

アンテナ・伝搬研究と無線通信システム

Antennas & Propagation Research and Wireless Communication Systems

堀 俊和

Toshikazu HORI

福井大学 産学官連携本部

和文概要

無線通信システムにとってアンテナ・伝搬は必要不可欠な基盤技術であり、アンテナ・伝搬研究において無線システムは needs の坩堝（るつぼ）である。本基礎講座では、アンテナ・伝搬研究を理解するための最低限の基礎知識について簡単に説明するとともに、アンテナ・伝搬研究が無線通信システムの実現において果たしてきた役割と実用アンテナの変遷を明らかにし、さらにアンテナ・伝搬研究の推移と動向についてまとめる。

まず、アンテナ・伝搬の基礎知識については、電磁波とアンテナ・伝搬との関係から説き起こし、アンテナの概念と研究開発の推移、アンテナからの放射、アンテナに要求される特性と評価、基本アンテナの動作原理およびアレーアンテナの基礎知識と動作原理について簡単に説明する。無線通信システムとの関わりについては、国内無線通信システムの変遷を示し、無線通信における基幹ネットワークを支えたアンテナ開発の変遷について概括する。最後に、学会におけるアンテナ・伝搬研究の推移、P2Pの無線システムにおけるアンテナ・伝搬研究の位置付け、それに続くアクセス系システムにおけるアンテナ・伝搬研究の位置付けおよび研究動向についてまとめる。

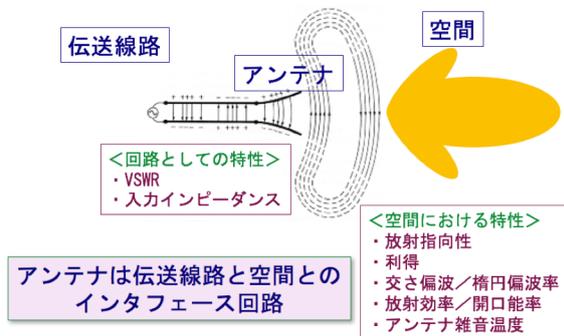


図 アンテナの概念



図 通信用アンテナ・伝搬の研究開発の推移

Abstract

"Antennas and Propagation" are necessary and indispensable fundamental technologies for wireless communications systems. And, the wireless system is a crucible of needs in "Antennas and Propagation" research. In this basic lecture, the minimum basic knowledge to understand "Antennas and Propagation" is explained easily. The role of "Antenna and Propagation" research achieved in realization of wireless communication systems is clarified, and the history of practical antennas for these systems is gathered concisely. More, the change and trend of "Antennas and Propagation" research are remarked.

1. アンテナ・伝搬の基礎知識

ここでは、初心者がアンテナ・伝搬を理解するために必要な最低限の基礎知識について簡単に解説する。アンテナ・伝搬のより深い基礎知識を身につけたい場合は文献 [1] をはじめ他の多くの専門書を参照されたい。

1.1 電磁波とアンテナ・伝搬

(1) 電磁波と Maxwell's Equation

無線通信には電磁波が用いられる。電磁波は導体に高周波電流を流すことにより発生する。この電磁波の発生、反射・透過、回折・屈折、散乱等の波動の振る舞いは、式(1)～式(4)で与えられる Maxwell's Equation で説明できる。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{D} , \mathbf{B} , \mathbf{J} , ρ は各々電界、磁界、電束密度、磁束密度、電流密度、および電荷密度である。

本基礎講座で対象とする「アンテナからの放射」も「大気中の電波伝搬」も同様に Maxwell's Equation を用いて説明できる。

Maxwell's Equation から式 (5) および式 (6) で与えられる電界あるいは磁界のみで表されるベクトル波動方程式を導出できる。

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu \frac{\partial \mathbf{J}_0}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon} \nabla \rho \quad (5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{J}_0 \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{J}_0 , ϵ , μ , σ は各々印加電流密度、誘電率、透磁率、および導電率である。

式 (5) および式 (6) で与えられる微分方程式の解を求めることにより、電磁界が求められる。

(2) 電流源からの放射

アンテナのような電流源からの放射については、波源を考慮した上述のベクトル波動方程式を解く必要がある。しかし、波源が分かってもこの方程式を直接解くことは困難である。

通常は、Maxwell's Equation の式 (2) の磁束密度 \mathbf{B} をベクトルポテンシャル \mathbf{A} で表し、これから電界 \mathbf{E}

をベクトルポテンシャル \mathbf{A} とスカラポテンシャル ϕ とで表す式 (7) を求め、

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} - \nabla \phi \quad (7)$$

さらに、式 (7) を Maxwell's Equation の式 (1) に代入しローレンツ条件を適用することにより、式 (8) に示すようなベクトルポテンシャル \mathbf{A} に対する Helmholtz 型の非同次波動方程式を得る。

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k_0^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_0 \quad (8)$$

ここで、 k_0 は自由空間中の波数である。

自由空間における式 (8) の解は、図 1 に示すように、自由空間のスカラーグリーン関数を用いて式 (9) のように求められる。

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}_0(\mathbf{r}') e^{-jk_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dV \quad (9)$$

ここで、 μ_0 , \mathbf{r} , \mathbf{r}' は各々自由空間中の透磁率、原点 O から観測点 P へのベクトル、および原点 O から電流源へのベクトルである。

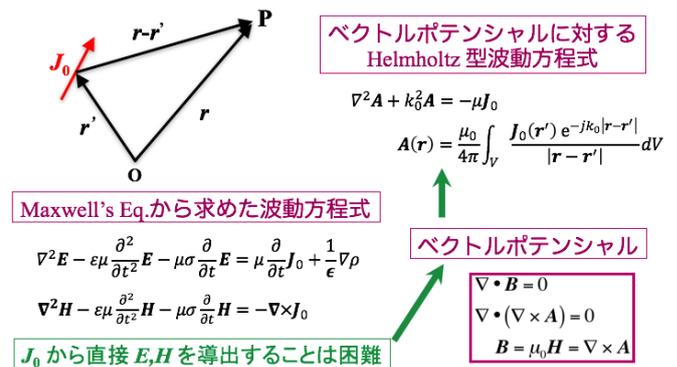


図 1 電流源からの放射界の解法

同様に、スカラポテンシャル ϕ に対する Helmholtz 型の非同次波動方程式からスカラポテンシャル ϕ を求め、先に求めたベクトルポテンシャル \mathbf{A} とあわせて、式 (7) に代入することにより電界 \mathbf{E} を求めることができる。実際には、ローレンツ条件の適用により、電界はベクトルポテンシャル \mathbf{A} のみで与えられるため、式 (9) で求めたベクトルポテンシャル \mathbf{A} を用いて自由空間中の電磁界 \mathbf{E} , \mathbf{H} は次式で求められる。

$$\mathbf{E} = -j\omega \left(\mathbf{A} + \frac{1}{k_0^2} \nabla \nabla \cdot \mathbf{A} \right) \quad (10)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} \quad (11)$$

(3) 電波伝搬

一方、電波伝搬を扱う場合には次式に示すような波源が無い（電荷および電流が 0）ときの簡易な Helmholtz Equations を解くことで電磁界が求まる。

$$\nabla^2 \mathbf{E} + (\omega^2 \epsilon \mu - j \omega \mu \sigma) \mathbf{E} = 0 \quad (12)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + (\omega^2 \epsilon \mu - j \omega \mu \sigma) \mathbf{H} = 0 \quad (13)$$

ここで、 ω は角周波数である。

自由空間中の波動方程式は、式(12)および式(13)において $\sigma=0$ と置くことにより次式で与えられる。

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \mathbf{E} = 0 \quad (14)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k_0^2 \mathbf{H} = 0 \quad (15)$$

波源から放射された電磁波は、波長に比べて充分遠方の領域 (Far-field Region, Fraunhofer Region と呼ばれる) においては球面波として広がっていく。この遠方領域において、球面波は近似的に平面波と見なされ、遠方領域における電波伝搬は平面波の伝搬として取り扱われる。

このとき xyz 座標系における z 方向に伝搬する平面波の電界 E_x は式(14)の波動方程式を満足し、次式で与えられる偏微分方程式の解を求めることにより電界 E_x が求まる。

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x + k_0^2 E_x = 0 \quad (16)$$

この平面波は時間的・場所的に正弦変動し、偏波面を持った波として光速で伝搬していく。偏波面は電界の方向で決まり、電界が大地に垂直である場合を垂直偏波、水平である場合を水平偏波と呼んでいる。これらを合わせて直線偏波と呼ぶ。一般に、直交する2つの直線偏波が同相の場合は、これらの合成電界も直線偏波となる。一方、2つの直交する直線偏波が位相差を持つ場合の合成電界は、時間的および空間的に伝搬軸の回りを楕円状に回転する楕円偏波となる。2つの直交する直線偏波が等振幅でかつ位相差が $\pm \pi/2$ のとき、楕円偏波は円偏波となり、回転方向に応じて右旋円偏波および左旋円偏波と呼ばれる。

1.2 アンテナの概念と研究開発の推移

(1) アンテナの概念

前述の通り、電磁波は導体に高周波電流を流すことにより発生する。この導体こそがアンテナであり、送受信回路と空間との整合素子として位置付けられる。「アンテナ」の語源は「昆虫の触角」である。

アンテナの概念を図2に示す。図2に示すように、アンテナは伝送線路と空間とのインタフェース回路であり、アンテナには伝送線路としての特性と空間における特性が要求される。

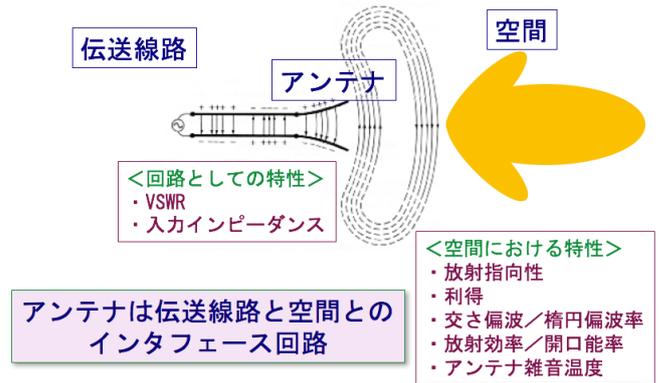


図2 アンテナの概念

(2) アンテナの分類

アンテナ工学ハンドブックに示されているように、アンテナは、使用周波数帯、性能、原理、および用途等によって分類されるのが一般的である [2]。ここでは無線通信システムへの応用の観点から、その構造により、線状アンテナ、開口面アンテナ、平面アンテナの3つに大別する。これらを「基本アンテナ」としたとき、基本アンテナ単独での使用に加えて、基本アンテナを素子として複数配列した「アレーアンテナ」が研究開発されている。

(3) アンテナの研究開発の推移

日本におけるアンテナ研究開発の歴史において、その黎明期を先導した技術は、1925年に東北大学で発明された八木・宇田アンテナである。その後、1930年から1950年にかけて、ビーム空中線リフレクタ、放物反射鏡、折返しアンテナ、円形配列アレーアンテナ、スロットアンテナ、自己補対アンテナ等の研究開発が行われ、その後の様々なアンテナの研究開発、応用開発に繋がっていく。

線状アンテナおよび開口面アンテナは、1950年代以降に国内無線通信システムへの応用が進み、無線通信システムの顔として大きな役目を担った。一方、平面アンテナは、その概念は1950年代に登場しているものの、1970年代以降になって著しく研究開発が進み、多くのシステムに導入されている。

また、無線通信システムの多様化に伴い、高利得、任意の指向性等の高性能な特性を持つ各種アレーアンテナの応用開発が進み、新たな無線通信システムを切り開く基盤技術としての位置付けも高くなってきている。

1.3 アンテナからの放射

図1に示したように、アンテナに流れる電流 J_0 の分布が明らかであれば、ベクトルポテンシャル A は

式 (9) より求められ、電磁界 \mathbf{E} , \mathbf{H} は式 (10) と式 (11) から求められる。

z 軸上にある微小電流素子について考える。 z 軸上の長さ dz の微小電流素子がつくるベクトルポテンシャルは z 方向成分 dA_z のみであり、次式で与えられる。

$$dA_z = \frac{\mu_0 I e^{-jk_0 r}}{4\pi r} dz \quad (17)$$

ここで、 I は電流である。

このとき、球座標系における (r, θ, ϕ) 方向のベクトルポテンシャル (dA_r, dA_θ, dA_ϕ) を式 (10) および式 (11) に代入して、微小電流素子からの放射電磁界は以下のように求まる。

$$E_r = \frac{\eta_0 I dz}{2\pi} \left[\frac{1}{r^2} - j \frac{1}{k_0 r^3} \right] \cos\theta e^{-jk_0 r} \quad (18)$$

$$E_\theta = \frac{\eta_0 I dz}{4\pi} \left[j \frac{k_0}{r} + \frac{1}{r^2} - j \frac{1}{k_0 r^3} \right] \sin\theta e^{-jk_0 r} \quad (19)$$

$$H_\phi = \frac{I dz}{4\pi} \left[j \frac{k_0}{r} - \frac{1}{r^2} \right] \sin\theta e^{-jk_0 r} \quad (20)$$

$$E_\phi = H_r = H_\theta = 0 \quad (21)$$

ここで、 η_0 は自由空間の固有インピーダンスである。また、式 (18) ~ 式 (19) において、 $\frac{1}{r^3}$, $\frac{1}{r^2}$, $\frac{1}{r}$ の項は各々準静電界、誘導電磁界、放射電磁界を表している。

式 (18) ~ 式 (21) から、微小電流素子からの遠方放射界は次式で与えられる。

$$E_\theta = j k_0 \eta_0 \sin\theta \frac{I dz e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \quad (22)$$

$$H_\phi = j k_0 \sin\theta \frac{I dz e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \quad (23)$$

1.4 アンテナの特性と評価

(1) アンテナに要求される特性

上記 1.2 で述べたように、アンテナには伝送線路としての特性と空間における特性が要求される。アンテナの主な電気的特性は以下に示すものである。

- (i) 放射指向性
- (ii) 3dB ビーム幅 (電力半値幅)
- (iii) 利得
- (iv) VSWR
- (v) 入力インピーダンス
- (vi) 交さ偏波/楕円偏波率
- (vii) 放射効率/開口能率
- (viii) アンテナ雑音温度

以下、放射指向性、3dB ビーム幅、利得について詳述する。

(2) 放射指向性

上記 1.3 で示したように、アンテナから放射された電波は遠方領域において球面波として伝搬することから、放射指向性は球座標系における距離 r に依存しない放射角 θ および ϕ のみで表された指向性関数 $D(\theta, \phi)$ で与えられる。

放射指向性のうち、あらゆる方向に均一に放射する指向性を等方性 (無指向性) と呼ぶが、これは実現できない指向性であり仮想的なものである。水平面内無指向性 (全方向性) や双指向性等の特別な指向性を除いて、通常のアンテナは図 3 に示すような放射指向性を持つ。なおここでは、ピークレベルで規格化した電界指向性を示している。また、通常の放射指向性の表記にはデシベル表示が用いられることが多い。

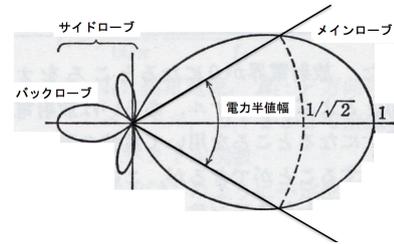


図 3 アンテナの放射指向性

一般に、放射指向性 $E(k)$ は、連続波源分布 $h(\xi)$ をフーリエ変換した形で表され、その関係は次式で与えられる。

$$E(k) = \int h(\xi) e^{jk\xi} d\xi \quad (24)$$

$$h(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int E(k) e^{-jk\xi} dk \quad (25)$$

両者がフーリエ変換の関係にあることから、連続波源分布 $h(\xi)$ が均一であるとき、放射指向性は SINC 関数となり、他の波源分布に比べて最も利得が高くかつ 3dB ビーム幅 (電力半値幅) が狭くなる。一方、波源のエッジテーパレベルが低いほど、第一サイドローブレベルが低くなる。また、波源が存在する開口面積が大きいほど、利得が高くかつ 3dB ビーム幅が狭くなる。

(3) 3dB ビーム幅 (電力半値幅)

アンテナの放射指向性における 3dB ビーム幅 θ_{-3dB} [deg] は次式で与えられる。

$$\theta_{-3dB} \approx \frac{60\lambda}{D} \sim \frac{70\lambda}{D} \quad (26)$$

ここで、 D はアンテナの開口径、 λ は波長である。

式 (26) に示すように 3dB ビーム幅は波源分布により異なり、波源分布が均一のとき最も狭い値となる。

(4) 利得

アンテナの利得には、絶対利得、相対利得、指向性利得、動作利得がある。

一般に、アンテナの利得は、ある方向へ放射される電波の電力密度と、これと同一の電力を供給されている基準アンテナから同一方向へ放射される電波の電力密度との比で定義される。この基準アンテナとして、無損失でかつ等方性の仮想的なアンテナを用いたときのアンテナ利得を絶対利得 (absolute gain) と呼び、通常 $G_a(\theta, \phi)$ と表記し dBi 値で表す。なお、dBi の i は isotropic の意味である。

アンテナの放射効率を η_a としたとき、絶対利得 $G_a(\theta, \phi)$ は次式で与えられる。

$$G_a(\theta, \phi) = \eta_a G_d(\theta, \phi) \quad (27)$$

ここで、 $G_d(\theta, \phi)$ は指向性利得 (directive gain) と呼ばれ、放射指向性を積分することにより求まる値である。

開口面積 A のアンテナの絶対利得 G_a [dBi] は次式で与えられる。

$$G_a = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \eta_a \right) \quad (28)$$

ここで、アンテナの開口径を D とすると、式 (28) は次式となる。

$$G_a = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta_a \right) \quad (29)$$

1.5 基本アンテナの動作原理

ここでは、いくつかの基本アンテナを取り上げて、その動作原理を簡単に説明する。各アンテナの詳細については文献 [1] をはじめ他の多くの専門書を参照されたい。

(1) ダイポールアンテナ

ダイポールアンテナは円柱導体棒の一部にギャップを設け、その部分に給電した構造である。これは、電源に繋がれた先端開放型の伝送線路の両先端を、電源側を中心として互いに反対方向に 90° 開いた構造とも考えられる。このとき、伝送線路において互いに逆方向に流れていた電流は、 90° 開いた構造とすることにより同じ方向に流れ、1本の導線に電流を流したものと等価になる。

特に、長さがほぼ半波長の円柱導体棒の中央にギャップを設け、その部分に給電した構造のアンテナは「半波長ダイポールアンテナ」と呼ばれ、共振型アンテナの基本アンテナである。半波長ダイポールアンテナの入力インピーダンス Z_{in} は約 $73.1 + j42.5\Omega$ であり、利得は 2.15dBi である。

(2) モノポールアンテナ

モノポールアンテナは、中波ラジオ放送 (AM) の送信アンテナに用いられているように、地板状に垂直に置かれたほぼ $1/4$ 波長の円柱導体棒と地板との間に給電した構造である。このとき、地板の反対側に円柱導体棒のイメージができ、等価的に半波長ダイポールアンテナとして動作する。

(3) 八木・宇田アンテナ

ダイポールアンテナと平行に無給電素子を置いたとき、無給電素子の長さが半波長より少し短いときは無給電素子が導波器として動作し、半波長より少し長いときは反射器として動作する。

この特性から、ダイポールアンテナの前に半波長より少し短い無給電素子を、後ろに半波長より少し長い無給電素子を設けることにより、ダイポールアンテナの前方 (導波器のある側) にメインビームが形成される。これは東北大学で開発されたアンテナであり、TV 受信用として古くから用いられている。

(4) ループアンテナ

ループアンテナは、先端短絡型の伝送線路と考えることができる。ループの大きさによって、微小ループと 1 波長ループに分けられる。

微小ループはループ内側を通過する磁界を受けるアンテナとして動作し、1 波長ループはループの周囲長が 1 波長となる周波数の波の電界を受けるアンテナとして動作する。

(5) ヘリカルアンテナ

ヘリカルアンテナは、波長に比べて長い導線を螺旋状に巻いた構造であり、広帯域特性を持つ進行波型のアンテナの基本アンテナである。ヘリカルアンテナの 1 回巻の周囲長により、ノーマルモードヘリカルと軸モードヘリカルに分類される。

ノーマルモードヘリカルは周囲長が波長に比べて充分小さい構造であって、ダイポールアンテナと同じく動作し、ヘリカルと直交方向に直線偏波のビームを持つ。一方、軸モードヘリカルは周囲長がほぼ波長に等しい構造であって、軸方向に円偏波のビームを持つ。

(6) マイクロストリップアンテナ (MSA)

MSA は、平面回路で問題となっていたマイクロストリップ共振器からの放射を積極的にアンテナとして用いたもので、共振型平面アンテナの基本アンテナである。

MSA は放射導体の長さが半波長となる周波数で共振し、MSA の放射導体に垂直な方向に電界を放射する。

(7) スロットアンテナ

スロットアンテナは、導体面にほぼ半波長の長さのスロットと呼ばれる穴を開けた構造であり、スロットに磁流が流れることから、共振型の磁流アンテナとして動作する。

(8) ホーンアンテナ

ホーンアンテナは開口面アンテナの基本アンテナであり、開口面が波長に比べて十分に大きい場合には、開口面から電磁波を放射していると考えられる。そのためホーンアンテナの位相中心から幾何光学的手法で求めた開口面上の電磁界分布に基づいた開口面分布法と呼ばれる解析が良く用いられている。

基本的なホーンアンテナとして、角錐ホーンアンテナと円錐ホーンアンテナがある。角錐ホーンアンテナは、方形導波管の基本モード TE_{01} 波で励振され、開口面の振幅分布は TE_{01} モードの分布であり、位相分布は角錐の頂点を中心とする球面と開口面との位相ずれとして求められる。一方、円錐ホーンアンテナは、円形導波管の基本モード TE_{11} 波で励振され、開口面の振幅分布は TE_{11} モードの分布であり、位相分布は円錐の頂点を中心とする球面と開口面との位相ずれとして求められる。

(9) パラボラアンテナ

パラボラアンテナは、上記のホーンアンテナと放物面反射鏡とを組み合わせた構造で、反射鏡アンテナの基本アンテナである。一次放射器としてホーンアンテナを用い、一次放射器から出る球面波を放物面反射鏡で反射させることにより球面波を平面波に変換して、高利得でかつ狭ビームの放射特性を実現したものである。

通常、パラボラアンテナの開口面も波長に比べて十分に大きく設計するため、ホーンアンテナの位相中心から幾何光学的手法で求めたパラボラアンテナの開口面上での電磁界分布に基づいた開口面分布法と呼ばれる解析が良く用いられている。

1.6 アレーアンテナの基礎知識と動作原理

ここでは、上記 1.5 で示した基本アンテナを素子として複数配列して構成されるアレーアンテナの基礎知識と動作原理を簡単に説明する。詳細については文献 [3] を参照されたい。

(1) アレーアンテナの概念

アレーアンテナとは、複数のアンテナを配列し、その全部または一部のアンテナを励振したアンテナ全体を言い、アンテナアレーまたは単にアレーとも呼んでいる。アレーアンテナは、図 4 に示すように、通常、素子アンテナ、移相器、電力分配器から構成される。

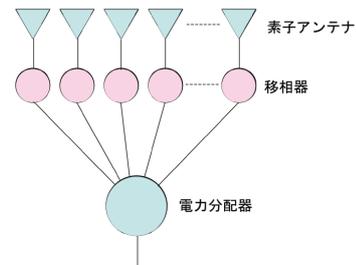


図 4 アレーアンテナの構成

アレーアンテナの電気的特性は、アレーアンテナの構成要素の自由度に依存する。自由度としては、(i) 素子数、(ii) 素子配列形状、(iii) 素子配列間隔、(iv) 素子配列方向、(v) 素子の励振位相、(vi) 素子の励振振幅、(vii) 素子利得、(viii) 素子の偏波があり、これらを適切に設定することによりアレーアンテナの電気的特性を任意に決定できる。なお、素子アンテナとしては、1.5 で述べた基本アンテナが主に用いられる。

アレーアンテナは、配列構造、素子アンテナ、給電線路、給電法、機能あるいは構成、使用目的等によって分類される。古典的なブロードサイドアレーから始まり、レーダ等に用いるビーム走査するフェーズドアレーや、適応的に指向性を形成するアダプティブアレーまで、高性能なアレーアンテナが出現し、ワイヤレス時代を支える主要技術として様々な用途に様々なアレーアンテナが用いられている。

(2) 配列指向性

配列指向性 (array factor) とは、素子アンテナとして等方性波源を仮定し配列したときの放射指向性を言う。

一般に、 N 個の等方性波源を 3 次元空間に配列したときの配列指向性 $f(\theta, \phi)$ は、球座標系において次式で与えられる。

$$f(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j[k_0(\hat{r} \cdot \mathbf{r}_n) + \phi_n]} \quad (30)$$

ここで、 \hat{r} , \mathbf{r}_n , A_n , ϕ_n は各々放射ベクトル、素子の位置ベクトル、素子の給電振幅および給電位相であり、放射ベクトル \hat{r} は次式で与えられる。

$$\hat{r} = (\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi, \cos\theta) \quad (31)$$

(3) 放射指向性

アレーアンテナの放射指向性 $E(\theta, \phi)$ は、上記の配列指向性 $f(\theta, \phi)$ を用いて次式で与えられる。

$$E(\theta, \phi) = g(\theta, \phi)f(\theta, \phi) \quad (32)$$

ここで、 $g(\theta, \phi)$ は素子の指向性である。例えば、軸方向に配列した半端長ダイポールアレーの放射指向性は次式で与えられる。

$$E(\theta, \phi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta} f(\theta, \phi) \quad (33)$$

(4) 指向性合成

前述の通り、アンテナの連続波源分布と放射指向性との間にはフーリエ変換の関係があり、波源分布の選び方により利得、サイドローブレベル、3dB ビーム幅、零点等の特性を任意に決定できる。

アレーアンテナについても、その構成要素の最適化により同様の特性を任意に決定できる。この任意の放射指向性および利得を得るための励振条件を求めることをアレーアンテナの指向性合成と呼んでいる。しかし、アレーアンテナは、離散波源分布であるため、これに適したものとして二項分布アレーや Dolph-Tchebyschff 分布等が考えられている。指向性合成理論の詳細については、文献 [4] を参考にされたい。

(5) 指向性制御

指向性制御アレーとしては、ビーム走査や指向性形成等を目的とするアレーがある。

ビーム走査アレーは、移相器を用いた位相制御によりビーム走査を行うフェーズドアレー、スイッチを用いた切替によりビーム走査を行うスイッチングアレー、主ビームではなくヌル（零点）を走査するヌルステアリングアレー、周波数を変化させることによりビーム走査を行う周波数ビーム走査アレー等がある。

一方、指向性形成を行うアレーとしては、振幅および位相の制御により所望の指向性を得るビームフォーミングアレーや、同じく振幅および位相の制御により適応的に任意の指向性を得るアダプティブアレー等がある。アダプティブアレーの詳細については、文献 [5] を参照されたい。

2. 無線通信システムとの関わり [6]

2.1 国内無線通信システムの変遷

図 5 に示すように、日本の国内通信においては、1950 年代から始まった電気通信ネットワークの時代が、1980 年代には情報通信ネットワークの時代へと姿を変え、ネットワークのデジタル化、ブロード

バンド化、光ファイバ化とともに、社会インフラとしての基幹無線通信ネットワークから、携帯端末に代表されるアクセス系無線通信ネットワークへと変わってきている。

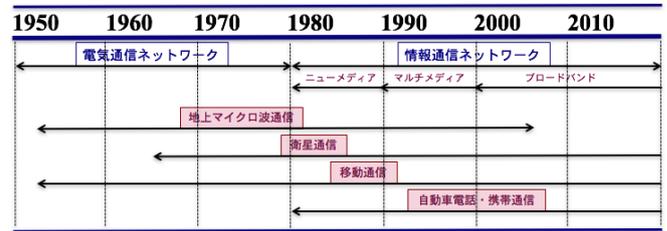


図 5 日本における国内通信の変遷

本格的な基幹無線通信ネットワークの時代を拓いたのは、1953年および1954年に導入された4GHz帯地上マイクロ波TV中継回線である。その後、市外電話中継回線として、マイクロ波帯（4/5/6GHz帯）、準ミリ波帯（20GHz帯）が用いられた。しかし、光ファイバの普及とネットワークのブロードバンド化に伴い、2006年に地上マイクロ波中継回線は光ファイバ回線に置き換えられ、基幹回線としての輝かしい時代の幕を閉じた。また、近距離の電話中継回線として、2GHz帯、11GHz帯および15GHz帯の無線通信ネットワークが用いられた。

国内通信用の衛星回線としては、1977年に打上げられた通信衛星（さくら）1号を用いたシステム以降、非常災害時の通信の確保を目的としていたが、1987年に「あふれ呼」を救済する迂回中継目的で、DYANETシステムが基幹系ネットワークとして、また、放送TV中継のためにDYANET IIシステムが、離島通信用にDYANET(C)システムが実用化され、1996年には、これらを統合した公衆網統合衛星通信方式（DYANET-X）により、Ka帯/Ku帯/C帯の各周波数帯の方式間の相互接続が可能となった。

現在、基幹系無線ネットワークの光ファイバ回線への移行に伴い、地上中継回線および国内衛星通信回線は、離島、山間地、非常災害対策として用いられている。

一方、移動通信は、1953年の内航船舶電話サービスに始まり、1964年に列車電話、1968年にポケットベル、1979年に自動車電話、1986年に航空機電話サービスが開始され、ワイヤレスの時代を象徴する1991年以降の携帯電話・携帯端末の時代へと繋がっている。

自動車・携帯電話システムは、1979年に大都市を対象とした第1世代のアナログ方式に始まり、中小都市方式、大容量方式を経て、1993年に第2世代のディ

デジタル方式，1998年に2.5世代のcdma-one，2001年に第3世代のIMT-2000（W-CDMA，CDMA2000），2006年に第3.5世代のEnhanced 3G（HSDPA，HSUPA），2010年に第3.9世代のSuper 3G（LTE），2014年に第4世代のLTE-Aへと発展し続けている。

また，1990年代以降の商用インターネットの爆発的展開に伴って，無線LANシステムが事業所から家庭にまで普及した。

2.2 地上固定通信用アンテナの変遷

地上マイクロ波中継回線のための地上固定通信用アンテナの変遷を図6に示す。個々のアンテナの詳細については文献[7]を参照されたい。

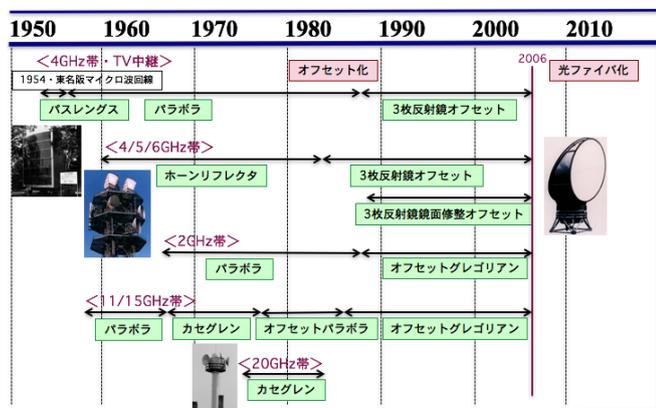


図6 地上固定通信用アンテナの変遷

1954年に，開口径4mのパスレングスアンテナの開発に始まり，パラボラアンテナ，ホーンリフレクタアンテナが開発され，4/5/6GHz帯共用アンテナとして導入されてきた。その後，無線回線の過密化に伴い，より狭い分岐角で使用可能なように，広角指向性に優れたオフセットアンテナの研究開発が始まり，3枚反射鏡オフセットアンテナが実用化された。さらに，交差偏波識別度に優れた鏡面修整3枚反射鏡オフセットアンテナが実用化された。

また，基幹無線回線の大容量化を図るための準ミリ波デジタル中継方式用として，20GHz帯カセグレンアンテナが開発され導入された。

26GHz帯を用いたアクセス系の固定無線通信用基地局アンテナとして，扇形のエリアに分布する利用者に対して，ポイント・ツー・マルチポイント形の通信を可能とするために，水平方向に扇形ビーム，垂直方向にコセカントビームを持つ鏡面修整セクタアンテナが導入された。

2.3 衛星通信用アンテナの変遷

国内衛星通信回線のための通信衛星用および地球

局用アンテナの変遷を図7に示す。個々のアンテナの詳細については文献[8][9]を参照されたい。

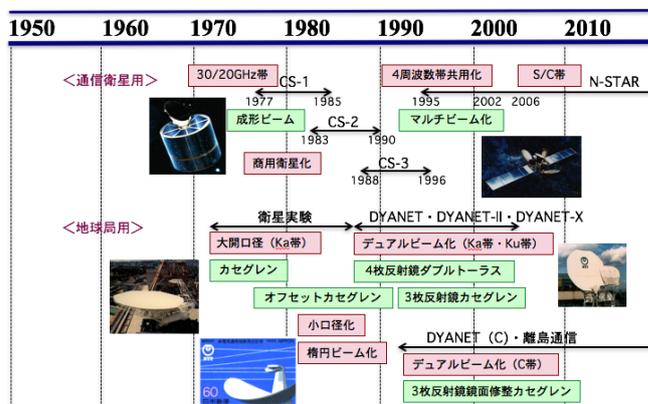


図7 国内衛星通信用アンテナの変遷

通信衛星は，1977年以降に打ち上げられた「さくら」CS-1～CS-3 および1994年の「きく6号」の実証実験をもとに，1995年8月および1996年2月に打ち上げられた静止衛星 N-STAR が実用機として用いられた。N-STAR は，3軸姿勢制御方式の大型通信衛星であり，S帯，C帯，Ku帯，Ka帯の4周波数帯，5種類のビームを用いた通信系を搭載するために，3枚の主反射鏡を用いたアンテナ系を採用し，各々を複数の周波数帯で共用することでコンパクト化を図り衛星搭載を可能としている。

国内衛星通信用地球局アンテナとしては，1972年以降に開発された開口径12.8mの4周波数帯共用および開口径11.5mの30/20GHz帯カセグレンアンテナの技術をもとに，広角指向特性および耐風性に優れた有効開口径11.5mのオフセットカセグレンアンテナを世界で始めて開発導入している。さらに，1987年以降，2衛星（N-STAR a および N-STAR b）に同時アクセス可能なデュアルビーム地球局アンテナとして，有効開口径4.2mの30/20GHz帯およびKa帯/Ku帯共用4枚反射鏡形式ダブルトラス形，有効開口径6.5mのTV放送中継用14/12GHz帯3枚反射鏡形式オフセットカセグレン形，有効開口径5.5mの離島通信用C帯3枚反射鏡形式鏡面修整形が開発され，あわせて100機を超えるデュアルビーム地球局アンテナが導入されている。

一方，衛星搭載アンテナの大型化に伴い，地球局は小型化し，有効開口径1.2mや75cm等の小型で簡易なオフセットアンテナが開発され，1995年1月に発生した阪神・淡路大震災に伴う復旧活動において特設公衆電話の提供や，山間の小さな集落での災害による孤立防止のために用いられている。

2.4 移動通信基地局用アンテナの変遷

図 8 に、陸上移動通信基地局アンテナの変遷を示す。個々のアンテナについては文献[10]を参照されたい。

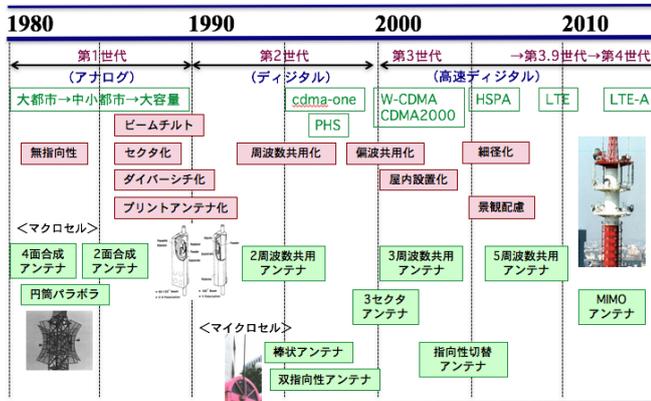


図 8 陸上移動通信基地局用アンテナの変遷

第 1 世代の基地局アンテナは、ダイポール素子を多段設置し、かつ 4 面合成により水平面内無指向性を実現したアンテナに始まり、その後、円筒パラボラを用いた 4 面合成アンテナに変更されている。

大容量システムにおいて、初めてプリントアンテナが採用され、セル間干渉抑圧のためのビームチルト化や、チャネル容量増加のためのセクタ化が図られている。

携帯電話の時代である第 2 世代以降の基地局アンテナは、周波数共用化が図られ、800MHz 帯/1.5GHz 帯/2GHz 帯の 3 周波数帯共用に始まり、現在では、5 周波数帯共用アンテナも登場してきている。また、偏波共用化、屋内設置、細径化等が図られ、トンネル内や不感地での通信を可能とするブースタアンテナや、周囲環境にマッチしたアンテナの開発もされている。

一方、PHS に代表されるストリートマイクロセル用基地局アンテナとして双指向性をもつプリント素子で構成された棒状アンテナや、坂道や地下街に適したアンテナ、偏波共用アンテナも開発されている。また、1980 年代後半には、干渉波の方向にヌルを向け所望ユーザの信号のみを送受信可能なアダプティブアレーアンテナも導入されている。

第 4 世代以降の基地局アンテナには、このアダプティブアレーアンテナの発展型である空間分割多重伝送技術が用いられており、複数のユーザに対して同時に空間分割多重伝送を行うマルチユーザ MIMO

(Multiple Input Multiple Output) 伝送の導入が検討されている。

2.5 移動体搭載/携帯端末用アンテナの変遷

陸上移動通信用車載アンテナとしては、トランクリッド設置のハイトダイバーシチアンテナに始まり、設置スペースに対応した車内設置アンテナも開発されている。

携帯端末は、1985 年のショルダーホン、1987 年のポータブルホンを最初に、1991 年の MOVA、1995 年の PHS、2001 年の FOMA と続き、それに用いる携帯端末アンテナは、逆 F アンテナ、折返しダイポールなど、当初のホイップアンテナから携帯内蔵型のアンテナへと変わってきた。また、基地局アンテナのマルチユーザ MIMO の検討に伴って、携帯端末についても端末 MIMO アンテナの検討がなされている。

3. アンテナ・伝搬研究の推移と動向

3.1 アンテナ・伝搬研究の推移

電子情報通信学会の総合大会におけるアンテナ関連の発表内容の推移を図 9 に示す。

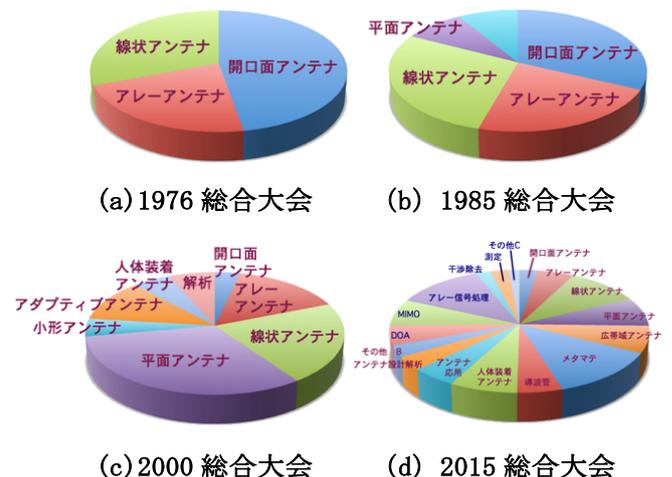


図 9 電子情報通信学会総合大会におけるアンテナ関連の発表内容の推移

図 9 に示すように、1970 年代に発表件数の半分を占めていた開口面アンテナが、2000 年には 4% と激減し、代わって平面アンテナが 40% 近くに台頭してきている。更に、2015 年には MIMO やアレー信号処理関連の発表が全体の 1/3 を占めてきている。

これは、基幹無線通信ネットワークが開口面アンテナを用いていたのに対し、最近のアクセス系や移動通信基地局等には、線状アンテナ、平面アンテナ、信号処理を用いたアレーアンテナが用いられていることと対応している。

3.2 P2P の無線システムにおけるアンテナ・伝搬

基幹通信ネットワークを支えてきた地上マイクロ波通信や衛星通信などの P2P (point to point) の無線

通信システムにおけるレベルダイヤを図 10 に示す。

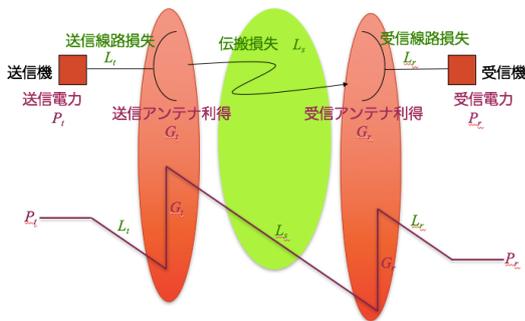


図 10 P2P の無線システムのレベルダイヤ

図 10 に示すように、アンテナ利得および電波伝搬損失は、無線通信システムのレベルダイヤを決定する上で重要なパラメータである。これらのシステムにおいては、アンテナ (A) と電波伝搬 (P) の研究開発において各々が技術の最適化を図れば良く、アンテナにおいては、主として開口面アンテナを用いたハードウェア中心の研究開発が行われてきた。

3.3 アクセス系システムにおけるアンテナ・伝搬

無線通信システムが基幹ネットワークから携帯電話・携帯端末を用いるアクセス系ネットワークへの転換に伴い、アンテナ・伝搬の研究開発もそれに応じて大きく変化して来ている。図 11 に通信用アンテナ・伝搬の研究開発の推移を示す。



図 11 通信用アンテナ・伝搬の研究開発の推移

図 11 に示すように、アンテナも開口面アンテナに変わって線状アンテナや平面アンテナが主流となり、それを素子とするアレーアンテナが多く用いられるようになってきた。さらに、適応的に指向性を制御できるアダプティブアンテナや MIMO アンテナが用いられるようになってきている。

P2P の無線通信システムに対し、「1 対多」のシステムである携帯電話や無線 LAN が普及した 1990 年代以降においては、A と P の技術を同時に考慮した最適化に加え、通信方式 (S) を意識した最適設計が必要とされてきた。この技術の変化を見越して、池上文夫先生 (当時、京都大学教授) は、1981 年の電気四学会連合大会のパネル討論において、A, P, S の「三位一体」説を提唱されている。その後、人体の影響 (H) を加えた「四位一体」説を藤本京平先生 (当時、筑波大学教授) が追唱されたが、近年の MIMO 技術が導入される時代に至って、「四位一体」に止まらず、FPGA, DBF, デジタル信号処理, 制御アルゴリズム, ネットワーク制御, . . . 等と、AP から見たワイヤレスシステムの開発は「N 位一体」ともいうべく、様々な技術が一体となって必要とされる状況に直面している。

また、方式設計ありきのアンテナ研究開発から、システムを先導するアンテナの研究開発へと変化を遂げており、指向性ダイバーシチ, ビームフォーミング, アダプティブ等のアンテナ特性を活かす新たなシステム提案が行われてきている。特に、第 5 世代およびそれ以降の移動通信に向けては、伝搬特性を考慮した SDMA, MIMO 等のための更なる高性能なアンテナの研究開発が望まれている。

文 献

- [1] 電子情報通信学会 (編): アンテナ工学ハンドブック (第 2 版), オーム社, 2008.
- [2] 澤谷邦男: “アンテナの分類,” アンテナ工学ハンドブック (第 2 版), 1 章 序論, pp.2-9, 電子情報通信学会 (編), オーム社, 2008.
- [3] 堀俊和: “アレーアンテナ設計の基礎,” アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ, 第 34 回, May 2007.
- [4] 関口利男, 稲垣直樹: “指向性合成理論,” 信学誌, Vol.48, No.4, pp.541-551, Apr. 1965.
- [5] 菊間信良: “アレーアンテナによる適応信号処理技術と高分解能到来波推定入門コース,” アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ, 第 9/10 回, Sept./Oct. 1997.
- [6] 堀俊和: “アンテナ技術 -無線システムのための実用アンテナの研究開発-,” 信学誌, Vol.99, No.8, pp.811-819, Aug. 2016.
- [7] T. Hori: "Antennas for Terrestrial Microwave Relay Links", IEICE Trans. Commun., Vol.E86-B, No.3, pp.900-908, Mar. 2003.
- [8] S. Makino and N. Miyahara: "Satellite Onboard Reflector Antennas", IEICE Trans. Commun., Vol.E86-B, No.3, pp.944-953, Mar. 2003.
- [9] S. Nomoto: "Reflector Antennas for Earth Stations and Radio Telescopes", IEICE Trans. Commun., Vol.E86-B, No.3, pp.925-943, Mar. 2003.
- [10] H. Arai and K. Cho: "Cellular and PHS Base Station Antenna Systems", IEICE Trans. Commun., Vol.E86-B, No.3, pp.980-992, Mar. 2003.