

고차 세기곱 간섭에 있어 Fisher 정보와 위상감도

함병승*

*광주과학기술원

*bham@gist.ac.kr

Fisher information and phase sensitivity of the higher-order intensity-product interference

Byoung S. Ham*

*Gwangju Institute of Science and Technology

요약

Fisher 정보란 측정가능한 임의의 변수 X 가 모르는 측정대상에 대해 갖는 최대의 정보량인데, 간섭계 출력신호에 대한 Fisher 정보는 그 출력이 위상에 대해 갖는 최소 허용오차를 나타내고 이를 통상 셋노이즈 한계라고 한다. 본 연구에서는 통상의 1 차 세기신호에 대해 2 차 이상의 세기곱 신호가 갖는 Fisher 정보가 특정의 위상상관 관계와 후처리 선택에서 셋노이즈 한계를 극복할 수 있음을 양자센싱의 하이젠베르그 한계와 비교하여 고찰한다.

I. 서론

마하젠더 간섭계는 빛가르개 2 개로 구성된 통상의 유니터리 변환 간섭계로써, 2 개의 출력포트 선택은 간섭계 위상에 의해 확정적으로 정해진다. 그러나, 포아송 분포를 갖는 통상의 레이저를 입력원으로 할 때, 그리고 평균 광자수를 1 보다 작게 유지하는 단일광자 수준에서는 위상대비 출력포트 선택은 임의성을 갖게 되는데, 이 근거가 Fisher 정보로 타나내어지고 이를 통상 셋노이즈 한계라고 한다. 따라서, 확정적 출력포트 선택율은 다수의 광자 N 혹은 다수의 측정대상 N 에 대해 루트 N 의 효과로 나타내어지는 신호대잡음비(SNR)로 귀결된다. 이 때, 위상오류의 최소한계를 결정하는 것이 Fisher 정보이고, 이 Fisher 정보는 결맞음 광자가 갖는 광자수의 포아송 분포에 국한된다. 즉, 최소 위상오류의 한계는 광원에 의해 결정되는 셈이다 [1].

한편 비고전광원 즉 고차얽힘광원(NOON 상태)을 입력원으로 하는 양자간섭계에서는, 간섭계 경로에 따른 포トン 수가 확정적이므로, 출력에 있어 위상에 무관한 광자수 오류로 인해, 셋노이즈 한계를 극복하는 하이젠베르그 한계를 나타낸다. 이를 양자센싱이라고 하는데, 위상오류한계에 있어 셋노이즈에 비해 루트 N 의 양자이득을 갖는다 [2]. 그러나, 고차얽힘광원에서 포톤 수 N 은 현실적으로 그 한계가 겨우 18 정도에 불과하여 [3], N 이 사실상 무한대인 고전센싱 대비 위상오류 이득은 단일광자 수준의 미우 미약한 신호를 제외하고는 현실적 의미가 없어, 양자센싱 적용분야는 매우 제한된다.

II. 본론

본 논문에서는 첫번째로 마하젠더 간섭계 출력에 있어, 하나의 출력을 N 개로 균등분할하고, 그들 사이의 N 차 세기간섭 측정신호에 대해 Fisher 정보를 구하고, 통상의 1 차 세기간섭 대비 위상오류 한계를 분석하고자 한다 [4]. 두 번째로는 마하젠더 간섭계 출력 두 개 사이의 2 차 세기간섭 측정신호에 대해 Fisher 정보를 구하고, 앞의 N 차 세기간섭과 비교함은 물론, 1 차 세기간섭과도 비교하여, 최저 위상오류가 셋노이즈 한계와 어떠한 관계에 있는지 규명하고자 한다. 마지막으로, 위 N 차 세기간섭에 있어, 각각의 분할된 포트에, 위 2 차 세기간섭과 같은 특별한 위상관계를 부여하여, 초해상간섭계를 구성하고, 그에 의한 Fisher 정보를 구하여, 최소위상오류가 셋노이즈 대비 어떠한 관계를 만족하는지 규명하고자 한다 [5]. 이로 인한 세개의 서로 다른 조건에서 구한 위상오류 한계가 NOON 상태를 입력원으로 하는 양자센싱에 있어 하이젠베르그 한계와는 각각 어떤 상관관계를 갖는지 분석하여, 현실적 의미에서 고전센싱의 한계와 하이젠베르그 한계 사이에서 존재할 수 있는 최적의 해를 제공하고자 한다.

III. 결론

본 논문에서는 통상의 마하젠더 간섭계 출력에 있어 세가지 서로 다른 측정방법에 대해 각각 Fisher 정보를 구하고 그에 기초하여 최소 위상오류를 비교분석하였다. 그 결과로써 셋노이즈 한계와 고차 세기간섭이 어떠한 관계를 갖는지 규명하였고, 양자센싱에 있어 NOON 상태의 N 한계를 극복할 대안을 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로
정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아
수행된 연구임(RS-2021-II211810).

참 고 문 헌

- [1] Key, S. M. Fundamentals of statistical signal processing (Prentice Hall, New Jersey, 1993).
- [2] Giovannetti, V., Lloyd, S., Maccone, L. Quantum-enhanced measurement: beating the standard quantum limit. *Science* **306**, 1330–1336 (2004).
- [3] Wang, X.-L. et al., 180qubit entanglement with six photons' three degree of freedom. *Phys. Rev. Lett.* **120**, 260502 (2018).
- [4] Ham, B. S. Intensity product-based optical sensing to beat the diffraction limit in an interferometer. *Sensors* **24**, 5041 (2024).
- [5] Ham, B. S. A superresolution-enhanced spectrometer beyond the Cramer–Rao bound in phase sensitivity. *Sci. Rep.* **15**, 6455 (2025).