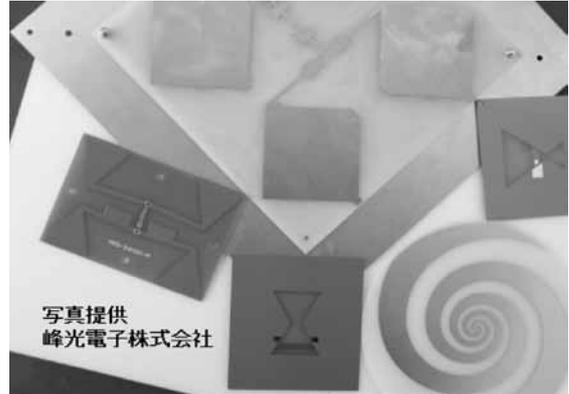


全世代にむけた産学人無線通信技術講座

～その3 注目される小形アンテナとマルチアンテナ～

私が1971年にアマチュア無線局を開局したが、無線局の免許が届く前から、1階の窓枠に取り付けた自作アンテナに無線機を接続し受信だけを楽しんでいた。免許が届いた日におそろおそろ電波を出してみた。初交信の相手局との距離は、それほど遠くはなかったが、自作のアンテナで交信ができた現実に興奮がおさまらなかったことを今でも覚えている。それ以来、アンテナに興味を持ち、私がアンテナの本を読みあさった高校時代は、受験勉強をしないで両親をハラハラさせたが、このアンテナへの興味が「好きこそ物の上手なれ」で、博士（工学）の学位をいただくまでに至った。



本稿で紹介する多様なアンテナ

根日屋 英之

はじめに

「いつでも、どこでも、だれとでも」通信が可能となる移動通信システムは、自動車、航空機、船舶、列車のみならず、今、話題のIEEE 802.15.6のWBAN (Wireless Body Area Network) では、たえず動いている人間にまでアンテナを取り付けるようになってきた。デジタル通信技術の進歩に伴い、アナログ的な発想では考えられなかった通信サービスが行われ、デバイスの高速化や低消費電力化、装置自体の小型・軽量化、電池の高性能化と移動通信の発展は新たな局面を迎えている。

無線通信に欠かすことができないアンテナについても、無線端末に内蔵する小形アンテナ（ここでは波長に対して放射素子が小さいアンテナを小形アンテナと記し、形状が小さい小型と区別したが、小型と同義）が注目されている。また、パーソナルユースの高速広帯域データ通信が広く用いられるようになり、アンテナも電子回路やソフトウェアと融合することにより高機能化している。

今回は、小形アンテナと、マルチアンテナ技術のアレイアンテナとMIMO (Multi Input Multi Output、またはMultiple Input Multiple Outputの略)について説明する。

小形アンテナの分類及び定義

私の会社では、アンテナ設計の受託も業務の一つとなっているが、お客様から特に小形アンテナの設計の

ご依頼が多い。しかし、小形アンテナとは具体的にどのようなアンテナを指すのかが明確ではないように思う。藤本京平氏は文献 [1] で四つに分類した小形アンテナを紹介した。

① 電気的小形アンテナ

電気的小形アンテナとは、小形でありながら必要な帯域幅や利得を有するアンテナである。アンテナがあまり小形になると、接続するコネクタやケーブルの影響が無視できなくなってくるので、このことも考慮したアンテナの設計を行う必要がある。

② 物理的制約付き小形アンテナ

物理的制約付き小形アンテナとは、アンテナ寸法の一部が「電気的小形アンテナ」に制限された条件をもつ構成のアンテナである。波長を基準とするような定義はなく視覚的に小形と判断される。

③ 機能的小形アンテナ

機能的小形アンテナとは、機能を評価基準とするもので、「同じ機能に対する相対的な小ささ」が判断基準になる。

④ 物理的小形アンテナ

物理的小形アンテナとは、人間が扱う上において、感覚的に「大きい」と感じないアンテナである。

以上の小形アンテナの分類ではグラウンド板の影響までは言及していない。しかし、実際的小形アンテナは、無線機器の筐体やグラウンド板の存在によってその特性が大きく変わるので、これらもアンテナの一部と考える必要があるだろう。

小形アンテナの寸法

一般に小形アンテナというと①の「電気的小形アンテナ」を指すが、技術に携わる者としては、アンテナの大きさが、そのアンテナの共振周波数での波長との比率でどれくらい小さいアンテナから小形アンテナと呼んでよいかを決めておきたい。アンテナ寸法が使用する波長 (λ) を評価基準として、小形アンテナの寸法的な定義は次の三つが提唱されている。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{アンテナ寸法} < \frac{\lambda}{2\pi} \quad \dots \quad \text{H. A. Wheeler} \\ \text{アンテナ寸法} < \frac{\lambda}{10} \quad \dots \quad \text{R. W. P. King} \\ \text{アンテナ寸法} < \frac{\lambda}{8} \quad \dots \quad \begin{array}{l} \text{S. A. Schelkunoff} \\ \text{H. T. Friis} \end{array} \end{array} \right.$$

私が仕事で出会ったアンテナ技術者は、H. A. Wheeler が提唱するアンテナ寸法を小形アンテナととらえている人が多いようである。少し専門的な話になってしまうが、蓄積界と放射界が等しい境界である半径が、 $\lambda / (2\pi)$ の球 (λ : 波長) とする 1 radian sphere 内にある寸法のアンテナを対象としたときに 1 radian sphere を用いると、この球面内部では蓄積界が支配的になるという観点と、長さなどの寸法を $\lambda / (2\pi)$ 、すなわち 1 radian length で規格化できることが実際の設計では便利なのが、その理由と思われる。

小形アンテナの寸法の限界

アンテナをどこまで小さくできるのかは電気的小形アンテナの限界論に関するもので、アンテナの寸法、Q (あるいは帯域幅)、利得などとの関係については、Wheeler [2]、Chu [3]、Hansen [4]、Harrington [5] による論文があり、寸法の限界の推測は行える。しかし、限界値をもつアンテナは、私たちが実際にアンテナ

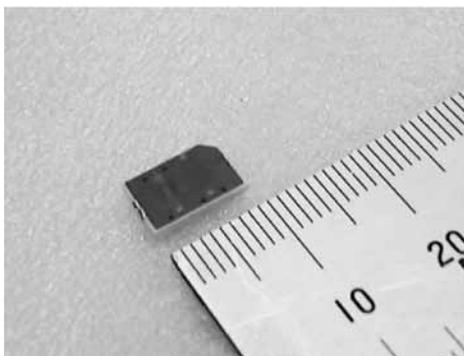


図1 チップアンテナ
(写真提供: 峰光電子株式会社)

を作る立場からすると実現が難しい。

私たちがアンテナを設計するという事は、電気的小形アンテナにおいて、寸法と放射効率と帯域幅のトレードオフを見出すことになる。アンテナの設計を依頼されるお客様が、「小形で高利得で広帯域のアンテナが欲しい」というご要望に対して、アンテナは小さくしてゆくと、利得は低下し、帯域も狭くなってしまふという現実があることを知っていただきたい。

小形アンテナの利得

アンテナの給電点インピーダンス Z は、

$$Z = R + jX \quad \text{または、} \quad Z = R - jX \quad (1)$$

で表される。ここで、 R は抵抗成分、 X はリアクタンス成分である。アンテナは共振すると、その共振周波数ではリアクタンス成分 X が 0 (ゼロ) となり、抵抗成分 R のみになる。この抵抗成分 R は、放射に寄与する放射抵抗 R_a と、放射に寄与しない損失抵抗 R_L の和であらわされる。

$$R = R_a + R_L \quad (2)$$

J. Klaus は著書 [6] で、微小ダイポールアンテナの最大有効面積は、その長さに関係無く $0.119 \lambda^2$ 、微小ループアンテナでも同様に $0.119 \lambda^2$ で、指向性利得はともに + 1.76dBi (=1.5 倍) と述べている。これらの値は、半波長ダイポールアンテナの有効面積が $0.13 \lambda^2$ なので、それに比べ約 92%、また指向性利得は + 2.14dBi (=1.64 倍) であるのでほとんど遜色がないといえる。しかし、実際の小形アンテナは、それほど高い利得が取れない。その理由は、アンテナが小形になると放射抵抗 R_a が低くなり放射効率 η が低下するからである。放射効率 η は、以下の式で表される。

$$\eta = \frac{R_a}{R} = \frac{R_a}{R_a + R_L} \quad (3)$$

J. Klaus の提唱する小形アンテナの指向性利得を $G_a = + 1.76\text{dBi}$ (=1.5 倍) とすると、絶対利得 G_a は以下の式で表される。

$$G_a = 10 \log(1.5\eta) = 10 \log \left(1.5 \frac{R_a}{R_a + R_L} \right) \quad [\text{dBi}] \quad (4)$$

小形アンテナの利得を高めることは、放射効率を高めることになる。それは、損失抵抗 R_L を低くするか放射抵抗 R_a を高くすることがこの式からわかる。

以上より、反射板などを付加する指向性アンテナで

はなく、放射素子のみで構成される小形アンテナの絶対利得は+1.76dBiを超えられないことになる。

アンテナの絶対利得

アンテナの絶対利得 G_a [dBi] とは、アンテナの利得を定義するために、その基準となるアンテナとしてアイソトロピックアンテナ (Isotropic Antenna) を用いたときの利得を示す。アイソトロピックアンテナとは、全空間すべての方向に均等に電波を放射する周波数に依存しないアンテナで、アンテナ自体は大きさが無い点波源と仮定する。

絶対利得の定義は、全方向無指向性のアイソトロピックアンテナに送信機を接続して、基準電力の電波を放射させる。アンテナからある距離 d の場所で電波の強さを計算し、このときの電波の強さ (電力) を P_i とする。次に、利得を測定したい被測定アンテナに同じ送信機を接続し、その被測定アンテナの最大輻射方向の同じ距離 d での電波の強さを測定する。このときの電波の強さ (電力) を P_{dut} とする。この P_{dut}/P_i の比をデシベルで表した値をアンテナの「絶対利得」といい、回線設計を行うときのアンテナの利得として用いる。

絶対利得 G_a は、その電波の強さの比を表現するにあたってアイソトロピックアンテナを基準にしたことを示すため、その両者の放射する電波の強さの比率を表す“dB”の後にアイソトロピックアンテナ (Isotropic Antenna) の頭文字の“i”を付加して「dBi」と表す。

$$G_a[dBi] = 10 \log \frac{P_{dut}}{P_i} \quad (5)$$

絶対利得において、アイソトロピックアンテナとの電波の強さを比較したとき、被測定アンテナの電波がアイソトロピックアンテナの電波の強さよりも強いときは+▲ dBiのように正の値をとり、弱いときは-■ dBiのように負の値をとる。基本的なダイポールアンテナの絶対利得は+ 2.14dBiである。

小形アンテナの利得の推測をする便利な式

進士昌明氏は文献 [7] で、実用アンテナの物理的長ささと電気的長さとの関係を示した。波長が短いUHF帯やSHF帯での領域では電気的に短縮する必要はあまり生じないが、LF帯からVHF帯の領域では電気的長さを確保しながら物理的長さを短くすることが要求される。進士氏は、アンテナの利得を G [dBd]

(dBdとは、ダイポールアンテナを基準とした相対利得)、アンテナの最大寸法を L 、1波長の長さを λ とおくと、 $L \ll \lambda$ の条件で、 G と L の間には、

$$G[dBd] \approx 8 \log \frac{2L}{\lambda} \quad (6)$$

の関係が存在することを示した。この式は、お客様からアンテナの寸法を提示されたときに、利得がどれくらい得られるかの目安をつけられる、設計者にとってはとても便利な式である。

小形アンテナの問題点と誤解

私が接するお客様の小形アンテナについての期待と、アンテナを小形化すると起こる特性劣化の現実との間にはギャップがある。以下にそれらの事例を挙げる。

● 小形であるが高利得のアンテナを設計して欲しい

小形アンテナの利得には、式 (4) で与えられる限界がある。アンテナを小形化すると放射のパラメータとなる放射抵抗 R_a の低下がおこるので、放射効率 η が低下する。設計者としては、放射抵抗が高い素子構造を考えることになるが、1/2波長ダイポールアンテナの放射抵抗 (73 Ω) に比べ、小形アンテナは、数 Ω から高くても十数 Ω の放射抵抗であり、損失抵抗 (数 Ω 程度) は両者でほぼ同じなので、小形アンテナの設計をしていると、電流分布を犠牲にしない1/2波長ダイポールアンテナや1/4波長モノポールアンテナは、非常に高効率 (高利得) なアンテナである。

● 広帯域の小形アンテナを設計して欲しい

小形アンテナは放射電力の割に大きな電流が流れ、位相に対して極めて敏感になり帯域が狭くなる。小形アンテナで広帯域のものができたときは、損失抵抗が大きく放射効率が悪いことがあり、インピーダンス特性では広帯域に見えていながら放射が弱いこともあるので、実際の放射特性も測定して確認しなければならない。

● 狭い指向性の小形アンテナを設計して欲しい

アンテナを小形化した極限はアイソトロピックアンテナ (点波源) になり、全方向無指向性になる。これは、アンテナ素子単体において、アンテナを小形化してゆくと無指向性に近づいてゆくことになる。反射板 (反射器) を有しない小形アンテナ単体での鋭い指向性のものは、実現が難しい。

● アンテナを筐体内蔵したら共振周波数が変わってしまったのは、性能が悪いアンテナか？

アンテナは周囲や環境の影響を受ける方が、実はアンテナとしては性能が良い（感度が高い）。携帯端末の筐体にアンテナを内蔵したら、共振周波数がずれてしまった（または、インピーダンスが変化した）ので、そのアンテナの性能が悪いと決めつけるのは誤った認識で、アンテナの感度が良いからこそ共振周波数がずれる（または、インピーダンスが変化する）のである。筐体に内蔵したり、プリント基板に実装する小形アンテナは、その実際に実装した環境で通信の目的周波数に共振させる調整が必要である。

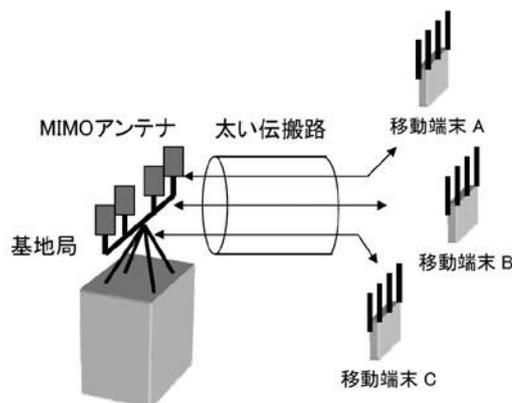


図3 MIMO

マルチアンテナ

アンテナの放射素子を複数用いたハイテクアンテナが用いられるようになってきた。

● アレイアンテナ

図2に示すように、アレイアンテナは、複数の放射素子の各々に位相や振幅に差をつけて給電することにより、アンテナに鋭い指向性を持たせるだけでなく、アンテナを機械的に回転させずに、アンテナの放射する方向を変えることができる。この原理は受信でもいろいろ応用でき、ある移動する無線局を追尾して通信したり、混信を与える無線局からの電波を受けなくしたり、また、無線局の電波の到来方向を探るなどで実用化されている。

● MIMO

携帯電話や無線LANなどでMIMO (Multiple Input Multiple Output) 伝送の技術が用いられている。MIMOとは、図3に示すように、送信側、受信側で各々複数のアンテナを使用し、その間の空間では複数の電波伝搬路を作ることで空間的な多重化を行う方式である。MIMOを用いると、占有周波数帯域幅を広げずに通信速度が大幅に向上し、また、複数のア

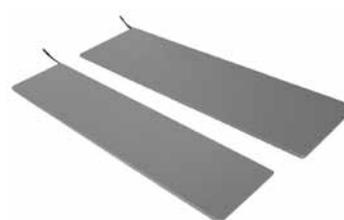


図4 マルチアンテナの事例 (写真提供：峰光電子株式会社)

ンテナで受信するので、マルチパスにも強く、障害物が多い環境でも通信状況を改善できる。

さいごに

私も無線通信機器の設計会社を起業して27年になる。その間に多くのアンテナも設計してきた。携帯電話が普及し始めた頃、正直なところ、お客様はアンテナを針金部品程度にしか考えておらず、非常に安い価格を想定されていた。しかし、携帯電話のアンテナが外部に突起しているものから筐体に内蔵するようになると、小形化が要求され、アンテナが周囲の電子部品や基板と干渉することへの対策が必要となる。また、近年では電子回路やソフトウェアと融合したハイテクアンテナが採用されるようになってくると、無線通信機器におけるアンテナは、単なる針金部品ではなくなってきている。アンテナはどこまで進化してゆくのかとても楽しみである。

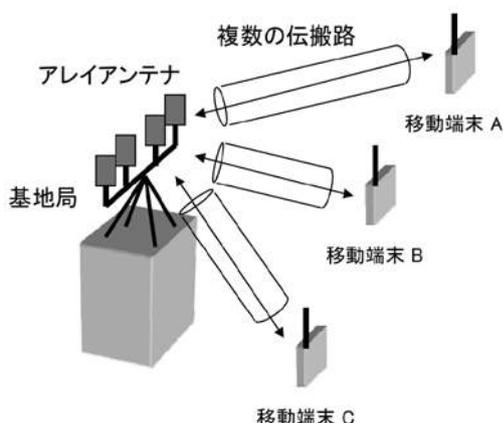


図2 アレイアンテナ

参考文献

- [1] 藤本京平: "小形アンテナに関する研究動向", 信学会誌, Vol. 70, No. 8, pp. 830-838, (1987/8)
- [2] H. A. Wheeler: "Fundamental Limitations of Small Antennas", Proc. IRE, 35, 12, p. 1479, (1947/12)
- [3] L. J. Chu: "Physical Limitations of Omni-directional Antennas", J. appl. Phys., 19, p. 1163, (1948/12)
- [4] R. C. Hansen: "Fundamental Limitations in Antennas", proc., IEEE, 69, 2, p. 170, (1981/2)
- [5] R. F. Harrington: "Effect of Antenna Size on Gain, Bandwidth and Efficiency", J. Res. Nat. Bur. Stand., V64D, pp. 1-12, (1960/1-1960/2)
- [6] J. Klaus: "Antennas", Second Edition, McGraw-Hill, 1988
- [7] 進士 昌明: "小形・薄形アンテナと無線通信システム", 信学論(B), Vol. J71-B, No. 11, pp. 1198-1205, (1988/11)
- [8] 根日屋 英之, 小川 真紀: 「ユビキタス時代のアンテナ設計」, ISBNコード 978-450132500-8, 東京電気大学出版局
- [9] 根日屋 英之, 小川 真紀: 「ワイヤレスブロードバンド技術」, ISBNコード 978-450132530-5, 東京電気大学出版局
- [10] 根日屋 英之: 「ワイヤレス通信の最新技術」, pp. 86-90, M&E 2009年12月号, 工業調査会
- [11] 小暮 裕明, 小暮 芳江: 「アンテナの仕組み」, ISBNコード 978-4-06-257871-4 C0255, 講談社 ブルーバックス