

방향탐지용 멀티 베이 안테나의 어레이 매니폴드 성능 향상 방법

Improving Array Manifold Performance in Direction Finding Multi-Bay Antennas via Bay Spacing Optimization

노행숙 · 김강희 · 태기철 · 박광문

Haeng-Sook Ro · Kang-Hee Kim · Ki-Cheol Tae · Gwang-Moon Park

요 약

본 논문은 광대역 방향 탐지 시스템에서 멀티 베이 배열 안테나의 베이 간 간격을 조절하여 주파수 대역별 소자 간 상호 간섭을 최소화하는 방법을 제안한다. 이상적인 배열 안테나는 어레이 매니폴드를 수학적 모델링으로 구할 수 있지만, 실제 환경의 배열 안테나는 mutual coupling, 기구적 구조, 주변 환경 등의 요인으로 인해 이상적인 결과와 차이가 발생한다. 본 연구는 이러한 현실적인 요소들이 어레이 매니폴드에 미치는 영향을 최소화하기 위해 베이 간 간격을 조절하는 방법을 제시하고, 이를 통해 방향 탐지 정확도를 향상시킬 수 있음을 입증하고자 한다. 실험 결과, 제안된 방법이 어레이 매니폴드의 측정 결과를 개선하고 방향탐지 성능을 효과적으로 향상시킴을 보여주었다. 이 기술은 전파 탐지를 필요로 하는 민간 및 국방의 다양한 분야에서 광범위하게 활용될 가능성이 있다.

Abstract

This paper proposes a method to minimize the mutual interference between elements operating in different frequency bands in a multi-bay array antenna for wideband direction finding systems by optimizing the spacing between bays. Array antenna manifolds in practical environments often deviate from the ideal manifold obtained via mathematical modeling because factors such as mutual coupling, mechanical structure, and surrounding environmental conditions. The proposed method facilitates the optimization of the bay spacing to minimize the impact of these factors on the array manifold, thereby improving the direction finding accuracy. Experimental results demonstrate that the proposed method effectively improves the array manifold measurement and enhances direction finding performance. This technology holds strong potential for broad applications in various civil and defense fields requiring signal detection capabilities.

Key words: Direction Finding, Array Manifold, Array Antenna, Multi-Bay

I. 서 론

4차 산업혁명 시대의 급격한 발전으로 인해 다양한 무

선 통신 서비스가 증가하고 있으며, 이로 인해 전파 환경이 점차 복잡해지고 있다. 이러한 변화로 인해 전파 혼신과 통신 장애는 개인용 휴대기기부터 의료, 운송, 제조 등

「이 논문은 2024년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397992, 무선신호 탐지기술을 통한 선박식별 기술체계 개발).」

한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· Manuscript received September 12, 2024 ; Revised October 2, 2024 ; Accepted October 31, 2024. (ID No. 20240912-096)

· Corresponding Author: Haeng-Sook Ro (e-mail: hsno@etri.re.kr)

다양한 산업과 공공 안전 분야까지 통신 서비스 전반에 큰 혼란을 초래할 수 있으며, 이로 인해 전파 감시의 필요성이 더욱 커지고 있다. 이와 같은 전파감시 분야에 있어서 혼신 신호나 불법 신호원의 위치를 탐지할 수 있는 방향탐지 시스템은 전파 방해 요소를 효과적으로 해결하기 위한 장치로서 중요한 역할을 한다.

방향탐지 시스템에 있어서 배열 안테나를 이용한 송신원의 위치 추정에는 가장 많이 사용하고 있는 방탐 방법 중의 하나이다. 이 방법은 배열 안테나에 평면파가 입사된다고 가정할 때 각 배열소자의 모든 입사방향에 대한 위상과 진폭의 복소응답인 어레이 매니폴드^{[1]~[3]}를 이용하여 방향탐지 알고리즘을 수행함으로써 신호원의 위치를 추정하는 기술이다. 방향탐지 안테나에 있어서 이상적인 단일소자와 배열 구조로 배치되면 소자 간의 특성이 균일하고 상호 간섭이 최소화된다. 그러나 실제 배열 안테나는 제작 과정에서 소자의 조립 상태에 따라 성능 차이가 발생할 수 있으며, 다양한 배열 구조로 배치할 때 마스트 등 기구물의 구조적 영향으로 인해 이상적인 특성과 차이가 발생할 수 있다. 이러한 차이는 방향 탐지 정확도^{[1],[4]}에 영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서는 광대역 방향탐지 시스템에 적용할 멀티 베이 안테나 구조를 제안한다. 주파수 대역별 배열 안테나를 마스트의 분리된 섹션에 장착하고, 베이 간 간격을 조절하여 대역별 소자 간의 상호 간섭을 최소화함으로써 이상적인 어레이 매니폴드에 근접한 결과를 도출하고, 이를 통해 위치 추정 정확도를 향상시킬 수 있는 구조를 제시한다.

본 논문의 높이 가변 마스트를 이용한 멀티 베이 안테나는 이동형 방향탐지 차량에 탑재할 목적으로 제안되었다. 이는 차량의 운행조건에 따라 베이 간 간격을 조정하되 높이가 고정된 마스트에 장착한 기존의 멀티 베이 안테나에 비하여, 고정 혹은 저속 이동 시 간격을 넓혀 탐지 정확도를 향상시킬 수 있고, 고속 이동 시 간격을 줄여 기동성을 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 논문의 II장에서는 제안한 멀티 베이 안테나 구조를 설명하고, III장에서는 제안한 구조의 성능을 확인하기 위하여 어레이 매니폴드를 측정하여 이론치와 비교하였다. 제안한 멀티 베이 구조에 있어서 저대역 배열소자는

길이가 길고 고대역에 의한 가림현상이 적으나 고대역 배열소자는 저대역 소자에 비해 매우 짧아 상대적으로 긴 저대역 소자에 의해 가림현상이 생기거나 혹은 장애물로 작용하여 전파를 반사함으로써 어레이 매니폴드 결과를 저하시킬 우려가 있다. 따라서 본 논문에서 상대적으로 영향이 큰 고대역 주파수 범위에 대한 어레이 매니폴드와 방향탐지 정확도 결과만을 제시한다.

II. 방향탐지용 광대역 멀티 베이 안테나

방향탐지 시스템 안테나의 배열 형태로는 주로 선형이나 원형 배열이 사용되며, 특히 방위각 전 방향의 신호 탐지를 위해 원형 배열 구조가 널리 활용된다. 본 논문에서는 광대역 방향탐지 시스템에 적합한 등간격 원형 배열 구조를 다루며, 주파수 대역별로 배열 안테나를 마스트의 섹션별로 분리 배치하여 전체 주파수 대역을 커버하면서 대역별 간섭을 줄이는 방법을 제안한다.

그림 1은 반경 r 인 등간격 원형배열 안테나의 예로, 5개의 다이폴소자로 이루어진 구조를 보여준다. 이 그림에서 각 소자에 대해 θ 와 ϕ 방향의 입사 신호에 대한 모든 방향 복소응답의 집합이 어레이 매니폴드이다. 정확한 위치 탐지를 위한 방향탐지 알고리즘에서는 신호가 입사되는 모든 방향에 대한 각 안테나 소자의 어레이 매니폴드가 필수적이며, 이 어레이 매니폴드 결과의 정확도는 방향탐지 정확성에 직접적으로 영향을 미친다. 이상적인 배열 안테나에서는 어레이 매니폴드를 수학적 모델링으로 구할 수 있지만, 실제 배열 안테나에서는 상호 결합, 기구

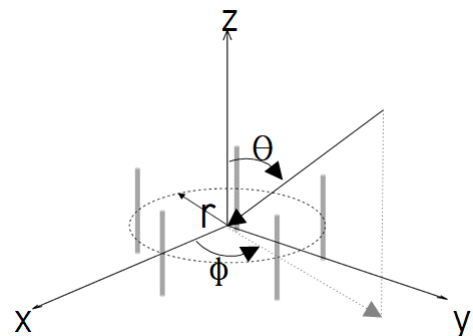


그림 1. 등간격 원형배열 안테나
Fig. 1. Uniform circular array antenna.

적 구조, 주변 환경 등의 요소로 인해 이상적인 성능과 차이가 발생한다. 특히 광대역 방향탐지 안테나에서는 단일 배열로 전체 주파수 대역을 커버하기 어렵기 때문에, 그림 2와 같이 대역별로 멀티 베이 구조를 가질 수 있다.

그림 2에서 고정 마스트는 베이 간 고정 간격 H_{fix} 를 가진 형태이다. 이 고정된 간격은 다른 베이 배열소자 간의 간격이 좁을수록 상호 간섭이 증가할 수 있어, 위상과 진폭의 mismatch로 인해 어레이 매니폴드 결과가 악화될 수 있으며, 이는 방향탐지 정확도의 저하로 이어질 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 광대역 방향탐지 시스템의 멀티 베이 배열 구조에서 베이 간격을 가변적으로 조정하여 대역 간 소자 간섭을 최소화하기 위한 방법으로, 그림 3과 같이 높이 가변형 멀티 베이 배열 안테나를 제안한다. 그림 3에서 각 대역별 배열소자는 가변 마스트의 섹션-1과 섹션-2에 장착되어 있다. 그림 3(a)와 같이 섹션-2의 높이를 H_{low} 로 조절하여 대역별 소자 간 간격을 좁힐 수도 있고, 그림 3(b)와 같이 섹션-2의 높이를 H_{high} 로 연장하여 간격을 넓힐 수도 있다.

III. 어레이 매니폴드

표 1은 본 논문에서 제안하는 높이 가변형 안테나 사양을 제시하고 있다. 표 1에서 λ_{Lc} , λ_{Hc} 는 각각 V/UHF 대역 내의 저/고대역 중심주파수에 해당하는 파장을 나타내며, 그림 4는 이 구조의 형상을 보여준다.

그림 4에 있어서, 마스트를 기준선으로부터 각각 A에서 B만큼 정해진 높이를 가변할 수 있다. 제시한 안테나의 어레이 매니폴드를 측정하여 그 결과를 비교하기 위하여 그림 5와 같이 측정 환경을 구성하였다.

그림 5에 의하면 무반향 측정실에 송신안테나와 측정

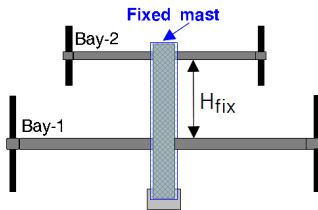
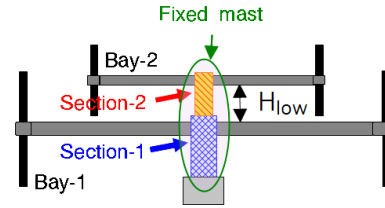
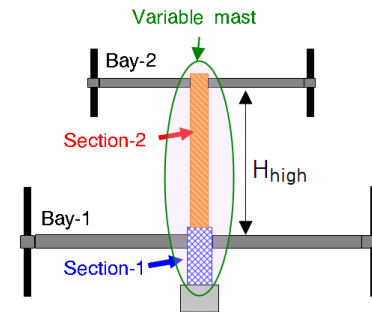


그림 2. 기존의 멀티 베이 배열 안테나
Fig. 2. Traditional multi-bay array antenna.



(a)

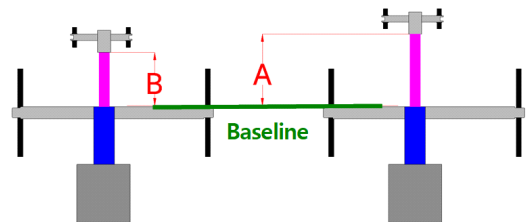


(b)

그림 3. 높이 가변형 멀티 베이 배열 안테나
Fig. 3. Adjustable height multi-bay array antenna.

표. 1. 높이 가변형 안테나 사양
Table 1. Height-adjustable mast antenna specification.

Specification		
Antenna type	5-element/2-bay antenna	
Array radius	Bay-1	$0.62 \lambda_{Lc}$
	Bay-2	$0.75 \lambda_{Hc}$
Element length	Bay-1	$0.54 \lambda_{Lc}$
	Bay-2	$0.52 \lambda_{Hc}$
Variable height of the mast [mm]	Mast-up (A)	250
	Mast-down (B)	177



(a)

(b)

그림 4. 높이 가변형 안테나 형상
Fig. 4. Height-adjustable mast antenna configuration.

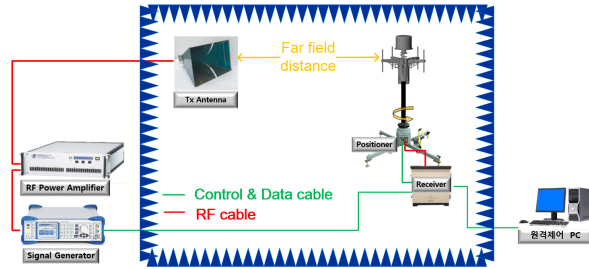


그림 5. 어레이 매니폴드 측정 구성도
Fig. 5. Array manifold measurement configuration.

대상 배열 안테나를 설치 후 높이를 정렬하고, farfield 거리만큼 이격하여 송수신 장비 및 포지셔너를 설치한다.

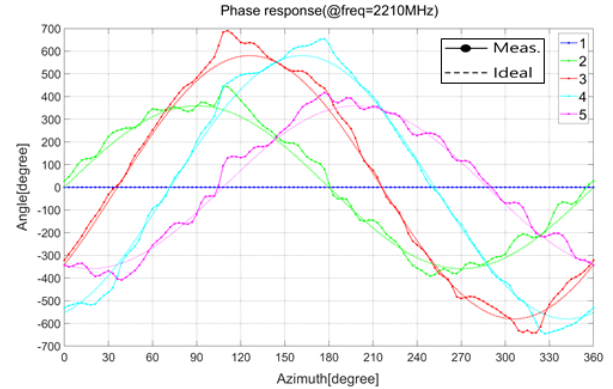
5개의 다이폴소자를 갖는 원형배열 안테나에 있어서 배열소자 1번을 기준안테나로 하여 방위각 0° 로 설정한 후 신호발생기와 RF전력 증폭기, 송신 안테나를 통하여 신호를 송신하여 각 배열소자들의 출력포트에서 수신한 응답특성을 측정한다^[5]. 방위각 0° 에 대한 측정이 끝나면 포지셔너를 α° 간격으로 회전시켜가면서 360° 까지 응답 특성을 측정하여 어레이 매니폴드를 구할 수 있다. 이때 측정각도의 간격이 적을수록 방탐 정확도가 향상될 수 있으나 데이터량의 증가로 측정 및 방탐알고리즘 계산 시간이 증가될 수 있어 적절한 간격선택이 중요하다.

그림 6은 고대역의 어레이 매니폴드 이론치와 측정치 비교결과로서 방위각 회전간격을 $\alpha=3^\circ$ 로 측정한 것이다. 그림 6(a) 및 그림 6(b)는 마스트 높이를 각각 177 mm와 250 mm로 변경했을 때의 어레이 매니폴드 결과이다. 마스트 높이를 177 mm에서 250 mm로 연장하여 저/고대역 배열소자 간의 간격이 넓어지면, 대역소자 간의 간섭이 감소하여 방위각 $0\sim 360^\circ$ 각도 변화에 따른 위상의 이론치 대비 측정치의 오차가 향상됨을 알 수 있다.

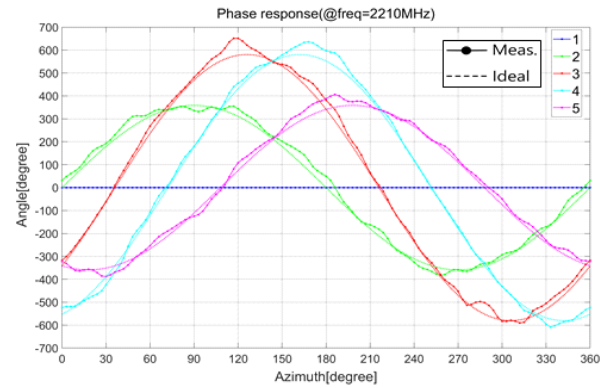
표 2는 마스트 높이를 177 mm에서 250 mm로 증가시켰을 때, 그림 6에 따른 주파수 2, 210 MHz에서 어레이 매니폴드의 위상 오차를 제시한 것으로써 14.22°rms 개선된 결과를 보여준다.

IV. 방향탐지 정확도

본 장에서는 MUSIC(multiple signal classification)알고리



(a)



(b)

그림 6. 고대역 어레이 매니폴드 결과 (@2,210 MHz)

Fig. 6. High-band array manifold results.

표. 2. 고대역 어레이 매니폴드 위상 오차

Table. 2. High-frequency array manifold phase error.

Item	Mast-down	Mast-up
Variable height of the mast [mm]	177	250
Error between the measured and the theoretical value [$^\circ\text{rms}$]	37.04	22.82

즘^{[6],[7]}을 적용한 가변 마스트 구조의 높이변화에 따른 방탐 정확도 결과를 제시한다. 표 3은 그림 4의 안테나에 있어서 고대역 전 주파수 범위에 대한 마스트 높이 변화에 따른 방위각 $0\sim 360^\circ$ 각도 범위의 방탐 정확도 비교결과이다. 이때 3° 간격의 응답특성에 대해 검정을 위해서는 대역 내 측정파수 104개를 5° 간격으로 샘플링하였다.

마스트 높이를 177 mm에서 250 mm로 증가시키면 고

표. 3. 고대역 안테나의 방탐 정확도

Table. 3. High-band antenna's direction finding accuracy.

Item	Mast-down	Mast-up
Variable height of the mast [mm]	177	250
(A) Number of measurement frequencies [ea]	104	104
(B) Number of test angles [ea]	73	73
(C) Number of samples=A×B [ea]	7,592	7,592
Direction finding accuracy [°rms]	0.896	0.350

대역 전체 주파수 범위 내에서 방탐 정확도는 0.546 °rms 향상되며, 이는 마스트 높이의 증가가 시스템 성능 향상에 긍정적인 영향을 미쳤음을 의미한다.

V. 결 론

본 논문은 광대역 방향탐지 시스템에서 멀티 베이 배열 안테나의 대역별 소자 간섭을 최소화하기 위해 베이 간 간격을 조절하는 방법을 제시하였다. 실제 2-bay 원형 배열 안테나를 제작하여 측정한 결과, 제안된 방법이 어레이 매니폴드의 측정 결과를 개선하고 방향 탐지 성능을 향상시키는 데 효과적임을 확인하였다. 본 기술은 이동 차량을 이용한 전파 모니터링 시스템에서 이동 시에 안테나 높이를 최소화하여 안정성과 기동성을 높이고, 신호 측정 시 안테나 전체 높이를 늘려 대역별 베이 간 간격을 확장함으로써 배열소자 간의 상호 간섭을 줄여 방향탐지 성능을 향상시킬 수 있는 방법으로, 국가 전파 관리 업무, 불법 전파 탐지 등의 민간 분야는 물론, 전파 방해 및 혼신원의 위치를 파악하는 국방 분야에서도 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] J. H. Kim, C. H. Cho, "Performance analysis of direction finding systems using EM simulation-based array Manifolds," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 10, pp. 1166-1172, Oct. 2012.
- [2] J. S. Lim, "Direction finding method of the uniform circular array antenna using the pattern of phase differences," *Journal of Korean Convergence Society*, vol. 10, no. 1, pp. 1-6, Jan. 2019.
- [3] J. S. Park, H. S. Shim, J. I. Ahn, and K. H. Song, "Array manifold measurement and verification for UCA calibration in multistatic PCL System based on FM Broadcasting," *Journal of the KIMST*, vol. 24, no. 2, pp. 165-174, Apr. 2021.
- [4] J. I. Choi, S. W. Kim, H. C. Chin, and W. H. Choi, "A study on the improvement of direction error for electronic warfare system," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS)*, vol. 18, no. 6, pp. 567-575, Jun. 2017.
- [5] H. Y. Kang, S. Y. Lee, Y. S. Kim, C. J. Kim, and H. K. Park, "Spatial spectrum estimation of incident signal via measured array manifold," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 15, no. 3, pp. 223-230, Mar. 2004.
- [6] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [7] H. Krim, M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: The parametric approach," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, Jul. 1996.

노 행 숙 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0004-6896-7848>



시스템 등

1995년 2월 단국대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 8월 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 5월~현재: 한국전자통신연구원
책임연구원
[주 관심분야] 안테나공학, 전파모니터링

태 기 철 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0001-2906-7247>



처리 등

1999년 2월 전북대학교 정보통신공학과 (공학사)
2001년 2월 전북대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2001년 2월~현재: 한국전자통신연구원
책임연구원
[주 관심분야] 전파모니터링 시스템, 신호

김 강 희 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-9955-1054>



책임연구원

2022년 1월~현재: 전파모니터링 전문연구실 사업 책임자
[주 관심분야] 임무기반 전파모니터링 시스템 설계/최적화, 무선통신 분석, 배열 신호처리

1999년 2월 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2001년 2월 광주과학기술원 정보통신공학 (공학석사)
2005년 2월 광주과학기술원 정보통신공학 (공학박사)
2005년 2월~현재: 한국전자통신연구원

박 광 문 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9585-9958>



구원

2000년 10월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
[주 관심분야] 스펙트럼 추정, 배열신호처리, AI 등

1993년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1995년 2월 경북대학교 전파공학과 (공학석사)
2010년 2월 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
1995년 3월~2000년 9월: LG정밀 주임연