THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2017 Apr.; 28(4), 347～350.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2017.28.4.347
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

2개의 안테나 소자를 갖는 Time-Modulated Array와 하나의 USRP를 이용한 실시간 방향탐지 시스템의 구현

Implementation of Real-Time Direction Finding System Using Time-Modulated Array with Two Antenna Elements and One USRP

이상준 · 윤현구* · 추호성** · 장병준

Sangjoon Lee · Hyungoo Yoon* · Hosung Choo** · Byung-Jun Jang

요 약

본 연구에서는 TMA(Time-Modulated Array)와 USRP(Universal Software Radio Peripheral)를 이용하여 2.4 GHz 대역에서 동작하는 실시간 방향탐지 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템은 2개의 상용 모노폴 안테나, 자체 제작한 스위치 보드, 그리고 하나의 USRP로만 구성되며, LabVIEW로 연동하여 실시간으로 특정 신호원의 입사 각도를 탐지할 수 있었다. 구현결과, 30°의 범위 내에서 최대 4°의 오차 이내로 방향탐지가 가능함을 확인하였다. 제안한 시스템은 기존의 다중 수신기를 갖는 방향탐지 시스템에 비해 하드웨어 구성이 간단할 뿐만 아니라, 주엽과 첫 번째 부엽 신호의 크기만을 이용하는 간단한 계산으로 방향탐지가 가능하다는 장점이 있다.

Abstract

In this paper, we implemented a real-time 2.4 GHz direction finding system using a time-modulated array(TMA) and an Universal Software Radio Peripheral(USRP). Our system consists of two commercial monopole antennas, self-designed switch board, and an USRP, and it is controlled using LabVIEW program in real-time. From measured results, it is verified that our system can exactly detect the incident angle within 4 degree in the range of 30 degree. Our direction finding system has advantages of a simple hardware architecture than conventional one with multiple receivers, and a simple algorithm only by using a main lobe and a first side-lobe of switching frequency.

Key words: TMA, Direction-Finding, USRP, Real-Time, LabVIEW, Harmonic Analysis

Ⅰ. 서 론

최근 전 세계적으로 RF(Radio Frequency) 스위치의 제어로 빔포밍(beam forming), 부엽 억제(side lobe suppression), 방향탐지(direction finding) 등 다양한 배열 안테나 기능을 수행할 수 있는 Time-Modulated Array(TMA)에 대한 관심이 높아지고 있다. TMA 개념은 1950년대에 처음 소개되었으나, 당시 RF(Radio Frequency) 스위치 구현의 한계 등 여러 문제로 인해 위상배열안테나(phased array antenna)에 비해 상대적으로 연구가 미약하였다. 하지만

국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)
*명지전문대학 컴퓨터전자과(Department of Computer Electronic Engineering, Myoungji College)
**홍익대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Elctrical Engineering, Hongik University)
· Manuscript received January 24, 2017 ; Revised March 21, 2017 ; Accepted April 4, 2017. (ID No. 20170124-05S)
· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

최근 RF 스위치 및 신호처리 기술의 발전으로 복잡한 위상배열 안테나를 대체할 수 있는 TMA가 새롭게 조명을 받고 있다[1]~[4].

본 연구는 TMA의 응용 중 하나인 방향탐지에 관한 것이다. TMA를 이용한 방향탐지 시스템에 대한 연구는 2007년 Tennant가 참고문헌 [3]에서 최초로 2개의 안테나와 1개의 RF 스위치만을 가지고도 정밀한 방향탐지가 가능함을 제시하였고, 참고문헌 [4]에서는 스펙트럼 분석기를 이용한 결과를 제시한 바 있다. 하지만 실시간으로 동작하는 방향탐지 시스템을 구현한 연구는 발표된 바가 없다. 이에 본 연구에서는 참고문헌 [3]과 [4]에서 제시한 방법을 기반으로 2.4 GHz ISM(Industrial, Scientific, and Medical) 대역에서 동작하는 TMA 기반 실시간 방향탐지 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템은 2개의 상용 안테나, 자체 제작한 RF 스위치 보드 및 범용 SDR(Software Defined Radio) 보드인 USRP(Universal Software Radio Peripheral)로 구성되며, 이를 LabVIEW 프로그램으로 연동하여 실시간으로 특정 신호원의 입사 각도를 탐지할 수 있도록 하였다.

본 논문에서 구현된 방향탐지 시스템은 기존의 다중 수신기 기반 방향탐지 시스템보다 간단한 하드웨어를 가질 뿐만 아니라, MUSIC, ESPRIT 등 복잡한 알고리즘 없이 스위칭 주파수의 주엽 및 첫 번째 부엽 성분의 크기만을 비교함으로써 실시간으로 신호원의 방향을 확인할 수 있어 상용화에 장점이 있다.

Ⅱ. TMA 방향탐지 이론

TMA 기반 방향탐지 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 두 개의 수신 안테나는 Duty Cycle(DC) 50 %인 구형파 제어신호를 입력으로 하는 SPDT(Single Pole Double Throw) 스위치에 연결되어 번갈아가며 신호를 수신하게 된다. 스위치의 출력은 USRP에 의해 기저대역으로 주파수 천이된다. 이 때 스위칭 주파수 F_P에 따라 부엽(sidelobe)이 발생하게 되는데, 이 부엽과 주엽(mainlobe)의 상대적인 크기의 비교를 통해 외부 신호원의 입사방향을 계산할 수 있다. 방향 계산은 LabVIEW 프로그램에 의해 실시간으로 이루어진다. 따라서 기존의 다중 수신기나 MUSIC 등 복잡한 신호처리 알고리즘이 필요 없다.

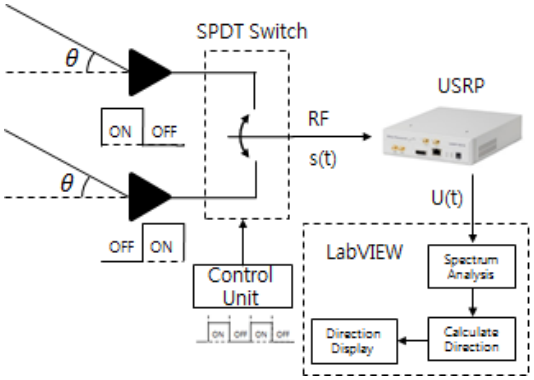


그림 1. TMA 기반 방향탐지 시스템 블록도
Fig. 1. Block diagram of direction finding system using TMA.

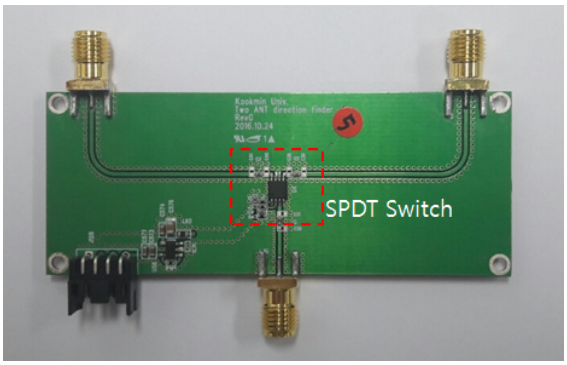


그림 2. TMA 회로와 회로도
Fig. 2. TMA circuit and circuit diagram.

방향 탐지할 특정 신호원이 F_c의 동작주파수를 갖는 CW(Continuous Wave) 신호라고 할 때, 두 안테나와 SPDT 스위치를 통해 수신된 신호 $s(t)$는 식 (1)과 같다.

$$s(t) = U(t)e^{j2\pi F_c t} \tag{1}$$

SPDT 스위치가 주기 T_P를 가지고 50 %의 DC로 조절된다면 $U(t)$는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$U(t) = \begin{cases} 1 & , (n-1)T_p < t \le \left(n-\frac{1}{2}\right)T_p \\ e^{-jKD\sin\theta} & , \left(n-\frac{1}{2}\right)T_p < t \le nT_p \end{cases} \tag{2}$$

여기서, K는 파수(wave number), D는 두 안테나 사이의 간격, 그리고 θ는 신호원과 두 수신안테나 간의 각도이

다. 식 (2)에서 $U(t)$의 크기는 언제나 1로 일정하며, SPDT 스위치에 따라 결정되는 두 수신 안테나의 간격 때문에 위상차가 발생하게 된다. 식 (2)에서 $U(t)$는 주기함수이므로 푸리에 급수(Fourier series)로 표현 가능하며, 이는 식 (3)과 같다.

$$U(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{j2\pi F_p k t} \tag{3}$$

여기서 a_k는 푸리에 계수로 식 (4)와 같다.

$$a_k = \begin{cases} \dfrac{1+e^{-jKD\sin\theta}}{2} & ,k=0 \\ \dfrac{j(e^{-jk\pi}-1)}{2k\pi}(1-e^{-jKD\sin\theta}) & ,k\neq 0 \end{cases} \tag{4}$$

식 (4)에서 k=0인 경우, DC에서의 주엽(a_0), k=1인 경우 스위칭 주파수에서의 첫 번째 부엽(a_1)이 된다. 이제 a_1을 a_0로 나누면 식 (5)와 같다.

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{2}{\pi}\tan\frac{KD\sin\theta}{2}, \tag{5}$$

식 (5)를 θ에 대해 정리하면 식 (6)과 같이 주엽과 부엽의 상대적 크기를 통해 두 안테나와 신호원이 이루는 입사 각도를 계산하는 것이 가능하다.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{2}{KD}\arctan\frac{\pi a_1}{2a_0}\right). \tag{6}$$

Ⅲ. 방향탐지 시스템 설계 및 실험결과

본 연구에서 설계한 안테나 스위치 회로는 그림 2와 같다. SPDT RF 스위치는 3.3 V에서 동작하는 PE4251MLI-Z를 사용하였고, 안테나는 2.4 GHz 대역 상용 모노폴 안테나로 두 안테나의 간격 D는 2.4 GHz에서 0.5 λ의 값을 갖도록 하였다. SPDT 스위치 구동은 파형발생기(Function generator)로 Agilent사의 33220A를 사용하였다. 파형발생기의 구형파 신호가 3.3 V일 때 첫 번째 안테나의 신호가 수신되고, 구형파 신호가 0 V일 때는 두 번째 안테나의 신호가 수신된다. 주파수 하향변환을 위해 NI사의 USRP-2922를 이용하였다. 주파수 변환된 기저대역 신호는 이더넷을 통해 호스트 PC 상의 LabVIEW로 전송된다.

그림 3. LabVIEW상의 USRP 수신부
Fig. 3. USRP receiver on the LabVIEW.

식 (6)의 계산은 PC 상의 LabVIEW에서 이루어진다. 그림 3과 같이 프로그램 상에서 USRP를 구동하기 위한 파라미터로써 캐리어 주파수(carrier frequency), IQ rate, 샘플 수 등을 지정한다. USRP를 통해 수신된 신호는 먼저 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)되며, 변환된 신호의 파워스펙트럼으로부터 가장 큰 신호인 a_0와 그 다음 큰 신호인 a_1을 탐지하고, 이를 식 (6)에 대입하여 신호원과 두 안테나가 이루는 방향 각도를 계산하게 된다. 이때, USRP의 IQ rate는 200 k Sample/sec, 샘플 수는 200 k개로 설정하였다. 계산 결과는 그림 3의 오른쪽 하단의 각도 표시기에 실시간으로 표시된다.

제안한 방향탐지 시스템의 방향탐지 성능을 알아보기 위해 그림 4와 같이 실험장치를 구성하였다. 먼저 안테나가 부착된 TMA 회로를 책상 위에 고정하였다. 다음으로 신호 발생기를 안테나에 연결해 TMA시스템과 50 cm 떨어지게 하였다. 신호발생기를 통해 발생되는 신호는 중심주파수 2.4 GHz의 CW 신호이며, 신호의 크기는 0 dBm으로 설정한 후 거리 50 cm를 유지하며, 각도를 변경하면서 방향탐지 능력을 확인하였다.

그림 5의 (a), (b), (c) 및 (d)는 각각 0°, 10°, 20°, 그리고 30°에서의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. DC에서 주엽 a_0가 발생하고, 스위칭 주파수 F_p가 1 kHz인 경우, 1 kHz 단위마다 부엽이 발생함을 확인할 수 있다. 그 외 작은 피크

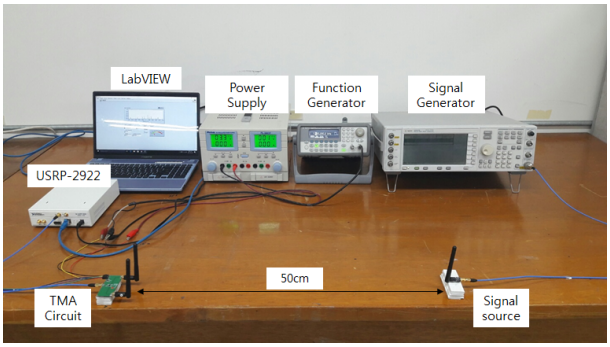
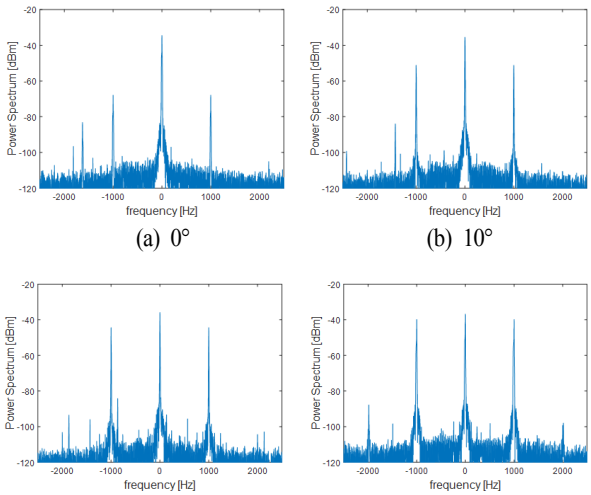


그림 4. 실제 방향 탐지 시스템 구성
Fig. 4. Configuration of a direction finding system.



(a) 0° (b) 10°

(c) 20° (d) 30°

그림 5. 각도별 수신 신호의 파워스펙트럼
Fig. 5. Variation of power spectrum with respect to different directions.

표 1. 실험결과
Table 1. Experimental results.

Direction [deg]	a_0 [dBm]	a_1 [dBm]	Result [deg]	Error [deg]
0	−34.46	−67.91	1.26	1.26
5	−35.16	−53.15	7.44	2.44
10	−35.48	−51.18	9.62	0.38
15	−35.80	−47.17	15.42	0.42
20	−35.92	−44.38	20.78	0.78
25	−36.45	−41.38	28.84	1.16
30	−36.83	−39.75	33.98	3.98

신호들은 랜덤하게 발생하는 노이즈나 본 알고리즘은 가장 큰 신호인 a_0와 그 다음 큰 신호인 a_1만을 이용하여 계산하므로 방향탐지 능력에 영향을 주지 않는다. 방향탐지 실험은 0°에서 5°씩 증가시키며 10번 실시하였고, 그 평균값을 표 1에 나타내었다. 구현된 방향탐지 시스템은 최대 4° 이내에서 방향을 탐지할 수 있음을 확인하였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 TMA를 이용한 실시간 방향탐지 시스템을 구현하였다. 구현결과 기존의 방향탐지 시스템에 비해 간단한 하드웨어 및 소프트웨어 구성으로 정확한 방향탐지 기능을 갖는 시스템을 구현할 수 있었다. 향후 다중 신호 및 특정 변조신호를 갖는 일반 신호원을 방향탐지 하는 시스템으로 확장할 계획이다.

References

[1] W. H. Kummer, A. T. Villeneuve, T. S. Fong, and F. G. Terrio, "Ultra-low sidelobes from time-modulated arrays", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 11, pp. 633-639, 1963.

[2] Lorenzo Poli, Paolo Rocca, and Andrea Massa, "Beam pattern optimization in time-modulated linear arrays", *Phased Array Systems and Technology(ARRAY), 2010 IEEE International Symposium on. IEEE*, 2010.

[3] A. Tennant, B. Chambers, "A two-element time-modulated array with direction-finding properties", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 64-5, 2007.

[4] Chong He, et. al., "Direction finding by time-modulated array with harmonic characteristic analysis", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 642-645, 2015.

[5] Alan, O'Donnell, et al., "Analysis of modulated signals for direction finding using time modulated arrays", *IEEE Radar Conference(RadarConf)*, pp. 1-5, 2016.