

파면 해석을 이용한 전파 도래각의 계산

○ 김 중 호, 조 진 호, 오 승 업, 박 동 철  
 충남대학교 전자공학과

Calculation of the Arrival Angles of a Wave by use of Wavefront Analysis

Jong Ho Kim, Jin Ho Jo, Seung Hyeup Oh, Dong Chul Park  
 Dept. of Electronics Eng., Chunenam National University

ABSTRACT

The problem considered is that of calculating the angles of arrival of a multimoded signal at an antenna array from simultaneous measurements of the amplitude and the phase of the signal in each element of the array.

The method of wavefront analysis is applied to a 4-element direction finder of the Adcock type. A simulated problem is constructed with the aid of suitable computer programs developed here.

1. 서 론

안테나 시스템을 이용하여 입사하는 전파의 입사각을 찾는 시스템을 방향탐지(Direction Finding : DF)시스템이라고 한다. 이 들은 안테나에서 얻는 신호의 획득 및 처리 방법에 따라 스칼라 시스템과 벡터 시스템으로 분류될 수 있다. 스칼라 시스템은 입사신호의 진폭이나 위상중 한가지 만을 이용한 DF 시스템으로 시스템 자체는 간단하나 다중 파가 입사할 경우 각 파의 분해 능력이 떨어지는 단점이 있다. 반면에 벡터 시스템은 입사신호의 진폭과 위상을 모두 이용한 DF 시스템으

로 다중 파 신호에 대한 각 파의 분해를 보다 정밀하게 할 수 있으며 본 논문에서 이용하고자 하는 파면 해석 방법은 벡터 시스템에 적용될 수 있다.

파면 해석(Wavefront Analysis : WFA) 방법은 디지털 신호 처리 기법과 관련되어 Gething(1>-3>)이 제안하였으며 가상의 beam-forming network를 구성시켜 파의 입사각을 구하였다. 그 후 Kelso(4>)는 파면 해석에 의한 일련의 다항식을 만들어 다항식의 근으로부터 파의 입사각을 찾았지만 처리할 수 있는 파의 수가 한정되어 있었다. 또한 Cawsey(5>)는 파면 해석을 위한 수치 해석 기법을 도입하여 Kelso가 사용한 방법의 문제점을 해결하였으나 Kelso나 Cawsey 방법의 응용은 단지 입사파의 양각만 찾는 것으로 국한되어 있다.

본 논문에서는 입사파의 방위각과 양각을 모두 찾을 수 있는 Adcock 형 배열 안테나에 파면 해석 방법을 적용하여 입사파의 도래각인 방위각과 양각을 구하는 방법과 다중 파인 경우 각 파에 대한 진폭과 위상을 계산하는 방법들을 프로그래밍하고 컴퓨터 실행이 없는 가상적인 완벽한 데이터를 이용하여 수치 시뮬레이션 하였다.

2. 파면 해석과 관련된 파라미터들의 관계

중심에서 같은 거리 만큼 떨어진 등, 서, 남, 북의 각 위치에 monopole 안테나가 서 있는 4소자 Adcock 배열 안테나가 있을 때 각 안테나에서 측정되는 파의 진폭과 위상은 입사파가 다중 파라고 할 때 다중 파를 구성하고 있는 각각의 파의 입사각에 의하여 결정된다.  $n, f, m$ 를 다음과 같이 정의하고 단일 프레임의 경우와 다중 프레임의 경우에 대하여 파라미터들의

관계를 살펴본다.

- n=배열에서의 안테나 갯수
- f=총 프레임의 수
- m=입사하는 파의 수

(가) 단일 프레임의 경우

각 안테나에서 측정 가능한 데이터는 진폭과 위상 2개 뿐이므로 단일 n개의 안테나라면 2n개가 된다. 그러나 진폭과 위상은 한 안테나를 기준으로 정의하므로 실제로 정의 가능한 파라미터의 수는 2(n-1)개가 된다. 한 파에 대하여 도출 해야 할 파라미터는 진폭, 위상, 범위각, 임각 4개이므로 m개의 파가 입사하면 4m개가 된다. 그러나 범위각과 임각은 기준점이 존재 하지만 진폭과 위상은 기준점이 없으므로 찾아야 하는 파라미터의 진폭과 위상도 한 파를 기준으로 정의 해야 한다. 그러면 결정 해야 할 파라미터의 수는 4m-2개가 된다.

(나) 다중 프레임의 경우

f개 프레임의 데이터가 축적 되어 있고 각 프레임에 따라 파의 입사각은 일정하고 진폭과 위상만이 변한다고 가정하면 측정 가능한 파라미터의 수는 2f\*(n-1)이며 결정 해야 할 파라미터의 수는 임각과 범위각의 수 2m과 진폭과 위상의 수 (2m-2)\*f이다. 그러므로 파면 해석 방법이 가능하려면 측정 가능한 파라미터의 수가 도출 해야 할 파라미터의 수보다 크거나 같아야 한다. 즉 2f\*(n-1) ≥ 2m+(2m-2)\*f가 성립하여야 한다.

3. 선형 관계식의 유도와 계수 결정

n개의 안테나 소자로 구성된 배열의 각 안테나에서 동시에 측정된 신호들을 Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, ----, Z<sub>n</sub>라 하면 여기에 taper 계수 d를 곱하여 다음과 같은 선형 방정식을 세울 수 있다.

$$d_1 Z_1 + d_2 Z_2 + \dots + d_n Z_n = 0 \quad (1)$$

$$Z_r = X_r + j Y_r$$

$$d_r = A_r + j B_r \quad (2)$$

$$X_r = S_r \cdot \cos(\phi_r)$$

$$Y_r = S_r \cdot \sin(\phi_r)$$

S<sub>r</sub>, φ<sub>r</sub>는 r 번째 안테나에서 측정되는 신호의 진폭과

위상이다.

식(1)에서 taper 계수 d를 구하고 마 d를 각 안테나의 전류라 하여 안테나 배열의 배열 요소(Array Factor : AF)를 구해 null 점이 되는 곳들을 찾으면 그 null 점이 입사하는 파의 입사각이 된다. 식(2)를 식(1)에 대입하여 그들의 실수 부분과 허수 부분을 4소자 Adcock 배열 안테나에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_n X_n - B_n Y_n + A_e X_e - B_e Y_e + A_s X_s - B_s Y_s + A_w X_w - B_w Y_w &= 0 \\ B_n X_n + A_n Y_n + B_e X_e + A_e Y_e + B_s X_s + A_s Y_s + B_w X_w + A_w Y_w &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

첨자 n, e, s, w 는 각각 북, 동, 남, 서 방향에 위치한 안테나를 나타낸다.

식(3)은 한 프레임의 측정 데이터에서 얻을 수 있는 방정식이고 하나의 안테나에 대해 두 개의 미지수 A<sub>r</sub>, B<sub>r</sub>이 있으므로 안테나 수 만큼의 프레임 수가 필요하다. 즉 4개의 안테나가 있으면 미지수는 8개이고 4개의 프레임 데이터를 취하면 8개의 방정식을 유도해 낼 수 있다.

$$[F(8 \times 8)] * [D(8 \times 1)] = [B(8 \times 1)] \quad (4)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} X_n - Y_n & X_e - Y_e & X_s - Y_s & X_w - Y_w & & & & & \\ Y_n & X_n & Y_e & X_e & Y_s & X_s & Y_w & X_w & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{1st 프레임} \\ \text{2nd 프레임} \\ \text{3rd 프레임} \\ \text{4th 프레임} \end{matrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \\ A_e \\ B_e \\ A_s \\ B_s \\ A_w \\ B_w \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

4. 파의 입사각과 진폭 및 위상

(가) 파의 수 및 입사각 계산

Adcock 형 배열 안테나에 입사하는 파의 입사각을 θ(양각), φ(범위각)로 나타내고 각 안테나를 등방성 안테나로 나타낸 경우 하나의 파가 입사한다고 가정하면 그림1처럼 표현할 수 있다.

그림1에 대한 배열 요소는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j\alpha_n} e^{j[\rho \ell \sin\theta \cos(\phi - \phi_n)]} \quad (5)$$

- N : 안테나의 수
- $\beta$  : 전파 상수 ( $2\pi/\lambda$ )
- $\alpha_n$  : 각 안테나에 주어지는 전류 위상
- $I_n$  : 각 안테나에 주어지는 전류 진폭
- $\phi_n$  :  $2\pi(n-1)/N$
- $\ell$  : 안테나 배열의 반경

식(5)에서  $AF(\theta, \phi)$ 가 0이 될때의  $\theta, \phi$ 가 여기서 찾고자 하는 파의 입사각이 되며 0이 되는 곳의 갯수가 곧 파의 수가 된다.

(나) 진폭과 위상의 분해

다중 파의 각 파에 대한 입사각이 (가)에서 결정된 후 각 파의 진폭과 위상을 구해보자. 그림1에서 양각  $\theta$ 를 고려하지 않고 위에서 내려다 볼 경우의 구조가 그림2와 같다.

직각 좌표계에서 원점 O에 대하여 N개의 위상차를  $N_p$ 라 하면 그림2에서 거리 r는 다음과 같이 표시된다.

$$r = d/2 * \cos(\phi)$$

여기에 양각  $\theta$ 를 고려한 거리 l는

$$l = r * \cos(\theta) = d/2 * \cos(\phi) * \cos(\theta)$$

가 되며 그림3처럼 나타낼 수 있다.

그러므로 위상차  $N_p$ 는 다음과 같다.

$$N_p = -\beta l = -\pi d/\lambda * \cos(\phi) * \cos(\theta) \quad (6)$$

같은 방법으로 E에 대한 위상차를  $E_p$ 라 하면

$$E_p = -\pi d/\lambda * \sin(\phi) * \cos(\theta) \quad (7)$$

가 된다.

또한  $S_p, W_p$ 를 각 원점에 대한 S, W에서 위상차라 하면 이 둘은 부호만 다르고 크기는 같다.

$$S_p = -N_p \quad (8)$$

$$W_p = -E_p$$

두 개의 파  $W_1, W_2$ 가 입사하고 각 파를 실수부와 허수부로 나누어 표시하면 다음과 같다.

$$W_1 = U_1 + jV_1 \quad (9)$$

$$W_2 = U_2 + jV_2$$

이 둘이 안테나에서 측정될 때 그 측정값과의 관계는

$$X_n + jY_n = W_1 e^{jN_p1} + W_2 e^{jN_p2}$$

$$X_e + jY_e = W_1 e^{jE_p1} + W_2 e^{jE_p2}$$

가 되며  $X_n$ 과  $Y_n$ 을 달리 표현하면 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} X_n &= U_1 \cos(N_p1) - V_1 \sin(N_p1) + U_2 \cos(N_p2) - V_2 \sin(N_p2) \\ Y_n &= U_1 \sin(N_p1) + V_1 \cos(N_p1) + U_2 \sin(N_p2) + V_2 \cos(N_p2) \end{aligned} \quad (10)$$

$X_e, Y_e$ 에 대해서는 (10)식의  $N_p1$  대신  $E_p1, N_p2$  대신  $E_p2$ 만 대신시키면 되며 이 (10)식은 앞에서 다른 (3)식과 비슷한 형태로써 같은 방법에 의하여 미지수  $U_1, V_1, U_2, V_2$ 를 구할 수 있다. 각 파의 진폭과 위상은 다음 식에 의하여 구해진다.

$$\begin{aligned} \text{진폭} &= \sqrt{U^2 + V^2} \\ \text{위상} &= \text{TAN}^{-1}(V/U) \end{aligned}$$

5. 시뮬레이션

4점의 그림1에서 반경  $\ell$ 가 3.5m, 입사파의 주파수는 10MHz로 놓고 두 개의 파가 입사한다는 가정하에서 파면 해석에 의한 도래각을 찾는 방법을 시뮬레이션 하였다. 아울러 이 도래각으로 부터 두개 파의 진폭과 위상을 역으로 찾아내는 방법도 시뮬레이션하였다. 집중이 없는 완벽한 데이터를 이용한 시뮬레이션 결과를 <표1-3>에 나타내었다.

<표1> 모드 파라미터

	모드1	모드2
Azimuth	152.1	248.2
Elevation	23.6	50.1
진폭 프래밍(1)	1.0	1.0
진폭 프래밍(2)	1.0	2.3
진폭 프래밍(3)	1.0	0.6
위상 프래밍(1)	0.0	41.0
위상 프래밍(2)	0.0	97.0
위상 프래밍(3)	0.0	234.0

<표2> 안테나에서 측정된 신호

	프래밍(1)	프래밍(2)	프래밍(3)
$X_n$	1.458	0.156	0.571
$Y_n$	1.336	2.759	0.018
$X_e$	1.358	-0.286	0.842
$Y_e$	0.605	1.641	-0.899
$X_s$	1.686	0.950	0.401
$Y_s$	-0.044	1.738	-0.980
$X_w$	1.912	1.662	0.429
$Y_w$	0.584	2.496	0.014

<표3> Taper 계수

	계수
$A_n$	-1.234
$B_n$	0.563
$A_e$	-4.4E3
$B_e$	-5.7E2
$A_s$	0.357
$B_s$	0.202
$A_w$	*1.
$B_w$	*0.

\* 임의로 선택한 값

프레임(1)에 대한 진폭과 위상

$U_1=1.0, V_1=0.0, U_2=0.76, V_2=0.06$   
 모드1                      모드2

진폭 =  $\sqrt{1^2+0^2}=1.0, \quad$  진폭 =  $\sqrt{0.76^2+0.06^2}=1.0$   
 위상 =  $TAN^{-1}(0/1)=0, \quad$  위상 =  $TAN^{-1}(0.06/0.76)=4.1$

6. 결 론

파면 해석을 이용하여 잡음이 없는 이상적인 가상 데이터로 다중 파의 입사각을 추출하고 각 파의 진폭 및 위상을 분해하였다. 5점의 시뮬레이션 결과에서 보듯이 잡음이 없는 완벽한 데이터를 이용한 경우 처음 가정된 수치들을 다시 그대로 재현해 내는 것을 볼 수 있다. 그러나 실제 응용을 위해서는 잡음이 섞인 실제 데이터를 이용하면서도 정확한 입사각과 각 파의 진폭과 위상을 알 수 있는 기법을 본 프로그램에 첨가하는 것이 연구되어야 한다.

참 고 문 헌

1. GETHING, P. J. D., MORRIS, J. G., SHEPHERD, E. G., and TIBBLE, D. V.,: "Measurement of elevation angles of h.f. waves", Proc. IEE, vol. 116, No. 2, 1969, pp. 185-193.
2. GETHING, P. J. D.,: "High-Frequency Direction Finding", Proc. IEE, vol. 113, No. 1, Jan. 1966, pp. 55-56.
3. GETHING, P. J. D.,: "Analysis of Multicomponent Wave-Fields", Proc. IEE, vol. 118, 1971, pp. 1333-1338.

lds", Proc. IEE, vol. 118, 1971, pp. 1333-1338.

4. KELSO, J. M.,: "Measuring the Vertical Angles of Arrival of HF Sky wave Signals with Multimodes", Radio Sci., vol. 7, 1972, pp. 245-250.
5. CAWSEY, D.,: "Numerical Methods for Wavefront Analysis", Proc. IEE, vol. 119, 1972, p. 1237-1242.
6. GETHING, P. J. D.,: "Radio Direction Finding and Resolution of Multi-component Wave-Fields", Peter Peregrinus Ltd., Stevenage, England, 1978.

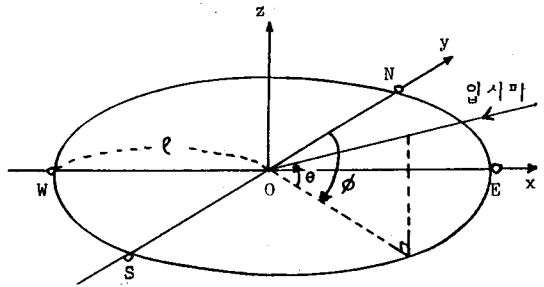


그림1. 4소자 Adcock 형 배열 안테나에 한 개의 파가 입사할 경우의 구조

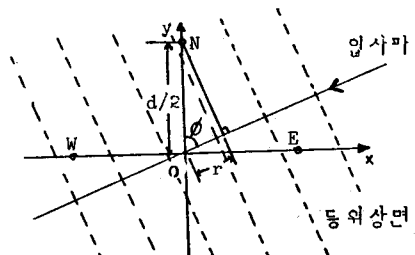


그림2. 임각  $\theta$ 를 고려하지 않고 위에서 내려다 본 구조

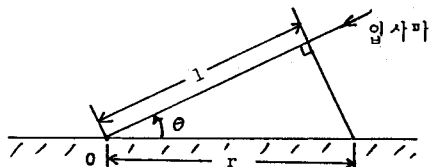


그림3. 임각  $\theta$ 를 고려하여 위에서 바라 본 구조