

광위상배열 기반 LADAR의 초기 위상 제어 기법 연구: 언덕 오름 기반 접근법

김 태 훈^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 국방첨단기술연구원

On the Control of Initial Phases in Optical Phased Array Based LADAR Systems: Hill-Climbing Based Approach

Taehoon Kim^{*,1)}

¹⁾ *Institute of Defense Advanced Technology Research, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 30 May 2019 / Revised 1 July 2019 / Accepted 26 July 2019)

ABSTRACT

Recently, optical phased array(OPA) based laser detection and ranging(LADAR) has gained great interest to replace the traditional mechanical light detection and ranging technique(LiDAR). In OPA-based LADAR, it is well known that phases of laser pulses traveling through each of channels should be the same to obtain a narrow free-space single beam without noise-like ripples in the far field. However, it is difficult to provide such ideal condition due to the fabrication errors. To tackle this problem, any algorithms should be necessary to compensate the initial random phases of each channel in OPA antenna. In this paper, we propose a hill-climbing based phase calibration algorithm and evaluate the performance of the proposed algorithm.

Key Words : LADAR, Optical Phased Array(광위상배열 안테나), Hill-Climbing(언덕 오름), Phase Calibration(위상 정렬), Objective Function(목적 함수)

1. 서 론

LADAR(Laser Detection And Ranging)는 송신기에서 전송한 레이저 펄스가 사물에 반사된 후 수신기까지 돌아오는 비행시간(Time-of-Flight; ToF)을 측정하여 사물까지의 거리를 탐지하는 기술이다. 4차 산업혁명의

도래와 더불어 자율 주행 기술의 상용화로 인하여 LADAR 기술은 최근 더 많은 관심을 받고 있다. 기존의 기계식 라이더(Light Detection And Ranging; LiDAR), MEMS 기반 라이더는 구동부가 존재하여 상대적으로 크고 고장이 나기 쉬운 단점이 있어, 광위상배열(Optical Phased Array; OPA) 안테나를 이용한 반도체 기반 고정형(solid-state) LADAR 개발을 위해 다양한 연구가 진행되고 있다¹⁾. 특히, 소형화된 LADAR는 드론, 무인로봇, 무인항공기 등 소형 무기체계에 탑재

* Corresponding author, E-mail: taehoonkim@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

될 수 있기 때문에 국방 분야에서도 활발히 연구가 진행되고 있다^{2]}.

초기에는 실리콘(silicon) 기반의 광위상배열 구조가 제안되었으나, 높은 전력을 광도파로(waveguide)로 인가했을 때 발생하는 비선형성(nonlinearity) 때문에 높은 출력을 얻기에 한계가 있다. 그로 인해 상대적으로 먼 거리에 있는 물체를 감지하기에는 무리가 있어 LADAR와 같은 분야에 적용하기에는 어려움이 있을 것으로 예상된다^{3]}. 이러한 한계를 극복하기 위해 실리콘에 비해 상대적으로 낮은 굴절률을 갖는 실리콘 나이트라이드(silicon nitride) 기반의 광위상배열 구조가 제안되었^{4]}, 수년간의 연구에 걸쳐 LADAR 및 근거리 통신 등 실제 시스템으로의 적용 가능성을 확인한 바 있다^{5]}.

광위상배열 안테나는 기계적인 구동부 없이 레이저 빔을 상하좌우로 조향할 수 있는 장점이 있다^{4]}. 안테나 격자 구조의 간격을 조절하거나^{6]}, 안테나를 통과하는 파장을 변화시킴으로써 빔 조향이 가능하다^{7]}. 또한, 열광학(thermo-optic) 위상변조기 혹은 전기광학(electro-optic) 위상변조기를 이용하여 안테나의 각 채널을 통과하는 레이저 펄스의 위상을 조절함으로써 빔 조향이 가능하다^{8]}. 1차원 혹은 2차원 빔 조향에 대한 연구가 많이 진행되어 왔으며, 광위상배열 안테나의 제작 및 실험을 통해 레이저 빔의 형성과 주사각 조절의 가능성이 보고된 바 있다^{9-12]}.

광위상배열 안테나에서 출력되는 빔이 원거리에서 한 점으로 모이기 위해서는 안테나의 인접 채널을 통과하는 레이저 펄스의 위상이 동일하게 유지되어야 한다^{13]}. 나노 공정의 한계, 이종 도파로의 결합 등의 영향으로 인하여 레이저 펄스가 각 채널을 통과할 때 틀어지게 되는 경우가 많은데, 이러한 위상을 바로 잡아줄 수 있는 위상 제어 알고리즘이 필수적이다. 가능한 모든 검색 공간(searching space)을 찾으며 전역 최적(global optimal) 솔루션을 찾는 완전 탐색(exhaustive search) 방법을 이용하여 틀어진 위상이 보상된 정렬된 빔을 얻을 수도 있겠지만, 해당 솔루션을 찾는 데 까지 상당한 시간이 소요되기 십상이다. LADAR를 운용하는 관점에서 온도, 전류 등의 미세한 변화로 인하여 정렬된 빔이 틀어지게 되는 경우, 운용 간에 (혹은 운용 중에) 빔 정렬 알고리즘을 통하여 틀어진 빔을 다시 보정해주는 작업이 필요할 수도 있는데, 복잡도가 높은 알고리즘을 이용하는 것은 LADAR 운용 관점에서의 병목점(bottleneck)이 될 수도 있다. 또한, 가

용하는 레이저 펄스의 파장에 따라 레이저 펄스의 진행 경로차가 달라지기 때문에 가용하려는 모든 파장에 대하여 위상 제어가 필요할 수도 있다.

본 논문에서는 광위상배열 안테나를 통과하는 레이저 펄스의 위상을 보상하여 각 채널을 통과하는 레이저 펄스의 위상을 동일하게 유지하기 위해 언덕 오름 기반의 위상 제어 알고리즘을 제안하며, 알고리즘의 목적 함수를 변화시키며 정렬되는 빔 패턴을 관찰한다. 모의실험을 통하여 제안하는 기법을 검증하며, 전체 검색 공간을 찾지 않고 일부의 검색 공간을 이용하더라도 틀어진 위상을 보상하여 정렬된 빔을 얻을 수 있음을 확인한다.

2. 광위상배열 안테나

Fig. 1은 1×N 광위상배열 안테나의 구성을 보여준다. 레이저 펄스가 통과하는 광도파로, 레이저 펄스를 N개의 채널로 나누어주는 광분배기(splitter), 각 채널을 통과하는 레이저 펄스의 위상(phase)을 조절해주는 광위상변조기(phase modulator), 레이저 펄스를 방사(radiation)시키는 회절격자 구조의 광안테나(grating coupler)로 이루어져있다. 레이저가 광도파로로 주사되며, 광분배기, 광위상변조기를 거쳐 광안테나를 통하여 방사된다.

Fig. 1과 같은 구조를 갖는 광위상배열 안테나는 레이저 펄스의 파장을 변화시킴으로써 방사되는 레이저 빔을 세로(Fig. 1의 y-방향) 방향으로 조향(steering) 할 수 있고, 인접 채널 사이의 위상차를 변화시킴으로써 방사되는 레이저 빔을 가로(Fig. 1의 x-방향) 방향으로 조향 할 수 있다.

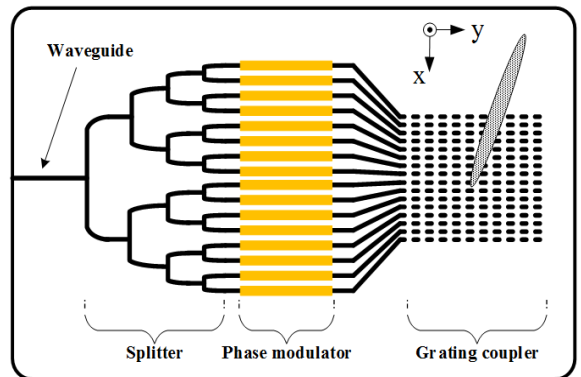


Fig. 1. Configuration of optical phased array antenna

3. 시스템 모델

본 논문에서는 Fig. 1과 동일한 구조를 갖는 일반적인 N-채널 광위상배열 안테나를 고려한다. 위상변조기를 이용하여 각 채널의 위상 조절이 가능하다고 가정한다. 설명의 편의를 위해 초기 정렬을 위한 위상 제어만 고려하며¹⁾, 빔 조향을 위하여 인접 채널 사이의 위상차를 조절하는 위상 제어는 고려하지 않는다²⁾. n 번째($1 \leq n \leq N$) 채널을 통과하는 빔은 $x_n(t) \times e^{j\epsilon_n t}$ 으로 모델링된다. $x_n(t)$ 은 n번째 채널을 통과하는 가우시안 빔을 나타내며, ϵ_n 은 n번째 채널의 임의 위상(random phase)을 나타내며 $[0, \sigma]$ ($0 \leq \sigma \leq 2\pi$)의 균등 분포(uniform distribution)를 따른다. Ω 는 위상변조기를 통해 인가 가능한 양자화 된(quantized) 위상의 집합을 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$\Omega = \left\{ 2\pi \frac{l}{L} \mid l = 0, \dots, L-1 \right\} \quad (1)$$

수식 (1)에서 L 은 인가 가능한 위상의 개수이다. 각 채널의 위상을 변화시키기 위해, 위상변조기를 통해 열 혹은 전기를 가하게 되는데 본 논문에서는 이러한 물리적인 현상을 다루지는 않고, 추가적으로 가해지는 위상의 정도만을 고려한다. $\omega_n \in \Omega$ 는 n번째 채널에 추가적으로 인가되는 위상을 나타낸다. 결과적으로, n번째 채널의 보상된 위상(calibrated phase)는 $\epsilon_n + \omega_n$ 로 나타내지게 된다. 광위상배열 안테나를 통해 얻어지는 원거리 장(far-field pattern)은 다음과 같이 표현된다.

$$F \left\{ \sum_{n=1}^N x_n(t) \times e^{j(\epsilon_n + \omega_n)t} \right\} \quad (2)$$

여기서, $F(\cdot)$ 는 푸리에 변환(Fourier transform)이다.

4. 위상 제어 알고리즘

4.1 알고리즘 목적

광위상배열 안테나에서 방사된 빔이 원거리에서 하

- 1) 제안하는 위상 제어 알고리즘은 광위상배열 안테나 기반 시스템(e.g., 반도체 기반 LADAR)의 초기 정렬뿐 아니라 구동 중 위상 정렬에도 응용 가능하다.
- 2) 인접 채널 간의 위상차($\Delta\phi$)를 동일하게 변화시켜주면, 빔 조향이 가능하다²⁾.

나의 정렬된 빔으로 형성되기 위해서는 각 채널을 통과하는 레이저 펄스의 위상이 동일하게 유지되어야 한다. 하지만, 각 채널을 통과하는 레이저 펄스의 위상은 안테나의 물성, 동작 온도, 공정상의 한계 등의 미세한 요인에 의해 영향 받기 쉬우며, 그로 인해 각 채널을 통과하는 레이저 펄스의 위상은 무작위로 흐트러지게 된다($\epsilon_n \neq \epsilon_{n'}$, for $n \neq n'$).

Fig. 2는 각 채널을 통과하는 레이저 펄스 위상의 무작위성(randomness)의 정도(σ)에 따른 원거리에서 형성되는 빔 패턴을 보여준다. 시스템 모델에서 설명한 바와 같이 각 채널의 임의 위상은 균등 분포 확률을 따르는 확률 변수로 모델링했기 때문에 모의실험을 진행하는 매 시행마다 원거리장 빔 패턴이 달라진다. 따라서, Fig. 2는 특정 시행의 스냅샷(snapshot)을 캡처한 결과를 보여주고 있다.

모든 레이저 펄스가 이상적으로 동일한 위상을 가질 때에는 원거리에서 정렬된 빔을 얻을 수 있다. 단, 메인 빔 이외의 사이드로브(side lobe)가 관찰되는 것은 광위상배열 안테나를 구성하는 광도파로의 이산적인(discrete) 배치로 인해 발생하는 자연스러운 물리적 현상이다. 레이저 펄스 위상의 무작위성의 정도가 심해질수록 ($\sigma \uparrow$) 원거리에서 리플이 많은 정렬되지 않은 빔이 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 본 예제를 통해 레이저 펄스 간의 위상을 일정하게 유지시켜주는 것이 얼마나 중요한 이슈인지 확인할 수 있다.

광위상배열 안테나의 각 채널을 통과하는 레이저 펄스의 위상을 변조시키기 위해 추가적인 위상이 인가되게 되는데, 이 때 양자화 된 이산적인 위상이 인

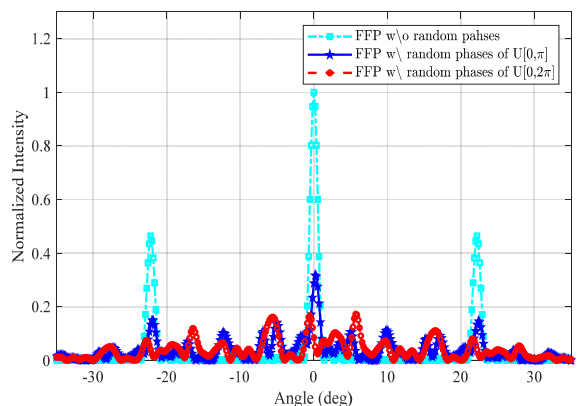


Fig. 2. Comparison of far-field patterns for varying the amount of randomness

가되게 된다3). 각 채널마다 인가할 수 있는 위상이 L 개이고 광위상배열 안테나의 모든 채널을 고려할 때, 인가 가능한 모든 경우의 수는 N^L 개가 된다. Fig. 3은 채널 별로 인가 가능한 위상의 수(L)를 변화시키며 최적의 위상 제어를 위해 검색해야하는 검색 공간 (searching space)의 크기를 보여준다. 인가 가능한 위상의 수(L)가 많아짐에 따라 검색 공간이 기하급수적으로(exponentially) 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 채널의 수가 많아짐에 따라 검색 공간이 커지는 것 또한 확인할 수 있다. 따라서, 모든 검색 공간을 검색하지 않아도 틀어진 위상을 적절히 보상할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 국부 최적(local optimal)을 찾는 대표적인 알고리즘인 언덕 오름(hill climbing) 알고리즘을 응용한다. 국부 최적이라는 것은 전체 검색 공간이 아닌 주어진 검색 공간에서 찾아지는 최적의 솔루션을 의미한다. 모든 검색 공간을 찾는 것이 아니기 때문에 솔루션을 찾는 데까지 소요되는 시간을 줄일 수 있는 장점이 있으나, 솔루션의 정확도가 떨어질 수 있는 단점이 내재한다. 특히, 언덕 오름 알고리즘은 주어진 문제를 해결하기 위해 임의의 솔루션으로부터 시작해 해당 솔루션의 인접 공간을 검색하며 더 개선된 결과를 찾는다. 더 개선된 결과를 만들어내는 솔루션이 있다면, 해당 솔루션의 인접 공간을 재검색한다. 개선된 결과가 나오지 않을 때까지 동일한 절차를 반복한다.

Fig. 4는 언덕 오름 알고리즘을 묘사한 그림이다. 완전 탐색(exhaustive search or brute force)을 이용할 경우에 전역 최적(global optimal)의 솔루션을 얻을 수 있으며, 여기서 전역 최적의 솔루션이란 각 채널의 위상을 완벽히 보상하여 보상된 위상의 값이 0이 되게 하는 솔루션을 의미한다(Fig. 7 참조). 전역 최적을 찾기 위해 전체 공간인 U 를 모두 검색해야 하지만(i.e., $|U|=L^N$), 언덕 오름 알고리즘을 이용할 경우 $\bigcup_{i=1}^I S_i$ 공간만을 검색해도 되며4), $S_i \cap S_{i'} = \phi$ for $i \neq i'$ 인 경우에는 총 $\sum_{i=1}^I |S_i|$ 개의 원소만 검색하면 된다. Fig. 4에 묘사된 것과 같이 언덕 오름 알고리즘은 모든 검색

공간(U)을 검색하는 것이 아니기 때문에 국부 최적(local optimal)의 솔루션을 반환하게 된다. 여기서, 국부 최적의 솔루션이란 각 채널의 틀어진 위상을 보상하여 모든 채널의 보상된 위상이 동일해질 수 있게 하지만, 보상된 위상의 값이 0이 아닌 솔루션을 의미한다. 다행스럽게도, 위상 정렬 알고리즘의 목적은 원거리에서 정렬된 빔을 형성할 수 있는 솔루션을 찾는 것이며, 정렬된 빔을 보장하기 위해서 모든 채널의 보상된 위상이 동일하기만 하면 되고, 해당 솔루션이 전역 최적일 필요는 없다. 따라서, 언덕 오름 알고리즘이 전역 최적 솔루션을 반환하지 못하는 단점은 크게 고려하지 않아도 무방하다. 오히려, 언덕 오름 알고리즘을 이용하여 연산량을 줄이는 장점을 누리면서 정렬된 빔을 얻을 수 있게 된다.

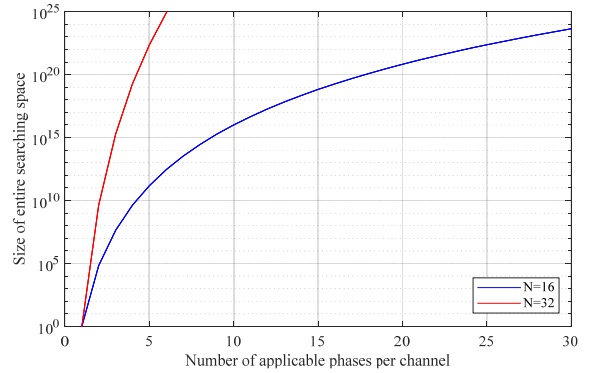


Fig. 3. Comparison of the size of searching space for varying the number of applicable phase levels per channel

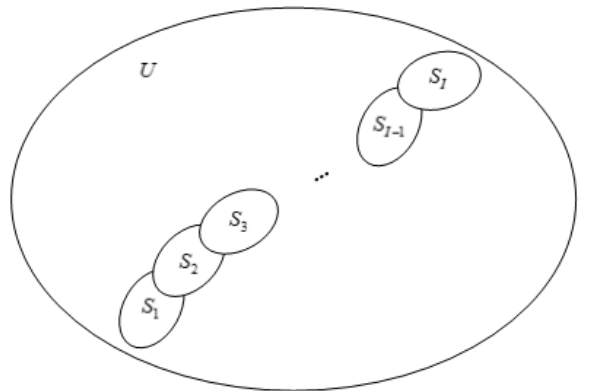


Fig. 4. Comparison of searching space between exhaustive search and hill-climbing algorithms

- 3) 인가되는 제어 값이 디지털화된 값이기 때문에 실제로 인가되는 위상 또한 양자화 된 형태가 된다.
- 4) 각 집합에서 고려하는 솔루션들이 일부 겹칠 수도 있다. 또한, 각 집합의 크기가 다를 수도 있지만, 본 논문에서는 분석의 편의를 위해 모든 집합의 크기가 동일하다고 가정하였다.

4.2 목적 함수 설계

목적 함수(objective function)의 설정 방법에 따라 제안하는 위상 정렬 알고리즘이 반환하는 솔루션이 달라질 것이다. 원하는 빔 패턴에 따라 Table 1과 같이 다양한 목적 함수를 설계할 수 있다.

Table 1. Types of objective functions

Objective functions	Definitions
P_s	메인 빔의 세기
$\frac{P_s}{P_{N-}}$	메인 빔의 세기 대 메인 빔의 좌측 잡음 비
$\frac{P_s}{P_{N+}}$	메인 빔의 세기 대 메인 빔의 우측 잡음 비
$\frac{P_s}{P_N}$	메인 빔의 세기 대 잡음 비

P_s 는 메인 빔의 세기(intensity)를 나타낸다. 빔이 정렬되기 전에는 원거리 장에서 어떤 부분이 메인 빔에 해당하는지 알 수 있는 방법이 없기 때문에, 정렬 여부와 관계없이 원거리 장에서 가장 큰 세기를 갖는 부분이 메인 빔이라고 간주해야 한다. 따라서, P_s 는 수식 (2)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_s = \max |F \left\{ \sum_{n=1}^N x_n(t) \times e^{j(\epsilon_n + \omega_n)t} \right\}|^2 \quad (3)$$

메인 빔 주변의 잡음(혹은 리플)은 메인 빔의 질(quality)를 저하시키는 요인이 된다. 메인 빔 기준으로 좌측의 평균 잡음 세기를 P_{N-} 로 정의하였으며, 메인 빔 기준 우측의 평균 잡음의 세기를 P_{N+} 로 정의하였다. P_N 은 메인 빔 주변의 평균 잡음의 세기를 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_N = \frac{P_{N-} + P_{N+}}{2} \quad (4)$$

5) 메인 빔을 기준으로 좌측/우측 첫 번째 골(valley)을 지나 관찰되는 모든 샘플들을 잡음으로 간주하였다.

4.3 위상 제어 알고리즘

주어진 목적 함수를 최대화 할 수 있도록 각 채널에 인가하는 최적의 위상 벡터 $w^* = (\omega_1^*, \dots, \omega_N^*)$ 을 찾아야 한다. Fig. 5는 본 논문에서 제안하는 언덕 오름 기반의 위상 제어 알고리즘의 흐름도이다. 보다 자세히 말하면, i 는 검색 공간의 인덱스를 나타내며, j 는 주어진 검색 공간을 구성하는 인가 위상 벡터의 인덱스를 나타낸다. i 번째 검색 공간을 구성하고, $|S_i|$ 개의 인가 위상 벡터에 대해 원거리 장 패턴을 관찰한다. 주어진 목적 함수의 값을 증가시키는 후보가 있으면, 목적 함수의 최댓값과 그 때의 인가 위상 벡터를 갱신한다. $G(S_i)$ 는 i 번째 검색 공간에서 얻을 수 있는 목적 함수의 최댓값을 나타낸다. $G(S_{i-1})$ 과 비교하여 더 나은 값이 검색되었을 경우 새로운 검색 공간 S_{i+1} 을 구성하여 동일한 절차를 반복한다.

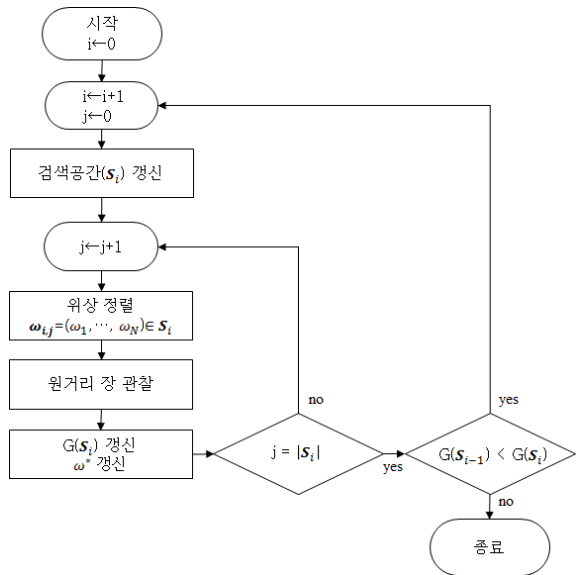


Fig. 5. Flow chart of our proposed phase calibration algorithm

5. 모의실험

제안한 위상 제어 알고리즘의 성능 평가를 위해 Matlab을 이용하여 모의실험을 진행하였다. 모의실험에서 사용된 변수 및 값은 Table 2에 나열되어 있다. 각 채널이 갖는 임의 위상은 모의실험 때 시행마다

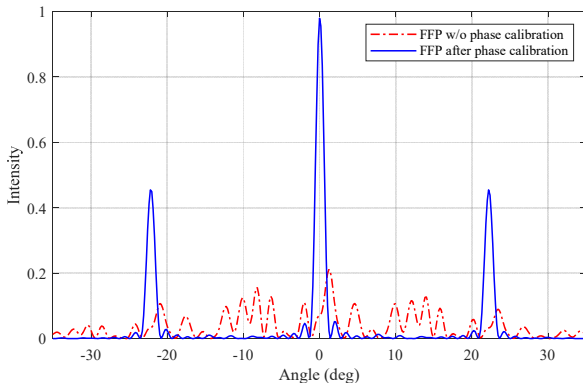
달라지기 때문에, 동일한 랜덤 시드(seed)를 이용하여 임의의 위상을 고정시킨 상태에서 모의실험을 진행하였다. 다시 말해, 주어진 랜덤 시드에서 16개의 채널이

Table 2. Simulation parameters and values

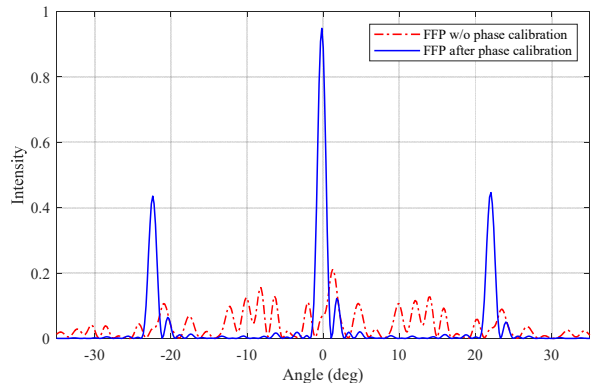
Parameters	Values
Number of channels (N)	16
Channel width	2 μm
Channel pitch	4 μm
Wavelength	1550 nm
Number of applicable phase levels per channel (L)	30

갖는 임의의 위상은 항상 동일하며, 이 상태에서 알고리즘을 적용하였을 때의 결과들을 도시하는 방법으로 빔 패턴을 표현하였다.

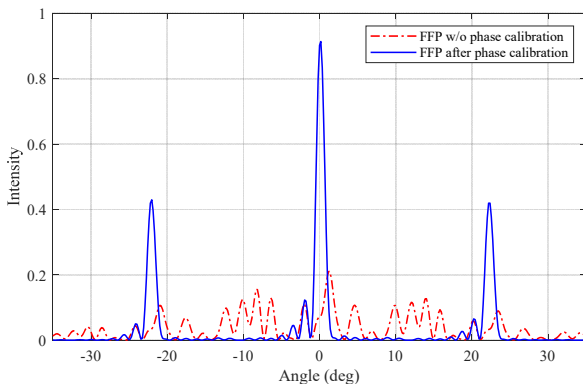
Fig. 6은 Table 1에 명시된 목적 함수에 따라 정렬된 빔 패턴을 보여준다. 동일한 임의의 위상을 고려했기 때문에, Figs. 6(a)-6(d)에 도시된 것과 같이 알고리즘이 적용되기 전에는 항상 동일한 빔 패턴을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한, 제안한 위상 제어 알고리즘을 이용했을 때 빔이 성공적으로 정렬되는 것을 확인할 수 있었으며, 목적 함수의 설계 원리에 따라 예상했던 빔 패턴을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 예를 들어, Fig. 6(b)와 같이 메인 빔 세기 대 메인 빔 기준 좌측 잡음 비를 최대화 하는 방향으로 최적화시켰을 때에는, 메인 빔 기준 우측에서 빔의 질을 저하시키는 리플이 관찰되는 것을 확인할 수 있었다. 또



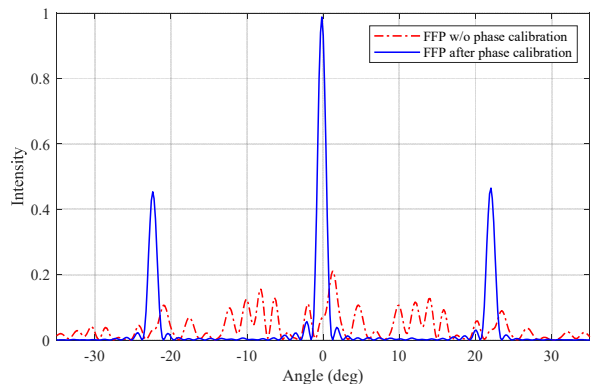
(a) Main beam only



(b) Main beam power to the left-side noise power



(c) Main beam power to the right-side noise power



(d) Mean beam power to the overall noise power

Fig. 6. Comparison of far-field patterns with/without phase calibration for various objective functions

한, 메인 빔으로 집중되어야 할 전력이 잡음으로 새어나갔기 때문에 메인 빔의 세기가 약간 감소한 채로 빔이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 또 다른 예로, Fig. 6(d)와 같이 메인 빔 세기 대 잡음 비를 최대화하는 방향으로 최적화 시킨다는 것은 결국 메인 빔 주변의 잡음에 해당하는 부분의 전력을 메인 빔으로 집중시키는 방향으로 최적화하는 것으로 해석할 수 있으며, 그로 인해 Fig. 6(a)와 상당히 유사한 빔 패턴을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 위상 제어 알고리즘을 적용하기 전/후의 각 채널의 위상을 보여준다. 알고리즘을 적용하기 전의 위상을 보면, 모든 채널이 상이한 위상을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 경우, Fig. 6에 도시된 알고리즘 적용 전의 빔 패턴과 같이 원거리에서 정렬된 빔을 관찰 할 수 없다. 모의실험 상에서는 각 채널의 틀어진 위상을 알 수 있기 때문에, 이를 완벽하게 보상할 수 있는 전역 최적 솔루션을 알 수 있으며, 해당 솔루션을 이용했을 때 보상된 위상 또한 비교를 위해 표현하였다. 위상 제어 알고리즘을 적용했을 경우에, 국부 최적의 솔루션을 통해 틀어진 위상이 보상되는 것을 확인할 수 있었다. 전역 최적이든 국부 최적이든, 각 채널에 인가하는 위상을 양자화하는 과정에서 발생하는 양자화 오차(quantization error)로 인하여 모든 채널이 완벽하게 동일한 위상을 갖게 하는 것은 불가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 각 채널에 인가하는 위상을 더 세밀한 준위(level)로 양자화 한다면 ($L \rightarrow \infty$) 동일한 위상을 갖게 할 수 있을 것이다.

Fig. 8은 위상 제어 알고리즘을 적용하기 전/후의 빔 패턴을 보여주는 그림이다. Fig. 8은 Fig. 6(d)와 동일한 그림을 포함하고 있지만, 빔 정렬의 정확도를 확인하기 위해 전역 최적 솔루션을 적용했을 때의 결과 또한 포함하고 있다. Fig. 8에서 각 채널의 임의의 위상을 안다는 가정 하에 해당 위상을 보상하기 위한 솔루션을 Oracle이라고 표현하였고, 해당 솔루션을 적용했을 때 전역 최적의 값을 얻을 수 있다. 실제 안테나가 동작하는 환경에서 찾는 것은 거의 불가능한 솔루션이지만, 공정한 비교를 위해 기준(baseline)으로 잡았다.

Fig. 7에서 관찰할 수 있듯이 제안한 위상 제어 알고리즘이 항상 전역 최적의 솔루션을 반환하는 것이 아니기 때문에 Oracle 솔루션과는 다른 결과를 반환했지만, Fig. 8에서 관찰할 수 있듯이 Oracle 솔루션을 인가했을 때 얻을 수 있는 빔 패턴과 유사한 빔 패턴

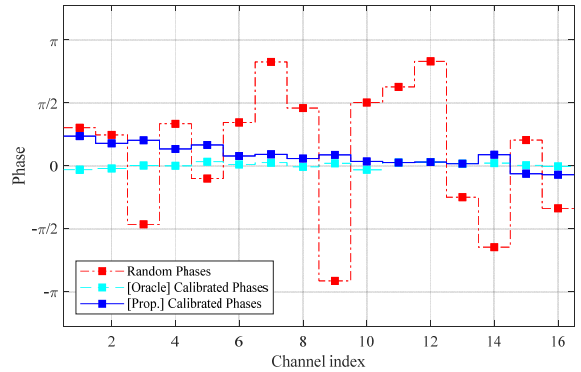


Fig. 7. Comparison of calibrated phases

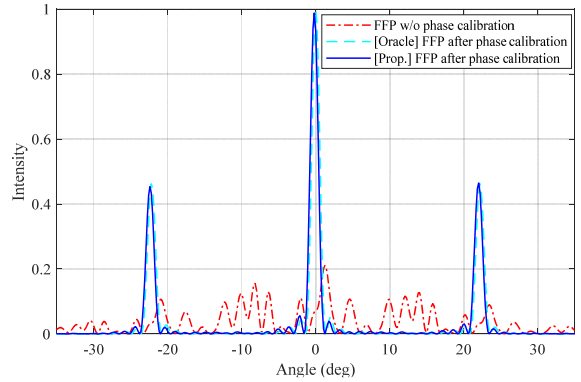


Fig. 8. Comparison of far-field beam patterns

을 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 전역 최적의 솔루션을 반드시 찾지 않아도 상당히 질 좋은 정렬된 빔을 얻을 수 있기 때문에, 알고리즘의 종료 조건을 잘 설계하는 것 또한 중요한 이슈가 될 것으로 보인다.

6. 결론

본 논문에서는 광위상배열 안테나의 초기 위상 제어를 위한 언덕 오름 기반의 빔 정렬 알고리즘을 제안하였고, 목적 함수에 따른 빔 정렬 패턴의 변화를 살펴보았다. 제안한 알고리즘을 통해 위상이 정렬되는 것을 확인할 수 있었으며, 국부 최적의 솔루션을 이용하여 정렬된 빔을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

제안한 알고리즘이 정상적으로 동작하기 위해서는 반드시 빔 패턴의 재연성이 확보되어야 한다. 즉, 알

고리즘이 동작하는 동안에 온도 등의 영향으로 칩의 동작 특성이 변경되지 않도록, 잡음의 영향으로 인하여 동일한 입력에 대하여 원거리 장 출력 빔 패턴이 달라지지 않도록 주의를 해야 한다. 또한, 제안하는 알고리즘을 이용하여 운용 간에 (혹은 운용 중에) 흐트러진 빔을 정렬할 수 있을 것으로 예상하며, 이는 solid-state LADAR의 보급 가능성을 더 증대시키는데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 “광위상배열 기반 LADAR 송수신 기술 연구(UE171060R)”의 일환으로 수행된 내용이며, 연구에 조언을 주신 채창준 박사님과 과제에 참여하는 아이쓰리시스템(주), 광운대학교, 부산대학교 관계자분들께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

References

- [1] Jie Sun, Erman Timurdogan, Ami Yaacobi, Ehsan Shah Hosseini & Michael R. Watts, “Large-Scale Nanophotonic Phased Array,” *Nature* 493, pp. 155-199, Jan. 2013.
- [2] Taehoon Kim and Chang-Joon Chae, “A Study of Beam Steering of LADAR Based on Optical Phased Arrays,” *KIMST Annual Conference Proceedings*, pp. 1234-1235, 2018.
- [3] Martijn J. R. Heck, “Highly Integrated Optical Phased Arrays: Photonic Integrated Circuits for Optical Beam Shaping and Beam Steering,” *Nanooptics*, Vol. 6, No. 1, pp. 93-107, 2017.
- [4] Christopher V. Poulton, Matthew J. Byrd, Manan Raval, Zhan Su, Nanxi Li, Erman Timurdogan, Douglas Coolbaugh, Diedrik Vermeulen, and Michael R. Watts, “Large-Scale Silicon Nitride Nanophotonic Phased Arrays at Infrared and Visible Wavelengths,” *Opt. Lett.*, Vol. 42, pp. 21-24, 2017.
- [5] C. V. Poulton et al., “Long-Range LiDAR and Free-Space Data Communication with High-Performance Optical Phased Arrays,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 25, No. 5, pp. 1-8, Sept.-Oct. 2019.
- [6] N. Tyler, D. Fowler, S. Malhouitre, S. Garcia, P. Grosse, W. Rabaud, and B. Szlag, “SiN Integrated Optical Phased Arrays for Two-Dimensional Beam Steering at a Single Near-Infrared Wavelength,” *Opt. Express*, Vol. 27, pp. 5851-5858, 2019.
- [7] Feng Xiao, Weiwei Hu, and Anshi Xu, “Optical Phased-Array Beam Steering Controlled by Wavelength,” *Appl. Opt.*, Vol. 44, pp. 5429-5433, 2005.
- [8] Seong-Hwan Kim, Jong-Bum You, Yun-Gi Ha, Geumbong Kang, Dae-Seong Lee, Hyeonho Yoon, Dong-Eun Yoo, Dong-Wook Lee, Kyoungsik Yu, Chan-Hyun Youn, and Hyo-Hoon Park, “Thermo-Optic Control of the Longitudinal Radiation Angle in a Silicon-Based Optical Phased Array,” *Opt. Lett.*, Vol. 44, pp. 411-414, 2019.
- [9] Karel Van Acoleyen, Wim Bogaerts, Jana Jágorská, Nicolas Le Thomas, Romuald Houdré, and Roel Baets, “Off-Chip Beam Steering with a One-Dimensional Optical Phased Array on Silicon-on-Insulator,” *Opt. Lett.*, Vol. 34, pp. 1477-1479, 2009.
- [10] Karel Van Acoleyen, Hendrik Rogier, and Roel Baets, “Two-Dimensional Optical Phased Array Antenna on Silicon-on-Insulator,” *Opt. Express*, Vol. 18, pp. 13655-13660, 2010.
- [11] David Kwong, Amir Hosseini, John Covey, Yang Zhang, Xiaochuan Xu, Harish Subbaraman, and Ray T. Chen, “On-Chip Silicon Optical Phased Array for Two-Dimensional Beam Steering,” *Opt. Lett.*, Vol. 39, pp. 941-944, 2014.
- [12] J. C. Hulme, J. K. Doylend, M. J. R. Heck, J. D. Peters, M. L. Davenport, J. T. Bovington, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, “Fully Integrated Hybrid Silicon Two Dimensional Beam Scanner,” *Opt. Express*, Vol. 23, pp. 5861-5874, 2015.
- [13] Tin Komljenovic and Paolo Pintus, “On-Chip Calibration and Control of Optical Phased Arrays,” *Opt. Express*, Vol. 26, pp. 3199-3210, 2018.