

안테나 배치에 따른 TDOA 방식의 방위탐지 오차

임중수^{1*}

¹백석대학교 정보통신학부

The Direction Finding Error of TDOA Method According to the Antenna Arrangement

Joong-Soo Lim^{1*}

¹Division of Information Communication Eng., Baekseok University

요약 전파 신호원의 방위를 정확하게 찾는 기술은 전자전에서 매우 중요하다. 전파 신호원의 방위를 찾기 위한 방위탐지 기술이 많이 연구되고 있으며, 최근에는 신호 도착시간차이(TDOA)를 이용하는 방위탐지 연구가 많이 진행되고 있다. TDOA 기술은 두 개의 배열 안테나에 도달하는 신호의 도착시간차이를 이용하여 신호원의 방위를 도출하는 방식이며, 방위탐지 오차는 배열 안테나의 기준선 길이와 시간측정 분해능과 관련이 있다. 본 논문에서는 10m*10m의 제한된 공간에서 안테나 배치 방법과 이에 대한 방위탐지 오차를 분석하여 최적 안테나 배치 방법을 제시하였다.

Abstract A direction finding(DF) technology of a signal is very important for electronic warfare and has studied for a long time. The method of TDOA(time difference of arrival) is one of good DF methods in this time, and that is to receive an emitter signal with two antennas, to measure the time difference of a signal at two antennas, and converse the time difference to direction of the signal. For small DF error, high time resolution receiver and long baseline are needed. In this paper we suggest a good baseline with adaptive antenna arrangement into 10m*10m area.

Key Words : Direction finding, TDOA, Arrangement, Baseline, Time Resolution, Antenna

1. 서론

전파를 발생하는 신호원의 방위와 위치를 찾는 것은 매우 중요하다. 그러나 전파 신호원의 방위를 수동식(passive)으로 찾는 방법은 매우 어렵다. 전파를 사용하여 표적의 방위를 탐지하는 방법 중에서 레이더처럼 장비가 전파를 발생하여 방사한 뒤에 반사파를 수신하여 표적의 방위를 탐지하는 방식을 능동식(active) 방위탐지라 부르고, 전파감시거나 전자전장비처럼 상대방이 전파를 방사하면 상대방의 전파를 수신만하여 신호원의 방위를 탐지하는 방식을 수동식 방위탐지 방식이라 부른다[1,2].

전파감시장비나 전자전장비에 사용되는 수동식 방위탐지 기술은 20세기 초에 시작되어 2차 세계대전 이후 계속 발전하여 왔으며, 1980년대 이후에는 초고주파를

사용하는 레이더나 무전기가 많이 개발되어서 초고주파 대역의 방위탐지 기술이 많이 발전하였다.

방위탐지 기술은 수신되는 전파의 진폭차, 위상차, 시간차, 주파수 차이 등을 이용한다. 1980년대에는 진폭비교 방위탐지 기술, 1990년대에는 위상비교 방위탐지 기술이 많이 사용되었으나 2000년 이후에는 신호도착 시간차(TDOA)와 도착신호 주파수차(Frequency Difference of Arrival: FDOA)방법이 많이 연구되고 있다[3].

TDOA 기술은 전파 신호원에서에서 방사된 전파가 전파 감시장비의 방위탐지용 배열안테나에 도달하는 전파의 도착 시간차를 이용하여 신호원의 방위를 탐지하는 방식이다. 이러한 신호의 도착 시간차를 이용하는 방법은 1980년대부터 잠수함 탐지를 위해서 수중에서 초음파 센서를 사용하는 소나(sonar) 배열시스템에 사용되었다. 수

*교신저자 : 임중수(jslim@bu.ac.kr)

접수일 10년 09월 30일

수정일 10년 11월 18일

게재확정일 10년 11월 19일

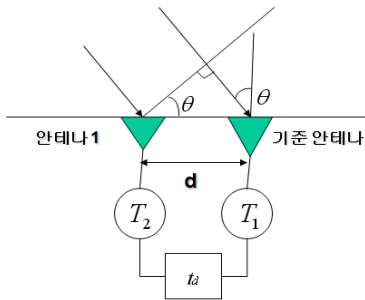
중에서 음파의 속도는 약 $1.1 \cdot 10^3$ m/sec 로 전파의 속도보다 매우 느리기 때문에 음파의 도착시간차를 측정하기가 쉬워서 일찍 실용화가 가능하였다[4].

본 논문에서는 TDOA 기술을 항공기나 차량에 탑재하는 전파감시시스템에 사용하는 경우에 제한된 공간에 안테나를 설치해야 하기 때문에 물리적으로 제한된 공간에서 안테나를 배치할 경우 배열안테나의 배치방법에 따른 안테나 상호간의 배치간격(또는 기준선), 방탐안테나의 빔폭에 따른 방탐오차를 분석하였다.

일반적인 TDOA 기술은 배열안테나 기준선이 길고 두 안테나에 신호가 도착한 시간차이를 측정하는 시간측정 분해능이 좋아야 방위탐지 오차가 작아진다. 항공기나 차량은 물리적으로 크기가 제한되어 있어 배열안테나 간격을 길게 할 수 없어서 2000년대 이전에는 많이 개발되지 않았으나, 최근에 와서 시간측정 분해능이 나노 초까지 가능해서 짧은 안테나 기준선에도 방위탐지 오차가 작아져서 미국, 스웨덴, 체코 등에서 장비를 개발하여 사용하고 있다[5][6].

2. TDOA 방위 탐지 원리

TDOA 기술을 사용하는 방위탐지 방식은 위상비교 기술을 사용하는 방위탐지 방식과 유사하지만, 위상비교 방탐 방식은 두 개의 배열안테나에 도착하는 신호의 위상차를 측정하는 것에 비해서 TDOA 방식은 두개의 배열안테나에 도착하는 신호의 시간차를 측정하여 방위를 계산하는 것이다.



[그림 1] TDOA 방위탐지 원리

그림 1은 배열 안테나와 시간 측정장치로 구성된 TDOA 방위탐지 장비이다. 여기에서 기준안테나와 안테나 1의 거리를 d 라하고, 에미터 신호의 입사각을 θ (rad.), 전파의 속도를 c 라 두면, 두 안테나에 도달하는 에미터

신호의 시간차(t_d)는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[3].

$$t_d = \left(\frac{d}{c} \right) \sin \theta \quad (1)$$

방위탐지 오차를 구하기 위해서 식 (1)을 미분하여 방위탐지 오차각 $\Delta\theta$ 에 대해서 정리하면 식 (2)와 같이 된다. 여기에서 $\Delta(t_d)$ 는 시간측정 오차이며 Δd 는 기준선 길이 오차이다.

$$\Delta(t_d) = \left(\frac{d \cdot \cos \theta}{c} \right) \Delta\theta + \frac{\sin \theta}{c} \cdot \Delta d \quad (2)$$

식 (2)에서 기준선 길이 d 는 정확하게 측정할 수 있으므로 Δd 를 0으로 가정하면 방위탐지 측정오차는 식 (3)과 같이 되며 단위는 라디안(radian)이다

$$\Delta\theta = \left(\frac{c}{d \cdot \cos \theta} \right) \Delta(t_d) \quad (3)$$

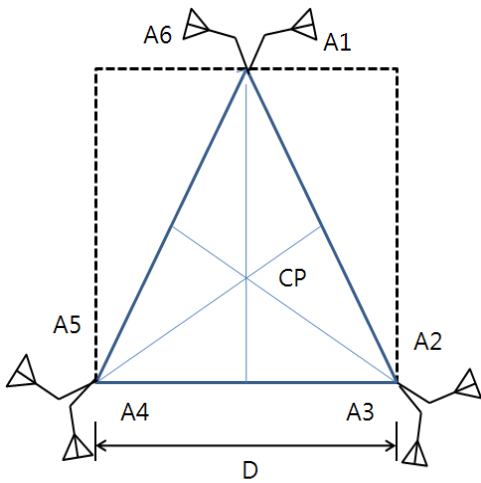
3. 안테나 배열 방법

TDOA 기술의 방위탐지 오차는 식 (3)에서 보는 바와 같이 안테나 사이의 거리와 시간측정 정확도에 의해서 결정되며 안테나의 이득과는 관계가 적다. 따라서 TDOA에 사용되는 안테나 규격은 진폭비교에 사용되는 안테나 규격보다 까다롭지 않다[7].

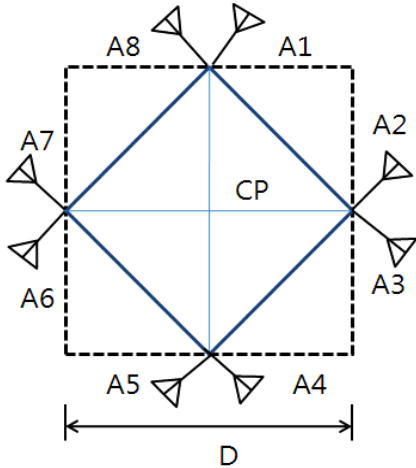
TDOA용 안테나를 배치할 경우에 방위 오차를 작게 하기 위해서는 안테나 사이의 기준선이 길고, 기준선이 담당하는 입사신호의 각도범위가 작아야 한다. 본 연구에서는 10m*10m 영역에서 최적의 안테나 배치 방법을 찾기 위해서 그림 2-그림 4와 같이 삼각형, 사각형, 육각형 모양의 기준선을 갖는 안테나 배치를 연구하였다.

TDOA에 사용되는 안테나는 각 안테나의 기준선이 담당해야하는 입사신호의 각도범위에 따라서 빔폭이 결정된다. 예를 들면 그림 2와 같이 삼각형 형태의 기준선에 6개의 안테나를 사용하여 360도 전방위의 신호를 수신할 경우 각 기준선의 담당 범위는 120도가 되며, 이 때 사용되는 각 안테나의 3dB 빔폭은 120도 이상이 요구된다.

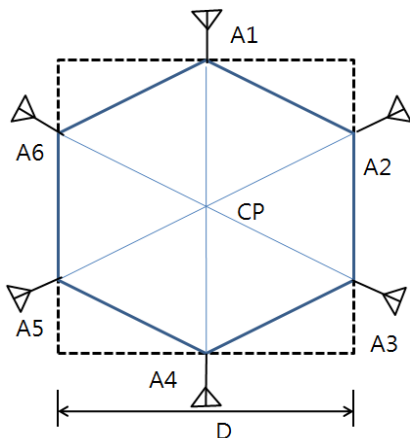
또한 그림 3과 같이 사각형 형태의 기준선에 8개의 안테나를 사용하여 360도 전방위의 신호를 수신할 경우 각 기준선의 담당범위는 90도가 되며, 이 때 사용되는 각 안테나의 3dB 빔폭은 90도 정도가 요구된다.



[그림 2] 삼각형 기준선과 6개의 안테나



[그림 3] 사각형 기준선과 8개 안테나



[그림 4] 육각형 기준선과 6개 안테나

그림 4와 같이 육각형 형태의 기준선에 6개의 안테나를 사용할 경우 각 기준선의 탐색 범위는 60도이지만, 각 안테나는 좌우 두 개의 기준선에서 동시에 사용되므로, 이 때 사용되는 각 안테나의 3dB 빔폭은 120도가 요구된다.

앞에서 분석한 바와 같이 초고주파 방위탐지용으로 사용되는 안테나는 3dB 빔폭이 넓어야 한다. 초고주파 대역에서 구조가 간단하면서 빔폭이 넓은 안테나로 스파이럴 안테나가 많이 사용된다. 스파이럴 안테나는 그림 5와 같이 유전체 위에 좁은 금속면을 나선형으로 회전시켜서 간단하게 만들 수 있으며, 광대역 주파수 범위에서 사용하기 위해서는 그림 6과 같이 나선형 기판 뒤에 일정한 길이를 갖는 발룬을 접지하여 제작 한다.

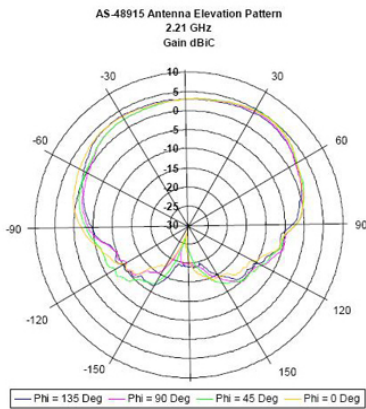
스파이럴 안테나의 빔 형태는 그림 7과 같이 넓은 주엽을 지니고 있으며 부엽과 후엽은 매우 작아서 넓은 입사각에서 도래하는 신호들을 잘 수신할 수 있다.



[그림 5] 유전체 위에 좁은 금속면으로 구성된 스파이럴 구조



[그림 6] 나선형 기판 후면에 접지된 발룬 (Q-par Angus Ltd. 제공)



[그림 7] 스파이럴 안테나 빔 패턴

4. 방위탐지 오차 모사

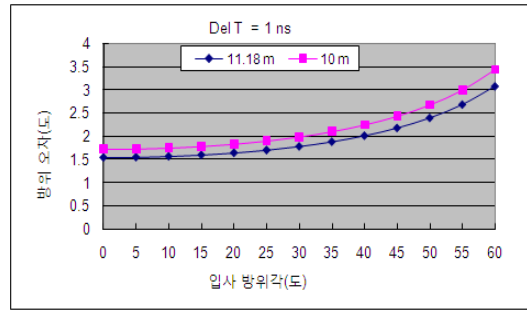
방위탐지 오차는 앞에서 유도한 식 (3)에서 기준선의 길이와 신호의 입사각 코사인값($\cos \theta$)에 반비례하고, 시간측정 오차에 비례한다. 따라서 TDOA 방식의 방위 오차는 기준선의 길이, 시간측정 오차와 $\cos \theta$ 에 의해서 결정된다.

식 (3)에서 방위탐지 오차각 $\Delta \theta$ 의 단위를 라디안에서 도(degree), $\Delta(t_d)$ 의 단위를 초에서 나노초(ns)로 사용하면 식(3)은 식(4)와 같이 된다.

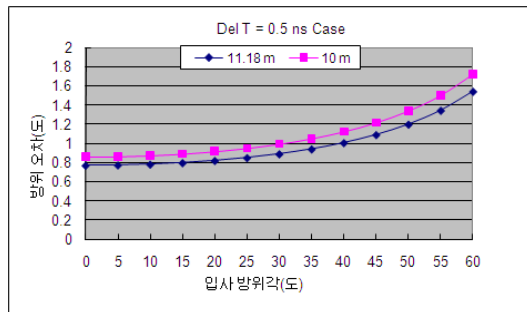
$$\Delta \theta = \left(\frac{17.2}{d \cdot \cos \theta} \right) \Delta(t_d) \quad (4)$$

그림 2에서 D를 10m로 하고 A1을 상변의 중앙에 배치하면, A1과 A2 안테나로 구성되는 기준선의 길이는 11.18m, A3와 A4 안테나로 구성되는 기준선의 길이는 10m이다. 이 경우 $\Delta(t_d)$ 가 1ns와 0.5ns 일 때 각 기준선별 입사방위각에 따른 방위오차는 그림 8, 그림 9와 같다. 방위오차는 기준선의 중심에서 가장 작고 좌우 대칭이므로 그림 8, 그림 9에서는 기준선의 중심에서 시계 방향으로 60도 범위에서만 방위오차를 측정하였다.

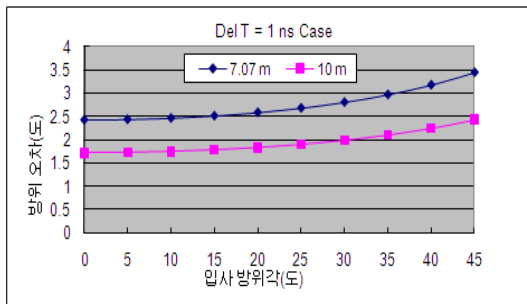
그림 3에서 D를 10m로 하고 A1을 상변의 중앙에 배치하면, A1과 A2 안테나로 구성되는 기준선의 길이는 7.07m, A3와 A4 안테나로 구성되는 기준선의 길이도 7.07m이다. 이 경우 $\Delta(t_d)$ 를 1ns와 0.5ns로 두면 각 기준선별 입사방위각에 따른 방위오차는 그림 10, 그림 11과 같다.



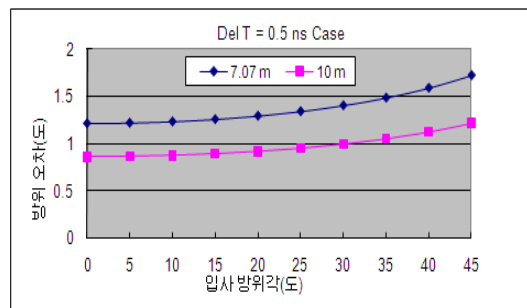
[그림 8] 입사 방위각별 방위오차($\Delta(t_d)=1ns$)



[그림 9] 입사방위각별 방위오차($\Delta(t_d)=0.5ns$)

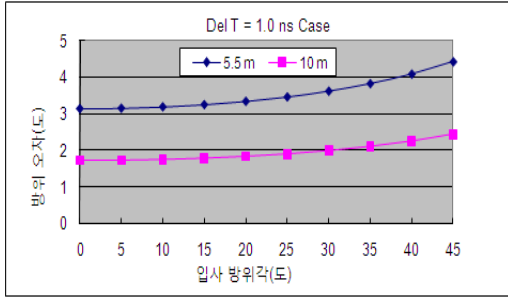


[그림 10] 입사방위각별 방위오차($\Delta(t_d)=1ns$)

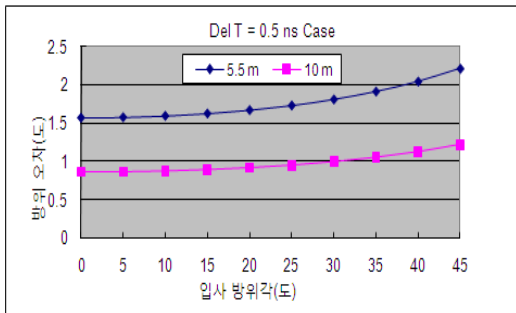


[그림 11] 입사방위각별 오차($\Delta(t_d)=0.5ns$)

그림 4에서 D를 10m로 하고 A1을 상변의 중앙에 배치하면, A1와 A2 안테나로 구성되는 기준선의 길이는 5.5m, A2와 A3 안테나로 구성되는 기준선의 길이도 5.5m이다. 이 경우 $\Delta(t_d)$ 를 1ns와 0.5ns로 두면 입사방위각에 따른 방위 오차는 그림 12, 그림 13과 같다.



[그림 12] 입사방위각별 방위오차($\Delta(t_d)=1ns$)



[그림 13] 입사방위각별 오차($\Delta(t_d)=0.5ns$)

표 1은 그림 2-그림 4에서 제시한 안테나 기준선에서 신호의 입사방위각이 0도, 30도 일 때 방위오차를 나타내었으며, 기준선이 긴 삼각형 배치가 방위오차가 작은 것을 알 수 있다. 또한 표 2는 각 기준선의 최대 입사방위각에서 방위오차 값이다.

그림 14는 각 기준선의 신호수신 각도범위를 고려한 방위오차이다. 기준선을 그림 2와 같이삼각형으로 배치한 경우 각 기준선의 신호수신 담당범위는 120도이지만 좌우 대칭이므로 60도 범위만 표현하였으며, 입사각 0도에서 최소오차, 60도에서 최대오차가 발생한다.

기준선을 그림 3과 같이 사각형으로 배치한 경우 각 기준선의 신호수신 담당범위는 90도이지만 좌우 대칭이므로 45도 범위만 표현하였으며, 입사각 0도에서 최소오차, 45도에서 최대오차가 발생한다. 또한 기준선을 육각형으로 배치한 경우 신호 수신 담당범위는 60도이며 좌우 대칭이므로 30도 범위만 표현하였으며, 입사각 0도에

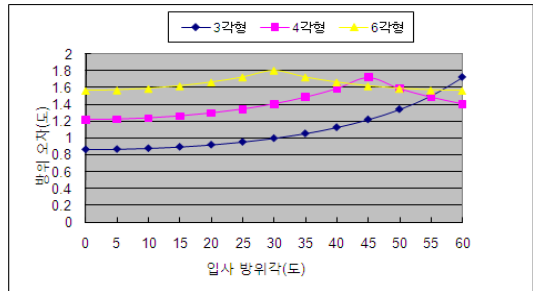
서 최소오차, 30도에서 최대오차가 발생한다.

[표 1] 입사방위각별 오차 ($\Delta(t_d)=0.5ns$)

배치 형태	기준선 길이(m)	입사 각(도)	오차 (°)	입사 각(도)	오차 (°)
3각형	10.0	0	0.86	30	0.98
3각형	11.2	0	0.78	30	0.89
4각형	7.07	0	1.21	30	1.40
6각형	5.5	0	1.5	30	1.81

[표 2] 최대입사각과 방위오차($\Delta(t_d)=0.5ns$)

배치 형태	기준선 길이(m)	최대입사 각(도)	최대방위오차(°)	안테나 수
3각형	10.0	60	1.72	6
3각형	11.2	60	1.54	6
4각형	7.07	45	1.72	8
6각형	5.5	30	1.81	6



[그림 14] 입사방위각별 오차($\Delta(t_d)=0.5ns$)

5. 결론

본 논문에서는 제한된 영역에서 안테나 배치 효과를 연구하기 위해서 가로와 세로가 10m* 10m 인 제한된 영역에 기준선을 삼각형, 사각형, 육각형의 구조로 배치하고 각 경우에 방위 오차를 계산하였다.

안테나 6개를 사용하여 기준선이 삼각형 구조인 경우 신호 측정 오차가 0.5ns인 경우, 기준선에 대한 신호 입사방위에 따른 방위오차는 입사방위각 0도에서 0.78°, 입사각 60도에서 최대 1.72° 가 되었다.

안테나 8개를 사용하여 기준선이 사각형 구조인 경우 신호측정 오차가 0.5ns인 경우 방위오차는 입사방위각 0도에서 1.21° 입사방위각 45도에서 최대 1.72° 가 되었다.

안테나 6개를 사용하여 기준선이 육각형 구조인 경우 신호측정 오차가 0.5ns인 경우 입사방위각 0도에서 1.5° 입사방위각 30도에서 최대 1.81°가 되었다.

따라서 제한된 영역에서 3dB 빔폭이 120도 이상인 안테나를 사용하는 경우 삼각형 구조가 사각형, 육각형 구조보다 평균 방위오차와 최대 방위오차가 작아서 방위 측정용 안테나 배치에 최 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Richard G. Wiley, *ELINT, The interception and analysis of radar signals*, Artech House, Boston, 2006.
- [2] G. D. Curtis Schleher, *A Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, Boston, 1999.
- [3] Filippo Neri, *Introduction to electronic Defense Systems(2nd Edition)*, Artech House, Boston, 2001.
- [4] Carter G. C. "TDOA delay estimation for passive sonar signal processing", *IEEE Trans. on Acoustics, speech, signal processing*, vol. 29, no 3, pp. 463-470, June 1981.
- [5] Kumar Gaurav Chhokra, et. al., "Accuracy Enhancements for TDOA Estimation on Highly Resource Constrained Mobile Platforms", *Technical Report, ISIS-03-402*, Vanderbilt University, Oc., 2003.
- [6] Aysegul Dersan, Yalcin Tanik, "Passive Radar Location By Time Difference of Arrival", *IEEE Trans. on Ant. and Propagation*, pp. 1251- 1257, March 2002.
- [7] 임중수 외 2, "TDOA 기법을 활용한 ELINT 장비의 정확도 분석", 산학기술학회논문집, 제12권, 제11호, pp. 20-25, 11월, 2009.

임 중 수 (Joong-Soo Lim)

[종신회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과(공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University Dept. of EE(공학박사)
- 1994년 1월 ~ 2003년 2월 : 국방과학연구소 책임 연구원/ 전파 탐지 팀장
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 2004년 1월 ~ 현재 : 한국군사과학회 편집위원
- 2007년 1월 ~ 현재 : 한국전자과학회 정보전자연구회 위원장

<관심분야>

전자파 수치 해석, 초고주파 시스템 설계, 방위탐지 장치 설계, 레이더 설계, 전자전 시스템 설계