

신호의 시간 지연을 이용한 광대역 위상배열 계산

Wide-Band Phased Array Antenna Analysis Using Time-Domain Signal Delay

조준녕 · 이경민 · 김기철*

Jun-Nyeong Cho · Kyoung-Min Lee · Ki-Choul Kim*

요 약

위상배열 안테나는 일반적으로 신호의 위상지연을 이용해서 배열 성분을 계산한다. 위상지연을 이용한 위상배열 계산 방법은 계산이 쉬운 장점이 있으나, 단일주파수에서 계산된 전기적 길이를 계산에 이용하기 때문에 넓은 주파수 대역에서의 위상배열 성능을 계산하는 방법으로는 적합하지 않다. 본 논문에서는 시간 지연을 이용한 배열안테나의 계산방법을 소개한다. 시간 지연을 이용한 배열안테나 계산방법은 전파의 속도를 이용해서 계산하는 특징으로 주파수에 영향을 받지 않고 성능 계산이 가능하고, 위상지연을 이용한 계산에서는 알기 어려운 에러에 대해서도 계산할 수 있는 장점이 있다. 두 개의 계산방법을 MATLAB 프로그램을 이용해서 비교했다. 계산 결과 5개의 Dipole을 uniform linear array 환경에서 30~50 GHz의 주파수 대역을 한 번에 계산할 수 있었으며, 기존의 phased array 계산 방법 대비 0.2% 이하의 오차율을 보였다. 이렇듯 시간 지연을 이용한 배열안테나 신호처리를 응용하면 광대역 배열안테나에 대한 효율적인 계산이 가능하며, 더 나아가 위상배열 성능 분석 시뮬레이터 분야에서도 활용이 가능할 것으로 기대된다.

Abstract

Generally, a phase array antenna calculates an array component using a phase delay of a signal. The phase array calculation method using the phase delay has the advantage of easy calculation; however, it is unsuitable for calculating the phase array performance in a wide frequency band, primarily because the electric length calculated at a single frequency. In this paper, an array antenna calculation method using the time delay is introduced. The proposed method has the advantage of being able to calculate the performance without being affected by the frequency as it is calculated using the speed of radio waves. Moreover, it can calculate errors that are difficult to understand in the calculation that uses the phase delay. The two calculation methods are compared using MATLAB. As a result of the calculation, it is possible to simultaneously calculate the frequency band of 30 to 50 GHz for 5 dipoles in a uniform linear array environment, and the error rate was less than 0.2 %. Accordingly, efficient calculation of wideband arrayed antennas can be achieved by applying the arrayed antenna signal processing method using time delay. Furthermore, it is expected to be applicable in the field of phased array performance analysis simulator.

Key words: Wide Frequency Band, Phased Array, Time Delay Calculation, Beam Squint

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다(UD190033ED).」
고려대학교 전기전자공학부(School of Electrical Engineering, Korea University)

*국방과학연구소(Agency for Defence Development)

· Manuscript received March 21, 2022 ; Revised April 4, 2022 ; Accepted September 8, 2022. (ID No. 20220321-030)

· Corresponding Author: Jun-Nyeong Cho (e-mail: whwns773@korea.ac.kr)

I. 서 론

최근 통신 하드웨어와 제어 소프트웨어의 발전으로 이전보다 저렴하게 능동 위상배열 안테나 제작이 가능해졌고, 그에 따라서 위상배열에 관한 연구 및 개발은 활발하게 진행되고 있다. 실제로 SpaceX의 Starlink는 개인용 안테나를 위상배열 안테나로 제작해서 저궤도 위성 통신에 사용하고 있으며^[1], 능동위상배열 레이더(AESA radar, active electronically scanned array radar)는 현대 전투기의 사격 통제에 필요한 핵심 센서로, 활발한 연구와 개발이 진행되고 있다^[2]. 이처럼 위상배열 안테나의 연구 및 개발이 활발해짐에 따라 다양한 상황에서 효과적으로 대처할 수 있게 성능을 계산할 수 있는 위상배열 성능 계산에 대한 중요도가 높아졌다. 본 논문에서는 기존의 위상을 이용한 계산 방법보다 효율적인 계산 방법에 관해 이야기하고자 한다.

현재 일반적으로 사용하고 있는 위상배열의 계산 방법은 신호의 지연을 위상의 지연으로 계산하는 방법이다. 하지만, 위상지연으로 계산하는 방법은 하나의 주파수에서만 전기적 길이를 계산하게 되어 넓은 주파수 대역의 신호를 계산하게 되면 주파수의 차이에 의한 오차가 발생하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 신호의 시간 지연으로 계산을 진행했다. 이 방법은 배열 안테나에 의한 신호의 지연이 발생하는 길이를 전파의 속도로 나눈 시간을 이용하는 방법으로, 안테나 패턴을 계산할 때는 계산하고자 하는 주파수 대역의 time-domain 신호를 생성해서, 계산에 사용하였다. 이 방법은 주파수에 영향을 받지 않아 광대역 위상배열 계산에 있어서 한 번의 계산으로 모든 주파수 대역의 계산을 할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특징은 위상을 사용하지 않고 시간을 이용하는 TTD(true time delay) phase shifter와 유사하며^{[3],[4]}, 시간 지연 계산 방법은 TTD 타입의 phase shifter를 사용하는 배열 안테나 계산에서 신호의 형태를 주파수에 따라 파워와 위상으로 변환하지 않고 계산이 가능한 장점이 있다.

시간 지연을 통한 위상배열의 계산 방법은 손으로는 계산이 어려운 문제가 있지만, 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 발전으로 컴퓨터 프로그램을 이용해서 계산을

진행할 수 있었다. 본 연구에서는 MATLAB을 이용해서 계산 후, 고속 푸리에 변환을 통해서 위상지연을 통한 위상배열 계산 방법과 비교했다.

본 논문은 위상배열의 시간 지연과 위상지연에 대한 계산 과정에 관해서 기술하고, 이 두 가지의 방법을 이용해서 5개의 dipole uniform linear array antenna를 계산한다. 그리고 계산된 결과를 가지고 두 계산 과정의 차이점과 장단점에 대해서 분석한다.

II. 위상배열 계산방법

2-1 위상지연 위상배열 계산방법

위상지연 계산 방법^[5]은 배열의 간격, 안테나의 방사 방향, 신호의 출력 전력과 위상으로 계산한 배열 성분은 안테나의 패턴을 곱해서 계산했으며, 배열 성분의 등가 모델은 그림 1과 같다. 배열 안테나의 패턴은 개별 안테나 성분과 배열 성분을 이용해서 계산하게 되는데, 그중 배열 성분은 식 (1)과 같으며, 배열 성분($AF(f, \theta, \phi)$) 계산을 위해서 주파수(f)와 개별 안테나에 전달되는 신호의 전력과 위상(I_n), 안테나의 개수(N)와 간격(d), 각도(θ)를 이용해서 계산한다. 그 후, 계산된 배열 성분과 개별 안테나의 패턴($g_a(f, \theta)$)을 곱해서 위상배열의 패턴을 계산한다.

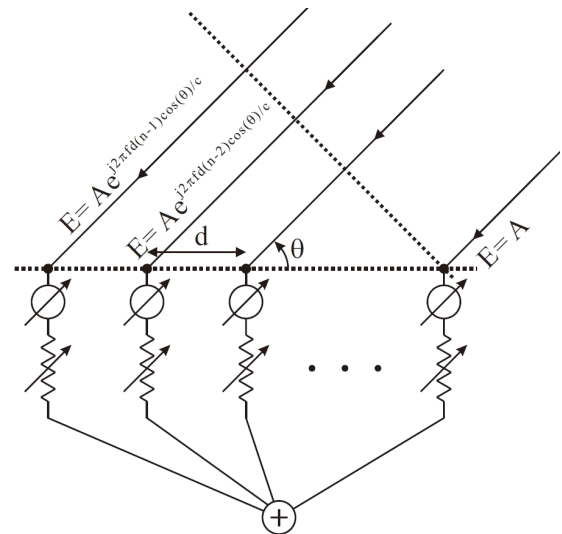


그림 1. 위상지연을 이용한 위상배열의 등가 모델
Fig. 1. Equivalent model of phased array using phase.

$$AF(f, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{j(\frac{2\pi f}{c} nd \cos \theta)} \quad (1)$$

$$F(f, \theta) = g_a(f, \theta) AF(f, \theta) \quad (2)$$

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \int \int \frac{4\pi}{|F(\theta, \phi)|^2 d\Omega} \quad (3)$$

2.2 시간 지연 위상배열 계산 방법

시간 지연 계산 방법은 위상지연과 같이 배열 성분에 안테나의 패턴을 곱해서 계산했으며, 배열 성분의 등가 모델은 그림 2와 같다. 시간 지연 계산 과정의 경우, 신호를 시간 함수($x_n(t)$)로 입력받는다고 가정했다. 배열 성분의 계산 수식은 식 (4)와 같다. 계산을 위해 위상지연과 같이 안테나의 개수(N)와 간격(d) 안테나의 각도(θ)를 이용해서 계산한다. 그 후, 계산된 배열 성분($y(t, \theta)$)을 푸리에 변환하여 주파수 영역의 배열 성분으로 변환한 뒤, 개별 안테나의 패턴($g_a(f, \theta)$)을 곱해서 위상배열의 패턴을 계산한다.

$$y(t, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left(t + \frac{nd \cos \theta}{c} \right) \quad (4)$$

$$y(t, \theta) \xrightarrow{FFT} Y(f, \theta) \quad (5)$$

$$F(f, \theta) = g_a(f, \theta) Y(f, \theta) \quad (6)$$

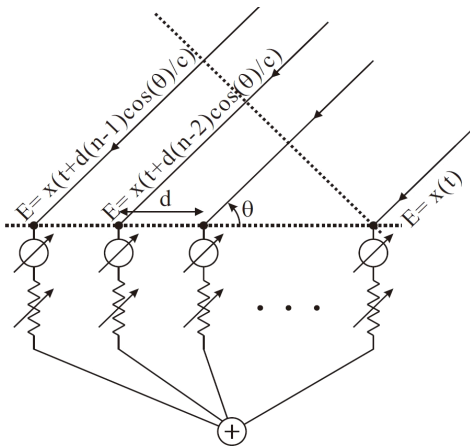


그림 2. 시간지연을 이용한 위상배열의 등가 모델
Fig. 2. Equivalent model of phased array using time.

III. Dipole Antenna Pattern Examples

3-1 분석용 배열안테나 구조

두 개의 위상배열 계산 방법을 검증하기 위해서 5개의 dipole antenna를 uniform linear array antenna로 구성하여 계산을 진행했다. 구조는 그림 3과 같으며, E-field의 방향을 z축 방향, H-field의 방향을 y축 방향으로 설정했다. H-plane 방향으로 5개를 배치하였고, 안테나는 $\lambda/2$ dipole antenna(@40 GHz)를 사용하였다. 안테나 간의 간격은 2.5 mm($\lambda/3$ @40 GHz)로 설정하였으며, 30~50 GHz의 PDF(probability density function)의 분포를 하도록 신호를 설정해서 각 element에 입력신호로 사용하였다. 또한, 각 element에 들어가는 신호는 5.89 [ps]의 지연을 주어 $\theta = 45^\circ$, $\Phi = 90^\circ$ 의 steering angle을 가지도록 설정하였다.

3-2 계산방법에 따른 위상배열 안테나 계산 결과 비교

30, 40, 50 GHz에서 E($\Phi = 90^\circ$, θ sweep)-plane에서 안테나 이득을 계산했으며, 결과는 아래 그림 4와 같다. 시간 지연 방법의 경우, 수식과 같이 각 element에 입력된 신호에 시간 지연만큼 보상해 준 뒤 더하여 Fourier transform을 해주어 결과를 도출했다. 그 결과, 위상지연을 통한 계산과 동일한 결과를 보였으며, 둘의 오차는 0.2 % 이하의 값을 가지는 것으로 계산되었다. Array factor의 경우, 45° 각도에 빔이 초점이 맞추어지는 것으로 계산되었지만, element antenna의 end-fire와 broadside의 중간 위치에 빔이 형성되어 있어서 element antenna의 안테나 패턴에 의해서 5-element dipole array의 패턴은 좀 더 broadside 방향으로 형성된 모습을 관찰할 수 있었다.

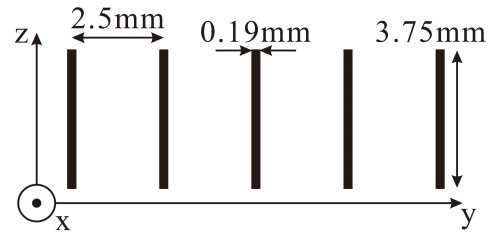


그림 3. 시뮬레이션을 위한 dipole phased array 구조
Fig. 3. Dipole phased array structure used for simulation.

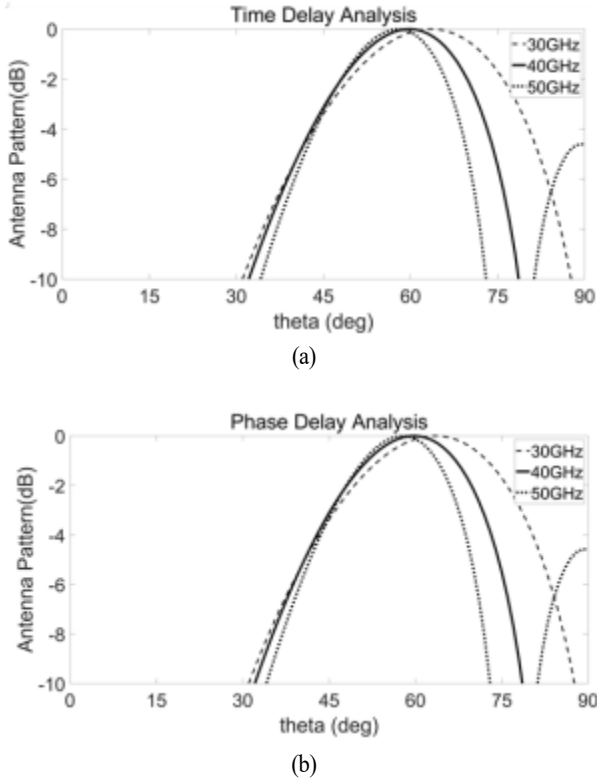


그림 4. (a) 시간 지연 계산방법을 이용한 안테나 패턴, (b) 위상지연 계산방법을 이용한 안테나 패턴
 Fig. 4. (a) Antenna pattern using time delay calculation, (b) Antenna pattern using phase delay calculation.

3-3 HFSS를 이용한 위상배열 안테나 계산 결과 비교

3D 필드 시뮬레이션으로 사용하고 있는 ANSYS사의 HFSS 프로그램의 결과와 비교를 통해서 시간 지연 위상 배열에 대해서 검증하였다. 그림 3과 같이 간단한 dipole phased array 구조로 계산하였으며, normalized pattern의 계산 결과는 그림 5와 같다. 구조 전체에 대해서 분석을 하는 HFSS 특성상 mutual coupling에 대해서도 분석하는 이유로 인해서, 정확한 계산을 위해서 HFSS로 계산된 S-parameter 정보와 element antenna의 패턴을 이용해서, mutual coupling과 안테나 패턴을 계산했다^[6]. S-parameter를 이용한 mutual coupling의 경우, 식 (7)~식 (10)과 같으며, 안테나 상호 간에 영향을 주어 각 안테나의 전류와 전압값이 바뀌게 되고, 그로 인해서 배열 안테나의 삽입 신호가 바뀌는 것을 계산하였다. 40 GHz에서 계산을 하였

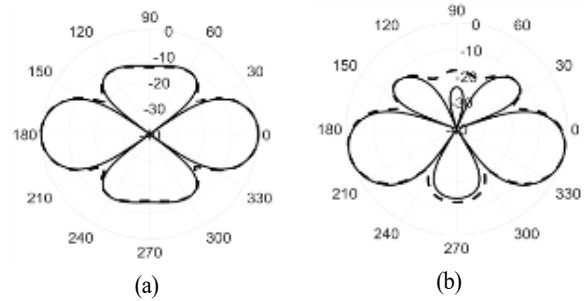


그림 5. 그림 3과 같이 형성된 phased array dipole antenna에서 (a) 동일한 위상의 신호가 입력된 H-plane의 normalized pattern과 (b) 30°(@40 GHz)씩 지연을 준 H-plane의 normalized pattern, 점선은 HFSS 결과, 실선은 계산 결과

Fig. 5. In the phased array dipole antenna formed as shown in Fig. 3, (a) the normalized pattern of the H-plane input with the same phase signal and (b) the normalized pattern of the H-plane with a delay of 30° (@40 GHz). The dotted line is the HFSS result, the solid line is the calculation result.

으며, 정확한 mutual coupling 계산에 어려움으로 인해서, peak gain 계산에 어려움이 있었지만, normalized pattern은 HFSS와 유사한 결과를 보였으며 약 3 %의 오차율을 가지는 것으로 계산되었다.

$$I_{f-i} = \frac{1}{Z_{0-i}} \left(a_i - \sum_{j=1}^N S_{ij} a_j \right) \quad (7)$$

$$V_{f-i} = a_i + \sum_{j=1}^N S_{ij} a_j \quad (8)$$

$$a_i = \sqrt{\frac{P_{inc-i}}{Z_{0-i}}} \angle \theta_{inc-i} \quad (9)$$

$$P_r = \sum_{i=1}^N \text{Re}(V_{f-i} I_{f-i}^*) \quad (10)$$

IV. 결 론

본 논문에서는 위상배열 안테나 계산에 있어서 지금까지 많이 사용하고 있는 위상지연을 통한 계산이 아닌 시간 지연을 통한 계산 방법에 대해서 분석하였다. 기존의 TTD를 이용한 배열 안테나의 연구는 많았지만, TTD를 이용한 배열 안테나의 해석에 대해서 다루지 않았다. 하

지만 TTD를 이용해서 배열 안테나를 해석하게 될 경우, 특정 상황에서는 위상을 이용한 배열 안테나 계산보다 빠르고 간편하게 계산할 수 있는 장점이 있었다. 또, 시간 지연 계산 방법은 연산이 상당히 많이 이루어지는 문제로 손으로 계산하기는 어렵지만, MATLAB과 같은 컴퓨터 프로그램을 이용해서 계산하였을 때는 충분히 계산할 수 있었다. 하지만, HFSS와 비교를 통해서 계산에 대해 검증할 때 예상과 결과가 일치하지 않는 문제가 있었고, 또 mutual coupling과 같은 추가적인 계산이 필요한 단점도 있었다. 추후 추가 연구를 통해서 이러한 문제를 해결해 나갈 수 있을 것으로 생각되며, 배열 안테나 제어 소프트웨어 부분과 통신 회로를 포함한 하드웨어 부분과의 결합으로 위상배열 성능 검증용 시뮬레이터 제작에 높은 정확도와 기타 물리현상에 대해서 효과적으로 대처할 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] D. Mohney, "News analysis: SpaceX has a lot riding on Starlink's \$499 UFO on a stick," 2020. Available:

<https://spacenews.com/news-analysis-spacex-has-a-lot-riding-on-starlinks-499-ufo-on-a-stick/>

- [2] H. Park, "Gain over temperature(G/T) calculation and measurement for airborne AESA antennas," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 2, pp. 154-162, Feb. 2021.
- [3] J. Jung, J. Ryu, J. Park, and J. Seo, "A study on configuration of true time delay phase shifter for wideband beam steering phased array antenna," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 413-420, Jun. 2017.
- [4] M. Longbrake, "True time-delay beamsteering for radar," in *2012 IEEE National Aerospace and Electronics Conference(NAECON)*, Dayton, OH, Jul. 2012, pp. 246-249.
- [5] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.
- [6] K. M. Lee, I. Kang, J. Park, and M. Kim, "Antenna pattern analysis using S-parameters for strongly coupled dipole arrays," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, no. 5, pp. 1337-1340, May 2019.

조 준 녕 [고려대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9446-4196>



2020년 2월: 고려대학교 전기전자공학부 (공학사)
2020년 3월~현재: 고려대학교 전기전자공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] RF, mm-Wave 안테나, 테라헤르츠 회로 설계

김 기 철 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1652-5576>



2011년 2월: 광주과학기술원 (공학석사)
2016년 8월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
2007년 1월~2008년 11월: 삼성탈레스 연구원
2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] RF 회로 및 전력증폭기, 통신용 초고주파 기술

이 경 민 [고려대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1136-0071>



2015년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
2015년 3월~현재: 고려대학교 전기전자공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] mm-Wave 안테나, 테라헤르츠 회로 설계