THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2026 October; 37(10), 1069～1072.

https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2026.37.10.1069
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

단일 TP-DDMZM 기반 마이크로파 포토닉 레이다 수신기의 2차원 도달각 및 도플러 주파수 편이 동시 측정 기법

Single TP-DDMZM-Based Simultaneous Measurement of 2D AOA and DFS for Microwave Photonic Radar Receivers

이 원 렬[1] · 이 인 근[2] · 송 민 제[3]

Wonryeol Lee[1] · Ingeun Lee[2] · Minje Song[3]

요 약

본 논문에서는 기존 전자식 레이다 수신기를 대체하는 마이크로파 포토닉스 기반의 2차원 도달각 및 도플러 주파수 편이 동시 측정 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 단일 Triple-parallel dual-drive Mach-Zehnder modulator와 단일 광검출기로 구성되며, 삼중 병렬 광 경로 구조를 통해 고각, 방위각 및 참조 신호를 독립적으로 수신한다. 특히 주파수 성분 분리를 통해 2차원 도달각을 탐지하고, 모호성 상관 함수(amplitude comparison function) 연산을 통해 도달각 측정 범위를 확대하였다. 시뮬레이션 결과, ±90° 범위 내 위상차에서 차원별 독립성을 확인하였으며, 3 dB 잡음 환경에서 4° 미만임을 확인하여 제안 시스템의 실효성을 확인하였다.

Abstract

This study presents a microwave photonics-based receiver for simultaneous 2D angle of arrival (AoA) and Doppler frequency shift measurements as an alternative to conventional electronic radar receivers. Utilizing a single TP-DDMZM and photodetector, the system independently acquires elevation, azimuth, and reference signals via a triple-parallel optical path structure. By isolating frequency components and applying an amplitude comparison function, the system achieves precise 2D AoA estimation over an extended measurement range. Simulations demonstrate dimensional independence across phase differences of ±90° and validate the system's robustness, maintaining an estimation error below 4° even under a 3 dB noisy environment.

Key words: Microwave-Photonics, AoA, DFS, TP-DDMZM

Ⅰ. 서 론

복잡해지는 전장 환경 속에서 표적의 2차원 도달각(AoA, angle of arrival)과 도플러 주파수 편이(DFS, Doppler frequency shift)를 실시간으로 동시에 확보하는 기술이 중요해짐에 따라, 기존 전자식 소자의 대역폭 한계와 전자기 간섭 취약성을 극복할 수 있는 초광대역 및 전자기 간섭 면역 특성의 마이크로파 포토닉스(MWP,

「이 연구는 정부(방위사업청)의 재원으로 수행된 연구임(915137101).」
국방과학연구소(Agency for Defense Development)

1: 연구원(https://orcid.org/0000-0002-5855-9136), 2: 선임연구원(https://orcid.org/0000-0001-5184-4025), 3: 선임연구원(https://orcid.org/0000-0002-3262-4497)

· Manuscript received June 22, 2026 ; Revised July 13, 2026 ; Accepted August 12, 2026. (ID No. 20260622-058)

· Corresponding Author: Minje Song (e-mail: mjsong@add.re.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

microwave photonics) 기반 연구가 활발히 수행되고 있다.[1]

특히, 세로다인(Serrodyne) 변조와 진폭 비교를 활용해 DFS와 AoA를 모호성 없이 동시에 측정하는 MWP 시스템이 제안되었으나[2], 단일 DP-DDMZM(dual-parallel dual-drive Mach-Zehnder modulator) 구조에 의존하여 1차원 공간 정보만을 추출할 수 있다는 한계가 있었다. 이를 2차원으로 확장하기 위해 이중 DP-DDMZM 구조를 채택할 경우, 시스템 복잡성과 광 손실을 야기하게 된다.

본 논문에서는 이러한 DP-DDMZM 시스템의 한계를 극복하고자, 단일 TP-DDMZM을 활용해 스펙트럼 내에서 표적의 도플러 정보 추출과 2차원 도달각을 분리 추출하는 수신기 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 3중 병렬 구조[3]를 통해 이중 DP-DDMZM보다 시스템 복잡성을 낮추고 광 손실 요소를 최소화하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장은 제안된 시스템의 이론적 수식 모델을 통해 시스템의 동작 원리를 설명한다. Ⅲ장에서는 광과 RF 도메인을 동시에 시뮬레이션 할 수 있는 Ansys사의 Lumerical Interconnect 시뮬레이션을 통해 구현 가능성을 제시한다.

Ⅱ. 제안된 시스템의 이론적 분석

제안된 시스템은 그림 1과 같이 광원부, 변조부, 검출부로 구성된다. 광원부의 LD(laser diode)에서 생성된 연속파 광신호가 TP-DDMZM의 3중 병렬 구조로 입사되어 고각, 방위각 및 참조 신호로 독립적인 위상 및 진폭 변조가 수행된다. 이후 변조된 신호들은 단일 광검출기를 통해 전기 신호로 변환되며, 최종적으로 전자식 스펙트럼 분석기를 통해 2차원 도달각과 도플러 정보를 추출한다.

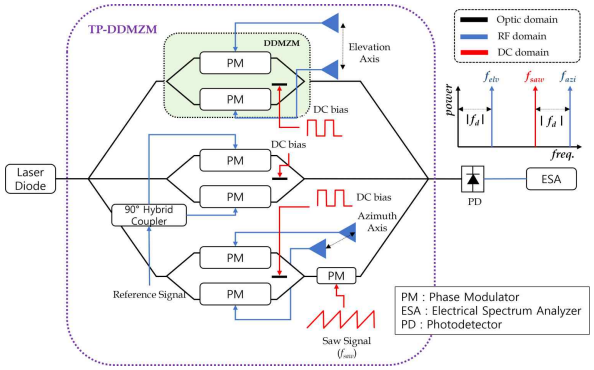


그림 1. 제안된 시스템의 개념도
Fig. 1. Schematic diagram of the proposed receiver system.

2-1 다중 경로 광전계 모델링

병렬 구조의 각 경로를 통과한 1차 상측파대(upper sideband) 광전계는 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

2-1-1 상·하단 경로

상·하단 경로에서는 수신된 고각 및 방위각 안테나 신호가 각각 변조되며, 상단 경로의 소신호 조건에서 출력 광전계는 식 (1)과 같다. 하단 경로는 수신 신호 변조와 더불어 DFS 모호성 해소를 위해 세로다인 변조(ω_{saw})가 적용되어 식 (2)와 같이 표현된다.

$$E_{top}(t) \approx Ae^{j(\omega_c+\omega_{RF})t}\left[1+e^{j(\theta_{elv}+\phi_{bias})}\right], \quad (1)$$

$$E_{bot}(t) \approx Ae^{j(\omega_c+\omega_{RF}+\omega_{saw})t}\left[1+e^{j(\theta_{azi}+\phi_{bias})}\right], \quad (2)$$

여기서 A는 진폭계수, ω_c는 광 반송파의 각주파수, ω_{RF}는 송신(ω_r)과 도플러 각주파수(ω_d)의 합, θ_{elv},θ_{azi}는 고각 및 방위각 안테나 수신 신호간 위상차, $\phi_{bias}=\pi V_{bias}/V_\pi$는 DC 바이어스 위상이며, V_π는 MZM의 반파장 전압이다.

2-1-2 중단 경로

국부 발진기 역할을 하는 참조 신호(ω_r)는 90° 하이브리드 커플러를 통해 분배되어 변조기를 각각 $\cos\omega_r t$와 $-\sin\omega_r t$로 구동하며, 메인 바이어스를 음의 직교점($-V_\pi/2$)으로 설정한다. 그 결과 중단 경로에서는 상측파대만 남는 단일 측파대 변조가 구현되어 출력 광전계는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$E_{mid}(t) \approx Be^{j(\omega_c+\omega_r)t}. \quad (3)$$

여기서 B는 참조 신호의 진폭계수이다.

2-2 단일 광검출기 자승 검파 및 스펙트럼 분리

삼중 병렬 경로를 통과한 광신호는 결합 후 하나의 광검출기로 입력되어 자승 검파 과정을 거친다. 출력되는

광전류(I_{PD})는 총 광전계의 절댓값 제곱에 비례하며, 각 경로 간의 비팅(beating)에 의해 세 가지 주요 주파수 성분으로 분리된다.

$$I_{PD}(t) \propto \left| E_{top}(t) + E_{mid}(t) + E_{bot}(t) \right|^2. \quad (4)$$

2-2-1 고각 비팅 성분(E_{top} vs E_{mid})

상단 경로와 중단 경로의 비팅 성분은 주파수 차이 $(f_r + f_d) - f_r$에 의해서 결정된다. 결과적으로 고각 정보는 기저대역인 $|f_d|$에 위치하게 되며, 해당 성분의 전력(P_{elv})은 식 (5)와 같다[4].

$$P_{elv}(\theta_{elv}) \propto \left| 1 + e^{j(\theta_{elv} + \phi_{bias})} \right|^2 \propto \left[1 + \cos(\theta_{elv} + \phi_{bias}) \right]. \quad (5)$$

2-2-2 방위각 비팅 성분(E_{bot} vs E_{mid})

하단 및 중단 경로의 비팅 성분은 세로다인 변조로 인해 $f_{saw} + f_d$ 지점에 위치한다. 도플러 주파수(f_d)의 부호에 따라 상·하단 경로의 비팅 성분인 기준 주파수(f_{saw})의 좌측(f_d<0) 또는 우측(f_d>0)에 성분이 형성되므로, 이를 통해 표적의 이동 방향을 모호성 없이 판별할 수 있다. 해당 성분의 전력(P_{azi})은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$P_{azi}(\theta_{azi}) \propto \left[1 + \cos(\theta_{azi} + \phi_{bias}) \right]. \quad (6)$$

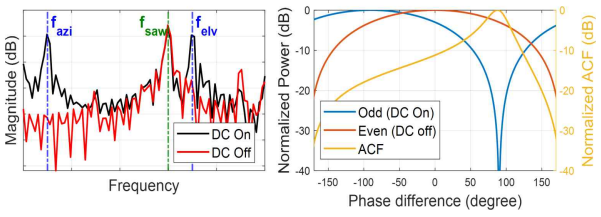
이때, 스펙트럼상에서 고각($f_{saw} + f_d$)과 방위각(f_d) 성분을 분리하여 모호성을 제거하기 위해서는, 표적의 접근 및 후퇴 상황을 모두 고려하여 세로다인 변조 주파수가 식 (7)의 조건을 만족해야 한다.

$$f_{saw} > 2|f_{d,\max}|. \quad (7)$$

여기서 $f_{d,\max}$는 탐지 가능한 표적의 최대 도플러 주파수이다.

2-3 모호성 상관 함수 기반 2차원 AoA 추출

스펙트럼상에서 분리된 전력 응답을 바탕으로 방향 모호성을 해소하기 위해 바이어스 스위칭 기법을 적용한다. 각 경로의 DC 바이어스(ϕ_{bias}) 전압을 최대점(0 V)과 직교점(V_π/2 V)로 교대로 인가하게 되면 스펙트럼은 그림 2(a)



(a) (b)

그림 2. (a) 전자 스펙트럼 분석기 출력, (b) 위상차에 따른 전력 및 ACF

Fig. 2. (a) Output of the electrical spectrum analyzer, (b) Power and ACF vs. phase difference.

와 같이 관심 주파수의 전력 크기가 변하게 된다. 이때 전력 크기는 위상 차이에 따라 최대점일 때는 우함수, 직교점일 때는 기함수 형태를 가진다. 획득된 두 가지 직교 전력 곡선을 기반으로 ACF(amplitude comparison function) $((1+\cos(\theta))/((1-\sin(\theta)))$를 도출하면 그림 2(b)와 같이 −180°에서 90° 범위의 위상 차이의 모호성을 해결할 수 있다. 하지만, 수신 신호 전력의 사전 정보 없이는 90°에서 180° 범위에서는 모호성이 발생하므로, 본 논문에서는 수신 전력의 사전정보를 사용하지 않는 ±90° 범위 내의 위상 차이만 고려하여 진행한다. 해당 위상 차이는 반파장 간격의 안테나에서 ±30° 범위의 도달각 추정이 가능하다.

각 차원의 ACF는 다른 주파수 성분에서 추출되어 상호 영향이 미미하다. 따라서, 차원별 ACF 데이터를 결합하여 2차원의 ACF를 연산함으로써 유일해를 추출할 수 있다.

Ⅲ. 시뮬레이션 검증

제안된 시스템의 성능을 검증하기 위해 그림 1의 구성과 표 1의 파라미터 설정을 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다.

3-1 차원별 독립성 검증

각 차원의 독립적인 ACF를 추출하기 위하여 고각 또는 방위각 중 하나를 고정한 채 나머지 위상차를 ±90° 범위에서 변화시켰으며, 그 결과는 그림 3(a)와 같다. 해당 결과가 그림 2(b)의 이상적인 ACF 곡선과 동일한 경향성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

또한, 2차원 ACF의 각 차원이 독립적인 특성을 확인하

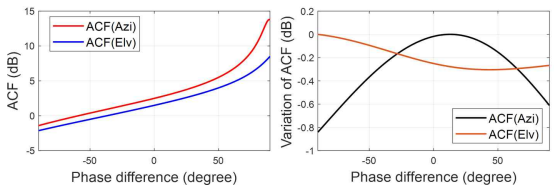
표 1. 시뮬레이션 주요 광 부품의 파라미터
Table 1. Simulation parameters.

Parameter	Value	Parameter	Value
LD P_{out}	12 dBm	PD responsivity	1 A/W
DDMZM loss	6 dB	PD dark current	10^{-9} A
DDMZM extinction ratio	30 dB	PD thermal noise	10^{-22} A^2/HZ

기 위하여, 한 차원의 각도를 변화시키더라도 타 차원의 ACF 특성에 미치는 영향을 그림 3(b)와 같이 확인하였다. 시뮬레이션 결과 고차항 및 누설 성분에 의한 영향이 0.9 dB 미만임을 확인하여 각 차원의 독립성을 검증하였다.

3-2 잡음 환경에 따른 위상차 오차

제안된 시스템의 실효성을 정량적으로 검증하기 위해, RF 수신 신호의 SNR(signal-to-noise ratio) 변화에 따른 위상차 추정 오차 분석을 수행하였다. 측정 범위 ±90° 내에서 임의로 14개의 측정 지점을 선정하여 각 지점에서의 오차를 산출하고, 이를 평균한 RMSE(root mean square error) 값을 도출하였다. SNR 조건의 경우, 일반적인 수신 환경에서 안정적인 신호 검출이 가능한 12 dB부터 5 dB, 3 dB의 잡음 환경에 따른 위상차 오차를 분석하였다. 각 SNR 환경에서 추출된 ACF를 잡음이 없는 이상적인 환경에서 구축한 0.5° 분해능의 기준 ACF와 비교하여 표 2와 같이 RMSE를 추출하였다. SNR이 감소함에 따라 추정 오차가 증가하는 경향을 보였으나, 3 dB의 극한 잡음 환경에서도 방위각과 고각 모두 4° 미만의 낮은 RMSE를 유지함을 확인하였다.



(a) (b)

그림 3. 시뮬레이션 결과 (a) 차원별 ACF, (b) 차원 간 독립성 분석
Fig. 3. Simulation results: (a) dimensional ACFs, (b) dimensional independence analysis.

표 2. 제안 시스템의 SNR 조건별 위상차 추정 오차
Table 2. Estimated phase difference errors of the proposed system by SNR.

Dimension / SNR (dB)	Azimuth (°)	Elevation (°)
12	1.3	0.9
5	1.8	2.6
3	2.4	3.8

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 단일 TP-DDMZM을 활용하여 2차원 도달각과 도플러 주파수 편이를 동시에 측정할 수 있는 시스템을 제안하였다. 삼중 병렬 광 경로 구조와 세로다인 변조를 적용하여 도플러 모호성을 제거하고 각 차원 성분을 주파수 영역에서 분리하였으며, 모호성 상관 함수를 통해 ±90° 범위의 위상차를 탐지할 수 있다. 특히, 이중 DP-DDMZM 구조 대비 삼중 병렬 구조를 채택함으로써 시스템 복잡도를 낮추고 광 손실을 최소화하여, 광-전 변환 효율의 증대를 기대할 수 있다. 시뮬레이션 결과, 차원 간 독립성 유지와 잡음 환경에서도 도달각 추정 가능성을 확인하였다. 본 결과는 향후 수신 전력 최적화 및 상호관계 보상 알고리즘 적용을 통해 더욱 넓은 각도 범위와 고정밀 추정으로 확장 가능하다.

References

[1] H. S. Kwon, J. Park, M. Hyun, and Y. Bae, "Field demonstration of a dual-band photonic radar for real-time ISAR drone classification," *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, no. 24, pp. 44697-44704, Nov. 2025.

[2] Y. Li, Y. Guo, B. Yin, Z. Wang, Q. He, and M. Wang, "Single-channel system for joint unambiguous measurement of DFS and AOA based on serrodyne modulation," *Applied Optics*, vol. 62, no. 26, pp. 6924-6930, Sep. 2023.

[3] Y. Chen, A. Wen, J. Guo, L. Shang, and Y. Wang, "A novel optical mm-wave generation scheme based on three parallel Mach–Zehnder modulators," *Optics Communications*, vol. 284, no. 5, pp. 1159-1169, Mar. 2011.

[4] V. J. Urick Jr., J. D. McKinney, and K. J. Williams, *Fundamentals of Microwave Photonics*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2015.