

양자 레이더 시스템 개발 동향 및 전망

정 종 진*, 전 상 운°, 정 방 철*, 김 철 영*, 김 진 웅**

Tendencies and Prospects on Quantum Radar Systems

Jong-Jin Jeong*, Sang-Woon Jeon°, Bang-Chul Jung*, Choul-Young Kim*, Jin-Woong Kim**

요 약

최근 미국, 유럽, 중국을 중심으로 2030년 전후 실전배치를 목표로 6세대 전투기 개발에 대한 연구 및 논의가 활발히 이루어지고 있다. 그에 따라 6세대 전투기의 핵심 기술로 평가받는 차세대 레이더 시스템의 연구 및 개발에 대한 논의도 활발히 진행 중이다. 특히 최근 중국 언론에서 발표된 양자 레이더 시스템의 향상된 표적 검출 및 스텔스 탐지 능력은 차세대 레이더 시스템으로써 양자 레이더의 가능성을 열어두었다. 양자 레이더는 기존의 레이더 시스템을 확장한 개념으로써 빛의 양자상태인 광자 기반 신호의 송수신에 기반하여 표적을 식별한다. 이로 인해 적은 양의 광자를 사용하여 표적 검출이 가능하며 스텔스 기술의 무력화, 전자전 기술의 무력화, 보안성 강화 등 다양한 잠재력을 지닌다. 따라서 본 논문은 양자 기술의 핵심이 되는 양자 얽힘 현상과 양자 레이더 시스템의 핵심 요소인 양자 조명에 대한 전반적인 연구 동향을 살펴본다. 또한 현재까지 연구된 양자 조명의 이론적, 실험적 결과를 바탕으로 양자 조명을 레이더 시스템에 적용했을 경우의 기술적 장점과 구현의 어려움에 대해 분석한다.

Key Words : quantum radar, quantum illumination, quantum entanglement, photon detection, quantum sensing

ABSTRACT

Recently, research and study on the development of 6th generation fighter aircraft have been actively discussed, mainly in the US, Europe, and China. Accordingly, the next-generation radar system, which is regarded as a key component of the 6th generation fighter aircraft, has been also discussed. In particular, the advanced target detection and stealth detection capabilities of quantum radar systems announced in the Chinese press opened up the possibility of a quantum radar system as the next generation radar system. Quantum radar extends the concept of conventional radar systems and detects targets based on the transmission and reception of quantum states of photons. Accordingly, it can detect targets with a relatively small number of photons, enable to provide neutralization of stealth and electronic warfare techniques and enhanced security. Therefore, in this paper, we review the research trends of quantum entanglement, which is the core of various quantum technologies, and then review quantum illumination, a key element of quantum radar systems. Based on the theoretical and experimental results of quantum illumination studied up to now, we analyze the technical advantages and implemental difficulties of applying quantum illumination to radar systems.

※ 본 연구는 국방과학연구소 (ADD)의 지원을 통해 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-0381-0258)Dept. of EE, Hanyang University, jeongjj@hanyang.ac.kr 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-0199-2254)Dept. of MIE, Hanyang University, sangwoonjeon@hanyang.ac.kr, 종신회원

* (ORCID:0000-0002-4485-9592, ORCID:0000-0002-5532-7399)Dept. of EE, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 종신회원, cykim@cnu.ac.kr

** (ORCID:0000-0002-0368-3324)Agency for Defense Development (ADD), kimjwaf@add.re.kr

논문번호 : 201808-247-C-RN, Received August 16, 2018; Revised November 14, 2018; Accepted November 14, 2018

I. 서 론

최근 미국, 유럽, 중국 등을 중심으로 6세대 전투기 개발에 대한 논의가 이루어지고 있으며, 특히 2030년 전후 실전배치를 목표로 미국에서 활발히 연구되고 있다. 아울러 6세대 전투기의 핵심 기술의 하나인 차세대 레이더에 대한 연구 개발도 진행 중에 있으며 특히 양자 레이더에 대한 구현 가능성도 집중 조명되고 있다. 본 논문은 이러한 세계적인 추세에 맞춰 한국형 6세대 전투기 운용환경을 고려한 양자 레이더의 구현 가능성에 대해 분석하고자 한다. 먼저 양자 레이더의 기본이 되는 물리 현상과 관련 실험에 대해 소개하고, 표적 탐지를 위해 실험, 개발 중인 양자 시스템에 대한 최신 연구 결과를 소개하고자 한다. 또한 관련 연구들의 분석 결과를 바탕으로 기존 레이더 시스템과의 차별성 및 핵심 개발 이슈에 대해 소개하고자 한다.

2013년을 기점으로 이탈리아의 University of Milan, Polytechnic University of Turin, INRim(Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) 공동 연구팀이 양자 조명 시스템을 실험적으로 구현한 결과^{1,2}가 발표되어 양자 레이더 구현의 가능성을 보여주었다. 또한 기존의 가시광선 대역에서 개발된 레이더 기술과 달리 EOM 변환기를 통해 마이크로웨이브 대역에서 동작하는 양자 얽힘 시스템이 개발되어 주목받고 있다³. 기존 레이더 시스템은 RF 전자기와 신호의 송수신을 통한 표적 검출을 수행한다. 즉, 많은 양의 전자를 사용하는 구조라고 할 수 있다. 이에 비해 양자 레이더 시스템은 기존의 레이더 시스템을 확장한 개념으로써 빛의 양자상태인 광자 기반 신호 송수신이 이루어진다. 이로 인해 적은 양의 광자를 사용하여 표적 검출이 가능하며 다음과 같은 잠재력을 지닌다.

- ▶ 스텔스 기술의 무력화: 현재 스텔스기에 적용된 스텔스 기술은 전자파 흡수재료 및 난반사 설계 기술로 나눌 수 있다. 하지만 이러한 스텔스 기술들은 RF 전자기파를 기준으로 개발된 기술들에 해당되며, 광자 혹은 광자 얽힘 현상을 활용하는 양자 레이더는 스텔스 기술의 원천 무력화가 가능하다.
- ▶ 향상된 표적 검출 성능 제공: 기존 레이더 시스템은 RF 전자기와 신호의 송수신을 통해 표적을 검출한다. 반면, 양자 레이더 시스템은 빛의 양자 상태(광자)의 얽힘 현상을 통해 표적을 검출한다. 따라서 광자의 얽힘 상태를 이용한 양자 조명 시스템을 적용할 경우, 잡음이 매우 심한 환경에서 얽힘 현상을 이용

해서 향상된 표적 검출 성능을 제공할 수 있다.

- ▶ 전자전 기술의 무력화 및 보안성 강화: 전자전 체계는 적의 위치나 방향을 탐지하여 아군에게 전파하고, 수집된 신호를 역이용하여 적의 공격으로부터 아군의 플랫폼을 보호하며, 아군에 관한 정보 이용을 저지시키는 체계이다. 전자파를 이용하여 적의 레이더, 통신장비, 미사일 등을 무력화시키기 위한 무기체계로서 지상, 해상, 공중의 광대한 네트워크를 구축하여 전자정보(ELectronic INTelligence - ELINT) 및 통신정보(COMMunication INTelligence - COMINT) 등의 적의 전자파 스펙트럼을 수신할 뿐만 아니라, 필요시 다양한 재밍 기법을 이용하여 적의 전자파 스펙트럼 신호를 교란시킨다. 양자 레이더 및 양자 통신을 통하여 재밍 등 적의 고도화된 전자전 기술을 무력화시킬 수 있으며, 동시에 전장 상황에서 센서들로부터 얻은 정보의 안전한 송수신이 가능하다.
- ▶ 타기종 레이더 시스템 및 군용/상용 통신 시스템과의 간섭 해결: 미래 전장환경은 개별 플랫폼에서 모든 전투요소가 복합적으로 결합되어 실시간 정보 공유가 가능한 네트워크 중심으로 변화되고 있으며, 핵심 네트워크는 위성을 이용한 우주 네트워크, 공중 플랫폼들을 연결하는 공중 네트워크, 정찰 및 감시를 수행하는 센서 네트워크, 지상 플랫폼들과 지휘본부를 연결하는 지상 네트워크로 구성되며 이러한 네트워크들을 이용한 지휘 통제 및 교전 지원 형태로 발전하고 있다. 즉, 개별 플랫폼 중심에서 모든 전투요소가 복합적으로 결합되어 실시간 정보 공유가 가능한 네트워크 중심(Network-Centric Warfare - NCW)으로 변화하고 있다. 단일 광자 혹은 얽힘 광자를 사용하는 양자 레이더 시스템의 경우, 기존의 RF 레이더 주파수 대역과 중첩되지 않은 대역을 사용하기 때문에 타기종 레이더 시스템과의 간섭 현상을 현저히 줄일 수 있다. 특히 RF 펄스파에 의존한 기존 레이더 시스템은 군용/상용 통신 시스템으로부터의 간섭에 매우 취약하며 양자 레이더는 이러한 간섭에 대한 원천적인 해결이 가능하여 NCW 기반의 미래전장환경에서의 레이더 운용에 큰 장점을 가진다.

따라서 본 논문은 차세대 레이더 시스템으로 주목받고 있는 양자 레이더의 구현 가능성을 분석하기 위하여 II장에서 양자 레이더의 기초 원리가 되는 양자

업힘에 대한 기본적인 이론과 양자 업힘이 파괴되는 환경에서도 양자 업힘의 이점을 유지시킬 수 있는 양자 조명(Quantum Illumination) 현상에 대한 이론들을 소개한다. III장에서는 양자 조명 현상을 실험적으로 구현한 연구들을 통해 양자 조명의 가능성과 실험적으로 확인된 양자 조명 현상의 이점을 소개한다. IV장에서 양자 업힘 및 양자 조명을 사용한 양자 레이더 시스템의 동작 원리를 기술적 특징 및 장단점을 분석하며, 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 양자 조명(Quantum Illumination) 이론적 모델

기존 레이더 시스템은 RF 전자기파 신호의 송수신을 통해 표적을 검출하며, 이를 위해 비교적 많은 양의 전자를 사용한다. 이에 비해 양자 레이더 시스템은 기존의 레이더 시스템을 확장한 개념으로써 빛의 양자상태인 광자 기반 신호 송수신이 이루어지며 상대적으로 적은 양의 광자를 사용하여 표적 검출이 가능하다. 양자 레이더는 양자 역학을 기반으로 한 송수신단 구조를 통해 기존 레이더 시스템으로 검출이 힘들었던 저 반사율, 고 잡음 환경에서 표적 검출 가능성을 증가시킨다. 또한 양자 레이더 시스템은 양자 업힘이라는 양자 컴퓨팅, 양자 통신, 양자 계측 중 다양한 양자 기술의 핵심이 되는 매우 유용한 물리 현상을 이용하여 표적 검출 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 하지만 레이더가 동작하는 실제 환경에서는 대부분의 업힘 광자 쌍이 파괴되거나 소실된다^{1,4,7}. 이는 특히 원거리 송수신을 요구하는 레이더 시스템에 치명적인 제약 조건으로 작용한다. 이러한 양자 업힘 현상의 한계에도 불구하고 이를 여전히 활용할 수 있다는 양자 조명(Quantum Illumination)의 가능성에 대해 2008년도 미국 MIT 대학에서 최초로 이론적 분석 결과가 발표되었다⁴. 따라서 본 장에서는 양자 조명 시스템의 기초가 되는 양자 업힘을 소개하고 양자 조명의 이론적 모델에 대해 소개하고자 한다.

2.1 양자 업힘(Quantum Entanglement)

양자 업힘이란 양자 시스템에서 나타나는 상관관계가 시공간적으로 멀리 떨어져 있는 상태에서도 나타나는 비국소적 특성을 나타내는 현상이다. 이를 나타내는 가장 대표적인 형태가 “벨 상태(Bell State)” 로 다음과 같은 네 가지 구조를 가진다.

$$\begin{aligned}
 |\phi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B) \\
 |\phi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_B - |1\rangle_A|1\rangle_B) \\
 |\psi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|1\rangle_B + |1\rangle_A|0\rangle_B) \\
 |\psi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|1\rangle_B - |1\rangle_A|0\rangle_B)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

벨 상태는 두 개의 2준위 상태가 중첩되어 있는 상태로, 2준위 상태 2개가 서로 상관관계를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 양자 업힘 상태는 다양한 방법으로 구현이 가능하며 양자 레이더는 광자의 업힘을 이용한 방법이 연구되고 있다. 그림 1은 양자 업힘을 발생시키는 SPDC (Spontaneous Parametric Down Conversion) 과정이다. 레이저 빔을 비선형 크리스탈에 주사하면 업힘 광자 쌍이 확률적으로 발생하며 이때 에너지 보존법칙에 의하여 주사된 빔의 총 에너지가 업힘 광자 쌍의 에너지로 전달/보존되며 마찬가지로 모멘트 보존법칙에 의하여 주사된 빔의 총 모멘트가 업힘 광자 쌍의 모멘트로 전달/보존된다^{1,6}.

$$k_{pump} = k_s + k_i \quad w_{pump} = w_s + w_i \tag{2}$$

Type 1 SPDC를 통해 만들어진 업힘 광자는 모멘트 보존을 만족하는 진동수를 선택하는 것이 가능하므로 진동수 업힘 상태의 구현이 가능하다.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|w_1\rangle_A|w_2\rangle_B + |w_2\rangle_A|w_1\rangle_B) \tag{3}$$

또한 Type 2 SPDC의 경우 방출된 원추형의 빛의 위쪽은 수직편광, 아래쪽 원추는 수평편광을 나타내며, 두 개의 원추가 중첩되는 점에서 편광 업힘 상태의 업힘 광자가 생성된다.

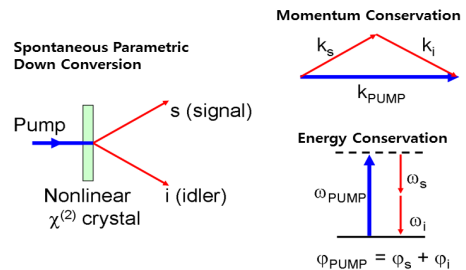


그림 1. SPDC를 통한 업힘 광자 생성 과정
Fig. 1. Creation of entangled photons through SPDC

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle_A|V\rangle_B + |V\rangle_A|H\rangle_B) \quad (4)$$

2.2 양자 조명(Quantum Illumination)

앞서 언급한 양자 얽힘 현상은 양자 컴퓨팅, 양자 통신, 양자 계측 등 다양한 양자 기술의 핵심이 되는 매우 유용한 물리 현상이다. 이론적으로 광자의 얽힘을 통해 간섭 측정 기반 광자 레이더의 표적 검출 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있지만, 레이더가 동작하는 실제 환경에서는 대부분의 얽힘 광자 상이 파괴되거나 소실된다^{1,4,7}. 이는 특히 원거리 송수신을 요구하는 레이더 시스템에 치명적인 제약 조건으로 작용한다. 이러한 양자 얽힘 현상의 한계에도 불구하고 이를 여전히 활용할 수 있다는 양자 조명(Quantum Illumination)의 가능성에 대해 2008년도 미국MIT 대학에서 최초로 이론적 분석 결과가 발표되었다⁴. 이후 좀 더 엄밀한 이론적 분석이 수행되었으며 실험적으로 이를 증명했다^{12,6}. 양자 조명이란 양자 얽힘이 파괴되거나 소실되는 환경에서도 얽힘 광자를 이용하여 표적 검출 성능을 향상시킬 수 있는 양자 센싱 기술이다. 양자 조명은 NOON state를 이용하는 간섭 측정 양자 센싱 기술⁵과는 다른 특성을 지닌다. 양자 조명은 광자 얽힘이 파괴되지 않는 잡음이 적고, 감쇄가 없는 환경에서는 성능의 향상을 보이지 않는다. 오직 양자 얽힘이 파괴되고 손실되는 환경에서 검출 성능의 향상을 보여준다.

2008년도 MIT에서 최초로 분석한 간략화 된 이론적 모델을 소개한다^{4,5}. 표적의 반사율을 η , 진동수 또는 편광의 광 모드(Optical Mode)당 평균 잡음 광자수는 b 이며 $b \ll 1$ 인 상황을 가정하며 수신기(Photodetector)의 구별 가능한 얽힘 모드(Entangled Mode)수를 d 라고 표기했다. 이 모델에서는 충분히 짧은 표적 검출 시간을 가정하여 매 표적 검출 시 최대한 개의 잡음 광자만이 수신된다고 가정했다. 즉 $db \ll 1$ 인 환경을 가정하여 얽힘 광자와 얽히지 않은 단일 광자를 기반으로 한 표적 검출 성능을 이론적으로 분석하였다.

얽히지 않은 단일 광자 기반 시스템의 분석을 위해 표 1과 같이 양자 조명 미적용 시스템의 작동 상황과 탐지 확률을 나타내었다.

SNR을 이용하여 $SNR > 1$ 인 영역($\eta/b > 1$) 을 저손실 영역, $SNR < 1$ 인 영역($\eta/b < 1$) 을 고손실 영역으로 표기한다. 저손실 영역의 경우 표적의 반사율이 평균 잡음보다 큰 경우이며, 고손실 영역의 경우 표적의 반사율보다 평균 잡음이 더 큰 경우다.

표 1. 양자 조명 미적용 시스템의 작동 상황과 탐지 확률
Table 1. Operation status and detection probability of a system with no quantum illumination

	Probability	State
$p(no not\ there)$	$1 - b$	Negative detection of a target that is not within range
$p(no there)$	$(1 - b)(1 - \eta)$	Negative detection of a target that is within range
$p(yes not\ there)$	b	Positive detection of a target that is not within range
$p(yes there)$	$b(1 - \eta) + \eta$	Positive detection of a target that is within range

저손실 영역에서 신호와 잡음을 구분하기 위해 필요한 광자수는

$$N_H \approx O(1/\eta) \quad (6)$$

고손실 영역의 경우 신호와 잡음을 구분하기 위한 광자수는

$$N_L \approx O(8b/\eta^2) \quad (7)$$

로 주어지게 되므로 N_H 는 N_L 보다 작다는 결론을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} N_L &\approx O(8b/\eta^2) \\ &\approx O(1/\eta) \times O(b/\eta) \\ &\approx N_H \times O(b/\eta) \\ &> N_H \end{aligned} \quad (8)$$

얽힘 광자를 사용하는 양자 조명 시스템을 생각해 보자. 양자 조명을 사용하기 위해 한 쌍의 얽힘 광자가 필요하다. 얽힘 광자 중 하나를 표적에 송신하고, 나머지 하나를 레이더 시스템에 저장해 놓는다. 이 두 광자는 가능한 광자 모멘트 자유도 모드 (Momentum degrees of freedom over all possible modes) d 에 얽혀있는 상태다^{4,5}.

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{d}} \sum_{k=1}^d |k\rangle_B |k\rangle_A \quad (9)$$

$|k\rangle$ 는 단일 광자가 모드 k 에 있는 상태를 의미하기 때문에 $|\Psi\rangle$ 는 2 광자 시스템을 의미한다. 단일 광자에서의 작동 상황과 탐지 확률을 추정할 것과 마찬가지로 광자 얽힘 상태를 이용해서 탐지 확률 및 신호 대 잡음비, 신호와 잡음을 구분하기 위한 필요한 광자 수를 추정할 수 있다.

표 2의 결과를 통해 얽힘은 평균 잡음 광자 수 b 를 얽힘 모드의 개수인 d 배 감소시키는 것을 확인할 수 있다.

$$b \rightarrow \frac{b}{d} \tag{10}$$

따라서 얽힘 상황에서의 SNR은 다음과 같이 주어지며^[4,5], SNR을 d 배 만큼 증가시킨다.

$$SNR \approx O(\eta d/b) \tag{11}$$

양자 조명 시스템 또한 $SNR > 1$ 인 영역 ($\eta d/b > 1$) 을 저손실 영역, $SNR < 1$ 인 영역 ($\eta d/b < 1$) 을 고손실 영역으로 구분할 수 있다.

저손실 영역에서 신호와 잡음을 구분하기 위해 필요한 광자수는

$$N_H \approx O(1/\eta) \tag{12}$$

고손실 영역의 경우 신호와 잡음을 구분하기 위한 광자수는

$$N_L \approx O(8b/\eta^2 d) \tag{13}$$

표 2. 양자 조명 적용 시스템의 작동 상황과 탐지 확률
Table 2. Operation status and detection probability of a system with no quantum illumination

	Probability	State
$p(no not\ there)$	$(1 - \frac{b}{d})$	Negative detection of a target that is not within range
$p(no there)$	$(1 - \eta)(1 - \frac{b}{d})$	Negative detection of a target that is within range
$p(yes not\ there)$	$\frac{b}{d}$	Positive detection of a target that is not within range
$p(yes there)$	$(1 - \eta)\frac{b}{d} + \eta$	Positive detection of a target that is within range

표 3. 단일 광자 레이더 시스템과 양자 조명 레이더 시스템의 비교^[5]

Table 3. Comparison of single photon radar systems and quantum illumination radar systems^[5]

	Single photon	Entangled photon
$p(no not\ there)$	$1 - b$	$1 - b/d$
$p(no there)$	$(1 - \eta)b + \eta$	$(1 - \eta)b/d + \eta$
$p(yes not\ there)$	b	$\frac{b}{d}$
$p(yes there)$	$(1 - \eta)b + \eta$	$(1 - \eta)b/d + \eta$
SNR	$O(\eta/b)$	$O(\eta d/b)$
High SNR	$\eta/b > 1$	$\eta d/b > 1$
N_H	$O(1/\eta)$	$O(1/\eta)$
Low SNR	$\eta/b < 1$	$\eta d/b < 1$
N_L	$O(8b/\eta^2)$	$O(8b/\eta^2 d)$

로 주어지며 양자 조명 시스템을 사용하는 경우에도^[4,5], 고손실 영역에서 신호와 잡음을 구분하기 위해 더 많은 광자가 필요하다.

표 3과 양자 조명 시스템 분석을 통해서 얻은 결론을 통해 양자 조명 적용 시 평균 잡음 광자 수를 얽힘 모드의 개수인 d 배 만큼 감소시키며 d 배의 SNR 향상을 얻는다. 왜냐하면 얽힘 광자를 사용함으로써 잡음 광자를 신호 광자로 잘못 해석할 확률을 $\frac{1}{d}$ 로 감소시켰기 때문이다. 따라서 양자 조명 적용 시 저손실 영역의 범위가 늘어남을 확인할 수 있다. 또한 SNR의 향상은 표적의 유무를 확인하기 위해 사용하는 광자 수에 영향을 미치는데, $SNR > 1$ 인 저손실 영역의 경우 필요한 광자 수가 양자 조명 시스템을 적용해도 변화가 없는 반면, $SNR < 1$ 인 고손실 영역의 경우 필요한 광자 수가 d 배 만큼 감소한다. 즉 양자 조명의 효과는 고손실 영역에서 크게 나타난다고 결론지을 수 있다^[5]. 얽힘의 생존이 보장되지 않는 고손실 영역에서 나타나는 SNR의 증가는 신호 광자와 저장된 광자의 얽힘이 환경에 의해 파괴된다 하더라도, 검출 성능을 향상시킬 수 있는 획기적인 방법이라고 말할 수 있다. 하지만 이러한 양자 조명 시스템은 원천적인 문제를 가지고 있다. 현재 양자 조명 시스템은 실험실 규모에서만 수행되었으며 상용 레이더 시스템 규모로 확장된 결과는 발표되지 않았다. 아울러 신호 광자 수신 문제 또한 남아있다. 수신단에서 사용하는 검출기는 신호 광자와 저장된 광자의 가능한 모드 k 에 대해 $w = w_k^S + w_k^A$ 의 주파수 상호 연관도 측정이 가능해야 하며, 도착시간 (Time Of Arrival, TOA) 상호 연관도를 확인해야 하

므로 최적의 광자 측정 성능을 지닌 검출기를 사용해야 한다. TOA의 경우 표적까지의 거리를 알지 못한다면 상호 연관도 측정은 매우 어려워진다. 따라서 양자 조명 시스템만을 이용해서 미확인 표적을 확인하는 경우 기존 레이더 시스템보다 향상된 성능 보장의 한계가 있다. 따라서 양자 조명 시스템은 단독으로 운용되기 보다는 기존 레이더 시스템과 상호 보완적으로 운용되어야 할 것으로 예상된다. 예를 들어 스텔스 탐지 기술의 경우 현재 UHF 대역에서 동작하는 레이더, 수동형 스텔스 감지 레이더, Multistatic 레이더 등 다양한 기술들이 개발되고 있다. 따라서 이러한 기술들로 스텔스에 대한 1차 탐지를 수행하고, 스텔스 출몰이 의심되는 경우에 해당 양자 레이더로 2차 정밀 탐색이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌^[4]에서는 표적의 유무에 관계없이 최대 하나의 광자만이 각 측정 시간동안 수신단에서 관측됨을 가정하였다. 이러한 이론적 분석은 양자 조명으로 인한 표적 검출 성능 향상을 직관적으로 이해하는데 도움이 되지만, 실제 환경에서 잡음 광자의 수는 정규분포를 따르기 때문에 양자 조명 시스템을 활용한 실제 표적 검출 성능 향상 정도를 규명하는데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 이후 다음과 같은 좀 더 정확한 모델링에 기반을 하여 양자 조명의 표적 검출 성능 향상 정도를 분석했다^[8].

1) 연속과 SPDC에 의해 생성되는 얽힘 광자 쌍의 개수를 가우시안 상태(Gaussian state)로 모델링하여 보다 정밀한 양자 통계치를 적용하였다^[9].

$$|\Psi\rangle_{SI} = \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{\frac{N_S^n}{(N_S+1)^{n+1}}} |n\rangle_S |n\rangle_I \quad (14)$$

여기서 N_S 는 모드 당 평균 광자 개수, $|n\rangle_{S,I}$ 는 n 개의 입자가 수신호(Signal)와 종속신호(Idler)에 있는 상태를 의미한다.

2) 송신단에서 수신단까지 양자가 전달되는 환경을 잡음, 소실이 존재하는 보손 채널(Bosonic Channel)로 모델링하여 적용했다^[10].

이러한 정규분포 모델을 반영한 이론적 분석을 통해 양자 조명을 기반으로 한 시스템과 기존의 결맞음 상태(Coherent State)를 기반으로 한 시스템의 오류 경계(Error Bound)의 차이를 다음과 같은 환경 아래에서

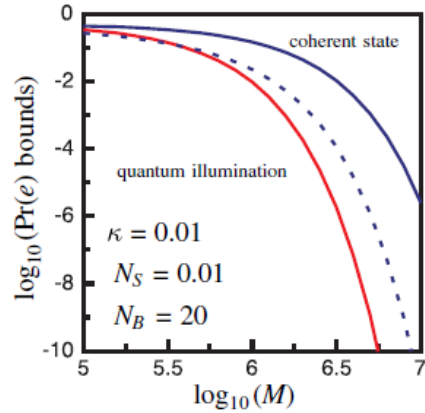


그림 2. 양자 조명 기반 시스템과 기존의 결맞음 상태 기반 시스템의 검출 오류 경계 비교^[8]
Fig. 2. Detection error bound of quantum illumination based system and coherent state based system^[8]

비교했다. 연속과 SPDC에 의해 생성된 M 개의 독립적 수신호-종속신호 모드 쌍(Mode pair)이 매우 많은, $M \rightarrow \infty$, 모드 당 평균 광자 개수가 매우 작은, $N_S \ll 1$, 열잡음이 매우 많으며, $N_B \gg 1$, 표적의 반사율이 매우 작은, $\kappa \ll 1$, 고손실 영역을 가정하였다^[11]. 양자 조명 시스템의 경우 수신호와 종속신호의 상호 연관도 측정을 통해 표적 유무를 판단하고, 결맞음 상태 시스템의 경우 단일 신호를 이용하여 표적 유무를 판단한다.

그림 2 는 표적 반사율 $\kappa = 0.01$, 모드 당 평균 광자 개수 $N_S = 0.01$, 평균 열잡음 광자 개수 $N_B = 20$, 인 SNR이 매우 작은 환경에서의 이론적인 검출 오류 확률 경계를 보여준다. 빨간색 실선은 양자 조명 시스템의 오류 확률 상한을 나타내고, 파란색 실선은 결맞음 상태 시스템의 오류 확률 상한, 파란 점선은 결맞음 상태 시스템의 오류 확률 하한을 나타낸다.

III. 양자 조명(Quantum Illumination) 실험

앞서 소개했듯이 2008년도를 기점으로 양자 조명에 대한 이론적인 분석을 통해 양자 얽힘이 파괴되거나 소실되는 환경에서도 여진이 이를 활용하여 향상된 표적 검출 성능을 제공할 수 있음이 밝혀졌다^[4,8]. 이러한 이론적 발견을 기반으로 이후 2013년도에 양자 조명의 가능성을 검증하는 실험적 결과가 발표되었다^[12,6]. 본 장은 양자 조명에 대한 실험 과정 및 주요 결과를 소개하고자 한다.

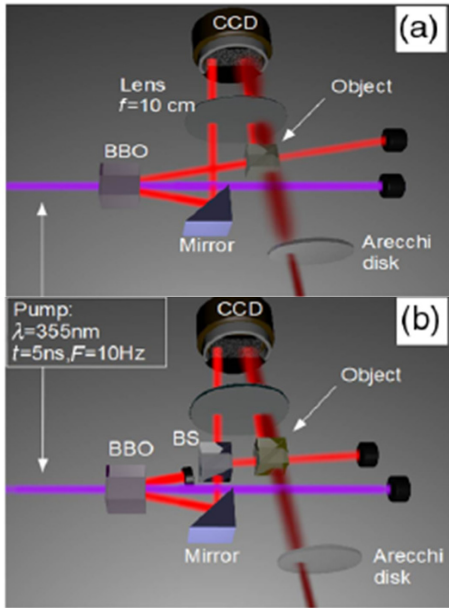


그림 3. (a) 양자 조명 적용 시스템 실험 환경 (b) 양자 조명 미적용 시스템 실험 환경[1]
 Fig. 3. (a) Experimental environment for quantum illumination system (b) Experimental environment for classic illumination system[1]

3.1 양자 조명(Quantum Illumination) 적용 시스템의 성능 향상에 대한 실험^[3,28]

2008년도를 기점으로 이론적으로 분석된 양자 조명의 가능성에 대한 실험적 검증이 2013년도에 최초로 수행되었다. 참고문헌^[1]은 이러한 검증을 위해 그림 3 같은 간단한 실험 환경의 구축을 통해 검증 및 성능 향상 분석을 진행하였다.

그림 3 (a)의 양자 조명 적용 시스템은 다음과 같은 동작 과정을 거친다.

1) [얽힘 광자 쌍 생성] 송신단은 레이저를 BBO 크리스탈에 주사하여 얽힘 광자 쌍을 생성. 편이상 얽힘 광자 쌍에 속한 임의의 광자를 수신호(Signal) 이라고 표기하고 나머지 광자를 중속신호(Idler) 라고 표기한다.

2) [수신호(Signal)/중속신호(Idler) 전송] 생성된 수신호(Signal)은 표적 역할을 하는 빔분파기(Beam splitter, BS)를 통과하여 일부는 CCD 카메라로 바로 전달되며 나머지 일부는 Arecchi Disk에서 나온 잡음과 합쳐져 CCD 카메라로 전달된다. 이때 Arecchi Disk는 얽힘 광자 쌍을 파괴/소멸시키는 잡음을 만드는 역할을 수행한다. 반면 생성된 중속신호(Idler)는 Mirror를 통해 CCD 카메라로 바로 전달된다.

3) [수신단 표적 검출] 수신단은 CCD 카메라로 수

신한 수신호(Signal)과 중속신호(Idler) 간의 상호상관도를 측정하여 표적 유무를 판단한다.

그림 3 (b)의 양자 조명 미적용 시스템은 다음과 같은 동작 과정을 거친다.

1) [얽힘 광자 쌍 생성] 송신단은 레이저를 BBO 크리스탈에 주사하여 얽힘 광자 쌍을 생성. 편이상 얽힘 광자 쌍에 속한 임의의 광자를 수신호(Signal) 이라고 표기하고 나머지 광자를 중속신호(Idler) 라고 표기한다.

2) [수신호(Signal)/중속신호(Idler) 전송] 생성된 수신호(Signal)은 반사경(Mirror)과 빔분파기를 통과하여 일부는 CCD 카메라로 전달된다. 나머지 일부는 표적 역할을 하는 빔분파기를 통과하여 그 중 일부는 CCD 카메라로 바로 전달되며 나머지 일부는 Arecchi Disk에서 나온 잡음과 합쳐져 CCD카메라로 전달된다. 반면, 생성된 중속신호(Idler)는 차단하여 CCD카메라로 전달되지 않게 한다.

3) [수신단 표적 검출] 수신단은 CCD 카메라로 빔분

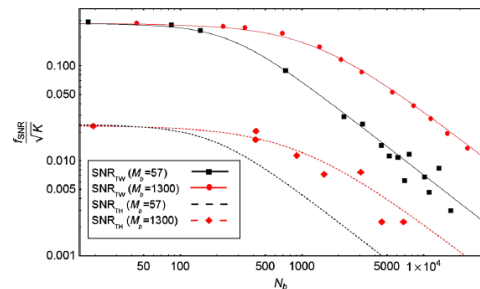


그림 4. 양자 조명 적용 시스템과 양자 조명 미적용 시스템의 신호 대 잡음비[1]

Fig. 4. SNR of a quantum illumination application system and a quantum illumination application system[1]

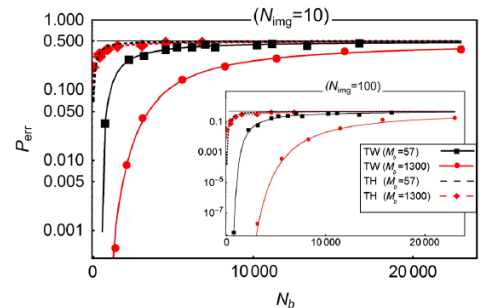


그림 5. 양자 조명 적용 시스템과 양자 조명 미적용 시스템의 오류 확률[1]

Fig. 5. Error probability of a quantum illumination application system and a quantum illumination application system[1]

파기를 통과하여 바로 수신한 주신호(Signal)과 표적 역할을 하는 빔분과기까지 통과하여 수신한 주신호(Signal)의 상호상관도를 측정하여 표적 유무를 판단한다.

그림 4, 5는 각각 양자 조명 시스템(TW)과 양자 조명 미적용 시스템(TH)의 신호 대 잡음비와 오류확률 비교 그래프이다. 실험 결과에서 확인할 수 있듯이 양자 조명 적용 시스템이 기존 양자 조명 미적용 시스템보다 동일 환경에서 향상된 신호 대 잡음비와 낮은 오류확률을 달성함을 확인할 수 있다.

3.2 도청 채널에서의 양자 조명 가능성에 대한 실험^[6]

참고문헌^[6]에서는 그림 6에서와 같은 실험 환경을 구성하여 도청 채널에서의 양자 조명 가능성에 대한 실험을 수행했다. Alice(송신노드)가 Bob(수신노드)에게 정보비트를 보내고자 하는 모델이며 이때 Eve(도청노드)는 도청을 시도하게 된다. 그림에서 사용된 약어의 의미는 다음과 같다.

- SPDC: spontaneous parametric down-converter,
- DM: dichroic mirror, C: collimator,
- CWDM: coarse wavelength-division multiplexer,
- BS: beam splitter, Attn: attenuator,
- EDFA: erbium-doped fiber amplifier,
- DL: delay line, PC: polarization controller,
- PM: phase modulator, AAG: adjustable air gap,
- Pol: polarizer, DCF: dispersion compensating fiber,
- DSF: dispersion-shifted fiber,
- TEC: thermoelectric cooler,
- OPA: optical parametric amplifier, D: detector

위 실험은 다음과 같은 동작 과정을 거친다.

1) [얽힘 광자 쌍 생성] Alice는 SPDC에 레이저를

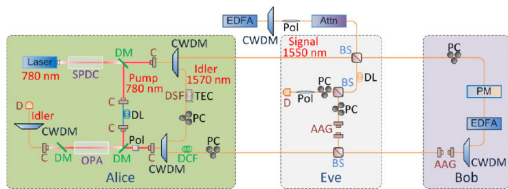


그림 6. 도청 채널에서의 양자 조명 가능성에 대한 실험 환경^[6]
 Fig. 6. Experimental environment for quantum illumination possibility in tap channel^[6]

통과시켜 얽힘 광자 쌍을 생성. 편의상 얽힘 광자 쌍에 속한 임의의 광자를 주신호(Signal)이라고 표기하고 나머지 광자를 종속신호(Idler)라고 표기.

2) [주신호(Signal) 전송/종속신호(Idler) 저장] Alice는 생성된 얽힘광자 쌍을 CWDM에 통과시켜 주신호(Signal)과 종속신호(Idler)를 분리한 후, 주신호(Signal)만을 Bob에게 전송하고 종속신호(Idler)는 저장.

3) [변조] Bob은 수신한 주신호(Signal)을 PM에 통과시켜 정보비트를 전달하기 위한 위상변조를 수행. 즉 정보비트 0은 위상을 0도, 정보비트 1은 위상을 180도로 변조함.

4) [잡음 삽입] 도청 채널에서의 양자 조명의 이득을 규명하기 위하여 Bob은 변조된 주신호(Signal)을 EDFA에 통과시켜 일부 얽힘 광자 쌍의 주신호(Signal)과 종속신호(Idler)의 양자 얽힘이 파괴되도록 함.

5) [Eve 수신과정] Eve는 Bob의 정보비트를 판별하기 위하여 Alice-Bob 경로의 변조 전의 주신호(Signal)과 Bob-Alice 경로의 변조 후의 주신호(Signal) 간의 상호연관도를 측정.

6) [Alice 수신과정] Alice는 Bob의 정보비트를 판별하기 위하여 저장된 종속신호(Idler)와 Bob-Alice 경로의 변조 후의 주신호(Signal) 간의 상호연관도를 측정. 구체적으로 종속신호(Idler)와 수신된 주신호(Signal)을 OPA에 통과시켜 상호연관도를 진폭의 크기로 변환하여 이를 기반으로 정보비트를 판별.

7) [종속신호(Idler) 저장방법] Alice의 경우 Bob의 정보비트를 판별하기 위해서는 종속신호(Idler)를 저장한 후 수신 주신호(Signal)과의 상호연관도를 측정하여야 함. 이를 위해서 Alice는 종속신호(Idler)를 DSF에 통과시켜 시간지연을 겪도록 하며, 이러한 시간지연이 주신호(Signal)이 Alice-Bob-Alice 경로를 거쳐 다시 수신하는데 걸리는 시간지연과 일치하여야 함.

그림 7은 위와 같은 동작 과정을 거친 Alice와 Eve의 오류확률을 도시한 그래프다. 푸른색 실선과 점선은 각각 Alice의 오류확률에 대한 실험값과 이론값이다. 이상적인 환경에서 도출한 이론값과 다소 차이를 보이지만 경향성은 일치하는 것을 확인할 수 있다. 녹색 실선과 점선은 각각 Eve 오류확률에 대한 실험값과 이론값임. 마찬가지로 이상적인 환경에서 도출한 이론값과 다소 차이를 보이지만 경향성은 일치하는 것을 확인할 수 있다. 중요한 점은 양자 조명을 이용한 Alice의 경우 그렇지 않은 Eve에 비해 오류확률을 현

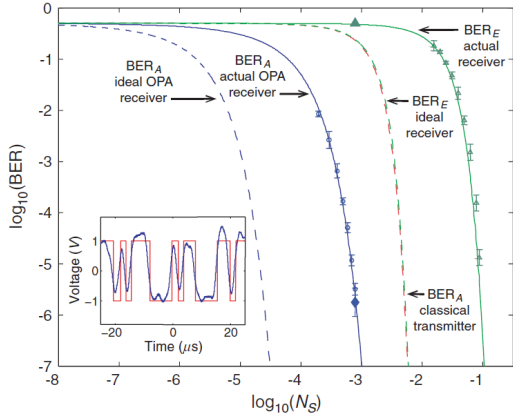


그림 7. 도청 채널에서의 Alice(송신 노드)와 Eve(감청 노드)의 수신오류확률 비교[6]
 Fig. 7. Comparison of reception error probability between Alice (transmitting node) and Eve (interception node) in the tap channel[6]

저히 낮출 수 있음을 두 실험값의 비교로 확인이 가능하다.

두 가지 실험을 통해 다음 두 가지 중요한 사항을 실험적으로 검증했다. 첫 번째로 양자 얽힘이 파괴되거나 소실되는 환경에서도 여전히 양자 조명을 통해 향상된 표적 검출 성능이 제공 가능함을 실험적으로 검증했다. 두 번째로 양자 조명을 기반으로 한 양자 통신의 성능 분석을 통해 도청 혹은 제밍 공격에 강한 시스템 구축이 가능함을 실험적으로 검증했다.

IV. 양자 레이더 시스템 동작 원리

본 장에서는 2, 3장에서 소개한 양자 얽힘, 양자 조명을 활용한 양자 레이더 시스템의 동작 원리에 대해 소개하고자 한다. 레이더 송수신단 구조에 따라 크게 단일광자 레이더, 얽힘 광자 레이더, 마이크로웨이브 대역에서 동작하는 얽힘 광자 레이더로 나눌 수 있다. 이를 바탕으로 각각의 양자 레이더 시스템 별 기술 특징 및 장단점에 대해서 분석하고자 한다.

4.1 단일 광자 레이더

기존 레이더 시스템과 유사한 송수신기 구조를 가지고 있음. RF 레이더와 대신 단일광자를 사용하여 표적을 식별한다. 크게 두 단계로 동작한다.

- 단계 1: 송신단에서 광자를 전송
- 단계 2: 수신단에서 표적을 통해 반사되어 수신된 광자의 유무를 판단하여 표적 식별

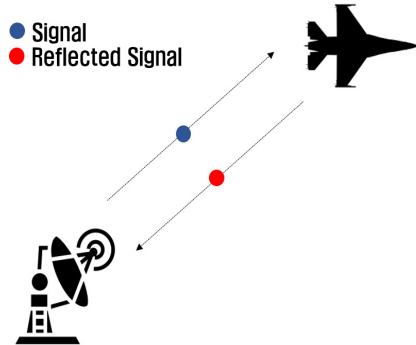


그림 8. 단일광자 레이더 송수신 과정
 Fig. 8. Single photon radar process

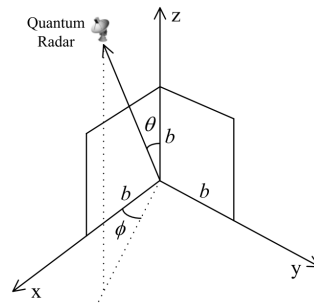


그림 9. 이면각 전파 반사기와 양자 레이더의 상호작용 모델[12]
 Fig. 9. The interaction model of quantum radar and the dihedral corner reflector[12]

기술의 특징 및 장점으로는 상이한 RCS(Radar Cross Section) 제공이라고 할 수 있다. 2014년 중국의 National University of Defense Technology에서 양자 레이더에 대한 RCS 분석을 수행했다[12].

그림 9는 QRCS(Quantum Cross Section) 분석을 위해 이면각 전파 반사기(Dihedral Corner Reflector)와 양자 레이더의 위치를 나타낸 모델이다.

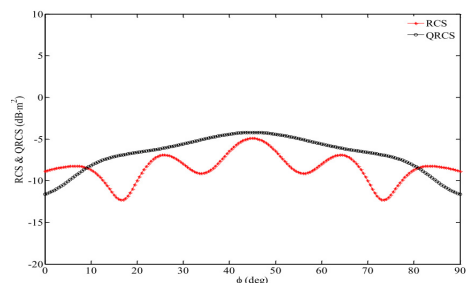


그림 10. 이면각 전파 반사기와 양자 레이더의 상호작용 모델[12]
 Fig. 10. The interaction model of quantum radar and the dihedral corner reflector[12]

그림 10은 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 로 고정 한 뒤, ϕ 를 변화시켜서 RCS와 QRCS를 비교하였다. QRCS가 RCS보다 안정적인 것을 확인할 수 있다. 이는 RF 레이더파와 단일 광자의 전파 특성 차이로 인하여 발생한 차이로, 기존의 RF 레이더 시스템과 통합적으로 운용할 경우 상호 보완적 관계를 형성할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 자연 중에 존재하는 광자로 인하여 표적을 통해 반사된 수신 광자의 검출에 영향을 받는다. 따라서 광자 검출기의 정확도와 관계없이 표적 탐지의 정확도는 제약 받을 것으로 예상된다.

4.2 얽힘 광자 레이더

얽힘 광자 레이더란 2장에서 소개한 양자 조명 기술을 기반으로 한 레이더 시스템을 지칭한다. 좀더 자세히 말하면 얽힘이 소실되는 잡음이 많은 환경에서도 얽힘 광자 쌍을 이용하여 표적 검출 성능을 획기적으로 증가시킨 레이더 시스템을 지칭한다⁴¹. 2013년도를 기점으로 얽힘 현상을 활용하여 양자 조명을 실험적으로 증명한 자료들이 발표되고 있다^{12,61}. 그림 10은 얽힘 광자를 활용하여 양자 레이더의 기본 동작 원리를 나타내는 개념도다. 크게 다음과 같이 세 단계로 동작한다.

- 단계 1: 송신단에서 얽힘 광자쌍 생성
- 단계 2: 송신단에서 광자쌍 중 하나만 전송하고 나머지 하나는 저장
- 단계 3: 표적을 통해 반사되어 수신된 광자와 저장된 광자의 양자 얽힘 유무를 판단하여 표적 식별, 즉 표적을 통해 반사된 수신 광자와 저장된 광자간의 상호 연관도를 측정한다.

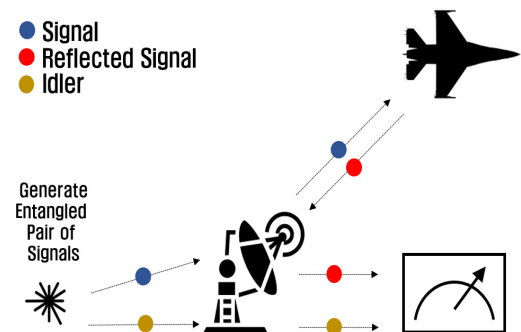


그림 11. 얽힘 광자 레이더 송수신 과정
Fig. 11. entangled photon radar process

단일 광자 레이더 시스템과 동일하게 광자를 송신하여 표적을 탐지하기 때문에 단일 광자 레이더의 이점 또한 얽힘 광자 레이더의 이점이 된다. 하지만 시스템 구현을 위해 광자 저장지연 장치가 필요하다. 저장하고자 하는 광자의 시간 지연을 통해 신호 광자가 표적에 반사되어 수신되는데 걸리는 시간과 일치하도록 설정해야 한다. 즉, 광자가 표적에 의해 반사되어 수신되는데 걸리는 시간지연을 미리 알고 있어야 항상된 표적 탐지가 가능하다. 실제 레이더 시스템은 표적의 위치 및 거리를 탐지를 통하여 추정하기 때문에 이와 같은 접근법이 유용하지 않다. 또한 수백 km 탐지거리를 요하는 전투기 작전환경에서 시간 지연 시스템을 구현한다 하더라도 저장된 광자의 손상여부 또한 확인할 수 없으므로 장시간 광자 저장장치의 구현이 필요할 것으로 예측되므로 양자 조명의 레이더 시스템의 적용은 구현 난이도가 높을 것으로 예상된다.

4.3 마이크로웨이브 대역에서 동작하는 얽힘 광자 레이더

상기 서술한 얽힘 광자 레이더처럼 양자 조명 기술을 기반으로 하며, 얽힘 광자 쌍을 이용한 얽힘 광자 레이더와는 다르게, 마이크로웨이브 대역의 신호와 광 주파수 대역의 신호 사이의 얽힘을 이용하여 표적 검출 성능을 증가시킨³¹ 레이더 시스템을 지칭한다. 최근 신호의 양자적 상태를 보존하면서 주파수를 변환하는 기술^{13,141}이 개발됨에 따라 이를 탐지 및 감지 분야에 적용한 연구 결과가 발표되고 있다. 마이크로웨이브 대역 신호와 광 주파수 대역 신호의 얽힘을 만들기 위해서는 EOM 변환기(Electro-Opto-Mechanical Converter)의 개발이 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. EOM 변환기는 마이크로웨이브 공동(Microwave Cavity), 광 공동(Optical Cavity), 기계식 공진기(Mechanical Resonator)가 결합되어 있는 구조로 양자적 상태를 보존하며 마이크로웨이브 대역에서 광 주파수 대역으로의 상향변환, 광 주파수 대역에서 마이크로 주파수 대역으로의 하향변환, 그리고 마이크로웨이브 공동 모드(Microwave Cavity Mode)와 광 공동 모드(Optical Cavity Mode) 사이의 얽힘을 만들어 준다. 최근 멤브레인(Membrane), 압전소자(Piezoelectric Crystal) 등을 기계식 공진기로 이용하여 EOM 변환기를 구현한 결과가 발표되었다^{15,161}.

마이크로웨이브 대역에서 동작하는 얽힘 광자 레이더 또한 다음과 같은 세 단계로 동작한다.

- 단계 1: 송신단에서 EOM 변환기를 이용하여 얽혀있

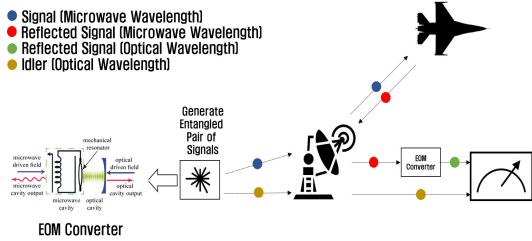


그림 12. 얽힘 광자 레이더 송수신 과정
Fig. 12. entangled photon radar process

는 마이크로웨이브 주신호(Signal), 광 종속신호(Idler) 생성

- 단계 2: 송신단에서 마이크로웨이브 주신호 전송, 광 종속신호 저장한다.
- 단계 3: 표적을 통해 반사되어 수신된 마이크로웨이브 신호를 EOM 변환기에 통과시켜 광 주파수로 변환한 뒤 저장된 종속신호와의 상호 연관도를 측정한다.

마이크로웨이브 대역에서 동작하는 얽힘 광자 레이더는 상기 서술한 얽힘 광자 레이더 시스템과는 다르게 마이크로웨이브 대역의 신호를 이용하여 표적을 탐지한다. 따라서 대기 환경에 영향을 받지 않는 마이크로웨이브 대역의 특성상 얽힘 광자 레이더보다 신호의 송수신이 용이하지만 복잡한 송,수신 과정을 거치기 때문에 에너지 손실의 가능성이 크다. 따라서 발생하는 손실에 대한 엄밀한 분석이 필요하다. 현재 실험실 수준의 EOM 변환기는 10% 이하의 변환 효율을 가지고 있기 때문에 실제 구현을 위해서는 보다 높은 효율의 EOM 변환기의 개발이 필수적이다.

V. 결 론

본 논문은 양자 레이더 시스템의 핵심 요소인 양자 조명에 대한 전반적인 연구 동향을 살펴보았다. 양자 조명 현상의 기반이 되는 양자 얽힘에 대한 간단한 분석과 양자 조명 현상의 이론적 분석 및 실험적 분석을 통해 양자 조명을 레이더 시스템에 적용했을 경우의 이점과 기술적 구현의 어려움에 대해 기술하였다. 양자 레이더 시스템은 크게 단일 광자 시스템, 얽힘 광자 시스템, 마이크로웨이브 대역에서 동작하는 얽힘 광자 시스템으로 나눌 수 있다. 얽힘 광자 시스템뿐만 아니라 단일 광자 시스템 또한 RF 레이더와와 전파 특성 차이로 인해 기존의 레이더 시스템과 차별화된 성능

향상을 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 얽힘 광자 시스템과 마이크로웨이브 대역에서 동작하는 얽힘 광자 시스템은 양자 조명이 적용된 시스템으로 잡음 환경에서의 표적 검출 능력 향상을 얻을 수 있지만 양자 조명 시스템 자체가 저장된 광자와 신호 광자의 동시 측정을 필요하기 때문에 표적까지의 거리 정보가 필요하다는 단점이 존재하며, 또한 마이크로웨이브 대역에서 동작하는 얽힘 광자 시스템의 경우 EOM 변환기 개발이라는 난제가 존재한다. 이러한 이유로 양자 조명을 이용한 시스템은 일차적인 표적 탐색이 이루어진 후에 상세한 표적 탐색 시스템으로 적합할 것으로 예상된다.

현재 양자 레이더 및 양자 기술의 경우 미국과 중국에서 가장 활발히 연구되고 있으며, 미국 및 유럽의 연구실을 중심으로 양자 탐지 기술에 대한 실험실 수준의 연구가 진행되고 있다. 특히 중국의 경우 얽힘 상태의 양자의 장거리 전송에 성공하였으며^[17,18], 중국전자과기집단공사(CETC)에서 자사가 개발중인 양자 레이더가 100km 떨어져 있는 스텔스 목표물을 탐지하는데 성공했다고 대내외적으로 발표했다^[19]. 우리나라의 경우 현재 양자 암호통신 기술이 집중적으로 연구되고 있다. 따라서 차세대 레이더 시스템 및 계측 시스템으로 주목받고 있는 양자 레이더 관련 양자 기술들의 가능성을 염두 해두고 자체 기술력 확보를 위한 분석 및 선행 연구가 필요한 시점이라고 판단된다. 특히 양자 레이더의 구현을 위해서는 광자 저장 장치, 고해상도 검출기, EOM 변환기 등의 핵심 장치들이 단순 실험실 환경이 아닌 실제 운용환경에서 개발 및 성능 검증이 우선적으로 수행되어야 한다.

References

- [1] E. D. Lopaeva, I. R. Berchera, I. P. Degiovanni, S. Olivares, G. Brida, and M. Genovese, "Experimental realization of quantum illumination," *Physical Rev. Lett.*, vol. 110, no. 15, Apr. 2013.
- [2] E. D. Lopaeva, I. R. Berchera, S. Olivares, G. Brida, I. P. Degiovanni, and M. Genovese, "A detailed description of the experimental realization of a quantum illumination protocol," *Physica Scripta*, T160, Nov. 2014.
- [3] S. Barzanjeh, S. Guha, C. Weedbrook, D. Vitali, J. H. Shapiro, and S. Pirandola, "Microwave quantum illumination," *Physical Rev. Lett.*, vol. 114, no. 8, Feb. 2015.

- [4] S. Lloyd, "Enhanced sensitivity of photodetection via quantum illumination," *Science*, vol. 321, no. 5895, pp. 1463-1465, Sep. 2008.
- [5] M. Lanzagorta, "Quantum radar," *Synthesis Lectures on Quantum Computing*, Morgan&Clapool Publishers, 2011.
- [6] Z. Zhang, M. Tengner, T. Zhong, F. N. C. Wong, and J. H. Shapiro, "Entanglement's benefit survives an entanglement-breaking channel," *Physical Rev. Lett.*, vol. 111, no. 1, Jul. 2013.
- [7] P. Ball, "Focus: Quantum mechanics could improve radar," *Physics*, vol. 8, no. 18, Feb. 2015.
- [8] S. H. Tan, B. I. Erkmen, V. Giovannetti, S. Guha, S. Lloyd, L. Maccone, S. Pirandola, and J. H. Shapiro, "Quantum illumination with Gaussian states," *Physical Rev. Lett.*, vol. 101, no. 25, Dec. 2008.
- [9] F. N. C. Wong, J. H. Shapiro, and T. Kim, "Efficient generation of polarization-entangled photons in a nonlinear crystal," *Laser Physics*, vol. 16, no. 11, pp. 1517-1524, 2006.
- [10] V. Giovannetti, S. Guha, S. Lloyd, L. Maccone, and J. H. Shapiro, "Minimum output entropy of bosonic channels: A conjecture," *Physical Rev. A*, vol. 70, 032315, Sep. 2004.
- [11] S. Guha, and B. I. Erkmen, "Gaussian-state quantum-illumination receivers for target detection," *Physical Rev. A*, vol. 80, no. 5, Nov. 2009.
- [12] K. Liu, H. Xiao, and Q. Fu, "Analysis of quantum radar cross section and its influence on target detection performance," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 11, pp. 1146-1149, Jun. 2014.
- [13] S. Barzanjeh, D. Vitali, P. Tombesi, and G. J. Milburn, "Entangling optical and microwave cavity modes by means of a nanomechanical resonator," *Physical Rev. A*, vol. 84, 042342, Oct. 2011.
- [14] S. Barzanjeh, M. Abdi, G. J. Milburn, P. Tombesi, and D. Vitali, "Reversible optical-to-microwave quantum interface," *Physical Rev. A*, vol. 109, 130503, Sep. 2012.
- [15] J. Bochmann, A. Vainsencher, D. D. Awschalom, and A. N. Cleland, "Nanomechanical coupling between microwave and optical photons," *Nature Physics*, vol. 9, no. 11, pp. 712-716, Nov. 2013.
- [16] R. W. Andrews, R. W. Perterson, T. P. Purdy, K. Cicak, R. W. Simmonds, C. A. Regal, and K. W. Lehnert, "Bidirectional and efficient conversion between microwave and optical light," *Nature Physics*, vol. 10, no. 3, pp. 321-326, Mar. 2014.
- [17] J. Yin, et al., "Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels," *Nature*, vol. 488, pp. 185-188 Aug. 2012.
- [18] J. Yin, et al., "Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers," *Science*, vol. 356, no. 6343, pp. 1140-1144, Jun. 2017.
- [19] B. Wang, *More technical details about China's Quantum Radar claims and quantum radar lab work(2017)*, Retrieved Aug., 30, 2017, from <http://www.nextbigfuture.com/2017/02/more-technical-details-about-chinas.html>

정 종 진 (Jong-Jin Jeong)



2018년 2월 : 한양대학교 응용 물리학과 졸업
 2018년 3월~현재 : 한양대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 무선통신, 양자 레이다

전 상 운 (Sang-Woon Jeon)



2003년 8월: 연세대학교 전기
전자공학부 공학사
2006년 2월: 연세대학교 전기
전자공학부 공학석사
2011년 8월: KAIST 전기및전
자공학과 박사
2011년 8월~2013년 2월: EPFL
박사후 연구원

2013년 3월~2016년 2월: 안동대학교 정보통신공학
과 조교수

2016년 3월~현재: 한양대학교 국방정보공학과 조교수
<관심분야> 무선통신, 정보이론

김 철 영 (Choul-Young Kim)



2002년 2월: 충남대학교 전자
공학과 졸업
2004년 2월: KAIST 전자공학
과 석사
2008년 2월: KAIST 전자공학
과 박사
2011년 2월: University of
California, San Diego(UCSD) 전기 및 컴퓨터공
학과 (Post-Doctorate)

2011년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 교수
<관심분야> 근거리 레이더 및 위상배열 응용을 위
한 MMIC 및 시스템 등

정 방 철 (Bang-Chul Jung)



2002년 2월: 아주대학교 전자
공학과 졸업
2004년 8월: KAIST 전자전산
학과 석사
2008년 2월: KAIST 전자전산
학과 박사
2008년 3월~2009년 8월:
KAIST IT 융합연구소 팀장

2009년 9월~2010년 2월: KAIST IT 융합연구소 연
구교수

2010년 3월~2014년 2월: 경상대학교 정보통신학과
조교수

2013년 3월~2015년 8월: 경상대학교 정보통신학과
부교수

2015년 9월~현재: 충남대학교 전자공학과 부교수

2010년 4월~현재: KAIST IT 융합연구소 겸직교수
<관심분야> 무선통신, 통계적 신호처리, 정보이론,
압축센싱

김 진 응 (Jin-Woong Kim)



1999년 3월: 공군사관학교 영
문학 학사
2013년 3월: 일본 방위대학교
전자공학 석사
2016년 3월: 일본 방위대학교
전자공학 박사
2016년 12월~현재: 국방과학연
구소 항공기레이더 체계 개발단 현역연구원

<관심분야> AESA RADAR, THIN FILM