

위상비교와 시간차를 복합한 정밀 방향탐지 기술

임중수^{1*}

¹백석대학교 정보통신학부

An Accurate Direction Finding Technology Using a Phase Comparison and Time Difference of Arrival

Joong-Soo Lim^{1*}

¹Division of Information Communication, Baekseok University

요 약 본 논문에서는 배열안테나에 도달한 전파의 위상차와 시간차를 이용하여 방향탐지 정확도가 높고 방향모호성이 없는 새로운 방향탐지 기술을 제안하였다. 21세기의 전자정보시스템에는 배열 안테나에 도달하는 신호의 위상차를 이용하는 위상차 방향탐지 방식 또는 배열안테나에 도달하는 신호도착 시간차를 이용하는 방향탐지 방식이 주로 사용되고 있다. 시간차를 이용하는 방식은 장치구성은 간단하지만 좁은 안테나 배치공간에서는 방향탐지 정확도가 나쁘고, 위상차 방식은 좁은 안테나 배치공간에서도 방향탐지 정확도는 높으나 방향모호성이 발생한다. 본 논문에서는 두 방식의 장점을 결합한 방향탐지 정확도가 높고 방향모호성이 없는 새로운 방향탐지 기술을 제안하였으며, 실제 운용환경과 유사한 잡음환경에서 방향탐지 오차를 모사하여 제안된 방식의 우수성을 입증하였다.

Abstract In this paper, we proposed a new direction finding(DF) technology using TDOA(time-difference of arrival) and PDOA(phase difference of arriving signal) method. The proposed technology has a good DF accuracy without DF ambiguity. TDOA or PDOA technology is used to the most of intelligence systems in 21 century. The principle of TDOA is to receive a signal with two parallel antennas, measure the time difference of arrival signal, and converse the time difference to the direction of incident signal. Those technology make a DF system small size but the DF accuracy is low into short antenna installation distance. The principle of PDOA is similar to TDOA except measuring the phase difference of arrival signal, These technology get a good DF accuracy in short antenna installation distance but have a DF ambiguity. The proposed DF method is simulated into DF system operation environment with noise, and has a good DF accuracy.

Key Words : Direction finding, TDOA, PDOA, Time Resolution, ELINT, Antenna

1. 서론

전파를 송수신하는 무선기기를 마르코니가 발명한 이후로 전파를 이용한 표적의 위치탐지, 조난구조, 안전항행 등의 기술이 지속적으로 발전되어 왔다. 전파를 이용하여 물체의 방향을 탐지하는 방식에는 레이더가 사용하는 능동식 방향탐지(이하 방탐)와 전자정보(electronic intelligence: ELINT)시스템이 사용하는 수동식(passive) 방탐방식이 있다. 능동식 방탐방식은 자신이 전파를 방사한 뒤에 반사신호를 수신하는 방식이고, 수동식 방탐방식

은 자신이 전파를 방사하지 않고 상대방이 방사하는 전파를 수신만하여 상대방의 방향을 찾는 방식을 말한다 [1].

전자정보시스템의 방탐기술은 2000년도 이전에는 배열안테나에 도달하는 신호의 진폭크기를 비교하는 진폭비교 방탐기술과 위상을 비교하는 위상차(Phase Difference of Arriving signal: PDOA) 방탐기술이 많이 사용되었으나 2000년도 이후에는 신호가 배열안테나에 도착하는 시간차를 이용하는 시간차(Time Difference of Arrival: TDOA) 방탐기술이 점차 많이 사용되고 있다[2].

*교신저자 : 임중수(jslim@bu.ac.kr)

접수일 11년 08월 22일

수정일 (1차 11년 10월 26일, 2차 11년 11월 04일)

게재확정일 11년 11월 10일

TDOA 방식은 장치구성이 간단하고 광대역 주파수에서 사용이 가능하지만 안테나 설치간격(이하 기준선)이 짧으면 방탐정확도가 낮아진다. 위상비교 방탐방식은 짧은 안테나 기준선에서 방탐정확도는 높으나 기준선이 입사전파의 반파장보다 길면 방향모호성이 나타난다[3].

본 논문에서는 TDOA 방식을 이용해서 방향 모호성을 해결하고, PDOA 방식을 이용해서 높은 방탐정확도를 얻는 모호성이 없고 방탐정확도가 높은 TDOA-PDOA 방탐 기술을 제안하였다.

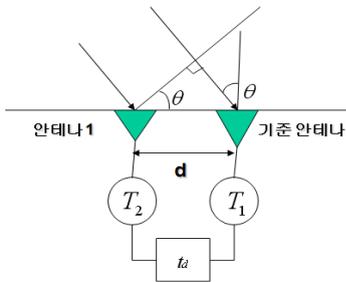
2. 전파의 방향탐지 기술 분석

2.1 TDOA 방향탐지

TDOA 방식이 초고주파 방탐기술에 많이 응용된 것은 2000년 이후 시간측정 정밀도가 매우 높아진 이후이다. TDOA 방탐의 원리는 그림 1과 같이 2 개의 안테나와 1 개의 시간차측정기를 갖는 TDOA 방탐장치로 설명할 수 있다. TDOA 방탐기술은 그림 1에서 입사전파가 수신기의 두개의 안테나에 도착하는 시간차를 측정하여 전파의 입사방향을 계산하는 것이다.

그림 1에서 기준안테나와 안테나 1 사이의 기준선 거리를 d 라하고, 전파의 입사각을 θ , 전파의 속도를 c 라 하면, 두 안테나에 도달하는 전파의 도착시간차(t_d)는 식 (1)과 같이 표현되며, 이 때 이격거리 d 의 단위는 m, 시간 은 초, 입사각은 라디안(radian)이다[3].

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



[그림 1] TDOA 방탐 장치 구성도
[Fig. 1] Block diagram of TDOA DF system

방위각 측정 오차($d\theta$)는 식 (1)을 미분하여 방위각 오차 $d\theta$ 을 기준으로 정리하면 식 (3)과 같이 된다.

$$dt_d = \frac{d}{c} \cos\theta d\theta \quad (2)$$

$$d\theta = \frac{cdt_d}{d \cos\theta} \quad (3)$$

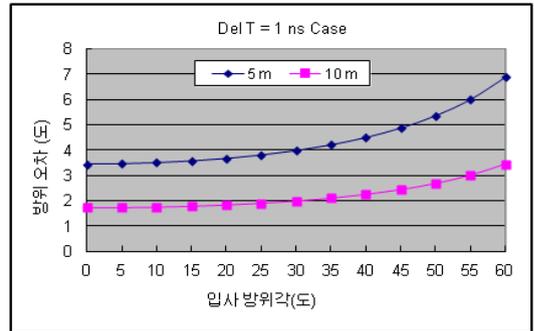
식 (3)에서 방위각오차 $d\theta$ 를 θ_e 로 표현하여 단위를 라디안(radian)에서 도(degree)로 변경하고, 시간측정 RMS 오차 dt_d 를 t_{de} 로 표현하고 단위를 초에서 나노초(nano second)로 변경하면 식 (4)와 같이 된다[4].

$$\theta_e = \frac{(17.2t_{de})}{(d \cos\theta)} \quad (4)$$

TDOA 방식에서 방탐 정확도를 좋게하기 위해서는 기준선 길이를 길게하고, 시간 측정 오차를 줄이는 것이 매우 중요하다.

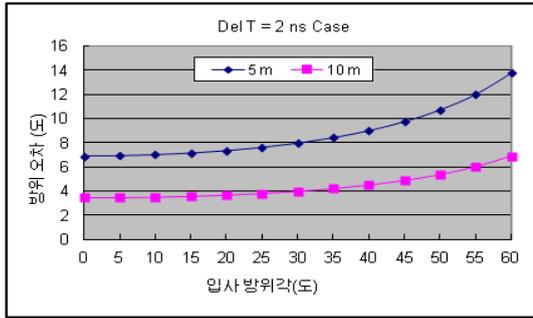
TDOA 방식에서 펄스 상승시간이 매우 짧은 임펄스 신호가 입사된다고 가정하면 방탐오차는 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

시간측정 오차 t_{de} 가 1ns일 때 기준선의 길이가 5m, 10m이면 전파 입사방위각에 대한 방탐 정확도 즉 방위오차는 그림 2와 같이 입사방위각이 0도인 경우 기준선 10m에서 1.7도, 기준선 5m에서 3.4도가 된다.



[그림 2] 입사 방위각별 방위오차($t_{de}=1ns$)
[Fig. 2] Direction errors according to the incident azimuth angles ($t_{de}=1ns$)

또한 시간측정 오차 t_{de} 가 2ns이고 기준선의 길이가 10m, 5m이면 방위오차는 그림 3과 같고, 입사방위각이 0도인 경우 기준선 10m에서 3.4도, 기준선 5m에서 6.8도가 된다.



[그림 3] 입사 방위각별 방위오차($t_{de}=2ns$)
 [Fig. 3] Direction errors according to the incident azimuth angles ($t_{de}=2ns$)

TDOA 방탐장치가 실제운영환경에서 펄스신호를 수신할 때 시간측정 정확도는 펄스신호의 신호대잡음비 (signal to noise ratio: SNR)와 펄스신호의 상승시간이 가장 중요한 변수이며, Cramer-Rao Bound에 의해서 식 (5)와 같이 주어진다. 여기서 t_r 은 비디오 펄스 상승시간이고 SNR은 비디오 신호의 신호상태이다[5].

$$t_{de} = \frac{(t_r)}{\sqrt{2SNR}} \quad (5)$$

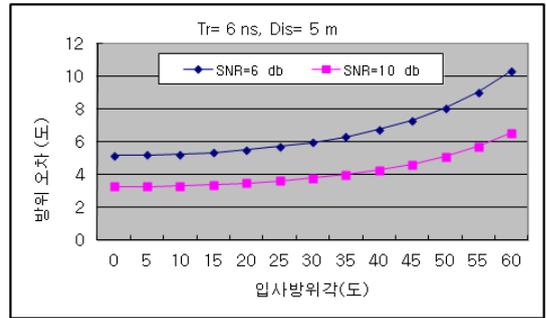
초고주파 대역에서 t_r 은 다중경로와 입사신호의 산란과 같은 외부 신호원에 의해서 성능이 저하되며, 2 개의 독립적인 기준선에서 시간차를 측정할 경우 t_{de} 는 $\sqrt{2}$ 만큼 줄어든다. 또한 펄스레이더의 경우처럼 반복적으로 시간차 측정이 수행될 수 있고 평균화가 가능하여 N 번의 시간차 측정과 평균화가 가능하다면, t_{de} 는 \sqrt{N} 만큼 줄어든다. 따라서 2번의 시간차 측정을 평균하여 사용할 경우 t_{de} 는 $\sqrt{2}$ 만큼 줄어들며 식(5)는 식(6)과 같이 수정된다. 또한 식(6)을 식 (4)에 대입하면 식 (7)과 같고, 이 식을 이용하여 방탐오차를 구할 수 있다[6][7].

$$t_{de} = \frac{t_r}{2\sqrt{SNR}} \quad (6)$$

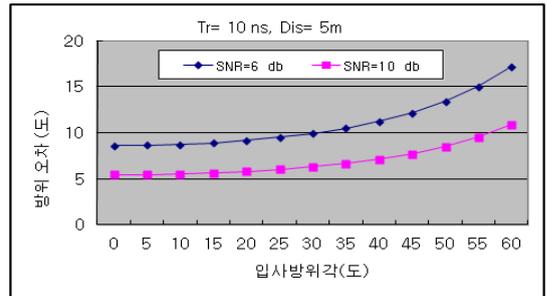
$$\theta_e = \frac{17.2t_r}{2d\cos\theta\sqrt{SNR}} \quad (7)$$

펄스신호의 상승시간 t_r 가 6ns, 기준선 길이가 5m이고, SNR이 6dB, 10dB일 때 0~60도 입사방위각에 대한 방위오차는 식 (7)을 사용하여 그림 4와 같이 구할 수 있

고, 입사방위각이 0도인 경우 SNR이 6dB이면 5.2도, 10dB이면 3.2도의 방위오차를 볼 수 있다. 또한 t_r 가 10ns인 경우에는 그림 5와 같이 SNR이 6dB, 10dB인 경우 8.6도, 5.4도의 방위오차를 얻을 수 있다.



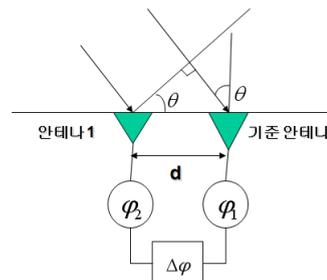
[그림 4] 방위각별 방위오차($tr=6ns$, $d=5m$)
 [Fig. 4] Direction errors according to the incident azimuth angles($tr=6ns$, $d=5m$)



[그림 5] 방위각별 방위오차($tr=10ns$, $d=5m$)
 [Fig. 5] Direction errors according to the incident azimuth angles($tr=10ns$, $d=5m$)

2.2 PDOA 방향탐지

위상차(PDOA) 방탐원리는 그림 6에서 보는 바와 같이 두 안테나에 도달한 신호의 위상차를 측정하여 전파의 도래 방향을 계산한다.



[그림 6] PDOA 방탐장치 구성도
 [Fig. 6] Block diagram of PDOA DF system

그림 6에서 두 안테나에 도달한 신호의 위상차 ϕ 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다. 여기서 λ 는 입사신호의 파장이고 d 는 안테나 사이의 거리이다.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d \cdot \sin\theta \quad (8)$$

PDOA 방탐 오차는 식 (8)을 미분하여 식(9)과 같이 유도할 수 있다.

$$d\phi = \frac{2\pi}{\lambda}d \cdot \cos\theta d\theta \quad (9)$$

식 (9)에서 방위각오차 $d\theta$ 를 θ_e 로 표현하고, 위상측정 RMS 오차 $d\phi$ 는 ϕ_e 로 표현하면 식 (10)과 같이 된다.

$$\theta_e = \frac{\lambda}{2\pi d \cdot \cos\theta} \phi_e \quad (10)$$

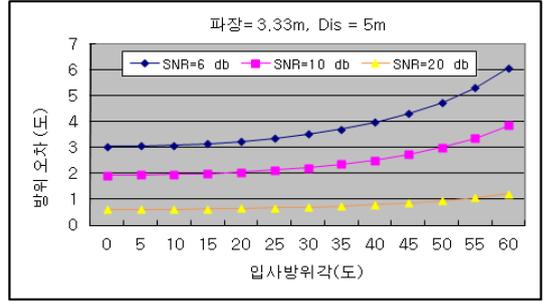
식 (10)에서 d 가 커지면 방탐오차가 줄어들게 되므로 방탐정확도를 높이기 위해서는 기준선을 길게 해야 한다. 그러나 기준선의 길이가 입사 신호의 반 파장보다 길어지면 다른 방향에서 들어온 신호들이 동일한 위상차를 발생시키는 경우가 생긴다, 이러한 현상을 역으로 설명하면 긴 기준선인 경우에는 동일한 위상차에 대응되는 전 파방향(θ)이 여러 개로 계산되어 방향모호성이 발생하게 된다.

위상오차(ϕ_e)는 입사전파의 SNR에 의한 영향이 가장 크다. 일반적으로 SNR에 의한 위상오차는 식 (11)과 같이 표현되므로 SNR을 고려한 실제 환경에서 방탐오차는 식 (12)과 같이 된다[8].

그림 6에서 기준선의 길이 d 가 입사신호 파장의 1.5배 이고, SNR이 6dB, 10dB, 20dB인 경우 PDOA 방식의 방위오차는 그림 7과 같고, 입사방위각 0도에서 방위오차는 3.0도, 1.9도, 0.6도가 된다.

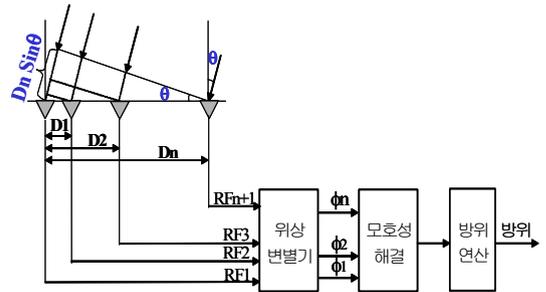
$$\phi_e = \frac{1}{\sqrt{SNR}} \quad (11)$$

$$\theta_e = \frac{\lambda}{2\pi d \cdot \cos\theta \sqrt{SNR}} \quad (12)$$



[그림 7] 입사전파의 SNR에 따른 방위오차
[Fig. 7] Direction errors according to the SNR of incident waves

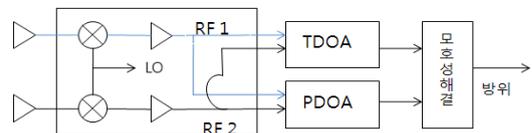
위상비교 방식에서 방향모호성을 제거하기 위해서는 그림 8과 같이 여러 개의 안테나를 사용하여 여러 개의 기준선에서 나온 방향정보를 서로 비교하여 모호성을 제거하는 방법이 사용되고 있으나 장비 구성이 복잡하고 장비 가격이 비싸서 새로운 방법들이 연구되고 있다[9].



[그림 8] 다중기준선 PDOA 방탐장치 구성도
[Fig. 8] Block diagram of multi-baseline PDOA DF system

3. 위상차와 시간차를 결합한 방탐기술

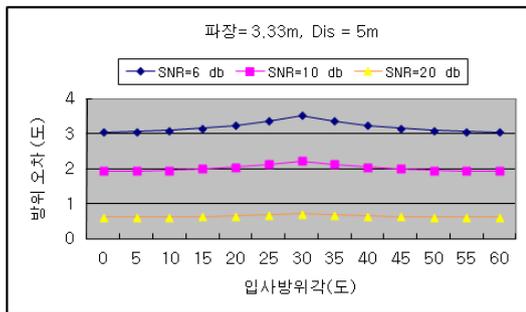
TDOA-PDOA 결합 방탐방식은 두 개의 안테나를 통하여 수신된 신호를 사용하여 TDOA 방식로는 개략적인 방위를 구하고, PDOA 방식으로는 모호성이 있는 정밀한 방위를 구한 후에 두 방식에서 계산된 방위를 결합해서 방향모호성이 없는 정확한 방위를 구하는 것이다.



[그림 9] TDOA-PDOA 결합 방탐장치 구성도
[Fig. 9] Block diagram of TDOA-PDOA combination DF system

그림 9는 TDOA-PDOA 결합 방탐장치의 구성도이다. 두 개의 안테나를 통해서 수신된 신호는 각각 비디오 신호로 변환된 후 두 채널로 분리되어 TDOA 장치와 PDOA 장치로 전달된다. TDOA 장치에서는 두 안테나에서 들어온 신호의 시간차를 계산하여 방위각을 계산하고, PDOA 장치에서는 두 안테나에서 들어온 신호의 위상차를 위상변별기를 이용하여 측정할 후에 방위각을 계산한다. 그 후에 TDOA 장치와 PDOA 장치에서 계산한 방위각을 결합하여 정확한 방위를 도출하게 된다.

그림 8과 같이 PDOA 기술만 사용하는 경우에는 3개의 안테나를 사용하고 안테나 최대기준선이 5m, 입사전파의 파장이 3.3m, 입사전파의 SNR이 6dB, 10dB, 20dB 인 경우, 전파의 입사방위각 0~60도에 대한 방위오차가 3.0~6.0도, 1.9~3.8도, 0.6~1.2도이다. 그러나 그림 9와 같이 TDOA-PDOA 기술을 사용하는 경우에는 3개의 안테나를 사용하면 방위오차는 그림 10과 같이 3.0~3.5도, 1.9~2.2도, 0.6~0.7도가 된다. 이것은 PDOA 기술만 사용될 때 보다 TDOA-PDOA 기술을 결합하여 사용하는 경우에는 최대 방위오차가 약 40% 감소하는 것을 확인할 수 있다.



[그림 10] TDOA-PDOA 결합 방탐기술의 SNR 따른 방위 오차

[Fig. 10] Direction errors according to SNR of incident waves at TDOA-PDOA system

4. 결론

TDOA 방탐기술은 광대역 주파수 신호의 방향을 탐지할 수 있고, 위상변별기나 주파수 측정기와 같은 장치가 부가적으로 필요하지 않기 때문에 비교적 간단한 시스템 구성이 가능하다. 그러나 방탐정확도를 높이기 위해서는 수 나노 초(nano second) 이하의 시간차를 정확하게 측정해야하고, 기준선이 길어야하기 때문에 긴 안테나 설치공간이 필요하다. 그러나 TDOA 기술을 PDOA 기술과 결

합해서 사용하면, TDOA 기술을 이용해서 방향모호성을 해결하고, PDOA 기술을 이용해서 높은 방탐정확도를 얻는 방식으로 방탐장치를 설계할 수 있다.

본 논문에서 제안한 TDOA-PDOA 기술을 결합할 경우 입사전파 파장과 안테나 기준선이 2:3 이고, 전파의 입사방위각이 0~60도, 입사전파의 SNR이 6dB, 10dB, 20dB인 경우에 방위오차는 PDOA 기술만 사용될 때 보다 최대오차가 약 40% 감소하였고, 장치 설계가 간단하여 기존의 기술보다 우수한 방탐기술로 확인되었다.

References

- [1] Filippo Neri, Introduction to electronic Defense Systems (2nd Edition), Artech House, Boston, 2001.
- [2] Kumar Gaurav Chhokra, et al., Accuracy Enhancements for TDOA Estimation on Highly Resource Constrained Mobile Platforms, Technical Report, ISIS-03-402, Vanderbilt University, October, 2003.
- [3] G. D. Curtis Schleher, A Electronic Warfare in the Information Age, Artech House, Boston, 1999.
- [4] Joong-Soo Lim, "The Direction Finding Error of TDOA Method According to the Antenna Arrangement", Journal of the Korean Academic Industrial Society, Vol. 11, No. 11, pp. 4503-4508, November, 2010.
- [5] Richard G. Wiley, Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals (Second Edition), Artech House, Boston, 1993.
- [6] Stephen E. Lipsky, Microwave Passive Direction Finding, Scitech Publishing Inc., 2004.
- [7] Joong-Soo Lim, et al., "An Analysis of Direction Finding Accuracy of ELINT System" Journal of the Korean Academic Industrial Society, Vol. 10, No. 11, pp. 3104-3109, November, 2009.
- [8] Richard G. Wiley, ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals, Artech House, Boston, 2006.
- [9] Joong-Soo Lim, et al., "A Technology of Microwave Direction Finding with Circular Array Combination Method", Journal of the Korean Institute Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 16, No. 6, pp. 549-555, June 2005.

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 : ADD 책임 연구원/전자전 탐장
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 2004년 1월 ~ 현재 : 한국군사과학회 편집위원
- 2007년 1월 ~ 현재 : 한국전자파학회 정보전자위원장

<관심분야>

전자파 수치해석, 초고주파 시스템, 레이더