

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06378

研究課題名(和文)ホログラフィックメモリのための多値複素振幅データの記録再生法の開発

研究課題名(英文)Recording and reading method of multi-level complex amplitude data for holographic memories

研究代表者

本間 聡 (HONMA, Satoshi)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：70362085

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、振幅、位相を同時に多値に変調した複素振幅信号光を簡易な光学系でホログラフィックメモリに記録し、その記録容量を大きく改善することを目的にしたものである。二枚の位相変調信号光のホログラムを多重記録することにより等価的に複素振幅データのホログラムを合成する手法を提案し、さらにエラー訂正技術やデジタルフィルタ処理を使用することにより大幅にSQAM信号の再生精度を改善することができることを明らかにした。また、よりモノマの消費を低減し、精度の高いSQAM信号を記録する手法として交互配置法を提案し、再生精度を解析および実験により評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光波の振幅と位相を同時に制御する空間変調器が存在しないため、従来はこれらを個別の変調器で制御することにより複素振幅信号を生成していた。本研究では1台の空間変調器を使用した光学系で、振幅と位相を独立に多値に変調した複素振幅信号を生成する手法を提案した。ホログラフィックメモリの光学系が小型化し、また開発コストを大幅に低減することが期待される。また、位相と振幅を制御する手法は、ホログラフィックメモリに限らず、結像距離を任意の調整可能なプロジェクタや多モードファイバ中の伝搬光制御など、多岐に応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to record the complex amplitude signal light whose amplitude and phase are simultaneously multi-valued in a holographic memory with a simple optical system, and to greatly improve the recording capacity. We proposed a method of equivalently synthesizing holograms of complex amplitude data by multiplexing recording of two holograms of different phase-modulated signal lights. It is also revealed that the accuracy of the reproduced SQAM signal can be improved significantly by implementing error correction technology and digital filter processing recursively. In addition, we proposed an interleaved method as a method for recording SQAM signals with high accuracy and reduced consumption of monomer, and evaluated the reproduction accuracy by analysis and experiment.

研究分野：光記録

キーワード：ホログラフィックメモリ 複素振幅信号 多重記録 二重露光法 位相交互配置法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

AI・ビッグデータの活用やオンデマンド映像配信の普及により大容量の情報を記録したいというニーズが顕在化しており、低消費電力で大容量のデータを保存するアーカイブ用メディアとしてホログラフィックメモリが注目されている。ホログラフィは元来、振幅のみならず位相も変調された光波分布を忠実に記録再生することができるが、光学カメラでは強度分布しか計測できず、また振幅と位相を同時に制御する空間光変調器(SLM: Spatial Light Modulator)がないことから、これまで空間複素振幅(SQAM: Spatial Quadrature Amplitude Modulated)信号を積極的にホログラフィックメモリに記録再生する試みは少ない。

近年になり、主にデジタルホログラフィの分野で光波の複素振幅分布を精度よく計測する技術が活発に研究されるようになり、ホログラフィックメモリでも SQAM データを記録再生することが期待されるようになった。ただし、2台の SLM を使用して信号光の位相、振幅を個別に変調する方式は、光学系が大型化、高コスト化するという問題を有していた。

2. 研究の目的

本研究では、簡素な光学系を用いて高解像度で多値の SQAM データをホログラフィックメモリに記録する手法を確立し、記録容量を大幅に改善することを目的とした。我々は、1台の位相変調型の空間変調器を使用し、二つの異なる位相変調信号光のホログラムを同一領域に多重記録することにより等価的に複素振幅信号のホログラムを合成する二重露光法を提案した。FFT-BPM を用いて記録再生シミュレーションを行い、再生信号の精度を評価した。同結果より再生精度を低下させる原因を検証し、またこれを補償するための再生信号の補正およびエラー訂正技術の適用を検討する。さらに、再生精度を改善し、かつワンショットで SQAM 信号を記録する方法を検討した。最後に、実験により SQAM 信号の再生精度を評価し、十分に識別可能な品質の SQAM 信号を生成できることを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 二重露光法による SQAM 信号の記録

図1に二重露光法の光学系を示す。二重露光法では、以下の二つの位相変調信号 $P_1$ 、 $P_2$ をそれぞれ位相変調型 SLM により生成し、同一の参照光と記録媒体に照射することによりホログラムを多重記録する。ここで記録する SQAM 信号の複素振幅値

$$O_{SQAM}(x, y) = O_s(x, y) \exp[j\theta_s(x, y)] \quad (1)$$

に対して、各位相変調信号の位相値は

$$\varphi_1(x, y) = \theta_s(x, y) + \text{acos}[O_s(x, y)/2] \quad (2a)$$

$$\varphi_2(x, y) = \theta_s(x, y) - \text{acos}[O_s(x, y)/2] \quad (2b)$$

と与えられる。ただし、 $O_s(x, y)$ および $\theta_s(x, y)$ は SQAM 信号の振幅値および位相値である。各位相変調光の複素振幅値は

$$O_{s1}(x, y) = \sqrt{I} \exp[j\varphi_1(x, y)] \quad (3a)$$

$$O_{s2}(x, y) = \sqrt{I} \exp[j\varphi_2(x, y)] \quad (3b)$$

となる。ただし、 $I$ は位相変調光の強度であり、定数である。同過程によって二つのホログラムが多重記録されると、等価的に SQAM 信号に対応したホログラムが合成される。

記録に用いた参照光と同じ読み出し光をホログラムに照射すると、二つの位相変調光の合成波が再生され、次式に示すように結果的に SQAM 信号 $O_r(x, y)$ が再生される。

$$O_r(x, y) \propto \sqrt{I} \exp[j\varphi_1(x, y)] + \sqrt{I} \exp[j\varphi_2(x, y)] = \sqrt{I} O_s(x, y) \exp[j\theta_s(x, y)] \quad (4)$$

ただし、二つのホログラムを記録する際、ホログラム間に強度差や位相差が生じた場合、再生 SQAM 信号は次式より与えられ、

$$O_{ra}(x, y) \propto \sqrt{I} \exp[j\varphi_1(x, y)] + \sqrt{I + \Delta I} \exp[j\varphi_2(x, y) + \Delta\theta] \quad (\text{if } I_1 \neq I_2) \quad (5)$$

再生 SQAM 信号の振幅および位相が歪むことが分かる。数値解析により、ホログラム間に強度差が生じる場合を想定し、記録されるホログラム分布および再生される SQAM 信号の精度を評価した。

(2) ターボ符号によるエラー訂正法の導入とウィナーフィルタによる再生光分布の補正

二重露光法において多重記録される二つのホログラム間に強度差または位相差が生じると、SQAM 信号の再生精度が著しく劣化する。また、再生信号において隣接するピクセルからの漏れ光によるピクセル間干渉によっても再生精度が劣化する。再生精度を改善するために、(A)記録信号の一部にパイロット信号を挿入し、ホログラムの強度差、位相差を推定・補償する手法、(B)軟判定 Viterbi アルゴリズムに基づくターボ符号によるエラー訂正、(C)復号信号と再生信号から生成したウィナーフィルタを使用したピクセル間干渉抑制法の適用を検討した。

図2に、パイロット信号を挿入した記録データを示す。同図に示すように、記録データの一部に4ビットのパイロット信号を挿入している。二つの位相ページデータに対してパイロット信

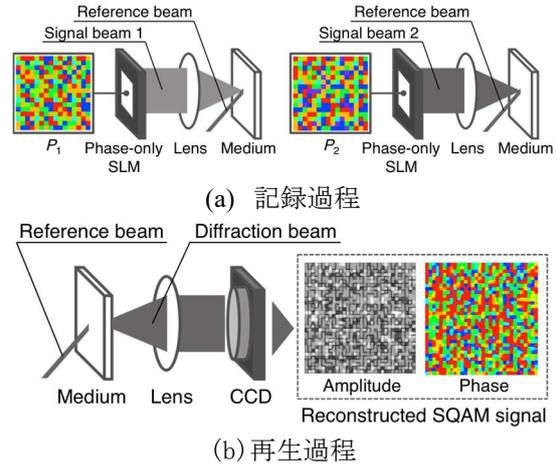


図1 二重露光法による複素振幅信号記録

号部の位相値(plt1, plt2, plt3, plt4)はそれぞれ(0,  $3\pi/2$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ), ( $\pi/2$ ,  $\pi$ , 0,  $3\pi/2$ )と設定した. ここで, 2つのホログラム間に強度差および位相差が生じた場合を想定し, 各ホログラムの複素回折効率を

$$\alpha = |\alpha| \exp(j\theta_\alpha) \quad (6a)$$

$$\beta = |\beta| \exp(j\theta_\beta) \quad (6b)$$

と定義する. 同回折効率は, 再生信号の各パイロット信号部分の複素振幅値 $O_{plt1-4}$ より

$$\alpha = \frac{1}{4} [(O_{plt1} - O_{plt4}) - j(O_{plt3} - O_{plt2})] \quad (7a)$$

$$\beta = \frac{1}{4} [-j(O_{plt1} - O_{plt4}) + (O_{plt3} - O_{plt2})] \quad (7b)$$

と推定でき, この値を用いて再生信号のデータ部分の複素振幅値を補正する.

さらに, 再生精度を改善するために, 二つのRSC(Recursive Systematic Convolutional)組織化トリレス符号化器を使用して記録データを符号化し, 再生時に再帰的にSOVA(Soft Output Viterbi Algorithm)によるエラー訂正を行うターボ符号エラー訂正技術を組み込んだ. これに加えて, エラー訂正された推定信号光分布とメモリから再生された再生光分布より作成されるウィナーフィルタを適用し, 再生信号光を補正した. 図3に記録データの符号化とホログラム記録過程, 図4にホログラムの再生過程とデータ復号過程を示す. 復号過程において, 上記の(A) - (C)の補正手法を再帰的に適用することにより, 相乗的に再生精度が改善されることを検証した.

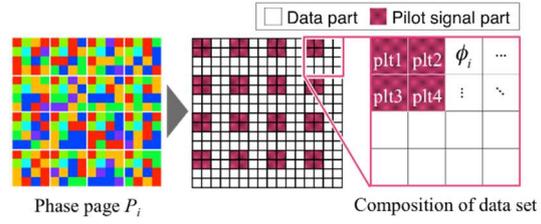


図2 パイロット信号の挿入

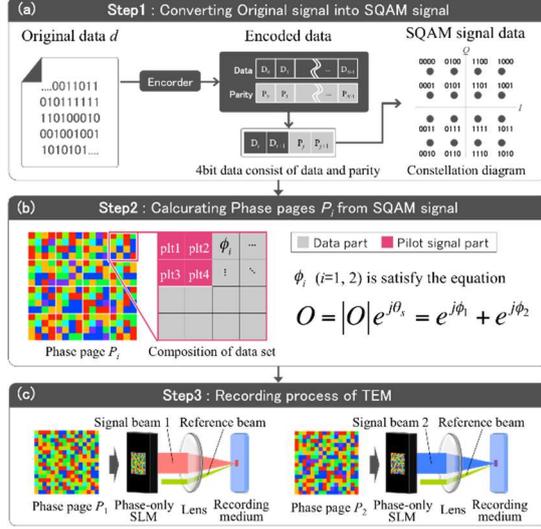


図3 記録データの符号化とホログラム記録

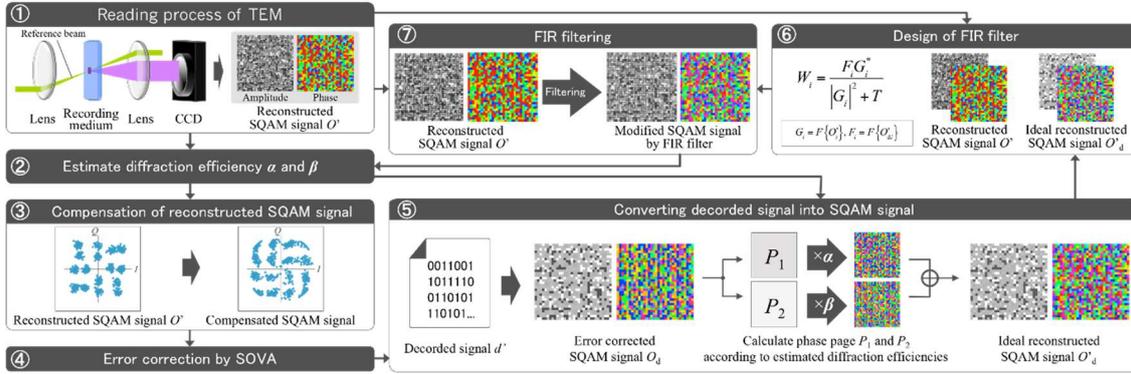


図4 SQAM信号の再生とその後の補償処理

### (3) 位相交互配置法によるSQAM信号の生成の検討

これまで二つの位相変調信号のホログラムを等しい強度で同一領域に多重記録することにより, 等価的に複素振幅信号のホログラムを形成する二重露光法を用いて, 再生SQAM信号の精度を改善する手法について検討してきた. 各位相変調信号にはSQAM信号として必要な成分と不要な成分が含まれており, 多重記録の過程で不要成分に対応するホログラムを選択的に相殺して所望のSQAM信号のホログラムを形成した. ただし, 同過程において, 媒体のシュリンクや, モノマ消費分布のばらつきにより高い精度で不要成分のホログラムを相殺することが難しく, 結果として, 光学実験では想定した精度の再生信号を得ることができなかった. また, 不要な成分のホログラムを一時的に記録する過程によって不要なモノマ消費が発生する問題を有していた.

同問題に対して, 二重露光法で使用した二つの位相分布を交互に配置した新たな位相分布を用いることで, 記録面において不要成分を分離した複素振幅信号を生成できることを見出し, 同手法を新たに位相交互配置法として提案した. 同手法において, 式(2)の二つの位相コードの一部を次式のように交互に交換して1枚の位相コードを生成する.

$$\varphi_3(x, y) = \theta_s(x, y) + a(-1)^{n+m} \cos[O_s(x, y)/2] \quad (8)$$

ただし,  $n$  および  $m$  は SLM の水平および垂直方向のピクセル番号である. 図5の光学系を使用

する。記録媒体の前面に空間フィルタを配置し、フィルタを透過した一部の光波を用いてホログラムを一度の露光で記録する。

式(8)の位相が与えられた位相変調光をレンズによりフーリエ変換すると、中心部分に

$$\mathcal{F}\left\{\left(\frac{O_s(x,y)}{2}\exp(j\theta_s(x,y))\right)\right\}$$

と、周辺部に  $\mathcal{F}\left\{\left(\sqrt{1-\left(\frac{O_s(x,y)}{2}\right)^2}\exp(j\theta_s(x,y))\right)\right\}$  に相

当する分布が現れる。前者の分布が SQAM 信号記録に重要な成分であり、後者は不要な成分となる。したがって、空間フィルタにより前者の成分のみ抽出して、これを用いてホログラムを記録することにより、一度の書き込みで複素信号のホログラムを記録することができる。また、同手法では、不要な成分は空間フィルタによって除去できるため、二重露光法と異なり不要なホログラム成分を記録する必要がない。したがって、二重露光法で問題となっていた多重ホログラムの強度差に起因する再生信号の歪や、無駄なモノマ消費を大幅に軽減することができる。

数値解析および実験により、同手法によって生成される SQAM 信号の精度を評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 二重露光法による SQAM 信号の記録と再生精度の数値解析による評価

高速フーリエビーム伝搬法 (FFT-BPM) をベースに記録媒体中の光波分布および形成される屈折率分布、再生光分布の解析を行った。同解析法を用いて、SQAM 信号をホログラフィックメモリに記録した場合の再生精度を評価した。同解析において、記録媒体であるフォトポリマ内のモノマは光照射エネルギー量に比例して消費され、その消費量に比例して屈折率が変化するというモデルを採用した。同解析を行うことで、ホログラム多重記録に伴って局所的にモノマが消費される過程が再現され、これがホログラム形成に与える歪、再生信号の精度に与える影響を評価した。

図6に多重したホログラム間に 0-40%の強度差が発生した場合の再生 SQAM 信号の点配置を示す。同結果より、ホログラム強度差が大きくなるにつれて、各シンボル値は本来の値からずれ、その歪により再生精度が低下することが分かる。

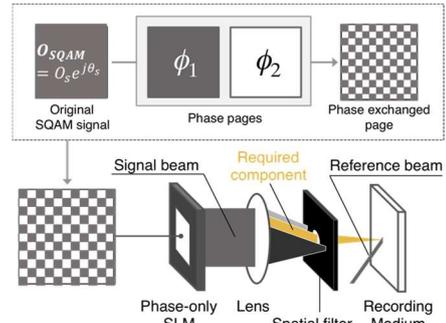
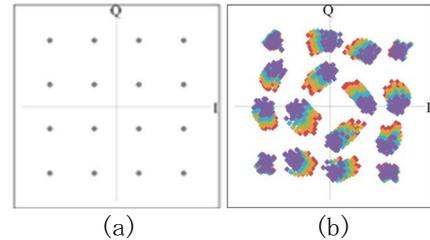


図5 位相交互配置法によるホログラム記録過程



(a) 理想的な SQAM 信号  
(b) 多重ホログラムの強度差に変動が生じた場合の再生 SQAM 信号

図6 再生された SQAM 信号の点配置

##### (2) ターボ符号とウィナーフィルタによる信号補正によるエラー低減の評価

パイロット信号によるホログラム強度差の推定と補正、ターボ符号によるエラー訂正、ウィナーフィルタによる信号補正を再帰的に適用した場合の再生 SQAM 信号のエラー訂正精度を数値解析により評価した。多重したホログラムの強度比を 1:1, 1:0.6, ホログラム記録に使用する露光面の半径を 1mm~0.3mm と仮定した。ターボ符号による復号処理の再帰回数に対する再生信号のエラーレートを計算した結果を図7に示す。ただし、ウィナーフィルタの使用の有無、フィルタ係数の更新の有無の条件を変えた場合についても計算した。同解析において、100枚の記録データに対して記録再生および補正処理を行い、平均エラーレートを評価している。同図において R はウィナーフィルタの係数の更新回数を表す。

同図より、いずれの条件においても、露光面積が小さくなるほど、また強度差が大きくなるほど、エラーレートが大きくなる事が分かる。ただし、ターボ符号による再帰復号回数が増えるほど、そのエラーレートが低減し、さらにウィナーフィルタを使用し、またその係数を更新することにより同解析条件下ではエラーが消失する結果が得られた。

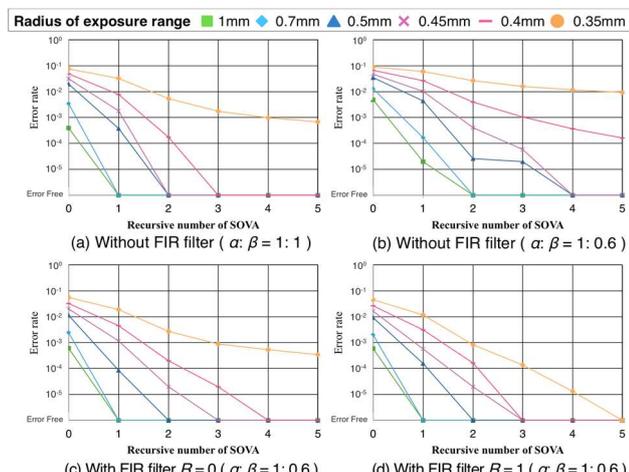


図7 ターボ符号による復号処理の再帰回数に対するエラーレート

(3) 位相交互配置法による SQAM 信号の生成と光学実験

位相交互配置法に基づき SQAM 信号を生成するためには、1 シンボルあたり複数の SLM のピクセルを使用する必要がある。図 8 に  $c^2 = 4 \times 4$  ピクセルを使用した場合の記録面における位相変調信号光のスペクトル分布および再生 SQAM 信号の解析結果を示す。同図(1a)は空間フィルタに照射する前のスペクトル分布を示しており、記録に必要な成分が中央部に、不要成分が周辺部に、それぞれ空間的に分離されて分布していることが分かる。同図(1b)に示すように、記録に必要な成分のみをフィルタによって抽出し、これを用いてホログラムを記録する。同図(2a)(2b)より 3 値の振幅分布、4 値の位相分布が再現されており、(2c)よりコンスタレーションマップ上においても各シンボルが分離されており、十分に識別可能な SQAM 信号が生成されることが分かる。

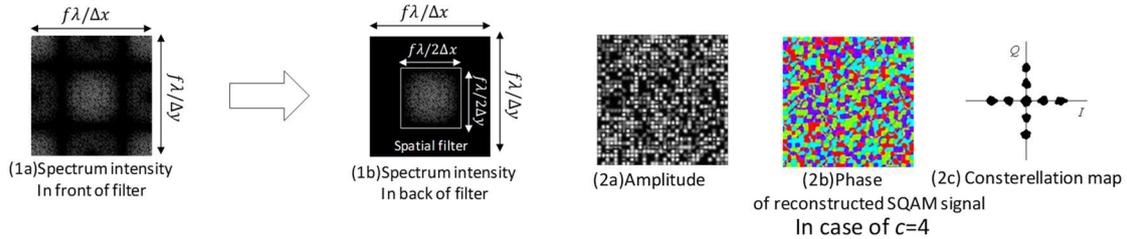


図 8. 位相交互配置法を用いた場合の記録媒体上の信号光分布と再生信号光分布

同結果を検証するために、図 9 に示す光学系を構成し、SQAM 信号を生成する実験を行った。同光学系は、空間変調器やレンズ、空間フィルタからなる SQAM 信号生成部と生成した SQAM 信号の複素振幅値を計測するためのマッハチェンダー干渉計部から構成されている。SQAM 信号の振幅値を 1, 0.5 とし、位相値を  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  とした。また、1 シンボルを生成するために使用するピクセル数を  $c^2 = 10 \times 10, 4 \times 4$  とした。

再生結果をそれぞれ図 10 および図 11 に示す。同図より、 $c^2 = 10 \times 10$  の場合、2 値の振幅値および 4 値の位相値が再生されていることが確認できる。コンスタレーションマップ上で各シンボル値の信号が分離されており、十分に識別可能な SQAM 信号が生成されることが分かる。一方、 $c^2 = 4 \times 4$  の場合、コンスタレーションマップ上で各シンボルの信号の一部が重なり、完全に分離できていないことが分かる。 $c^2$  が小さくなるほど、位相変調光に含まれる SQAM 信号に必要な成分と不要成分の各スペクトル分布が広がり、空間フィルタを透過させる際に、不要成分の一部が混入し、さらに信号成分の一部が除去されるようになる。その結果として、SQAM 信号の精度が劣化したと考えられる。ただし、二重露光法を使用した場合と比較して、大幅に再生精度を改善することができた。またワンショットで SQAM 信号を生成するため、モノマ消費の抑制と記録プロセスの削減ができた。上記の実験結果は、生成した SQAM 信号を直接計測した結果であり、エラー訂正やウィナーフィルタ等のデジタル処理を施していない。これらの技術と組み合わせることにより、より精度が改善されると期待される。

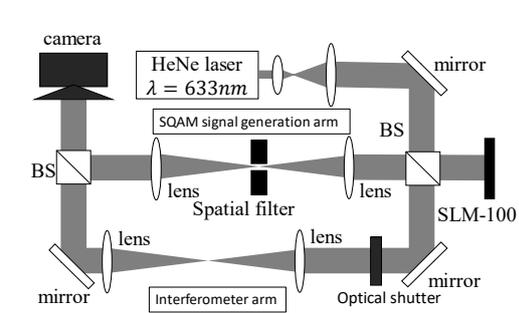


図 9. 実験系

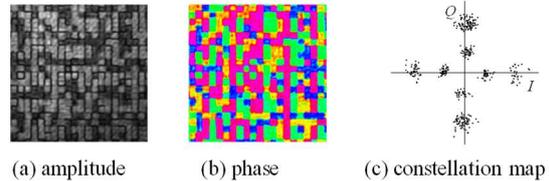


図 10.  $c=10$  の場合の再生 SQAM 信号

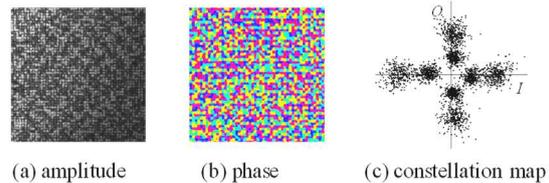


図 11.  $c=4$  の場合の再生 SQAM 信号

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Honma Satoshi、Funakoshi Haruki	4. 巻 58
2. 論文標題 A two-step exposure method with interleaved phase pages for recording of SQAM signal in holographic memory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SKKD05 ~ SKKD05
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab2be1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件／うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Haruki Watanabe and Satoshi Honma
2. 発表標題 Holographic projector using phase interleaved method
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruki Funakoshi and Satoshi Honma
2. 発表標題 High density recording by interleave method with RLL code for holographic memory
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Honma and Haruki Funakoshi
2. 発表標題 Reproduction of SQAM signal using interleaved phase page based on two-step exposure method for holographic memory
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間 聡, 舩越 悠希
2. 発表標題 ホログラフィックメモリのための交互配置位相ページ を用いた二重露光法によるSQAM信号記録
3. 学会等名 磁気記録・情報ストレージ研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間 聡, 舩越 悠希
2. 発表標題 ホログラフィックメモリのための位相交互配置法を用いたSQAM信号記録と記録密度の評価
3. 学会等名 マルチメディアストレージ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本間 聡, 舩越 悠希
2. 発表標題 ホログラフィックメモリのための位相交互配置法を用いたSQAM信号記録と記録密度の評価
3. 学会等名 マルチメディアストレージ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruki Watanabe and Satoshi Honma
2. 発表標題 Holographic projector using phase interleaved method
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruki Funakoshi and Satoshi Honma
2. 発表標題 High density recording by interleave method with RLL code for holographic memory
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Honma and Haruki Funakoshi
2. 発表標題 Reproduction of SQAM signal using interleaved phase page based on two-step exposure method for holographic memory
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間 聡, 船越 悠希
2. 発表標題 ホログラフィックメモリのための交互配置位相ページ を用いた二重露光法によるSQAM信号記録
3. 学会等名 磁気記録・情報ストレージ研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruki Funakoshi and Satoshi Honma
2. 発表標題 Synthesizing complex amplitude data with multiple intensity page for holographic memory
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hikaru Takahashi and Satoshi Honma
2. 発表標題 SOVA decoding and FIR filtering for holographic memory with Two-step exposure method
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Honma, Hikaru Takahashi, Haruki Watanabe
2. 発表標題 Spatial Quadrature Amplitude Modulation Signal with Orthogonal code for Holographic memories and Two-step exposure method
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本間 聡, 船越 悠希
2. 発表標題 ホログラフィックメモリのための交互配置法によるSQAM信号生成
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Honma and Hikaru Takahashi
2. 発表標題 Spatial Quadrature Amplitude Modulator with Photorefractive Device based on Two-step Exposure Method for Holographic Memories
3. 学会等名 international symposium Imaging, Sensing, And Optical Memory 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hikaru Takahashi and Satoshi Honma
2. 発表標題 Compensation of SQAM signal with pilot signal for two-step exposure method in holographic data storage
3. 学会等名 international symposium Imaging, Sensing, And Optical Memory 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----