

PXIe 형식 AWG 카드로 원자시계 성능 향상

전 세계에서는 국제원자시(TAI)를 확립하기 위해 수백 개의 원자시계를 지속적으로 비교하고 있다. 독일에서는 Physikalisch-Technische Bundesanstalt(PTB)가 세계 최고 수준의 세슘 원자분수시계 두 대를 운용하며 이에 기여하고 있다. 그러나 이 시계들을 계속 작동시키기 위해서는 레이저를 이용해 원자 구름을 수 마이크로켈빈까지 냉각하고 Ramsey 분광법을 수행하는 정교한 기술이 필요하다. Spectrum Instrumentation의 AWG 카드는 최신 원자시계 구성에서 핵심적인 역할을 담당한다. 세슘 원자분수시계 CSF1과 CSF2는 국가 기준 시간 척도 UTC(PTB)를 제어하며, PTB의 시간 서비스와 독일 전체의 법정시각을 위한 기반을 제공한다. 이를 통해 시계와 열차부터 항공 교통, 통신, 방송, 컴퓨터 시스템 등에 이르기까지 모든 것을 동기화한다.

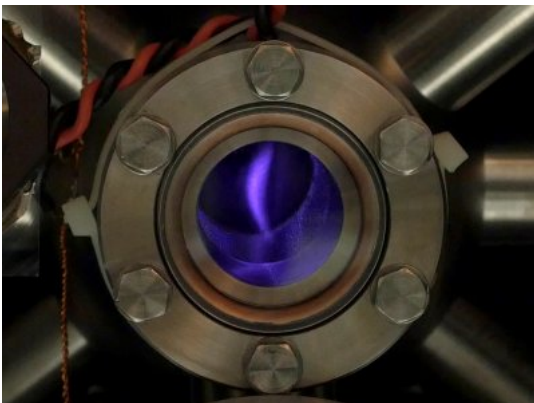


PTB의 두 세슘 원자분수시계는 독일 연방공화국 전체에 법정시각을 제공한다.

PTB에서 운용되는 세슘 원자분수시계와 같은 시계는 세슘 원자의 양자 거동을 기반으로 한다. 1초는 세슘-133 원자의 바닥상태에 있는 두 에너지 준위 사이의 전이에 해당하는 방사선이 정확히 9,192,631,770번 주기 동안 지속되는 시간으로 정의된다. 진공 챔버에서 초저온 상태의 원자 구름은 최종 상태를 레이저 유도 형광 분광법으로 측정하기 전에 Ramsey 마이크로파 공동을 두 차례 통과한다.

세슘 원자를 냉각하는 방법

PTB의 시간 및 주파수 부서 소속인 Dr. Johannes Rahm은 다음과 같이 설명한다. "측정을 수행하기 전에 초저온 원자 구름을 로딩해야 합니다. 이는 자기광학 트랩(CSF1) 또는 광학 몰라시스(CSF2)를 이용해 구현됩니다. 두 경우 모두 특정한 기하학적 배열로 정렬된 레이저를 세슘-133의 광학 전이 주파수보다 약간 낮게 디튜닝합니다. 잔류 열 운동으로 인해 이 레이저 빛은 도플러 시프트되어 전이 주파수로 이동하며, 레이저 광자의 흡수와 운동량 보존에 의해 원자 구름 속 원자들이 감속되고 이에 따라 냉각됩니다."



형광을 발하는 세슘 원자 구름을 보여주는 진공 챔버의 적외선 사진. (사진 제공: Mareike Bernien)

세슘 원자분수시계의 작동 사이클

이후 레이저 사이의 작은 주파수 차이가 공중으로 공을 던지는 것처럼 원자 구름을 위쪽으로 밀어 올린다. 이로써 '분수' 효과가 발생한다. 원자들은 위로 이동할 때 Ramsey 공동을 한 번 통과하고, 중력에 의해 아래로 내려올 때 다시 한 번 통과한다. Ramsey 공동을 두 번째로 통과한 후에는 형광 분광법을 이용해 전이 확률을 결정한다. Ramsey 공동을 통과할 때마다 마이크로파 펄스가 인가된다. 이 펄스의 주파수는 그 결과로 얻어지는 전이 확률이 약 50%가 되도록 조정된다. 로딩 단계, 발사 단계, Ramsey 조사, 검출 및 각 단계 사이의 탄도 비행으로 구성되는 각 원자분수 사이클에서 마이크로파 주파수 디튜닝의 부호가 반전된다. 이를 통해 대칭적인 전이 확률 구조의 왼쪽과 오른쪽을 각각 샘플링할 수 있다. 실제 전이 주파수는 이후 50% 전이 확률에 맞춰 설정된 두 개의 제어 주파수의 평균으로 결정된다. 측정이 완료되면 약 1.2초 후 사이클이 다시 시작되며 하루 24시간 계속된다.

시계의 발전

세슘 원자분수시계는 레이저를 정밀하게 제어해야 한다. 이 기능은 처음에는 PTB의 이전 세대 엔지니어와 과학자들이 개발한 맞춤형 아날로그 회로를 사용해 구현되었다. 이처럼 복잡한 시스템을 장기간 유지하는 것은 점점 어려워지고 있다. 따라서 실험 자체와 마찬가지로 지원 전자 시스템도 발전해야 하며, 이에 따라 Dr. Rahm은 아날로그 시스템을 디지털 방식으로 대체하는 방법을 연구하기 시작했다. 그의 연구를 통해 Spectrum Instrumentation의 PXIe 형식 AWG(Arbitrary Waveform Generator) 카드를 통합하게 되었다. 이 카드들은 음향광학 변조기를 사용해 원자의 냉각, 발사 및 검출 과정에서 레이저 주파수를 조절하는 데 필요한 RF 주파수를 생성한다.



24시간 연속으로 작동하는 세슘 원자분수시계를 점검하고 있는 Dr. Johannes Rahm. (사진 제공: PTB)

Spectrum 지원팀의 신속한 대응

그러나 구현 과정에서 한 가지 문제가 발생했다. M4x.6622-x4 AWG 카드가 정확도 요구사항을 매우 우수하게 충족했지만, 사용 가능한 신호 생성 모드 중 어느 것도 PTB에서 필요한 특별한 요구사항에 부합하지 않았다. 세슘 원자분수시계 사이클을 효율적으로 설계하려면 각 레이저가 사이클의 특정 시점에 특정한 파형 세트를 필요로 한다. Dr. Rahm은 설계 엔지니어가 직접 담당하는 Spectrum Instrumentation 지원팀에 문의했다. 단 이틀 만에 소프트웨어 엔지니어들은 “Sequence Restart Mode”라는 새로운 기능을 개발했다. Dr. Rahm의 테스트는 성공적으로 완료되었으며, 새로운 모드는 그가 구상했던 그대로 작동한다.



PXIe 형식의 Spectrum M4x.6622 Arbitrary Waveform Generator 카드. (사진: Spectrum)

한편 Spectrum Instrumentation은 65xx 및 66xx 시리즈의 모든 AWG를 대상으로 Sequence Restart Mode를 무료 업그레이드로 출시했다. 최신 드라이버를 설치하면 새로운 모드를 쉽게 활성화할 수 있다.

스펙트럼 인스트루멘테이션(Spectrum Instrumentation) 소개

1989년에 설립된 스펙트럼 인스트루멘테이션(Spectrum Instrumentation)은 독보적인 모듈식 설계 개념을 기반으로 200종 이상의 디지털라이저 및 제너레이터 제품을 PC 카드(PCIe 및 PXIe 타입) 및 독립형 이더넷 유닛(LXI)으로 설계 및 생산하고 있다. 35년 이상의 역사를 지닌 스펙트럼은 업계 최고 브랜드를 보유한 다수의 기업들과 대부분의 명문 대학 등 전 세계적으로 다양한 고객을 확보하고 있다. 스펙트럼은 독일 함부르크 인근에 본사를 두고 있으며, 5년 보증을 비롯해 설계 엔지니어들이 직접 제공하는 뛰어난 기술 지원으로 유명하다. 스펙트럼에 대한 자세한 정보는 www.spectrum-instrumentation.com에서 확인할 수 있다.

Spectrum Instrumentation GmbH

Ahrensfelder Weg 13-17

22927 Grosshansdorf

Germany

Sven Harnisch

전화: +49-4102-6956-0

sven.harnisch@spec.de

<https://spectrum-instrumentation.com/>