. において、実際の移動通信環境における 2 GHz 帯の実効利得を RFM 法を用いて測定するが、それに先立ち本章では暫定的な評価指標として PAG を用いる。

図 17 及び図 18 に各アンテナの PAG を示す。ここで示す各アンテナの () 内の番号は図 16 で示したものに対応している。

図 17 に、 $1/4$ 波長モノポール、PIFA 及び $3/4$ 波長アンテナの PAG を示す。図 17 (3) から、図 12 に示した半波長素子を垂直に配置した $3/4$ 波長アンテナの PAG は $-1.6 \sim -4$ dBd である。

これに対して、PIFA の PAG は C_{VH} による変化傾向は同様であるが全体的に約 2 dB 低い。これは、両

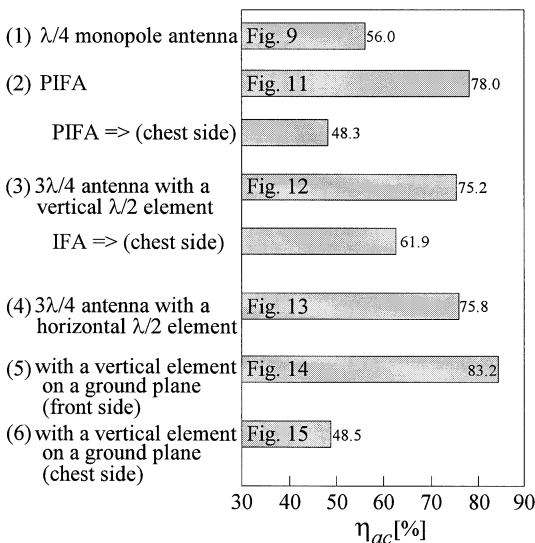


図 16 胸装着状態における効率 η_{ac}
Fig. 16 η_{ac} in wearing on the chest.

アンテナの交差偏波成分比率は同様であるが、水平方向利得が PIFA よりも 3/4 波長アンテナのほうが高いためである。

また 1/4 波長モノポールの場合、主偏波が E_θ 成分であり E_ϕ 成分が低いため C_{VH} による PAG の変化はないが、垂直面指向性において水平方向に発生するヌルにより PAG が約 -8.5 dBd と低い。

更に、(4) に示す半波長素子を水平に配置した 3/4 波長アンテナの PAG は、 $-3.8 \sim -10$ dBd 以下と変化が大きい。これは、主偏波成分が E_ϕ であるためである。

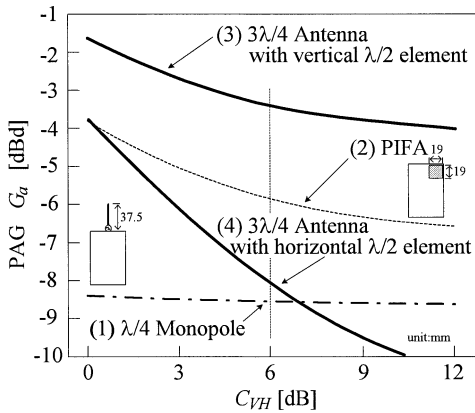


図 17 胸装着状態における 1/4 波長モノポール、PIFA 及び 3/4 波長アンテナの PAG
Fig. 17 PAG of $\lambda/4$ monopole, PIFA and the $3\lambda/4$ antenna in wearing on the chest.

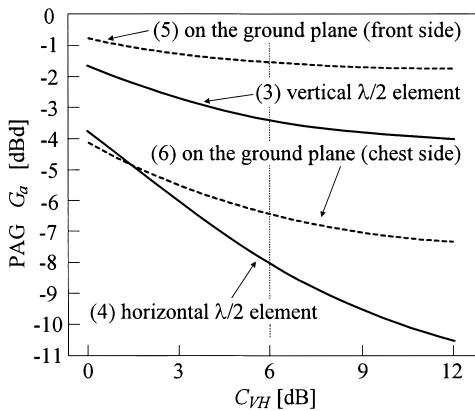


図 18 胸装着状態における各種 3/4 波長アンテナの PAG
Fig. 18 PAG of the $3\lambda/4$ antennas in wearing on the chest.

次に、図 18 に 4 種類の 3/4 波長アンテナの PAG を比較した結果を示す。図 18(5) から、図 14 に示した半波長素子を地板上に配置した 3/4 波長アンテナを人体正面側に向けた場合の PAG は、他に比べて最も高く $C_{VH} = 6$ dB において -1.4 dBd である。これに対して、(6) に示す 3/4 波長アンテナを胸側に向けた場合の PAG は $C_{VH} = 6$ dB において -6.3 dBd と低い。このように装着方向によって PAG に大きな差が発生する主な要因は、図 16 で説明した効率の差であると考えられる。

また、(3) に示す半波長素子を地板から突起して垂直に配置した 3/4 波長アンテナの $C_{VH} = 6$ dB における PAG は -3.3 dBd であるが、このアンテナの IFA 側を胸側に向けて装着した場合の PAG は $C_{VH} = 6$ dB において -4.5 dBd であった。このように半波長素子を地板から突起して配置した構成では、PAG においても装着方向による差は小さい。

上記の PAG に関する結果から、半波長素子を地板から突起して垂直に配置した 3/4 波長アンテナでは、装着方向にかかわらず $C_{VH} = 6$ dB において -4.5 dBd 以上の PAG が得られることがわかった。この値は、携帯電話用半波長ホイップの通話状態の一般的な値である -6 dBd 以上であり、主アンテナの性能として十分な値であるといえる。

4. 実効利得の測定

本章では、3. で述べたカード型無線機に適用した 1/4 波長モノポールアンテナ、PIFA 及び 3/4 波長アンテナの胸装着状態の実効利得を実際の移動通信伝搬環境において RFM 法を用いて測定する。

図 19 に実効利得の測定システムの構成を示す。固定

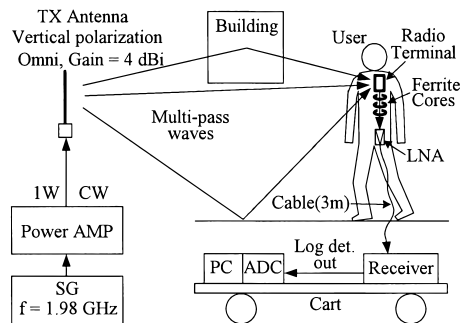


図 19 実効利得の測定システム
Fig. 19 Measurement system of effective gain.

する送信側では、標準信号発生器からの連続波を電力増幅器で1W (30 dBm) に増幅し、垂直偏波で利得が4 dBi である水平面無指向性アンテナで送出する。取得した実験局免許の都合から、測定周波数を1.98 GHz に設定している。

移動する受信側では、被測定アンテナを取り付けた携帯無線機を実際の人体に装着し、徒歩で移動しながら受信レベルをサンプリングする。アンテナの給電部と人体の腰に装着した低雑音増幅器 (LNA) を50 cm の同軸ケーブルを介して接続する。このとき、同軸ケーブルのアンテナ側にフェライトコアを被せることでケーブルによる放射特性への影響を排除した [15]。LNA から3 m の同軸ケーブルを介して受信機へ信号を入力し、受信機のアナログ出力をADコンバータ (ADC) を介してコンピュータ (PC) へ取り込む。

ケーブル損失を含めた受信系の総合雑音指数 (NF) は5 dB であり、受信機の帯域幅が300 kHz であるので、受信アンテナ端の入力換算雑音は-114 dBm である。C/N = 9 dB を検出下限とすれば検出電力の最低値は-105 dBm となる。したがって、送受アンテナの利得を含めた伝搬減衰が最大135 dB まで測定が可能である。また、受信系が線形性を維持できる最大入力電力は-30 dBm であるので、測定ダイナミックレンジは75 dB である。この範囲において、アンテナ入力端から標準信号を入力して受信線形性の校正を行う。なお、測定分解能は約0.05 dB である。

徒歩移動の速度を毎秒0.5 m として、1回の測定において20秒間で10 m を移動する。サンプリング間隔は1 ms であり、サンプリング間距離は $\lambda/300$ である。

1回の測定 (10 m 移動) で20,000 点の受信レベルを取り込み、その中央値及び累積確率分布を算出する。

測定は金沢大学工学部の敷地内で行った。測定点の配置を図20に示す。送信アンテナは3階校舎屋上 (地上高約11 m) に設置しており、この送信点から132 m 離れたA点と約200 m 離れたB点の路上において測定を行った。両測定点とも送信アンテナとの間には複数の4階校舎が存在し見通し外である。両測定点において、10 m の移動コースをそれぞれ3コース設定した。

まず、両測定点において交差偏波電力比 (XPR) を測定した。人体及び携帯無線機の代わりに半波長ダイポール及び微小ループを地上1.5 m の高さで各測定コースを移動させた。垂直に配置した半波長ダイポールとループ面を水平に配置した微小ループの受信レベル中央値の比と両アンテナの利得の比からXPRを求めた。各コースにつき5回測定した平均値から求めたXPRは、A点で9.4 dB でありB点で6.0 dB であった。また、両測定点の垂直偏波成分の累積確率分布を図21に示す。図21において、横軸の受信レベルは中央値を0 dB として規格化した値を示している。図21から両測定点ともほぼレイリー分布に近いことがわかる。

垂直に配置した半波長ダイポールの受信レベル中央値と人体に装着した被測定アンテナの受信レベル中央値との比から実効利得を求めた。携帯無線機の装着状態は3.の指向性測定時と同一条件とした。各被測定アンテナ及び各コースにおいて、5人の人体に対して測定を行った。

被測定アンテナは、1/4 波長モノポールアンテナ、

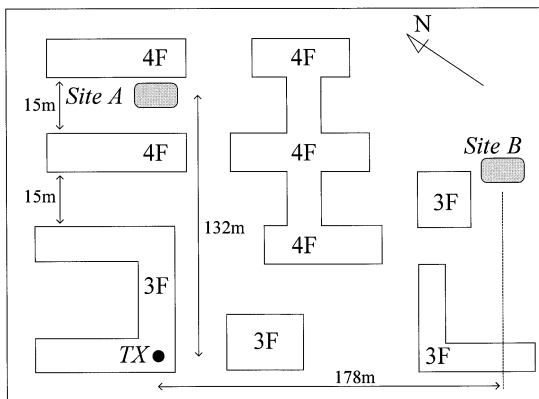


図20 測定点の配置
Fig. 20 Measurement sites map.

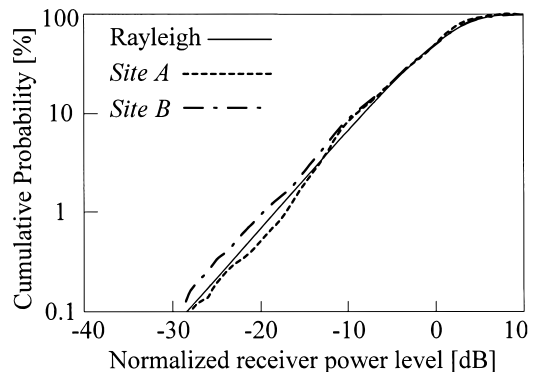


図21 累積確率分布
Fig. 21 Cumulative probability distribution.

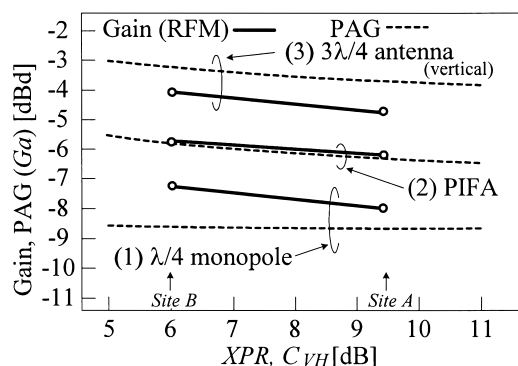


図 22 胸装着状態における 3/4 波長アンテナ, PIFA 及び 1/4 波長モノポールの実効利得

Fig. 22 Effective gain of $\lambda/4$ monopole, PIFA and the $3\lambda/4$ antenna in wearing on the chest.

PIFA 及び 3/4 波長アンテナの 3 種類である。3/4 波長アンテナとして、3.4 で説明したように、装着方向にかかわらず良好な PAG が得られた図 1 の半波長素子が地板から突起して垂直に配置された 3/4 波長アンテナを選択した。胸装着状態における装着方向は、図 12 に示すように IFA 側が人体正面側に向く方向とした。同様に、PIFA についても図 11 に示すように PIFA が人体正面側に向く装着方向とした。

各コース及び 5 人の測定結果を平均して求めた実効利得を図 22 に示す。ここでは、図 17 で示した PAG を横軸上で XPR と C_{VH} を対応させて併記している。

図 22 において、3/4 波長アンテナの実効利得は PAG に対して約 1 dB 低く約 -4.5 dBd である。実効利得において、3/4 波長アンテナは他のアンテナに対して 2 ~ 4 dB 高い結果となった。また、1/4 波長モノポールの場合、PAG よりも実効利得のほうが 1.5 dB 程度高い結果であった。

図 22 の結果から、3/4 波長アンテナの場合は実効利得より PAG のほうが高く、逆に 1/4 波長モノポールの場合は実効利得のほうが高い結果であった。この現象は、両アンテナの垂直面指向性と測定点における到来波仰角に関連していると考えられる。

PAG は水平方向のみの電力指向性から算出されるが、市街地における到来波仰角は $0 \sim 30^\circ$ に分散する [4]。3/4 波長アンテナの場合は、図 12 に示すように水平方向が最大放射方向であるので、PAG のほうが高い値となると考えられる。また、1/4 波長モノポールの場合は図 9 に示すように、水平方向がヌルとなっていることから、実効利得のほうが高い値となると考

えられる。また、PIFA の場合は実効利得と PAG がほぼ一致した結果である。これは図 11 に示すように、水平方向にはヌルが存在せずかつ最大放射方向が水平方向ではないため、3/4 波長アンテナと 1/4 波長モノポールの中間的な傾向となったものと考えられる。

このように、PAG を用いる場合、被測定アンテナの垂直面指向性の特徴により実効利得との間にある程度の差異が発生する。上記のような差異を無視できない場合は、到来波仰角のパラメータを含む平均実効利得 [16] を用いることが有効である。しかしながら、図 22 において PAG と実効利得の差は最大で 1.5 dB 程度であり、 XPR と C_{VH} による変化傾向もほぼ一致している。この程度の差異が許容できる場合、PAG は 2 GHz 帯において簡易的な評価指標として利用可能であるといえる。

5. む す び

本論文では、携帯無線機用内蔵アンテナとして、半波長素子とそれを励振するための IFA を組み合わせた 3/4 波長アンテナによる利得改善について検討した。

カード型無線機に適用した 3/4 波長アンテナにおいて、半波長素子の位置と方向を変化することにより主偏波と指向性を変化できることを示した。また、一つの板金部品のみで整合機能を含むアンテナ全体を実現する構成例を示し、IFA を励振器として使用することによるコストや生産性の面での利点を示した。

次に、従来のアンテナと数種類の 3/4 波長アンテナの胸装着状態の指向性を測定し、効率 η_{ac} 及び PAG を求めた。その結果、半波長素子が地板から突起して垂直に配置された 3/4 波長アンテナは、アンテナが人体に向けられるような装着方向を考慮すると、従来の PIFA に比べて平均的な効率の面で有利であることを示した。また、この 3/4 波長アンテナの PAG は $C_{VH} = 6$ dB において -4.5 dBd 以上であり、主アンテナとして十分な値であることを示した。

更に、実際の移動通信伝搬環境における実効利得を RFM 法を用いて測定した。その結果、3/4 波長アンテナの実効利得は -5 dBd 以上であり、従来の他のアンテナの実効利得より 2 dB 以上高いことがわかった。

また、PAG と実効利得の比較から、被測定アンテナの垂直面指向性の特徴により PAG と実効利得との間には 1.5 dB 程度の差異が見られるが、全体的な傾向がほぼ一致することを確認した。この差異が許容できる場合 PAG は 2 GHz 帯における簡易的な評価指標

として利用可能であるといえる。

今後は、3/4 波長アンテナの広帯域化と様々な端末における設計法の確立について検討を進める予定である。

謝辞 測定に御協力頂きました、石川県工業試験場吉村慶之氏、金沢大学 中西成一氏に感謝します。また、本研究の機会を与えて頂きました松下通信金沢研究所所長安島巧氏に感謝致します。

本研究は、文部科学省の平成 12 年度科学技術振興調整費による地域先導研究「地域産業の発展に寄与する電磁波技術に関する研究(超小型携帯無線機用アンテナの放射特性)」の一環として行われた。

文 献

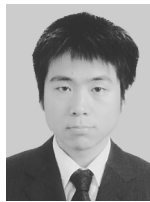
- [1] 新井宏之, 酒井信智, “携帯端末用単方向指向性アンテナの構成法と人体ファントムの効果,” 1999 信学総大, SB-1-12, 1999.
- [2] 岡野由樹, 河井寛記, 小柳芳雄, 吉村博幸, 伊藤公一, “SAR 低減を目的とした 2 GHz 帯携帯電話機用板状無給電素子配列ループアンテナ,” 2001 信学総大, B-1-186, 2001.
- [3] W.C.-Y. Lee and Yu S. Yeh, “Polarization Diversity for Mobile Radio,” IEEE Trans. Commun., vol.COM-20, no.5, pp.912-923, Oct. 1972.
- [4] 渡辺邦夫, 三島 発, 恵比根佳雄, “陸上移動通信における電波到来仰角の測定,” 信学論(B-II), vol.J60-B, no.11, pp.880-887, Nov. 1977.
- [5] H. Morishita, H. Furuuchi, H. Ide, Z. Tanaka, and K. Fujimoto, “A Balance-Fed Loop Antenna System for Handset,” IEICE Trans. Fundamentals, vol. E82-A, no.7, pp.1138-1143, July 1999.
- [6] 江川 潔, 大賀 忠, 伊藤英雄, “携帯無線機用 U 字ダイポールアンテナの放射特性(その 2),” 2001 信学総大, B-1-123, 2001.
- [7] 春木宏志, 小林 敦, “携帯無線機用逆 F アンテナ,” 昭 57 信学総全大, no.613, pp.3-66, 1982.
- [8] 小川晃一, 松吉俊満, 門間健志, “人体の頭, 手および肩の影響を考慮した 900 MHz 帯携帯端末ダイバーシティアンテナの特性解析,” 信学技報, A-P98-88, pp.89-96, Oct. 1998.
- [9] 齋藤 裕, 長野 勇, 八木谷聡, 春木宏志, “人体に装着された小形無線端末用アンテナの放射特性,” 信学論(B), vol.J83-B, no.10, pp.1437-1445, Oct. 2000.
- [10] T. Taga and K. Tsunekawa, “Performance Analysis of a Built-in Planar Inverted F Antenna for 800 MHz Band Portable Radio Units,” IEEE J. Select. Areas in Commun., vol.SAC-5, no.5, pp.921-929, June 1987.
- [11] J.B. Andersen and F. Hansen, “Antennas for VHF/UHF Personal Radio: A Theoretical and Experimental Study of Characteristics and Performance,” IEEE Trans. Vehicular Tech., vol.VT-26, no.4, pp.349-357, Nov. 1977.
- [12] H. Arai, N. Igi, and H. Hanaoka, “Antenna-Gain Measurement of Handheld Terminals at 900 MHz,” IEEE Trans. Vehicular Tech., vol.VT-46, no.3, pp.537-543, Aug. 1997.
- [13] User’s Manual for IE3D, Ver.8.0, Zeland Inc., 2001.
- [14] R. Yamaguchi, K. Sawaya, and Y. Fujino, “Effect of dimension of conducting box on radiation pattern of a monopole antenna for portable telephone,” IEICE Trans. Commun., vol.E76-B, no.12, pp.1526-1531, Dec. 1993.
- [15] M. Murase, Y. Tanaka, and H. Arai, “Propagation and Antenna Measurements Using Antenna Switching and Random Field Measurements,” IEEE Trans. Vehicular Tech., vol.VT-43, no.3, pp.537-541, Aug. 1994.
- [16] T. Taga, “Analysis for Mean Effective Gain of Mobile Antennas in Land Mobile Radio,” IEEE Trans. Vehicular Tech., vol.VT-39, no.2, pp.117-131, May 1990.

(平成 13 年 8 月 6 日受付, 11 月 28 日再受付)



齋藤 裕 (正員)

昭 59 石川高専卒。平 3 (株) 松下通信金沢研究所入社。以来、主として移動通信機器及び移動通信用アンテナの研究開発に従事。現在、同社開発グループチームリーダー。博士(工学)。IEEE 会員。



杉浦 宏和 (学生員)

平 12 金沢大・工・電気情報卒。平 14 同大大学院修士課程了。在学中、携帯無線機用アンテナの研究に従事。



長野 勇 (正員)

昭 43 金沢大・工・電気卒。昭 45 同大大学院修士課程了。同年同大電気助手、昭 62 同電気・情報工教授。昭 58~59 米国ジェット推進研究所 NRC 研究員。異方性不均質媒質中の電磁界計算法、VLF 波による D 層電子密度計測法の開発、衛星搭載用プラズマ波計測装置の開発に従事。工博。昭 62 地球電磁気・地球惑星圏学会田中賞受賞。電気学会、テレビジョン学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、アメリカ地球物理学会各会員。



八木谷 聡 (正員)

昭 63 金沢大・工・電気・情報卒．平 2 同
大大学院修士課程了．平 5 同博士課程了．
同年同大電気・情報助手，現在，同助教授．
平 9～10 米国ミネソタ大客員研究員（文部
省在外研究員）．科学衛星及びコンピュー
タシミュレーションによる磁気圏プラズマ

波動解析の研究，火星探査衛星（のぞみ）搭載用低周波波動観
測装置の開発に従事．博士（工学）．地球電磁気・地球惑星圏学
会，米国地球物理連合（AGU）各会員．



春木 宏志 (正員)

昭 41 東北大・工・電気卒．同年同大・工・
電気通信研究所助手．昭 44 同大大学院修
士課程了．同年松下通信工業（株）入社．
以来，主として移動体通信機器及び移動体
通信用アンテナの研究開発に従事．現在，
同社ワイヤレスソリューション研究所主席

技師．