

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

요 약

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 섷노이즈 한계라고 한다. 본 연구에서는 통상의 1 차 세기신호에 대해 2 차 이상의 세기곱 신호가 갖는 Fisher 정보가 특정의 위상상관 관계와 후처리 섷노이즈 한계를 극복할 수 있음을 양자센싱의 하이젠베르크 한계와 비교하여 고찰한다.

I. 서 론

마하젠더 간섭계는 빔가르개 2 개로 구성된 통상의 유니터리 변환 간섭계로써, 2 개의 출력포트 섷노이즈는 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 섷노이즈는 임의성을 갖게 되는데, 이 근거가 Fisher 정보로 타나내어지고 이를 통상 섷노이즈 한계라고 한다. 따라서, 확정적 출력포트 섷노이즈는 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 고차엄힘광원($N00N$ 상태)을 입력원으로 하는 양자간섭계에서는, 간섭계 경로에 따른 포톤 수가 확정적이므로, 출력에 있어 위상에 무관한 광자수 오류로 인해, 섷노이즈 한계를 극복하는 하이젠베르크 한계를 나타낸다. 이를 양자센싱이라고 하는데, 위상오류한계에 있어 섷노이즈에 비해 루트 N 의 양자이익을 갖는다 [2]. 그러나, 고차엄힘광원에서 포톤 수 N 은 현실적으로 그 한계가 겨우 18 정도에 불과하여 [3], N 이 사실상 무한대인 고전센싱 대비 위상오류 이익은 단일광자 수준의 미미 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 섷노이즈 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 섷노이즈 대비 어떠한 관계를 만족하는지 규명하고자 한다 [5]. 이로 인한 세개의 서로 다른 조건에서 구한 위상오류 한계가 $N00N$ 상태를 입력원으로 하는 양자센싱에 있어 하이젠베르크 한계와는 각각 어떤 상관관계를 갖는지 분석하여, 현실적 의미에서 고전센싱의 한계와 하이젠베르크 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 섷노이즈 한계와 고차 세기간섭이 어떠한 관계를 갖는지 규명하였고, 양자센싱에 있어 $N00N$ 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).