

# Wire-Grid 기법을 이용한 안테나특성 예측 (Prediction of Antenna Characteristics Using Wire-Grid Method)

조 응 회\*, 간 종 만\*, 이 응 주\*

(Ung Hee Cho, Jong Man Kan, Eung Joo Lee)

## 요 약

본 논문에서는 전계적분방정식을 이용하여 급속구조물에 설치된 안테나 특성을 분석하였다. 계산 프로그램의 정확도는 미국 NELC에서 수행한 Brass 축척모델 연구와 비교하여 확인하였으며 복잡한 급속구조물상에 설치된 안테나 특성도 계산결과와 측정결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

## ABSTRACT

The electromagnetic characteristics of antennas in the complicated metallic structures were analyzed using the electric field integral equation. The accuracy of computer program was confirmed by comparing the computation result with NELC brass model study. And computation result of antenna characteristics in metallic structures was in good agreement with our measuring result.

## I. 서 론

구조물의 크기가 전자파의 파장에 비해 상대적으로 작은 경우 여러가지 해석기법이 개발되어 이용되고 있다. 간단한 구조물에 설치된 안테나의 특성은 해석적인 방법 또는 해석적인 방법과 수치해석적인 방법이 결합된 방법으로 예측할 수 있으나 보다 복잡한 구조물에 설치된 안테나에 대해서는 수치해석적인 방법으로도만 예측이 가능하다. 수치해석 방법은 Maxwell 방정식과 경계조건으로부터 구해지는 미분 또는 적분형태의 방정식을 이용한 방법이 있다.<sup>(1,2)</sup>

적분방정식은 파장이 구조물의 크기에 비해 상대적으로 큰 경우에 가장 적합하며 전계적분방정식(EFIE, Electric Field Integral Equation)은 주로 가는 와이어(Thin-Wire)의 전자파해석에 주로 이용되고 자계적분방정식(MFIE, Magnetic Field Integral Equation)은 면의 구조물에 대한 해석에 이용된다.<sup>(3-5)</sup> 본 연구에서는 와이어(안테나)가 포함된 구조물에 가는 와이어(Thin-Wire) 가정을 적용한 전계적분방정식을 이용하여 구조물을 다수의 선형 세그먼트로 나누고 MOM(Method of Moments)<sup>(1,6,7)</sup>으로 구조물의 영향을 고려한 안테나의 특성 예측 S/W를 개발하였다. 개발된 예측 S/W의 정확도 검증은 기 발표된 직사각형 모델<sup>(8)</sup>에 적용하여 안테나의 복사패턴과 안테나간 결합량에 대한 비교, 분석을

\* 국방과학연구소 전자파 연구실  
Agency for Defense Development, EMI /EMC  
Laboratory

통해 계산결과와 정확도를 입증한 후 많은 안테나와 금속구조물이 설치된 보다 복잡한 모델에 적용하여 안테나간 결합량을 비교하였다.

## II. 이 론

### 1. 전계적분방정식

전계적분방정식은 가는 와이어 구조물의 저주파 전자파해석에 가장 적합하며 면의 구조물에도 적용 가능하다. 와이어(안테나)가 포함된 금속구조물을 선형 세그먼트로 나누고 가는 와이어 가정을 적용하면 전계적분방정식은 식(1)과 같다.<sup>(3,5,9)</sup>

$$\hat{s} \cdot \vec{E}^1(\vec{r}) = \frac{j\eta}{4\pi k} \int_L I(s') (k^2 \hat{s} \cdot \hat{s}' - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'}) g(\vec{r}, \vec{r}') ds' \quad (1)$$

여기서,

$\hat{s}$  : 관찰점  $\vec{r}$ 에서의 단위 벡터

$\hat{s}'$  : 원천점  $\vec{r}'$ 에서의 단위 벡터

$s, s'$  : 와이어 축을 따른 거리 변수

$g(\vec{r}, \vec{r}') = \exp(-jk|\vec{r}, \vec{r}'|) / |\vec{r} - \vec{r}'|$ , 자유공간의 그린함수

$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ , 자유공간의 파수

$\eta = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ , 자유공간의 특성 임피던스

$E^1(\vec{r})$  : 입사전계

$I(s')$  : 입사전계에 의해 와이어에 유기된 전류

### 2. 수치해석

전계적분방정식에 대한 수치해석은 MOM(Method of Moments)방법을 이용하였으며 전류의 기저 또는 확장함수는 상수, 정현 및 여현함수의 3개 항으로 표현하였고, 시험 또는 가중함수는 델타함수를 사용하는 포인트 매칭기법을 사용하였다. j번째 세그먼트에 대한 전류의 확장함수는

$$I_j(s) = A_j + B_j \sin k(s - s_j) + C_j \cos k(s - s_j) \quad |s - s_j| < \Delta_j / 2 \quad (2)$$

로 표현하며, 여기서  $s_j$ 는 j번째 세그먼트의 중간값이고  $\Delta_j$ 는 세그먼트의 길이이다. 전류의 크기에 관계되는 세개의 미지수 중 두개는 세그먼트의 접속관계에 따라 구해진다. 반경이 같은 세그먼트가 접속되는 점에서 전류와 전하는 연속이며, 반경이 다른 세그먼트가

접속되는 점에서 전류의 연속성은 Kirchoff의 전류법칙을 적용하고 전하는 세그먼트의 반경에 따라 식(3)과 같이 분포되는 것으로 가정하여 각 세그먼트에 하나의 미지수만 남게 된다.<sup>(10, 11)</sup>

$$\frac{\partial I(s)}{\partial s} \Big|_{\text{접속점 } s} = \frac{Q}{\ln\left(\frac{2}{ka}\right) - \gamma} \quad (3)$$

여기서,  $a$  : 세그먼트의 반경

$Q$  : 접속점 주위의 전체 전하

$\gamma$  : 0.5772, Euler 상수

세그먼트간의 전자기적 결합관계를 나타내는 임피던스 행렬식은 식(2)로 표현된 전류에 의한 각 세그먼트의 전계를 계산하면 된다. 그림 1의 관찰점 P에서 전계는 전류성분을 상수와 정현함수로 분리하여 계산하는 것이 편리하므로 식(2)의 상수와 정현함수 전류성분으로 부터 전계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(12)</sup>

$I = I_0 \begin{bmatrix} \sin kz' \\ \cos kz' \end{bmatrix}$ , 정현 및 여현함수 전류성분

$$E_\rho^f(\rho, z) = -\frac{I_0}{\lambda} \frac{j\eta}{2k^2 \rho} G_0 \{k(z-z') \begin{bmatrix} \cos kz' \\ -\sin kz' \end{bmatrix} + [1 - (z-z')^2(1+jkr_0)] \frac{1}{r_0^2} \begin{bmatrix} \sin kz' \\ \cos kz' \end{bmatrix} \} \Big|_{z_1}^{z_2} \quad (4a)$$

$$E_z^f(\rho, z) = \frac{I_0}{\lambda} \frac{j\eta}{2k^2} G_0 \{k \begin{bmatrix} \cos kz' \\ -\sin kz' \end{bmatrix} - (1+jkr_0)(z-z') \frac{1}{r_0^2} \begin{bmatrix} \sin kz' \\ \cos kz' \end{bmatrix} \} \Big|_{z_1}^{z_2} \quad (4b)$$

$I = I_0$ , 상수 전류성분

$$E_\rho^f(\rho, z) = -\frac{I_0}{\lambda} \frac{j\eta \rho}{2k^2} [(1+jkr_0) \frac{G_0}{r_0^2}]_{z_1}^{z_2} \quad (5a)$$

$$E_z^f(\rho, z) = -\frac{I_0}{\lambda} \frac{j\eta}{2k^2} \{ [(1+jkr_0)(z-z') \frac{G_0}{r_0^2}]_{z_1}^{z_2} + k^2 \int_{z_1}^{z_2} G_0 dz' \} \quad (5b)$$

여기서  $G_0 = \exp(-jkr_0) / r_0$

$$r_0 = [\rho^2 + (z-z')^2]^{1/2}$$

이며 식 (5b)의 적분식은 Romberg 적분방법을 이용하였다.

MOM 기법을 의해 얻어진 행렬식은

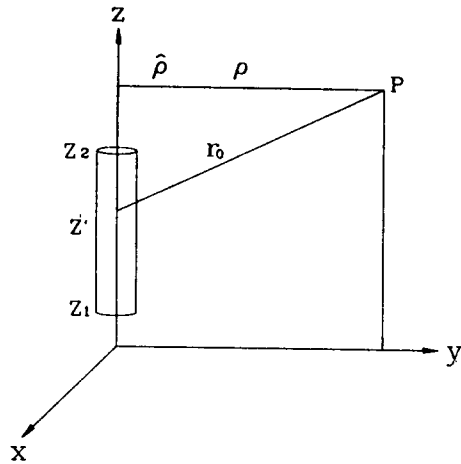


그림 1. 원통 좌표계  
Fig 1. Cylindrical Coordinate System

$$[E]=[Z][I] \quad (6)$$

로 표현할 수 있고, 구조물에 인가된 전압원에 따라 각 세그먼트에 유기된 전류는 Gauss 소거법을 이용하여 임피던스 행렬식을 역변환시킨 다음 구했다.<sup>(13)</sup>

### 3. 복사패턴

안테나의 복사전자계는 식(6)에서 구한 전류로부터 계산할 수 있으며 원거리 가정을 적용하면 식(1)로부터 복사전자계는 식(7)과 같이 표현된다.

$$\vec{E}(\vec{r}_o) = \frac{jkn}{4\pi r_o} \exp(-jkr_o) \int_L [(\hat{k} \cdot \vec{I}(s))\hat{k} - \vec{I}(s)] \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}) ds$$

여기서  $\hat{k} = \vec{r}_o / |\vec{r}_o|$ ,  $k = 2\pi / \lambda$  이다.

### 4. 안테나간 결합량

송·수신 안테나간 최대 전력전송은 송신안테나의 임피던스가 수신 안테나의 임피던스와 복소정합이 될 때 가능하므로 두 안테나를 2단자 회로망으로 보고 어드미턴스 변수를 구한 다음 RF 증폭기 설계시 이용되는 Linville 해석기법을 이용하여 식(8)과 같이 두 안테나간 최대 전파 결합량을 계산하였다.<sup>(14, 15)</sup>

$$G_{MAX} = \frac{1}{L} [1 - (1 - L^2)^2] \quad (8)$$

$$\text{여기서, } L = \frac{|Y_{12}Y_{21}|}{2\text{Re}(Y_{11})\text{Re}(Y_{22}) - \text{Re}(Y_{12}Y_{21})}$$

## III. 적용 및 분석

### 1. 연구결과와의 검증

전계적분방정식을 구조물에 대한 전자과해석에 이용한 연구결과와의 정확도 검증은 그림 2의 직사각형 구조물에 적용하였으며 검증모델의 제원은 표 1과 같다.<sup>(8)</sup>

표 1. 검증모델의 제원

Table 1. Characteristics of Example Model

항 목	제 원	비 고
○ 구조물 크기	○ 20' * 60' * 16' (높이)	
○ 안테나	○ Whip 안테나	
- 길이	- 35'	
- 직 경	- 4.5''	
- 재 질	- 황 동	
- 설치위치	- 중앙과 모서리부분 (중앙으로부터 29.12')	H1, H2

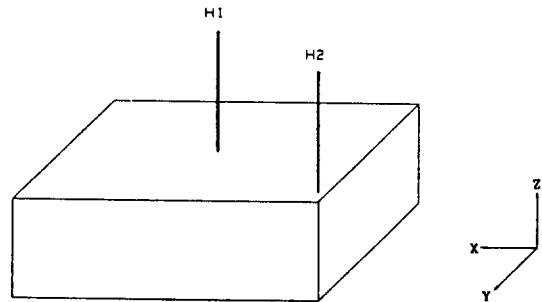


그림 2. 검증모델의 구조  
Fig 2. Configuration of Example Model

그림 2의 1/48 Brass 축척모델로부터 미국 NELC (Naval Electronics Laboratory Center)에서 측정 한 각 안테나의 복사패턴과 안테나간 결합량을 본 연구결과치와 비교하였고, 그 결과는 그림 3, 4에 각각 나타내었다. 그림 3의 안테나간 전파 결합량 비교는 전 주파수대역에서 3dB 이내의 차이가 있었으며 세그먼트 수를 현재(494개의 세그먼트로 모델링)보다 더 증가시키면 보다 양호한 결과가 얻어질 것으로 판단된다. 그림 4의 복사패턴은 Brass 축척모델의 패턴 측정시 안테나의 임피던스 비정합에 대한 손실을

고려하지 않았으므로 상호비교를 위해서 복사패턴 예측 안테나에 50Ω의 부하를 중단시켰고, 다른 안테나는 구조물에 접지시켰으며, 이들은 1/4λ 모노폴 안테나를 기준하여 측정치와 같은 척도로 나타내었다. 복사패턴 비교 결과 Null의 위치는 측정치와 일치하였으며 전방향에 대해 약 3dB 이내의 차이가 있는 양호한 결과를 얻었다.

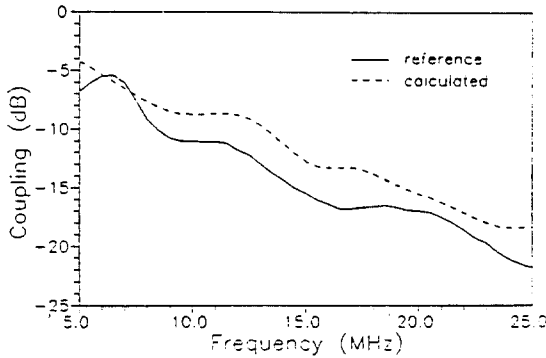


그림 3. 검증모델의 안테나간 결합량  
Fig 3. Coupling Between Two Antennas of Example Model

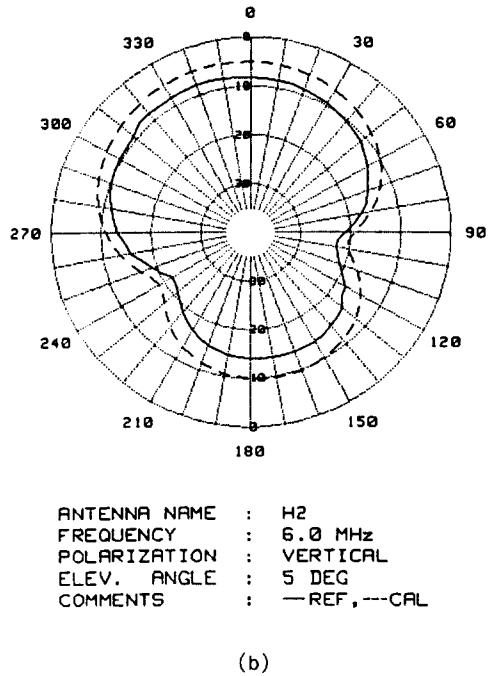
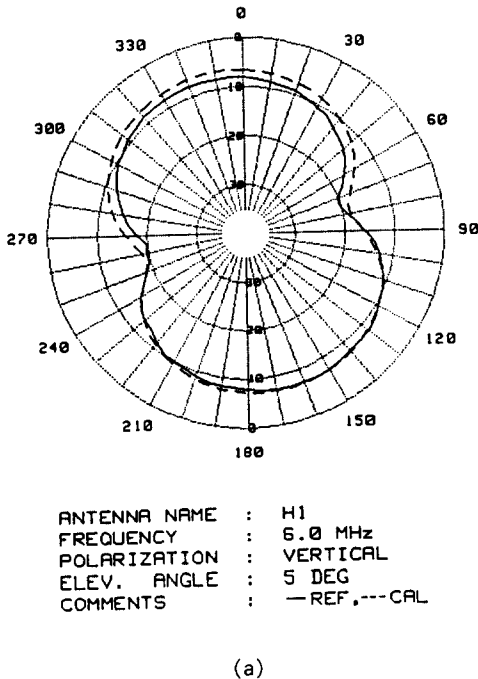


그림 4. 검증모델의 안테나 복사패턴  
a. H1 안테나 b. H2 안테나  
Fig 4. Radiation Patterns for Each Antenna of Example Model  
a. H1 Antenna b. H2 Antenna



## 2. 연구결과의 적용

앞서 검증한 연구결과를 토대로 5개의 HF 안테나 (H1,H4,H5 : Whip 안테나(7m), H2,H3 : Long Wire 안테나(9m))와 복잡한 구조물이 설치된 모델에 대해 그림 5와 같이 706개의 선형 세그먼트로 모델링하였으며 송·수신기(H1-H3 : 송신안테나, H4,H5 : 송·수신안테나)간 전자파 결합량은 HF 대역에서 예측하여 측정치와 비교하였다. HF 송·수신기간 전자파결합량 측정은 통신기와 안테나 사이에 설치된 자동 안테나 결합기를 사용하여 측정(1MHz 단위)하였으므로 예측결과와 직접 비교하기 위해서 수신안테나에 50Ω 부하를 중단시켰고 송·수신 안테나의 임피던스를 MOM으로 계산하여 임피던스 비정합에 대한 손실을 보상하였다. 측정치와 예측치의 비교는 그림 5 모델의 구조물과 안테나 설치위치의 대칭성을 고려하여 그림 6에 나타내었으며 최대 5dB 이내의 차이가 있는 것으로 확인되었다.

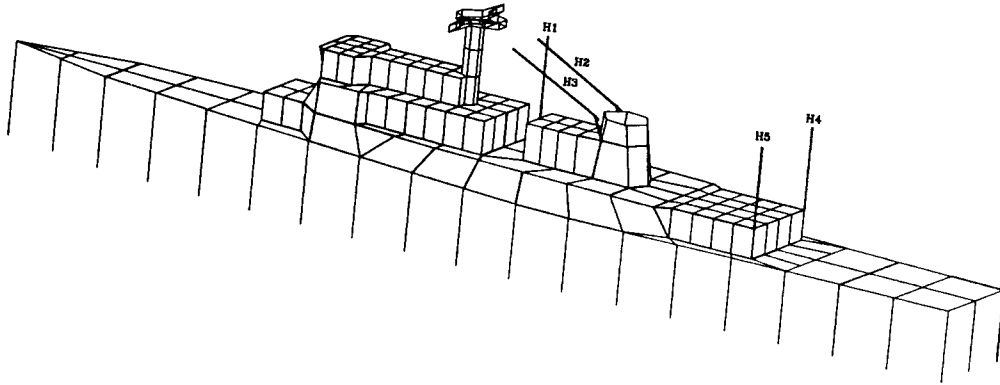


그림 5. 적용모델의 와이어 그리드 모델링  
Fig 5. Wire-Grid Modeling of Applied Model

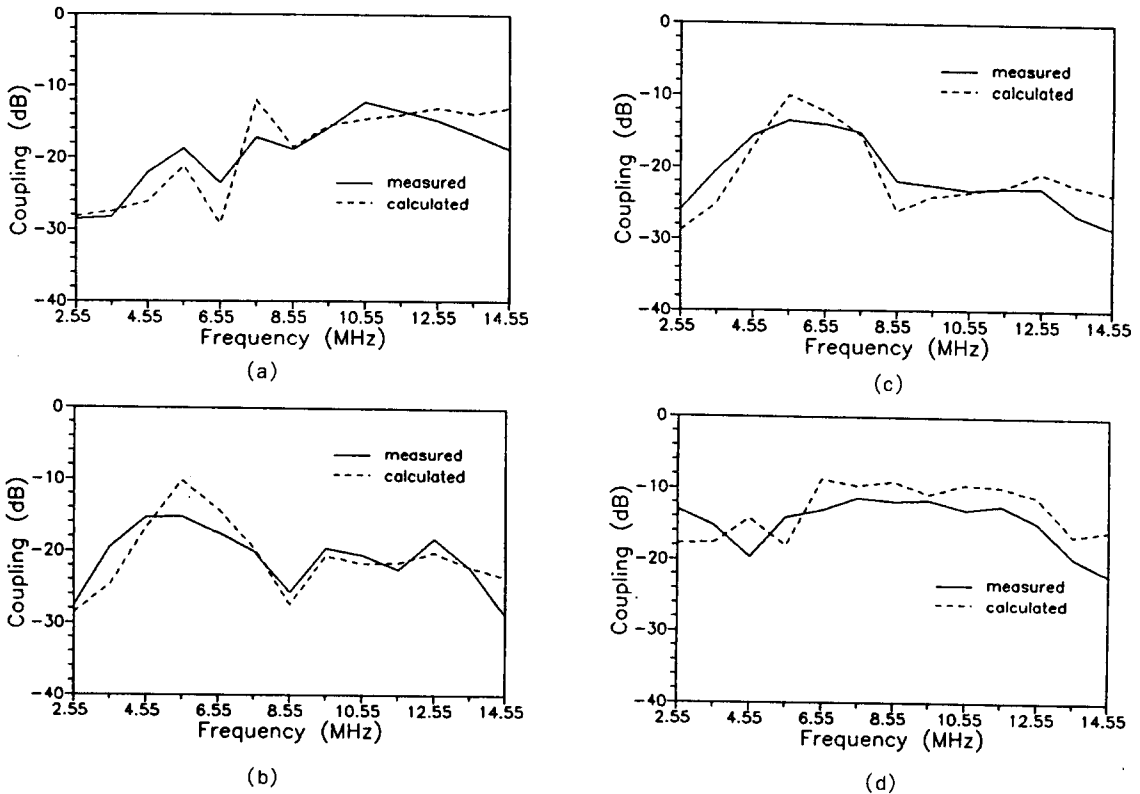


그림 6. 적용모델의 안테나간 결합량  
a. H1-H4 안테나    b. H2-H4 안테나  
c. H2-H5 안테나    d. H4-H5 안테나  
Fig 6. Coupling Between Two Antennas of Applied Model  
a. H1-H4 Antennas    b. H2-H4 Antennas  
c. H2-H5 Antennas    d. H4-H5 Antennas

#### IV. 결 론

구조물에 설치된 안테나의 특성을 예측하기 위해서는 안테나 주위에 있는 금속구조물의 영향을 고려한 전자파해석 연구가 필요하며, 본 연구에서는 전개 적분방정식을 이용하여 안테나와 구조물을 선형 세그먼트와 와이어 그리드로 나누어 안테나의 특성 예측, 분석이 가능한 S/W를 개발하였다. 연구결과와 정확도 검증은 기 발표된 모델에 적용하여 안테나간 결합량과 복사패턴을 비교한 결과 3dB 이내의 양호한 결과를 얻어 계산결과와 정확도를 확인하였으며 보다 복잡한 모델에 대해 HF 안테나간 전자파 결합량을 예측하여 측정치와 비교하였다.

본 연구결과는 금속구조물에 다수의 통신장비를 설치할 때 사전에 안테나의 특성 예측, 분석을 통해 안테나의 최적배치 설계 분석자료로 활용할 수 있으며, 예측결과와 정확도를 더욱 향상시키기 위해서 안테나와 구조물의 와이어 그리드 모델링시 세그먼트 길이와 반경의 최적조건 자료도출을 위한 연구가 계속 수행되어야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. R. Mittra, "Computer Techniques for Electromagnetics," Pergamon Press, Braunschweig, Chip. 2-4, 1973
2. A.T. Adams, Jose Perini, J.R. Stewart and T. E. Baldwin, "Numerical Techniques for Radiation and Coupling Problems", IEEE-EMC Symposium Record, pp. 219-225, 1973
3. N.C. Albertsen, J.E. Hansen and N.E. Jensen, "Computation of Radiation from Wire Antennas on Conducting Bodies", IEEE Trans. on Antenna and Propagation, Vol. AP-22, pp.200-206, March 1974
4. K.K. Venskauskas, V.V. Krestianinov and S.I. Andreev, "Shipboard EMC Improvement due Topside Optimization by Moment Method", IEEE-EMC Symposium Record, pp.47-51, 1990
5. S.Cristina and A.Orlandi, "EMC Effects of the Lightning Protection System: Shielding Properties of the Roof-Grid", IEEE-EMC Symposium Record, pp.78-83, 1991
6. R.F. Harrington, "Field Computation by Moment Methods", Macmillan, New York, 1968
7. R.C. Hansen, "Moment Methods in Antennas and Scattering", Artech House, Boston, 1990
8. L.S. Hansen, "Measurement Techniques for Scale Modeling HF and UHF Shipboard Antennas", Naval Electronics Laboratory Center TN 3283, San Diego, CA, Dec. 1976
9. A.J. Poggio and R.W. Adams, "Approximations for Terms Related to the Kernel in Thin-Wire Integral Equations", UCRL-51985, Lawrence Livermore Laboratory, San Diego, CA, Dec. 1975
10. Y.S. Yeh and K.K. Mei, "Theory of Conical Equiangular-Spiral Antennas Part I-Numerical Technique", IEEE Trans. on Antenna and Propagation, Vol. AP-5, No. 5, pp.634-639, Sep. 1967
11. T.T Wu and R.W.P King, "The Tapered Antenna and Its Application to the Junction Problem for Thin Wires", IEEE Trans. on Antenna and Propagation, Vol. AP-24, No. 1, pp.42-45, Jan. 1976
12. J.A. Stratton, "Electromagnetic Theory", McGraw-Hill, New York, pp.454-457, 1941
13. A. Ralston, "A First Course in Numerical Analysis" McGraw-Hill, New York, 1965
14. G. Johnson, "High Frequency Amplifier Using Admittance Parameters", Electro Technology, Dec. 1963
15. D. Rubin, "The Linville Method of High Frequency Transistor Amplifier Design", Naval Weapons Center, NWCCCL TP 845, Corona, CA, March 1969
16. K.R. Siarkiewicz and A.T. Adams, "Near and Far-Field Thin-Wire Coupling-Theory and Experimental", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-19, No. 4, pp. 394-401, Nov. 1977