

垂直姿態ヘリカルアンテナに関する理論的検討

2004MT058 丸地 智博
指導教員 稲垣 直樹

1 はじめに

ヘリカルアンテナはらせん状の導線によって構成されており、アキシャルモード・ヘリカルアンテナ (AHA) とノーマルモード・ヘリカルアンテナ (NHA) がある。AHA は1ターンが一波長程度のとき、らせんの軸の方向に最大の放射が行われる。一方 NHA は1ターンの長さが波長に比して十分小さいもので、らせんの軸と垂直の方向に最大の放射が行われる。軸と垂直な方向に垂直偏波を放射し、アンテナが小形である必要がある場合に用いられる。AHA は十分研究されているが、NHA は放射効率が低く、幅が狭く、詳細な検討はまだされていない。したがって小形、低背形が望まれる現在、NHA の研究が必要とされる。そこで本研究では、モーメント法を用いて NHA を積分方程式の離散化による方法によって解析し、共振、反共振の条件を各寸法に対して求める。積分方程式の数値計算として Mathematica を用いる。

2 積分方程式の離散化による解析

2.1 積分方程式

ヘリカルアンテナは線径 d の導線が半径 a 、ピッチ p のらせん状に巻かれたもの左右各 N 巻きによって構成されているものとし、座標系を図1のように定める。

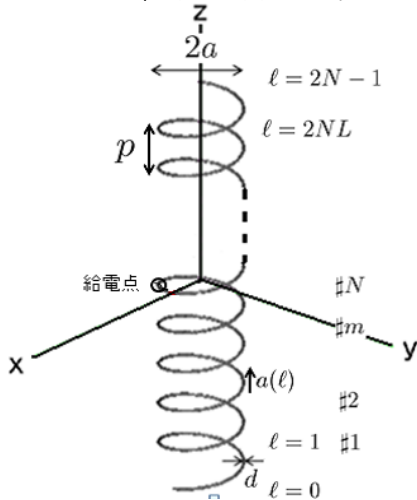


図1 座標表現

巻きの長さ L は $\sqrt{(2\pi a)^2 + p^2}$ に等しい。らせん状に沿

う座標を ℓ で表わすと電流分布 $J(\ell)$ に対する積分方程式は次のようになる。

$$\int_0^{2NL} G(\ell, \ell') J(\ell') d\ell' = -\frac{V}{\delta} \text{rect}\left(\frac{\ell - NL}{\delta}\right) \quad (1)$$

ここで V は給電点 ($\ell = NL$) の電圧, δ は給電点の間隙である。 $G(\ell, \ell')$ はグリーン関数で次式により与えられる。

$$G(\ell, \ell') = -\frac{j}{4\pi\omega\epsilon} a(\ell) [k^2 I - \nabla \nabla'] \frac{\exp(-jkr)}{r} a(\ell') \quad (2)$$

ここで $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon} = 2\pi/\lambda$, $a(\ell)$ は ℓ における導線の軸の方向の単位ベクトル, I は単位ダイアディック, ∇ と ∇' はそれぞれ ℓ (波源点) および ℓ' (観測点) に関するベクトル微分演算子を表わし, r は ℓ と ℓ' の間の距離とする。

2.2 離散化

式 (1) を直接解くことは容易ではないので、らせん巻きの長さ L が波長に比して小さいことを利用して以下に示すように離散化を行い、近似解を求める。図1中の # m の部分に対して座標 ℓ' を定めるとする。そして、図2のように ℓ' に対して適当に定めた関数 $f(\ell')$ によって電流分布が次式のように表せれるものとする。

$$J(\ell') = \sum_{m=1}^{2N-1} I_m f(\ell' - mL) \quad (3)$$

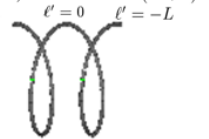


図2 離散化

式 (3) を式 (1) に代入することによって

$$\sum_{m=1}^{2N-1} I_m \int_{-L}^L G(\ell, mL + \ell') f(\ell') d\ell' = -\frac{V}{\delta} \text{rect}\left(\frac{\ell - NL}{\delta}\right) \quad (4)$$

さらに式 (4) に $J(\ell)$ を乗じ、 ℓ について $[(n-1)L, (n+1)L]$ の範囲にわたって積分し、ガラーキン法を用いることによって、

$$\sum_{m=1}^{2N-1} I_n I_m \int_{-L}^L \int_{-L}^L G(nL + \ell', mL + \ell'') f(\ell') f(\ell'') d\ell' d\ell'' = -V I_n \delta_{Nn} \quad (5)$$

を得ることができる。\$I_n\$ は重み関数。

ここで、\$I_n\$ と \$I_m\$ の部分間の相互インピーダンスを導入し、

$$Z_{nm} = - \int_{-L}^L \int_{-L}^L G(nL + \ell', mL + \ell'') f(\ell') f(\ell'') d\ell' d\ell'' \quad (6)$$

と置くと、次式が得られる。

$$\sum_{m=1}^{2N-1} Z_{nm} I_m = V \delta_{Nn} \quad (n = 1, 2, \dots, 2N-1) \quad (7)$$

よって式 (1) は式 (7) の \$(2N-1)\$ 元の連立方程式となる。

2.3 \$Z_{nm}\$ の計算

式 (2) を用いて式 (6) を変形すると \$Z_{nm}\$ を得ることができる。

$$Z_{nm} = j \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \int_{-kL}^{kL} \int_{-kL}^{kL} \frac{\exp(-jk r_{nm})}{k r_{nm}} \left[a(\ell') f(\ell') a(\ell'') f(\ell'') - \frac{1}{k^2} \frac{df(\ell')}{d\ell'} \frac{df(\ell'')}{d\ell''} \right] d(k\ell') d(k\ell'') \quad (8)$$

ここで \$r_{nm}\$ は \$\ell = nL + \ell'\$ と \$\ell = mL + \ell''\$ の間の距離であり、\$(\ell - \ell'')\$ と \$(n - m)\$ に依存する。また、\$a(\ell') \cdot a(\ell'')\$ は \$(\ell - \ell'')\$ のみに依存する。したがって式 (8) の \$[\]\$ の中が \$(\ell - \ell'')\$ および \$(\ell + \ell'')\$ の簡単な関数であれば、式 (8) の二重積分は一重積分に簡略化することができる。そして得られる値は \$(n - m)\$ のみに依存する。そのために関数として、\$f(\ell') = \cos^2\left(\frac{\pi \ell'}{2L}\right)\$ 選ぶ。この関数は両端 \$(\ell' = \pm L)\$ で 0、中央 \$(\ell' = 0)\$ で 1、\$\ell' = \pm L/2\$ で \$1/2\$ となる。

この電流関数に対して式 (8) の計算された結果は以下の形に表現できる。

$$Z_{0,n} = j \frac{1}{32\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\exp(-jkR_n(u))}{kR_n(u)} + \frac{\exp(-jkR_{-n}(u))}{kR_{-n}(u)} \right] F_1(u) + \left(\frac{\exp(-jkR_{n+1}(u))}{kR_{n+1}(u)} + \frac{\exp(-jkR_{-n+1}(u))}{kR_{-n+1}(u)} \right) F_2(u) \Big] du \quad (9)$$

2.4 電流分布と給電点インピーダンスの表式

\$Z_{nm}\$ を \$(n, m)\$ 要素とする \$(2N-1)\$ 次の正方行列 \$[Z]\$ を導入し、

$$[Y] = [Z]^{-1} \quad (10)$$

を求め、\$[Y]\$ の \$(n, m)\$ 要素を \$Y_{nm}\$ とすれば、式 (3) によって電流分布を与える係数 \$I_m\$ および給電インピーダンス \$Z_{in}\$ は次式によって求められる。

$$I_m = V Y_{mN} \quad (11)$$

$$Z_{in} = 1/Y_{nN} \quad (12)$$

3 数値計算の結果と考察

半径 \$a = 0.006\$、ピッチ \$p = 0.006\$、線径 \$d = 0.001\$ の NHA に対して巻数 \$N\$ を 1 から 20 まで変化させたときのインピーダンスを図 3 に示す。また、巻数を 8 から 11 まで変化させたときの電流分布を図 4 に示す。

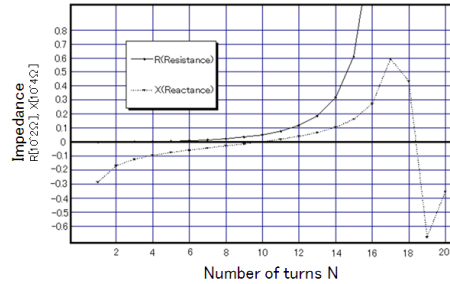


図 3 巻数に対するインピーダンス変化

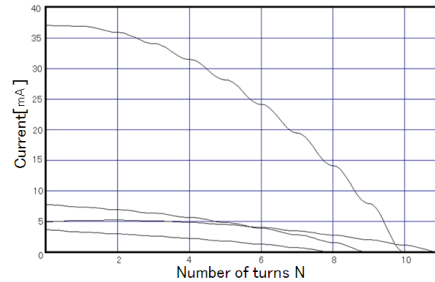


図 4 巻数に対する電流分布の変化

図 3 から \$N = 9.5\$ で共振状態となり、\$N = 17.5\$ で反共振状態となることが分かる。また、反共振の起こるアンテナ長は共振長の 2 倍よりわずかに短くなっている。図 4 からは、共振長付近での電流の振幅は急激に大きくなっていることがわかる。

4 おわりに

本研究では NHA について、積分方程式を離散化することによって解析を行を理論を示し、共振長について数値計算を示した。その結果、各寸法に対しての共振条件がわかった。今後の課題としては、アンテナの縮小率、共振時の放射抵抗などについての計算も示す必要がある。そして、NHA を実際に作成し理論値との裏付けを行っていく予定である。

参考文献

- [1] 稲垣直樹, 田村克彦, 藤本京平: “垂直姿勢ヘリカルアンテナの共振長に関する理論的検討”, 名古屋工業大学学报, Vol.23, pp.335-342(1971).
- [2] C.A.Balanis: Antenna Theory Analysis And Design Second Edition, John Wiley Sons(1997).