

Grover 기반 위상배열안테나의 위상 최적화 연구

가득현, 이재우, 오연정, 이종민, 김은기

LIG넥스원

deukhyeon.ga@lignex1.com, jaewoo.lee2@lignex1.com, yeonjeong.oh@lignex1.com,
jongmin.lee01@lignex1.com, eunki.kim@lignex1.com

A Study on Phase Optimization of Phased-Array Antennas Based on the Grover Algorithm

Ga Deuk Hyeon, Lee Jae Woo, Oh Yeon Jeong, Lee Jong Min, Kim Eun Ki

LIG Nex1.

요약

본 논문은 Grover 양자탐색 알고리즘을 이용하여 위상배열안테나의 위상 최적화를 수행하는 새로운 접근법을 제시한다. 위상배열안테나의 위상 조합은 안테나 수와 탐색 정밀도가 증가할수록 지수적으로 늘어나며, 기존의 전수 탐색 방식은 계산 복잡도와 시간이 급격히 증가하는 한계를 가진다. 본 연구에서는 검증에 위해 2x2 배열(4개 안테나)과 0°, 60°, 120°, 180°의 위상 단계를 적용하여 총 256개 조합 중 최대 수신신호세기(RSSI)를 갖는 최적 상태를 탐색하였다. 그 결과 Grover 알고리즘은 탐색 횟수를 약 \sqrt{N} 수준으로 줄이면서도 높은 정확도를 유지하였으며, 이러한 방법이 위상 제어뿐 아니라 대규모 배열안테나 및 저궤도 위성통신 시스템과 같은 고정밀 탐색 분야에도 활용될 수 있음을 보여준다.

I. 서론

위상배열안테나는 다수의 안테나 소자를 배열하여 각 소자의 위상과 진폭을 제어함으로써 원하는 방향으로 전파를 형성하는 기술로, 무인기, 위성통신, 레이더, 5G/6G 이동통신 등 다양한 분야에서 핵심적인 역할을 수행하고 있다[1],[2]. 그러나 안테나 수가 증가하고 탐색 정밀도가 높아질수록, 최적의 위상을 찾기 위해 처리해야 하는 데이터의 양이 급격히 많아지며, 이에 따라 시스템 제어의 복잡도와 연산 부담 또한 커지는 문제가 발생한다. 이로 인해 기존의 전수 탐색이나 일반적인 최적화 기법은 계산 복잡도와 탐색 시간이 급격히 증가하는 한계를 가진다. 최근 이러한 문제와 함께 수많은 데이터를 처리하여 최적화하거나 효율적인 정답을 도출하기 위한 접근으로 양자컴퓨팅 기반 탐색 알고리즘이 활발히 연구되고 있으며, 이 중 Grover 양자탐색은 비구조화 탐색에서 필요한 탐색 횟수를 선형(N)에서 약 제곱근(\sqrt{N}) 수준으로 줄여, 고전적 방법 대비 탐색 효율을 향상시키는 것으로 알려져 있다[3]. 이를 활용하여, 위상배열안테나의 위상 최적화 문제에 Grover 알고리즘을 적용하였다. 이를 통해 탐색 정밀도의 향상에 따라 증가하는 계산 부담을 완화하고, 보다 효율적인 위상 탐색 과정을 구현하고자 하였다. 이를 검증하기 위해 2x2 배열 구조(4개 안테나)와 0°, 60°, 120°, 180°의 위상 단계를 사용하여 256개 위상 조합 중 최대 수신신호세기(RSSI)를 갖는 최적 위상의 값을 도출하였다. 그 결과, 탐색 횟수를 약 \sqrt{N} 수준으로 줄이면서도 높은 탐색 정확도를 유지할 수 있었다. 또한, 이러한 연구의 과정을 통해, 실제 적용 시 더 많은 안테나 수나 고정밀도를 위한 위상 제어에도 동일한 알고리즘 확장이 가능함을 확인할 수 있다.

본 논문은 위상배열안테나의 위상 제어 문제를 양자탐색으로 해결할 수 있음을 실험적으로 제시하고, 향후 대규모 배열 및 저궤도 위성통신 시스템으로의 확장 가능성을 제시한다.

II. 본론

본 논문에서는 2x2 구조의 위상배열안테나를 기반으로, 각 안테나가 선택할 수 있는 위상을 0°, 60°, 120°, 180°의 네 단계로 설정하였다. 이에 따라 총 256개의 가능한 위상 조합이 존재하며, 각 조합에 대해 수신 신호 세기(Received Signal Strength Indicator, RSSI)를 반영하였다. RSSI는 각 안테나에서 방사된 신호가 위상 차이에 따라 서로 보강되거나 상쇄되는 현상을 단순화하여 계산하였다. 이를 위해 복잡한 간섭 효과 대신, 위상 차이에 따른 신호 세기의 변화를 코사인 제곱 형태로 근사하여 모델링하였다(그림 1 참조).

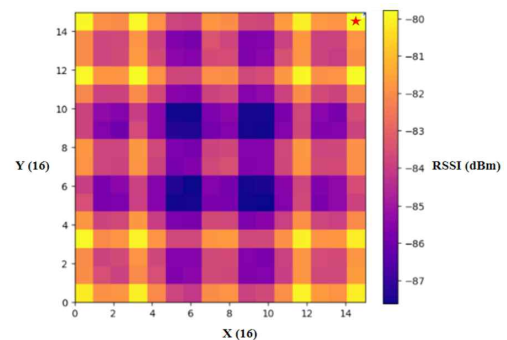


그림 1. RSSI 분포도

전체 256개 상태의 RSSI 값을 16x16 격자 형태로 시각화한 2D평면이다. RSSI의 높은 영역은 노란색으로 표시되며, 우측 상단 위의 별표로 표시된 지점이 최적 위상 조합 상태이다. RSSI는 -90 dBm에서 -80 dBm 범위로 분포하며, 목표 상태는 단일 최대값을 보인다.

Grover 알고리즘은 양자 중첩과 간섭 현상을 활용하여 탐색 효율을 제공한 수준으로 향상시키는 알고리즘이다. 총 8개의 큐비트를 사용하여 256개의 상태를 표현하였으며, 각 큐비트 쌍은 하나의 안테나 위상을 나타내

도록 구성하였다.

양자 논리회로는 균등 중첩 상태를 생성하는 초기 단계, 최적 위상 조합에 해당하는 상태의 위상을 반전시키는 오라클(Oracle), 그리고 전체 확률 분포의 평균에 대한 반사를 수행하는 디퓨저(Diffuser)로 구성되었다(그림 2 참조).

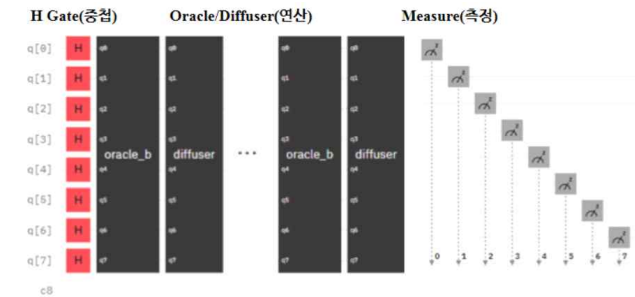


그림 2. 양자 논리회로 구성의 예

실험은 IBM의 Qiskit 양자 시뮬레이터 환경에서 수행되었으며, 상태벡터 기반의 이상적(noiseless) 시뮬레이션을 통해 결과를 도출하였다. Grover 알고리즘의 반복 횟수는 이론적 근사식에 따라 약 13회로 설정하였고, 각 반복 단계에서 상태 확률 분포의 변화를 관찰하였다(수식 (1) 참조)[3].

$$\frac{\pi}{4}\sqrt{N} \quad (1)$$

그림 3은 초기 중첩 상태의 확률 분포를 나타낸 것으로, 목표 상태의 확률이 반복에 따라 점진적으로 증폭되는 현상을 보여준다(그림 4 참조).

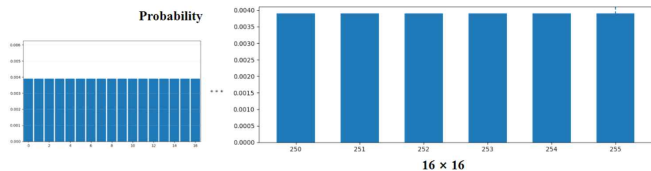


그림 3. 초기 256개의 중첩 상태의 확률

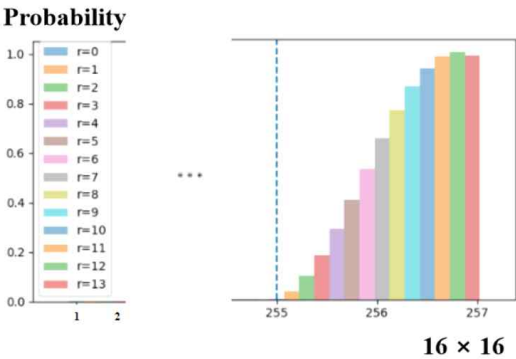


그림 4. 13회 반복 횟수에 따른 확률상태의 변화

표 1은 Grover 알고리즘 적용 전후의 결과를 비교한 것이다. ‘목표 타겟 RSSI’는 실제 최적 상태(이상적 조합)에서의 수신 세기를 의미하며, ‘탐색 결과 RSSI’는 Grover 알고리즘 수행 후 가장 높은 확률로 탐색된 상태에서 계산된 RSSI를 나타낸다. 또한, 각 안테나별 위상 값 역시 비교를 통해 탐색 결과가 일치함을 확인하였다.

구분	RSSI (dBm)	안테나1 Phase	안테나2 Phase	안테나3 Phase	안테나4 Phase
목표타겟	-79.77	180	180	180	180
탐색결과	-79.77	180	180	180	180

표 1. Grover 알고리즘 시뮬레이션 결과

고전 탐색(Classical exhaustive search)과 Grover 알고리즘의 탐색 효율을 비교하기 위해, 동일한 상태공간 크기(N = 256)에 대한 질의 횟수와 성공 확률을 비교하였다. 전수 탐색은 256회의 RSSI 평가를 요구하지만, Grover 알고리즘은 약 13회의 오라클 호출로 동일한 결과를 얻었다. 표 2의 비교 테이블에서 볼 수 있듯이, 이상적 환경에서 Grover 알고리즘의 성공 확률은 약 100%에 근접하며 고전 탐색 대비 효율적인 결과를 확인할 수 있다.

기법	반복횟수	확률
고전 탐색	256	100%
Grover 알고리즘	13	99.2%

표 2. 고전방식과 Grover알고리즘의 비교

시뮬레이션을 통해 Grover 알고리즘이 위상 배열 안테나의 위상 최적화 문제에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 전수 탐색이 256회의 평가를 요구하는 반면, 본 알고리즘은 약 13회의 반복만으로 동일한 최적 상태를 높은 확률로 탐색할 수 있었다.

III. 결론

본 논문에서는 2×2 위상배열안테나의 위상 최적화 문제를 대상으로 Grover 양자탐색 알고리즘의 적용 가능성을 확인하였다. Qiskit 시뮬레이션을 통해 총 256개의 위상 조합 중 최적 상태를 약 13회의 반복만으로 탐색할 수 있음을 확인하였으며, 이는 고전적 전수 탐색 대비 약 20배 이상의 탐색 효율 향상을 의미한다. 이러한 연구의 과정을 통해 무인기 운용, 대규모 배열안테나, 그리고 저궤도 위성통신 시스템과 같은 고정밀 탐색 및 실시간 위상 제어 분야에서도 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

참 고 문 헌

[1] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4th ed., Wiley, 2016.

[2] R. C. Hansen, Phased Array Antennas, 2nd ed., Wiley, 2009.

[3] L. K. Grover, "A fast quantum mechanical algorithm for database search," Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC), pp. 212 - 219, May 1996.