

새로운 위상변조 다중화를 이용한 흘로그램 중첩기록 및 재생

손승대 · 고재량 · 이연호

성균관대학교 전기·전자 및 컴퓨터 공학부

(1999년 4월 6일 받음, 1999년 12월 10일 수정본 받음)

본 논문에서는 참조빔의 단면을 0° 와 180° 의 위상값으로 부호화하여 서로 다른 흘로그램을 중첩 저장하는 기존의 위상부호 다중화 방식을 개선한 새로운 위상변조 흘로그램 중첩방식을 제안한다. 이러한 위상변조 다중화 흘로그램 중첩방식을 위하여 본 논문에서는 piezo-electric 소자를 이용한 공간 광변조기를 제작하여 실험하였다. 이러한 실험결과를 통하여 새로운 방법에 의하여 중첩기록 및 재생된 흘로그램들 사이의 잡음이 기존의 방법 보다 매우 작아짐을 알 수 있다. 이러한 실험결과는 흘로그램 중첩이 비선형적으로 이루어지기 때문에 발생하는데 이것을 확인하기 위하여 본 논문에서는 컴퓨터 모의실험을 실시하여 실험결과와 비교하였다.

I. 서 론

1968년 Chen에 의하여 대용량 광메모리 기록매체로 광굴절 결정체가 대두된 이후,^[1] 다양한 기법을 이용하여 여러개의 흘로그램을 광굴절 결정체내에 동시에 저장하는 방법에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 지금까지 제안된 흘로그램 중첩방법을 크게 둘로 나누면 첫째로 기록매체의 동일한 지점에서 서로 다른 흘로그램을 중첩저장하는 방법이 있고 둘째로 서로 다른 흘로그램을 서로 다른 지점에 저장하는 방법이 있다. 여기서 첫번째 방법에는 참조빔의 각도를 변화시키면서 서로 다른 흘로그램을 저장하는 각다중 흘로그램 저장방식,^[2,3] 서로 다른 흘로그램을 서로 다른 파장을 이용하여 저장하는 파장각다중 흘로그램 저장방식,^[4] 참조빔 단면의 위상을 변화시켜 참조빔을 코드화한 후 서로 다른 위상 코드에 대하여 서로 다른 흘로그램을 저장하는 위상부호 디중 흘로그램 저장방식^[6-9] 등이 있다. 두 번째 방법에서는 서로 다른 흘로그램을 이웃한 위치에 겹쳐가며 저장하는 이동각다중 흘로그램 저장방식^[5]이 있다. 이러한 여러가지 중첩방법들 중에서 현재 각다중 흘로그램 중첩저장 방법이 널리 사용되고 있지만 이 경우 참조빔의 입사각을 변화시키기 위하여 acousto-optic, electro-optic, 혹은 기계적인 방법에 의하여 참조빔의 입사각도를 변화시키는 장치가 추가로 필요하여 시스템이 복잡해지는 단점이 있고 또한 이러한 장치들의 상대적으로 느린 속도 및 완벽하지 못한 반복성이 대용량 광메모리 시스템의 설계에 많은 문제점을 초래할 수 있다. 그리하여 최근에는 참조빔의 입사각을 변화시킬 필요가 없어서 이러한 추가 장치들이 필요없는 위상부호 디중화 방법이 매우 활발하게 연구되어지고 있다.

위상부호 디중 흘로그램 저장방식은 초기에는 각다중 흘로그램 중첩 시스템에서 저장하려는 이미지에 대한 신호 대 잡음비를 크게 개선하기 위하여 부수적으로 사용되거나 혹은 변화가 가능한 광연결을 위하여 위상변이된 흘로그램의 이중노

출 기술로 이용되었다. 다른 중첩방법들과 병행되지 않고 독자적인 위상부호 디중화를 이용한 흘로그램 중첩방법에 대한 연구는 국외에서 다음과 같이 수행되었다. 1968년 LaMacchia와 White는 포토그래피 감광매체의 동일한 영역에 여러개의 점광원을 중첩저장하기 위하여 참조빔의 위상을 ground glass plate을 이용하여 불규칙한 위상부호화 하였다.^[10] 그 이후 공간 광변조기를 이용하여 참조빔을 정확한 위상부호화하는 연구들이 수행되었다. Healey와 Krile은 여러개의 평면파를 하나의 참조빔으로 사용하여 각각의 평면파에 binary위상을 인가하여 실험하였고,^[11,12] Anderson은 참조빔의 위상을 sine함수의 형태로 변조하여 실험하였다.^[13] Denz등은 참조빔 단면의 위상을 Walsh-Hadamard의 코드에 따라 0° 와 180° 의 위상값을 부여하여 직교 위상부호 디중 흘로그램 중첩방식을 제안하고 실험을 통하여 증명하였다.^[6] 이러한 위상부호 디중화 흘로그램 저장방식은 위치 또는 입사각을 변화시키지 않고 서로 다른 신호 이미지를 저장할 수 있으므로 빠른 데이터 저장이 가능하며, 이론적으로 cross talk가 발생하지 않고 잡음이 없는 데이터의 복원도 가능하다. 또한 이러한 위상부호 디중화 흘로그램 저장방식은 다른 흘로그램 저장방식과 병행하여 사용될 수 있으므로 더 많은 흘로그램의 저장이 가능하기 때문에 최근에 매우 활발히 연구되어지고 있다. 그러나, 공간 광변조기(Spatial Light Modulator)를 이용하여 0° 와 180° 의 위상변이를 Walsh-Hadamard 코드에 따라 조합하여 여러개의 흘로그램을 저장하는 기존의 방법에서는, 실제에 있어서는 기록매체의 한 지점에서 서로 다른 굴절률 격자들이 0° 와 180° 의 위상을 가지고 서로 겹쳐 기록되므로 기록매체가 비선형적으로 동작하는 경우 기록되는 흘로그램들 사이의 상쇄간섭 혹은 보강간섭이 비선형적으로 발생하므로 비교적 많은 양의 잡음이 존재할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 0° 와 180° 뿐만 아니라 그 이외의 위상 값들을 이용하여 참조빔 단면의 위상을 변조하여 서로 다른 흘로그램

을 저장하는 새로운 방식의 '위상변조 다중 휠로그램 저장' 방식을 제안한다. 이러한 방법을 이용하면 저장매체의 한 지점에서 기록되는 서로 다른 굴절률 격자를 사이에 180° 이외의 위상차이가 존재하여 기존의 방법에서 발생되는 잡음을 줄일 수 있게 된다.

II. 이 론

기존의 위상부호 다중 휠로그램 저장방식에서는 여러개의 휠로그램을 중첩해서 저장할 때 참조빔을 일차원적으로 여러개의 픽셀(Pixel)로 나누고 각 픽셀에 위상변이를 인가한다. 이 때 각 픽셀에 부여한 위상변이를 묶으면 하나의 휠로그램을 저장하기 위해 사용되는 하나의 위상부호가 된다. 이렇게 만들어진 하나의 위상부호는 저장하려는 하나의 휠로그램에 대한 주소로 간주될 수 있다. 여기서 각 픽셀에 인가된 위상변이는 0° 혹은 180° 로 주어지고 이들은 통상적으로 Walsh-Hadamard 코드의 형태로 분포한다. 이러한 참조빔은 광굴절 결정체내에서 저장하려는 휠로그램의 정보를 포함한 신호빔과 서로 교차하여 기록된다. 즉, 그림 1(a)처럼 4-bit를 이용한 휠로그램 중첩 저장실험을 살펴보면 참조빔은 4개의 픽셀로 이루어져 있고 이들 픽셀로부터의 빔들은 광굴절 결정체내의 서로 다른 4개의 지점(A, B, C, D)에서 이미지를 내포한 신호

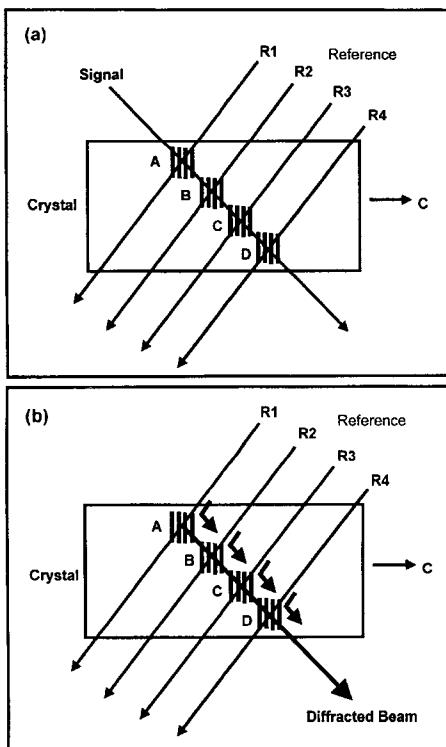


그림 1. (a) 4개의 픽셀로 이루어진 참조빔이 하나의 신호빔과 교차하여 서로 다른 4개의 지점에서 광굴절 격자를 형성하여 신호빔에 포함된 광정보를 분산 기록한다. (b) 휠로그램의 복원시 4개의 픽셀로 이루어진 참조빔이 입사하면 각각의 지점에서 Bragg diffraction이 발생하고 이들이 서로 합하여져서 기록된 광정보가 복원된다.

빔과 각각 교차한다. 그 결과, 하나의 신호빔은 4개의 참조빔과 교차하고 각각의 지점에서 서로 독립적인 간섭패턴을 형성한다. 각 지점에서 형성된 간섭패턴의 밝은 부분에서는 광여기에 의해 자유전자가 전도대역으로 여기된다. 이렇게 여기된 자유전자들은 확산 및 표동에 의해서 간섭패턴의 어두운 부분으로 이동하고 이들은 여기서 빈 트랩(empty trap)과 재결합하게 된다. 이러한 과정에서 공간전하 전계가 형성되며 이 공간전하 전계는 광굴절 결정체의 전기광학 현상에 의해서 광굴절 결정체의 굴절률 또는 유전률 텐서의 변화를 가져온다. 이러한 변화에 의해서 광굴절 격자가 형성되며 신호빔에 포함된 광정보가 이러한 굴절률 격자 형태로 저장된다.

기존의 위상부호 다중화 휠로그램 중첩방식의 원리를 4-bit 위상부호를 이용하여 설명하면 다음과 같다. 즉, 참조빔을 형성하는 4개의 픽셀로부터 나온 빛은 그 위상이 0° (혹은 180°)로 인가된 후 신호빔과 교차하여 기록매체의 일정한 지점에 휠로그램을 저장하게 된다. 그 다음에 이러한 휠로그램을 복원하는 경우 참조빔의 위상을 휠로그램 기록시와 동일하게 0° (혹은 180°)로 인가하면 복원되는 신호빔의 위상은 0° 로 주어진다. 그러나 참조빔의 위상을 180° (혹은 0°)로 인가하여 휠로그램을 복원하는 경우 복원되는 신호빔의 위상은 180° (혹은 -180°)로 주어진다. 그런데 그림 1(b)에서처럼 참조빔은 4개의 픽셀로 이루어져 있고 신호빔에 포함된 광정보(혹은 2차원 이미지)는 서로 다른 4개의 지점(A, B, C, D)에 분산 기록되어 있으므로 참조빔을 이용하여 이러한 휠로그램을 읽는 경우 이들 4개의 지점에서 읽힌(Bragg diffraction 된) 빔들이 서로 합하여져서 복원되는 신호빔을 형성하게 된다. 그런데 참조빔의 4개의 픽셀에 인가된 위상변이가 휠로그램을 기록할 때와 동일하면 Bragg diffraction된 4개의 빔들 사이에서 보강간섭이 발생하여 휠로그램의 복원이 가능하지만, 4개의 픽셀에 인가된 위상변이가 휠로그램 기록시와 다른 값(혹은 다른 위상부호)로 주어지면 Bragg diffraction된 4개의 빔들 사이에 상쇄간섭이 발생하여 휠로그램의 복원이 불가능하게 된다.

표 1은 4-bit Walsh-Hadamard 코드를 이용하여 4개의 참조빔의 위상이 어떻게 주어지는지를 보여준다.

앞에서 설명한 것처럼 예를 들어 코드 1로 하나의 휠로그램을 기록한 후 똑같은 코드 1을 이용하면 기록된 휠로그램을 복원할 수 있지만 다른 코드 2, 3 혹은 4를 이용하면 그 휠로그램을 복원할 수 없다. 그리하여 이 경우 서로 다른 4개의 참조빔 코드를 이용하여 서로 다른 4개의 휠로그램을 기록매

표 1. 참조빔이 4개의 픽셀로 이루어진 경우 기존의 위상부호 다중화에서 사용되는 참조빔 위상코드. 4개 서로 다른 위상코드를 이용하여 4개의 서로 다른 휠로그램을 중첩 기록

코드	참조빔위상			
	픽셀 1	픽셀 2	픽셀 3	픽셀 4
코드 1	0°	0°	0°	0°
코드 2	0°	0°	180°	180°
코드 3	0°	180°	180°	0°
코드 4	0°	180°	0°	180°

표 2. 참조빔이 4개의 퍽셀로 이루어진 경우 새로이 제안된 위상변조 다중화에서 사용되는 참조빔 위상코드

코드	참조빔위상			
	핀셀 1	핀셀 2	핀셀 3	핀셀 4
코드 1	0°	0°	0°	0°
코드 2	90°	270°	90°	270°
코드 3	45°	135°	225°	315°

체의 동일한 지점에 서로 독립적으로 저장할 수 있다. 그러나 이러한 기준의 방법에서는 그림 1 및 표 1에서 보는 것처럼 4개의 코드를 이용하여 4개의 홀로그램을 중첩저장하는 경우, 기록매체의 어느 한 지점(예를 들어 지점 B)에서 두 개의 굴절률 격자(코드 1과 코드 2에 해당하는 홀로그램)은 위상이 0°로 기록되고 다른 두 개의 굴절률 격자(코드 3과 코드 4에 해당하는 홀로그램)은 위상이 180°로 기록된다. 그리하여 이러한 4개의 굴절률 격자를 사이에 상쇄간섭 혹은 보강간섭이 발생하게 된다. 이 경우 홀로그램 기록매체가 정확하게 선형적으로 동작한다면 이러한 상쇄간섭 혹은 보강간섭에 의한 굴절률 격자의 형성은 전혀 문제되지 않지만 만약에 홀로그램 기록매체가 비선형적으로 동작하는 경우 상쇄간섭과 보강간섭이 똑같은 양으로 발생하지 않기 때문에 복원되는 4개의 홀로그램들 사이에 잡음(cross talk)이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 기준의 위상부호 다중화에 의한 홀로그램 중첩방식에서 발생할 수 있는 잡음을 줄이기 위하여 기존의 방법에서 사용한 0°와 180° 뿐만 아니라 그 이외의 위상변이를 이용하여 새로운 형태의 위상부호를 만들어 여러개의 홀로그램을 중첩저장하는 방법을 제시한다. 이러한 새로운 방법에서는 표 2에서와 같이 서로 다른 참조빔 코드에 의하여 저장된 홀로그램들 사이에는 기존의 방법에서와 마찬가지로 독립적인 관계가 존재하여 여러개의 서로 다른 홀로그램을 기록매체의 동일 지점에 중첩저장할 수 있다. 그러나 기록매체의 동일 지점에 기록되는 굴절률 격자를 사이에 180°이외의 위상차이가 존재하여 기존의 방법에서와는 달리 완전한 상쇄간섭 혹은 보강간섭이 발생하지는 않는다. 이러한 이유로 본 논문에서 제시하는 새로운 방법에서는 복원되는 홀로그램들 사이의 잡음이 매우 작아질 수 있다.

III. 새로운 위상변조 홀로그램 중첩을 위한 PSLM제작

기존의 위상부호 다중 홀로그램 중첩방식을 이용하여 홀로그램을 중첩기록하는 경우 주로 LCD를 이용하여 제작된 PSLM(Phase Spatial Light Modulator)를 사용하고 있다. 이러한 기존의 LCD-PSLM은 통과하는 레이저빔의 위상을 0° 혹은 180°만으로 변화시킬 수 있다. 그러나 본 논문에서 새로이 제시하는 위상부호에는 0°와 180° 뿐만 아니라 그 이외의 위상변이가 필요한다. 따라서 본 논문에서 이러한 여러값의 위상변이가 가능한 PSLM을 위하여 10개의 piezo-electric material을 1차원으로 나열한 어레이(array)를 만든 다음, 그 위에 작은 거울(mirror)을 부착하여 새로운 PSLM을 제작하였

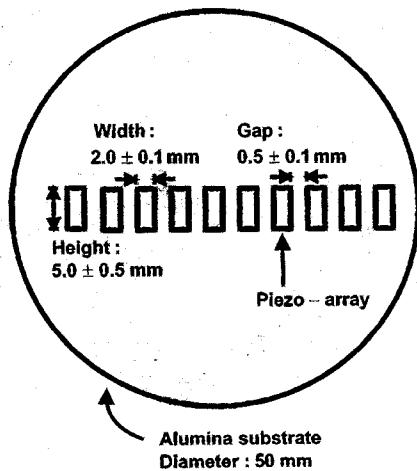


그림 2. 반지름이 50 mm인 alumina substrate 위에 크기가 5 mm × 5 mm × 2 mm로 주어지는 10개의 PZT-5H를 0.5 ± 0.1 mm의 간격으로 일렬 배열하여 piezo-array를 제작. PZT-5H의 최대인가전압: 200V, 최대변위: 3.2 μm ± 10%, hysteresis: 10%~18%.

다. 이러한 새로운 PSLM은 piezo-electric material에 가해지는 전압에 따라서 그 높이가 변하므로 거울에 입사하여 반사하는 빛의 위상을 연속적으로 변화시킬 수 있다. 그림 2는 본 연구에서 제작한 PSLM의 개략도를 나타낸다.

이것은 반지름이 50 mm인 alumina 기판위에 가로 2.0 ± 0.5 mm, 세로 5.0 ± 0.5 mm, 높이 5.0 ± 0.5 mm로 주어지는 10개의 piezo-electric transducer를 0.5 ± 0.1 mm의 간격을 두고 1차원 배열로 나란히 부착한 후 이러한 piezo array 위에 다음과 같은 방법으로 10개의 거울들을 부착하였다. 먼저 헬륨-네온(He-Ne) 레이저빔을 직경이 2인치인 빔확대기(bean

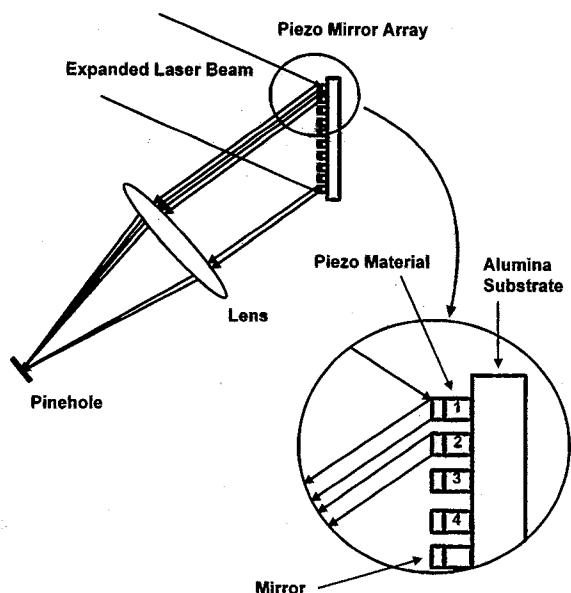


그림 3. Piezo-array 위에 각각 작은 거울을 설치하여 PSLM을 제작. 각각의 거울로부터 반사된 평행광이 렌즈에 의하여 한 점에 모이도록 각각의 거울을 설치. 여기서 거울 하나의 크기는 5 mm × 5 mm × 2 mm.



그림 4. 완성된 piezo-mirror array.

expander)를 이용하여 평행광으로 만든 다음 직경이 약 2인치인 보통의 거울에 반사시켜 초점거리가 50cm인 렌즈를 이용하여 핀홀(pinhole)을 통과하여 한 점에 모이도록 한다. 그 다음에 보통의 거울 대신에 piezo mirror array를 집어 넣은 후 표면에 epoxy을 바른 후 각각의 조그만 거울들에 의해 반사된 빛이 동일한 핀홀을 통과하도록 조절하여 부착하였다. 이러한 방법에 의하여 piezo mirror array에 부착된 작은 거울들의 표면이 서로 평행하도록 만들어 PSLM을 완성하였다. 그림 3은 이러한 제작과정을 보여주고 있다.

완성된 PSLM의 10개의 거울들로부터 반사되어 초점거리에 맷 힌 빔의 크기는 약 2.5 mm로 측정되었다. 이러한 PSLM의 제작에 사용된 piezo-electric transducer는 PZT-5H이며 최대 200V까지 전압을 인가할 수 있으며, 이때 최대변위는 $3.2 \mu\text{m} \pm 10\%$ 이다. 여기서 PZT-5H는 약 10%~18%의 히스테리시스(hysteresis) 특성을 가지고 있으므로 이러한 특성을 고려하여 전압을 인가하여야만 우리가 원하는 위상변이를 얻을수 있다. 그림 4는 이러한 과정에 의하여 제작 완료된 PSLM을 보여준다.

IV. 실험장치 및 실험방법

그림 5는 본 논문에서 제시하는 위상변조 홀로그램 중첩방식을 이용하여 여러개의 홀로그램을 중첩저장하기 위한 실험장치도이다.

먼저 파장이 514.5 nm인 아르곤-이온 레이저(Ar-Ion Laser)를 직경이 2인치인 빔 확대기를 통과시켜 확대한 다음 beam splitter BS1을 사용하여 참조빔과 신호빔으로 나누었다. 여기서 신호빔은 다음과 같이 구성된 4-F 시스템, 즉 이미지 차트(image chart), 렌즈 L1, 저장매체인 BaTiO₃ 결정체, 렌즈 L2, 및 렌즈 L3를 통과하여 CCD 카메라에 입사하도록 만들고, 참조빔은 piezo-mirror array로 부터 반사된 후 광굴절 결정체 BaTiO₃에 입사하여 신호빔과 완전하게 교차하도록 하였다. 여기서 광굴절 결정체에 저장되는 서로 다른 광신호는 이미지 차트를 서로 다른 각도로 돌려놓아 그들 사이에 구분이 되도록 하였다. 이때 참조빔과 신호빔 사이의 사잇각은 20°로 하였다. 그 다음 piezo-mirror array에 의하여 반사된

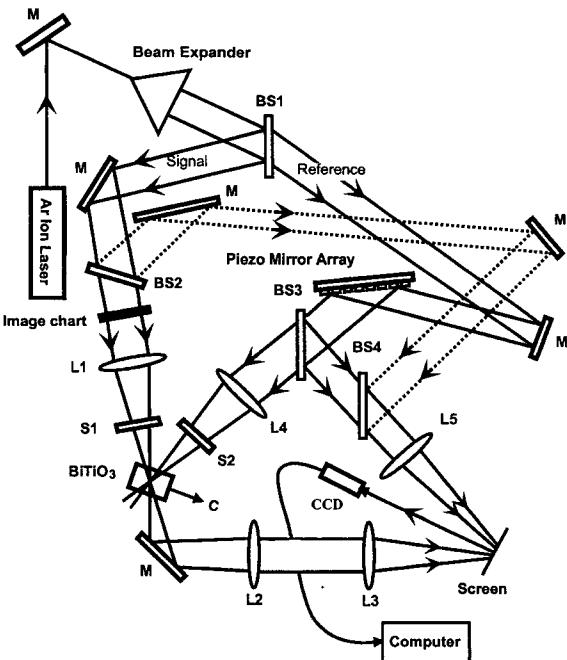


그림 5. 홀로그램 저장 및 복원을 위한 실험 장치도. 신호빔은 image chart를 통과하여 BaTiO₃ 결정체에 입사하고 기준빔은 piezo-mirror array에 반사한 후 BaTiO₃ 결정체에 입사. Beamsplitter BS4는 piezo-mirror array로부터 반사한 빛의 일부와 레이저에서 나온 빛의 일부를 모아서 간섭패턴을 형성시킨다. 이러한 간섭패턴은 piezo-mirror array에 의하여 기준빔이 정확하게 위상변이 되었는지를 확인하는데 사용된다. CCD 카메라는 복원된 홀로그램과 간섭패턴을 동시에 컴퓨터 모니터에 표시하여 준다.

참조빔의 위상이 정확하게 변이되었는지를 확인하기 위하여 그림 5의 점선으로 표시한 것 처럼 또 다른 beam splitter BS2를 이용하여 균일하게 확대된 빔을 얻고 비슷한 방법으로 piezo-mirror array로부터 반사된 참조빔을 beam splitter BS3를 이용하여 둘로 나누어 이들 두 개의 빔을 beam splitter BS4로 합성하여 이들 사이의 간섭무늬가 스크린위에 발생하도록 만들었다. 이러한 간섭무늬는 CCD카메라에 의하여 컴퓨터에 입력되고 이것은 다시 컴퓨터 모니터를 통하여 눈으로 관찰할 수 있다. 여기서 CCD 카메라는 광정보를 포함한 신호빔과 위의 간섭무늬를 동시에 수신하여 이들을 동일한 컴퓨터 모니터 상에 동시에 표시하여 준다. 본 실험에서 사용되는 컴퓨터는 위상변이된 참조빔에 의하여 형성된 간섭무늬가 CCD 카메라에 의하여 수신되면 이러한 간섭무늬 위의 어떠한 일정한 지점에서의 grey scale값을 수치로 표시하여 줄 수 있다. 이것을 이용하여 본 실험에서는 piezo-mirror array에 의하여 발생된 참조빔의 위상변이를 컴퓨터 모니터 상에 나타나는 간섭무늬의 이동(linear displacement)로 표시하게 되고 이것은 다시 모니터 위의 고정된 한 지점에서의 grey scale값의 변화로 전환하여 참조빔 위상변이를 조정 및 확인하게 된다. 이러한 방법에 의하여 piezo-mirror array로부터 반사되는 참조빔 각 픽셀의 위상을 독립적으로 또한 본 실험에서 요구하는 어떤 일정한 값으로 변화시킬 수 있다.

본 논문에서는 10개의 핵셀로 이루어진 piezo-mirror array 중에서 두 개의 핵셀을 이용하여 본 논문에서 제시하는 위상변조 홀로그램 중첩의 가능성을 실험하였다. 여기서 사용된 저장매체는 doping이 되지 않은 BaTiO₃ 결정체이고 두 개의 서로 다른 광정보가 포함된 신호빔을 위하여 transmission type의 U.S airforce resolution chart를 0° 혹은 약 45° 돌려서 사용하였다. 본 논문에서 실시한 실험의 순서는 다음과 같다. 먼저 기존의 위상부호 다중화 방법에서 사용되는 참조빔 위상코드 (0°, 0°)를 이용하여 첫 번째 홀로그램을 저장한 후 위상코드를 기존의 방법에서 제시하는 (0°, 180°)를 바꾸어 두 번째 홀로그램을 중첩저장하였다. 그 다음 기록된 홀로그램을 복원하기 위하여 참조빔의 위상코드를 (0°, 180°)로 하여 그 위상코드에 해당하는 두 번째 홀로그램을 복원하고, 다시 참조빔의 위상코드를 (0°, 0°)로 바꾸어 저장된 첫 번째 홀로그램을 복원하였다. 그 다음 본 논문에서 제시하는 위상변조 다중화 홀로그램 중첩을 실험하기 위하여 앞에서 기록된 모든 홀로그램을 지운 후 참조빔의 위상코드를 (0°, 0°)로 하여 첫 번째 홀로그램을 저장한 후, 참조빔의 위상코드를 (90°, 270°)로 바꾸어 두 번째 홀로그램을 저장하였다. 위에서와 마찬가지로 기록된 홀로그램을 복원하기 위하여 우선 참조빔의 위상코드를 (90°, 270°)로 하여 그 위상코드에 대응되는 두 번째 홀로그램을 복원하고, 다시 참조빔의 위상코드를 (0°, 0°)로 하여 저장된 첫 번째 홀로그램을 복원하였다. 여기서 적용한 홀로그램 저장시간은 첫 번째 홀로그램을 저장할 때는 15초, 두 번째 홀로그램을 저장할 때는 5초로 설정하였다. 이러한 홀로그램 중첩기록 및 복원은 그림 5에서 표시된 것처럼 두 개의 mechanical shutter S1과 S2를 이용하여 이루어진다. 즉 첫 번째 홀로그램을 기록하는 경우에는 두 개의 shutter를 모두 열어서 신호빔과 참조빔이 광굴절 결정체에서 서로 교차하도록 만들고, 두 번째 홀로그램을 중첩 기록하는 경우 필요한 참조빔의 위상변이를 위하여 piezo-mirror array에 인가되는 전압을 변화시키는 동안 두 개의 shutter를 모두 닫아서 빔이 광굴절 결정체에 입사되지 않도록 한다. 중첩기록된 홀로그램을 복원하는 경우, 우선 두 개의 shutter를 모두 닫고 piezo-mirror array에 전압을 인가하여 필요한 위상코드를 만든 후 shutter S2를 열어서 앞의 위상코드에 해당하는 홀로그램을 읽는다. 이때 복원되는 신호빔은 이전에 홀로그램을 기록할 때와 똑같은 경로를 따라서 광굴절 결정체로부터 CCD 카메라에 입사되고 그 정보는 다시 컴퓨터에 입력되어 모니터에 표시된다.

V. 실험 결과

다음의 그림 6은 본 논문에서 실시한 홀로그램 중첩기록 및 복원실험의 결과이다.

그림 (a)와 (b)는 기존의 위상부호 다중화 방법을 이용한 실험결과이다. 우선 각각 0° 및 45°로 돌려져서 신호빔에 삽입된 image chart를 서로 다른 광정보를 가진 신호빔으로 가정하였다. 그 다음 2개의 핵셀로 이루어진 참조빔의 위상을 각각 (0°, 0°) 혹은 (0°, 180°)로 만들어 이를 두 개의 이미지를

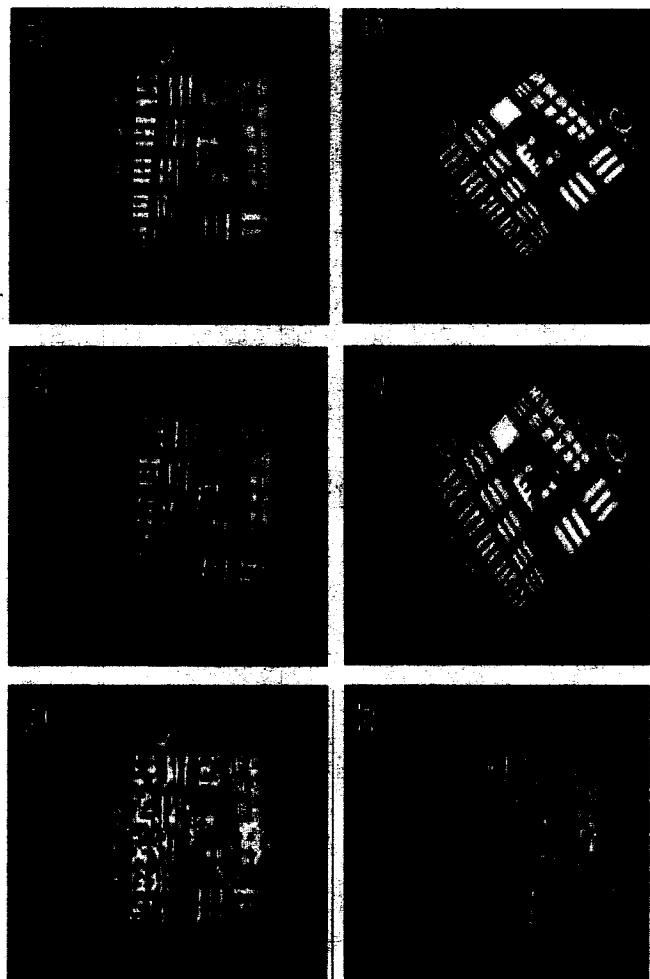


그림 6. (a)와(b)는 기존의 위상부호 다중화를 이용하여 중첩 저장 및 복원된 2개의 홀로그램. (c)와 (d)는 새로이 제안된 위상변조 다중화를 이용하여 중첩 저장 및 복원된 2개의 홀로그램. (e)는 기존의 방법으로 저장된 홀로그램을 위상부호 (0°, 90°)로 읽었을 때 복원되는 홀로그램. (f)새로운 방법에 의하여 저장된 홀로그램을 위상부호 (0°, 90°)로 읽었을 때 복원되는 홀로그램.

BaTiO₃ 결정체에 중첩하여 기록하였다. 그 다음 저장된 2개의 이미지를 각각 해당되는 위상부호를 이용하여 복원하였다. 여기서 (a)는 참조빔의 위상을 (0°, 0°)로 만들어 저장된 홀로그램을 읽었을 때의 복원된 신호를 나타내고 (b)는 참조빔의 위상을 (0°, 180°)로 만들어 홀로그램을 읽었을 때의 복원된 신호 이미지를 나타낸다. 이 경우 각각 복원된 신호에는 BaTiO₃ 결정체에 중첩되어 기록된 서로 다른 홀로그램의 정보가 잡음(crosstalk)으로 나타난다는 것을 알 수 있다. 그림 (c)와 (d)는 본 논문에서 제시하는 새로운 방법에 의하여 두 개의 서로 다른 이미지를 중첩하여 저장하고 복원한 실험의 결과이다. 앞에서와 마찬가지로 0° 및 45°로 돌려진 image chart를 서로 다른 신호빔 이미지로 가정하고 참조빔의 위상을 각각 (0°, 0°) 혹은 (90°, 270°)로 만들어 이를 두 개의 이미지를 중첩하여 저장하였다. 그림 (c)는 참조빔의 위상을 (0°, 0°)로 만들어 홀로그램을 읽었을 때의 복원된 신호 이미지를 나타내고 그림

(d)는 참조빔의 위상을 $(90^\circ, 270^\circ)$ 로 만들어 휠로그램을 읽었을 때의 복원된 신호 이미지를 나타낸다. 이들을 기준의 방법을 사용한 그림 (a), (b)와 비교하면 복원된 이미지에 나타나는 잡음이 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

그림 (e)는 두 개의 휠로그램을 각각 참조빔 위상($0^\circ, 0^\circ$)과 $(0^\circ, 180^\circ)$ 로 중첩기록한 후 참조빔의 위상을 $(0^\circ, 90^\circ)$ 로 만들어 이것을 읽으면 중첩기록된 두 개의 휠로그램이 동시에 나타난다는 것을 보여준다. 비슷한 방법으로 그림 (f)는 두 개의 휠로그램을 각각 참조빔 위상($0^\circ, 0^\circ$)과 $(90^\circ, 270^\circ)$ 로 중첩기록한 후 참조빔의 위상을 $(0^\circ, 90^\circ)$ 로 만들어서 읽으면 앞에서와 마찬가지로 두 개의 휠로그램이 동시에 읽힌다는 것을 보여준다.

VI. 컴퓨터 모의실험

본 논문에서 새로이 제안하는 위상코드($0^\circ, 0^\circ$)와 $(90^\circ, 270^\circ)$ 를 이용한 휠로그램의 중첩방식은 광굴절 결정체가 100% 선형적으로 동작한다면 기존의 위상코드($0^\circ, 0^\circ$)와 $(0^\circ, 180^\circ)$ 를 이용한 휠로그램 중첩방식과 100% 똑같은 실험결과를 보여주어야 한다. 그러나 광굴절 결정체내에서의 휠로그램의 중첩은 비선형적으로 이루어지므로 이들 두가지 방법은 실제의 실험에서 매우 다른 결과를 나타낸다. 이 경우 간단한 이론에 의하여 이러한 비선형 휠로그램의 중첩을 해석하기가 불가능 하므로 본 논문에서는 컴퓨터 모의실험을 통하여 앞의 실험결과와 비교하였다.

본 논문에서는 Kukhtarev 방정식을 이용하여 광굴절 결정체 내에 입사하는 간섭패턴에 의하여 형성되는 공간전하 전계를 계산할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 C언어를 이용하여 완성하였다. 이 프로그램에 의하면 간섭패턴이 cosine함수로 주어지는 경우 형성되는 공간전하 전계는 -sine함수로 주어진다. 이러한 계산의 결과가 그림 7(a)와 (b)에 가는 실선으로 표시되었다.

본 모의실험에서는 두 개의 휠로그램이 중첩되는 경우를 가정하여 첫 번째 휠로그램이 10초 동안 기록된 후 두 번째 휠로그램이 5초 동안 기록된다고 가정하였다. 즉, 기존의 phase-code multiplexing을 모의실험하는 경우 첫번째 휠로그램이 위상 0° 로 10초 동안 기록된 후 그 다음 5초 동안 위상 180° 로 중첩될 때 광굴절 결정체내에 형성되는 공간전하 전계를 계산하였다. 그 다음 본 논문에서 제시하는 위상코드에 의한 휠로그램의 중첩을 모의실험하기 위하여 첫번째 휠로그램이 위상 0° 로 10초 동안 기록된 후 그 다음 5초 동안 위상 90° 로 중첩될 때 광굴절 결정체내 형성되는 공간전하 전계를 계산하였다.

두 개의 휠로그램을 중첩실험한 실험결과(그림 6)에서 알 수 있듯이 image pattern의 어느 한 점 혹은 픽셀은 중첩실험 도중에 두 번 모두 on 되어 기록되거나, 혹은 첫 번째 휠로그램 기록시에는 on 두 번째 휠로그램 기록시에는 off, 혹은 첫 번째 휠로그램 기록시에는 off 두 번째 휠로그램 기록시에는 on, 혹은 두 번 모두 off되어 기록된다. 본 논문에서는 실험결과(그림 6)에서 나타나는 crosstalk이 image pattern의 픽셀이

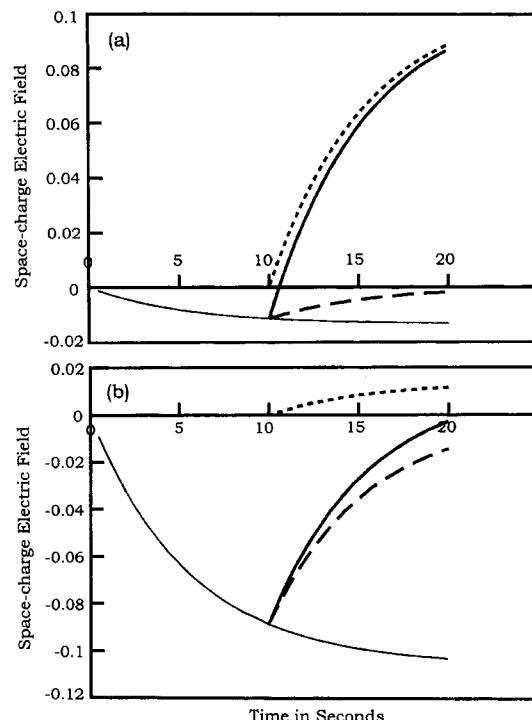


그림 7. 두 개의 휠로그램이 기존의 위상코드와 새로이 제안된 위상코드에 의하여 중첩기록될 때의 공간전하 전계를 계산. (a)원래 신호의 1/60에 해당하는 잡음이 약 10초 동안 기록된 후 그 다음 5초 동안 신호빔이 중첩 기록됨. (b) 신호빔이 약 10초 동안 기록된 후 그 다음 5초 동안 신호빔의 1/60에 해당하는 잡음이 기록됨. 가는 실선: 간섭패턴의 위상이 0° 로 주어지는 경우 sine형태로 기록되는 공간전하 전계의 크기. 굵은 실선: 간섭패턴의 위상 180° 로 주어지는 경우 sine형태로 중첩 기록되는 공간전하 전계의 크기. 파선: 간섭패턴의 위상 90° 로 주어지는 경우 sine형태로 형성되는 공간전하 전계의 크기. 점선: 간섭패턴의 위상 90° 로 주어지는 경우 cosine형태로 형성되는 공간전하 전계의 크기.

off되었을 때에도 광굴절 결정체에 일정한 굴절률 격자가 형성될 수 있다는 것을 가정하였다. 즉 image pattern의 어두운 부분에서도 미약한 빛이 존재한다는 것을 가정한다. 이러한 것은 실제의 실험에서는 빛의 회절에 의하여 발생할 수 있다. 본 실험에 사용된 image pattern을 통과한 빛의 contrast ratio는 약 60:1로 측정되었고 이러한 image가 광굴절 결정체를 통과하기 바로 직전에는 그 contrast ratio는 약 20:1로 측정되었다. 본 모의실험에서는 image pattern의 밝은 부분과 어두운 부분의 빛의 세기의 비를 보수적으로 60:1로 가정하였다.

그림 7(a)는 주어진 image pixel이 첫 번째 휠로그램이 기록되는 10초 동안 off이고 두 번째 휠로그램이 기록되는 5초 동안에는 on 되었다고 가정하였다. 이 경우 처음의 10초 동안에 미약한 공간전하 전계 격자가 -sine함수 형태로 형성된다. 이때의 sine함수의 크기를 그림 7(a)의 가는 실선으로 표시하였다. 그 다음 간섭패턴의 위상이 180° 로 변하여 입사하는 경우 sine함수 형태로 형성되는 공간전하 전계의 크기를 굵은 실선으로 표시하였다. 그 다음 본 논문에서 제시하는 위상코드를 모의실험하기 위하여 처음의 10초 동안 위상 0° 로 첫 번

제 홀로그램을 기록한 후 그 다음 5초 동안 위상을 90° 로 변화시켜서 두 번째 홀로그램을 기록하였다. 이 경우 광굴절 결과 내에는 sine함수의 격자와 cosine함수의 격자가 동시에 존재하게 된다. 그림 7(a)에서 파선은 sine형태의 격자의 크기를 나타내고 점선은 cosine함수 형태로 형성되는 격자의 크기를 나타낸다.

그림 7(b)는 image pattern의 주어진 하나의 픽셀이 처음 10초 동안 on이고 그 다음 5초 동안 off된다고 가정하여 모의 실험한 결과이다. 가는 실선은 간섭패턴의 위상이 0° 인 경우 sine함수의 형태로 형성되는 격자의 크기를 나타내고, 굵은 실선은 간섭패턴의 위상이 180° 인 경우 sine함수의 형태로 형성되는 격자의 크기를 나타내고, 파선은 간섭패턴의 위상이 90° 인 경우 sine함수의 형태로 형성되는 격자의 크기를 나타내고, 점선은 간섭패턴의 위상이 90° 인 경우 cosine함수의 형태로

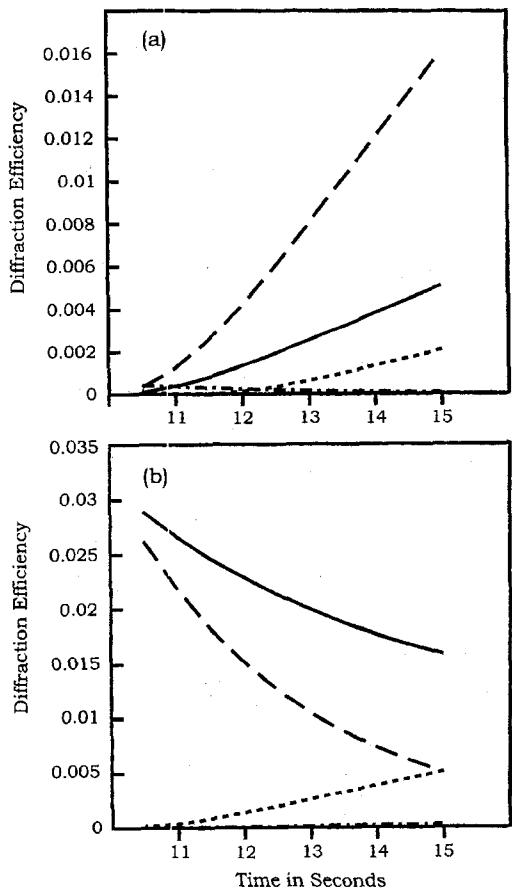


그림 8. 기록된 잡음 및 신호가 복원될 때의 크기. (a) 원래 신호의 1/60에 해당하는 잡음이 약 10초 동안 기록된 후 그 다음 5초 동안 신호빔이 중첩 기록됨. 실선: (0° , 180°)의 위상코드로 복원된 신호빔 크기. 점선: (0° , 0°)의 위상코드로 복원된 잡음의 크기. 파선: (90° , 270°)로 복원된 신호빔 크기. 일점쇄선: (0° , 0°)로 복원된 잡음의 크기. (b) 신호빔이 약 10초 동안 기록된 후 그 다음 5초 동안 신호빔의 1/60에 해당하는 잡음이 기록됨. 실선: (0° , 0°)의 위상코드로 복원된 신호빔 크기. 점선: (0° , 180°)의 위상코드로 복원된 잡음의 크기. 파선: (0° , 0°)로 복원된 신호빔 크기. 일점쇄선: (90° , 270°)로 복원된 잡음의 크기.

형성되는 격자의 크기를 나타낸다.

이러한 데이터를 기본으로하여 본 논문에서는 image pixel로부터의 빛이 두 개의 기준빔과 교차하여 phase-code multiplexing을 만드는 경우에 대하여 모의실험하였다. 그림 8(a)는 첫 번째 신호가 off 두 번째 신호가 on으로 중첩된 경우 홀로그램의 복원을 모의실험한 결과이다.

기준의 위상코드(0° , 0°)와 (0° , 180°)를 이용하여 이를 두 개의 신호가 중첩된 후 위상코드(0° , 180°)로 복원된 신호가 실선으로 표시되었고, (0° , 0°)의 위상코드로 복원된 신호가 점선으로 표시되었다. 이 경우 image pixel이 처음에는 off 그 다음에 on이므로 첫 번째 기록된 홀로그램은 단지 잡음을 의미하고 두 번째 기록된 홀로그램은 정보를 지닌 신호를 의미한다. 그 다음 본 논문에서 제시하는 위상코드(0° , 0°)와 (90° , 270°)를 이용하여 중첩 기록된 홀로그램의 복원을 모의실험하였다. 위상코드(0° , 0°)와 (90° , 270°)를 이용하여 두 개의 신호(처음에는 off, 두 번째는 on)이 중첩된 후 위상코드(90° , 270°)로 복원된 신호가 파선으로 표시되었고, (0° , 0°)의 위상코드로 복원된 신호가 일점쇄선으로 표시되었다. 앞에서와 마찬가지로 파선은 정보를 지닌 실제의 신호를 의미하고 일점쇄선으로 표시된 데이터는 잡음을 의미한다. 그림 8(b)는 중첩되

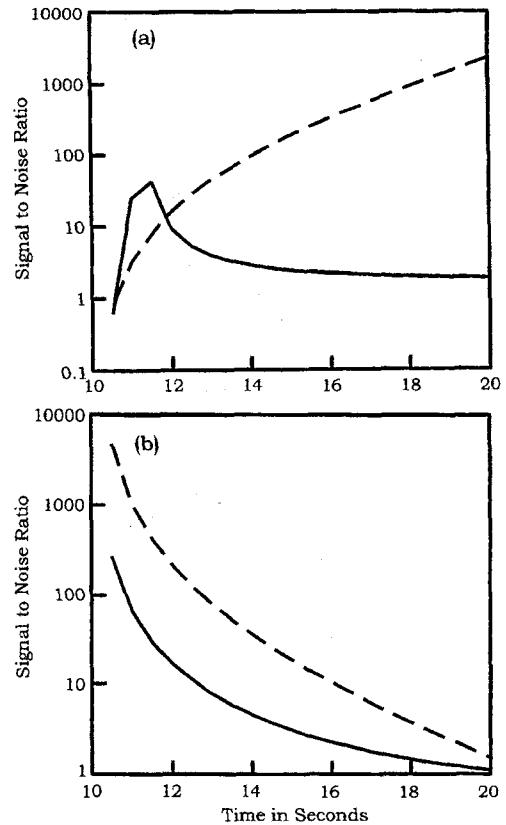


그림 9. 복원된 신호대 잡음의 비. (a) 원래 신호의 1/60에 해당하는 잡음이 약 10초 동안 기록된 후 그 다음 5초 동안 신호빔이 중첩 기록됨. (b) 신호빔이 약 10초 동안 기록된 후 그 다음 5초 동안 신호빔의 1/60에 해당하는 잡음이 기록됨. 실선: 기존의 위상코드를 사용한 경우. 파선: 새로이 제안된 위상코드를 사용한 경우.

는 두 개의 신호가 처음에는 on, 두 번째는 off인 경우의 모의실험 결과를 나타낸다. 즉 기존의 위상코드를 이용하여 두 개의 신호가 중첩된 후($0^\circ, 0^\circ$)로 복원된 신호가 실선으로 표시되었고($0^\circ, 180^\circ$)로 복원된 잡음이 점선으로 표시되었다. 마찬가지로 새로운 위상코드에 의하여 두 개의 신호가 중첩된 후($0^\circ, 0^\circ$)로 복원된 신호가 파선으로 표시되었고, ($90^\circ, 270^\circ$)로 복원된 잡음이 일점쇄선으로 표시되었다. 이 그림에서 점선과 파선은 10초인 지점에서 서로 만난다. 그림 8(a)와 (b)에서 알 수 있듯이 새로운 위상코드에 의한 홀로그램의 중첩 기록 및 복원시 나타나는 잡음 혹은 crosstalk(일점쇄선으로 표시)가 기존의 위상코드를 사용하였을 때의 그것(점선으로 표시)보다 매우 작아짐을 알 수 있다.

이러한 crosstalk을 정량적으로 표시하기 위하여 그림 9에서는 홀로그램이 복원될 때의 신호 대 잡음의 비를 계산하였다.

그림 9(a)는 첫 번째 신호가 off, 두 번째 신호가 on으로 중첩기록된 후 복원되었을 때의 신호 대 잡음의 비를 나타낸다. 실선은 기존의 위상코드를 사용하였을 때의 데이터이고 파선은 새로운 위상코드를 사용하였을 때의 데이터를 나타낸다. 그림 9(b)는 첫 번째 신호가 on, 두 번째 신호가 off로 중첩기록된 후 복원되었을 때의 신호 대 잡음의 비를 나타낸다. 실선은 기존의 위상코드를 사용하였을 때의 데이터이고 파선은 새로운 위상코드를 사용하였을 때의 데이터를 나타낸다. 그림에서 보는 것처럼 새로운 위상코드에 의한 신호 대 잡음의 비가 기존의 위상코드보다 약 10배 개선된 것을 알 수 있다.

VII. 결 론

본 논문에서는 기존의 위상부호 다중화 방법에서 비선형 현상으로 인하여 나타날 수 있는 잡음을 개선하기 위하여 새로운 위상변조 다중화 홀로그램 중첩방법을 제시하였다. 이러한 새로운 개념을 실험하기 위하여 본 논문에서는 piezo-electric material을 이용하여 10개의 핵셀을 갖는 Phase Spatial Light Modulator를 제작하였다. 그 다음, 본 논문에서 제시하는 새로운 개념의 홀로그램 다중화의 타당성을 입증하기 위하여 2개의 핵셀을 이용하여 참조빔의 위상을 변이하여 두 개의 서로 다른 이미지를 광굴절 결정체에 중첩기록하고 이들을 복원하는 실험을 실시하였다. 이러한 실험의 결과 새로운 방법에 의한 홀로그램 중첩이 기존의 방법에 비하여 상대적으로 작은

잡음을 포함한다는 것을 증명하였다. 이러한 실험 결과를 확인하기 위하여 본 논문에서는 두 개의 홀로그램이 중첩 기록 및 복원되는 것을 모의실험할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하여 그 결과가 실험결과와 일치하는 것을 보였다.

본 연구에서 제작한 PSLM은 10개의 핵셀을 갖도록 제작되었지만 사용된 piezo-electric material이 상당히 큰 hysteresis 특성을 갖고 있어서 이를 10개의 핵셀을 동시에 구동하여 실험하기는 불가능하였다. 이후에는 PSLM의 구동 전기회로에 feedback회로를 첨가하여 piezo-electric material의 hysteresis를 보상하여 참조빔의 위상을 더욱 정확하게 조절하여 실험하는 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비(1997-001-E00277)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] F. S. Chen, J. T. LaMacchia, and D. B. Fraser, *Appl. Phys. Lett.* **13**, 223 (1968).
- [2] F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stoll, *Opt. Lett.* **47**, 605 (1991).
- [3] F. H. Mok, *Opt. Lett.* **18**, 915 (1993).
- [4] G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, *Opt. Lett.* **17**, 1471 (1992).
- [5] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, G. Barbastathis, and K. Curtiss, *Opt. Lett.* **20**, 782 (1995).
- [6] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, *Opt. Comm.* **85**, 171 (1991).
- [7] J. Trisnadi and S. Redfield, *Proc. SPIE*, **1773**, 362 (1992).
- [8] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, *Appl. Opt.* **31**, 5700 (1992).
- [9] C. Alves, G. Pauliat, and G. Roosen, *Opt. Lett.* **19**, 1894 (1994).
- [10] T. LaMacchia and D. L. White, *Appl. Opt.* **7**, 91 (1968).
- [11] P. Healey and D. Smith, *OSA Annual Meeting Technical Digest* pp.119 (1987).
- [12] T. F. Krile, M. O. Hagler, W. D. Redus and J. F. Walkup, *Appl. Opt.* **18**, 52 (1979).
- [13] D. Z. Anderson and D. M. Lininger, *Appl. Opt.* **26**, 5031 (1987).

Holographic optical memory by phase-modulation multiplexing

Seung-Dae Sohn, Jae-Ryang Ko and Yeon-Ho Lee

Sungkyunkwan University, School of Electrical and Computer Engineering, Suwon 440-746, Korea

(Received April 6, 1999, Revised manuscript received December 10, 1999)

We propose a new scheme of hologram multiplexing that can improve the crosstalk noise in the conventional phase-code multiplexing. Our method is based on the idea that the separate holograms to be stored in a certain region of the photorefractive material should have relative phase other than 180° . To demonstrate the new idea we fabricate a phase spatial light modulator using piezo-electric material. The experimental result shows that the crosstalk noise in the restored holograms is reduced much in our method. We also computer simulate the hologram multiplexing and compare the result with the experimental data.