

ÚJ MODELLEK ÉS ESZKÖZÖK A HOLOGRAFIKUS ADATTÁROLÓ RENDSZEREK KUTATÁSÁBAN

PhD értekezés

Várhegyi Péter

Témavezető: Koppa Pál

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2005.

Nyilatkozat

Alulírott Várhegyi Péter kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2005. március 21.

Várhegyi Péter

A dolgozat bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a későbbiekben – a BME doktori szabályzatának megfelelően – a BME TTK dékáni hivatalában lesznek elérhetőek.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm a dolgozatom megírásában nyújtott segítségét Koppa Pálnak, és Lőrincz Emőkének. Szintén köszönöm a kérdéseimre nyújtott bőséges válaszokat Ujhelyi Ferencnek, Erdei Gábornak, Sütő Attilának, a közös munkát Ujvári Tamásnak, Reményi Juditnak és Sajti Szilárdnak. Valamint köszönöm a modell és a szoftver fejlesztésében nyújtott segítségét Szarvas Gábornak is.

Végezetül köszönöm feleségemnek, Katának és lányomnak, Violának, és szüleimnek, hogy elviselték, és amennyire tudták segítettek a dolgozatom megírását.

Tartalom

1	Bevezetés	1
2	A holografikus adattárolás és modellezése.....	4
2.1	A holografikus adattárolás alapjai	4
2.2	A modellezés szerepe a holografikus adattárolás kutatásában	7
2.3	A HMC rendszer.....	8
3	Új modell a Fourier típusú holografikus adattároló rendszerek vizsgálatára	15
3.1	Holografikus adattároló rendszerek klasszikus modelljei	15
3.2	Új, kiterjesztett modell a Fourier hologramos adattárolás rendszerhez.....	17
3.3	A modell számítógépes megvalósítása és felhasználása	26
3.4	A modell működésének bemutatása a HMC rendszer példáján	29
3.5	További lehetséges memória rendszerek modellezése	31
4	Új összefüggések feltárása a tároló anyag telítődése és a holografikus rendszer tulajdonságai között.....	33
4.1	Az azobenzén poliészter tároló anyag kutatásának előzményei.....	33
4.2	Az azobenzén poliészter tulajdonságainak dinamikai modellje	38
4.3	Kutatásaim a telítődési modell ellenőrzésére	42
5	Vékony holografikus adattároló rendszerek optimalizálása szimulációs vizsgálatokkal	45
5.1	Az optimalizálás módszerei.....	45
5.2	A HMC rendszer alap paraméterei	46
5.3	A HMC rendszer optimalizálása.....	47
5.4	A javasolt optimális rendszer és az eredmények.....	59
6	Új módszerek a Fourier síkbeli intenzitás-eloszlás simítására, és ezáltal a Fourier hologramok hatásfokának javítására	62
6.1	Az eddig használt simítási eljárások.....	62
6.2	Új algoritmusok fázismaszkok tervezéséhez.....	66
6.3	A HMC rendszerben jelenleg használt fázismaszk	76
6.4	A simítási módszerek összehasonlítása és javasolt új eszközök	80
6.5	Az SLM fázisainak felhasználása az intenzitás simítására.....	86
7	Összefoglalás	88
8	Függelék	89
8.1	CD melléklet.....	89
8.2	Apertúra rekesz méretezésének számítása.....	89
8.3	Felhasznált rövidítések	92
8.4	Felhasznált jelek és változók	93
9	Irodalomjegyzék	95

1 Bevezetés

Doktori munkám célja egy új és jól használható modell felállítása volt a holografikus adattároló rendszerek kutatásához és e modell felhasználása az ilyen rendszerek vizsgálatához, optimalizálásához, tervezéséhez, javításához, továbbfejlesztéséhez. Elkészítettem a holografikus tároló rendszereknek egy átfogó és általános modelljét, amely leírja a rendszer működését, tulajdonságait. A modellt ellenőriztem, a kapott eredményeket valódi rendszerbeli kísérletekkel vettem össze, és az eredmények bebizonyították a modell használhatóságát. A modellt sikeresen alkalmaztuk a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem és az Optilink Kft. közös fejlesztésében készülő Holografikus Memória Kártya (Holographic Memory Card – HMC) rendszer esetében. E holografikus rendszeren jelentős javulást értünk el a modellel végzett kutatásaim eredményeképpen.

Dolgozatom második fejezetében először a holografikus adattárolásról írok, bemutatom céljait, módszereit, alkalmazásának lehetőségeit és röviden a kutatások történetét is. Ez az általános részben a kutatásom területét szemlélteti. Ezután a modellezés szerepét elemzem az adattároló rendszerek kutatásában. A megfelelő modellek segíthetnek megérteni a tapasztalt jelenségeket, megkönnyítik a tervezést, fejlesztést, megbízhatóbbá teszik az elkészített eszközöket. Majd a fejezet harmadik felében a HMC rendszerről írok. A HMC rendszer ismertetését azért éreztem szükségesnek, mert a modellem alkalmazását ezen rendszeren szemléltetem, és segítségével ezt a rendszert optimalizáltam. A rendszer ismeret nélkül eredményeimet nehezebb megérteni.

Harmadik fejezetben mutatom be az 1. tézisemet, vagyis az általam készített Fourier típusú holografikus adattároló rendszerek általános modelljét, mely Gyors Fourier transzformáción (Fast Fourier Transform – FFT) alapul és a szakirodalomban tárgyalt modelleknél jelentősen bővebb és általánosabban felhasználható. A fejezetet a szakirodalom áttekintésével kezdem, ismertetem az eddig megalkotott fontosabb modelleket, amelyek azonban általában speciális feladatokra készültek. Egy-egy kérdésre összpontosítottak a többi hatás elhanyagolásával és az adatok megjelenítésére szolgáló egyes pixelek viselkedését vizsgálták csak. Így ezek a modellek általános vizsgálatokra nem, vagy csak nehezen használhatóak.

Az irodalom áttekintése után saját vizsgálataimra térek rá. Bebizonyítottam, hogy egy összetett holografikus rendszer modelljében nem elég egyes pixeleket vagy pixel csoportokat külön vizsgálni ahogy azt a szakterületen általánosan használt konvolúción alapuló modellek teszik, hanem a teljes tárolt kép feldolgozására van szükség. Arra is rámutattam, hogy a különböző fizikai effektusok együttes hatása nem modellezhető az egyes hatások szétválasztásával azok bonyolultsága és nemlineáris hatása miatt. Ez indokolja egy átfogó modell felállításának szükségességét.

Az általam készített modell a Fourier transzformáción alapul. Az optikai hullámfrontot egy kétdimenziós komplex mátrix reprezentálja, amelyhez kísérletekkel és számításokkal meghatároztam a szükséges mintavételezést. A mátrixos leírás a rendszerben fellépő diffrakciós effektusokat is figyelembe veszi a Fourier transzformáció segítségével. Ezen diffrakciós effektusok közül a leglényegesebbek az adatokat megjelenítő térbeli fénymodulátoron és a rendszer apertúra rekeszen keletkező diffrakció. A hullámfront mátrixával modellezhető az optikai hullámfrontban fellépő jelenségek. A modell így többek között figyelembe veszi a megvilágító lézernyaláb tulajdonságait, a fénymodulátor kontrasztját és kitöltési tényezőjét, a rendszer apertúra rekeszének méretét és alakját, a véletlen fázismaszkot, a referencia nyaláb alakját, és a CCD detektor pixelméreteit és zajait. Ezenkívül egy rendszer összeépítése során fellépő főbb hibák hatásait is megfigyelhetjük,

például az egyes elemek elmozdulását, porszemeket és karcokat a hologramon, beállítási hibákat, hologram átfedéseket. Dolgozatomban részletesen ismertetem a modell felépítéséhez felhasznált és megalkotott fizikai és matematikai módszereket.

Az elméleti alapokra épülő rendszermodellt egy számítógépes szimulációs szoftvercsomagban valósítottam meg, amely egy felhasználóbarát, könnyen kezelhető és átlátható környezetben ad lehetőséget az egyes paraméterek változtatására, optimalizálására. A szoftvercsomag neve „Szimu” doktoranduszi munkám során ennek a szimulációs programnak segítségével számítottam ki az elért eredményeimet. Dolgozattal együtt közreadom a szoftver demó változatát, amely kipróbálásra megtalálható dolgozatom CD mellékletén.

A negyedik fejezet a 2. tézisem bemutatása. A modell keretein belül megalkottam a holografikus tároló anyag dinamikai tulajdonságainak leírását. Ezáltal egy olyan új vizsgálati eszközt valósítottam meg, amely a holografikus adattároló rendszerek leírásánál a tároló anyag hatását is figyelembe veszi és ezzel lehetővé teszi a tároló anyag nemlineáris válaszána és telítődésének nagy pontosságú modellezését. A HMC rendszerben polarizációs Fourier hologramokat rögzítünk azobenzén oldalláncú poliészter típusú anyagokba. A fejezet elején áttekintem a szakirodalmat. A szakirodalomban nem találtam ilyen mélységű szimulációs modellt a tároló anyag viselkedéséről. Ezután kollégáim kísérleteit, számításait és eredményeit mutatom be, amelyeket felhasználtam a modell kibővítése során. Az anyag leírásához két paramétert használunk és a modellben a hullámfront ábrázolására használt komplex mátrixon alkalmazzuk. Ennek a feltételeit és lehetőségeit megvizsgáltam, és dolgozatomban részletesen bemutatom.

Végül a modell helyességét ellenőrző kísérleteket mutatom be. Különböző paraméterű szimulációs és rendszerbeli kísérleteket végeztem, és az eredményeket összehasonlítottam bit hiba arány (BER) és képhűség szempontjából. Az eredmények bebizonyították, hogy a modell a Fourier típusú holografikus adattároló rendszerek működésén kívül a tároló anyaggal együtt is helyesen írja le a rendszert.

Az ötödik fejezetben a 3. tézisemet mutatom be. Megmutatom, hogy a modellel végzett szimulációs vizsgálatokkal a HMC rendszer működése optimalizálható. A meghatározó paraméterek egy olyan új kombinációját javasolom, amely nagyobb adatsűrűséget és írási sebességet eredményez kisebb bit hiba arány mellett. A fejezet elején áttekintem az általam használt szimulációs módszert, amely első lépésként megvizsgálja az egyes változók hatásait, majd második lépésben globálisan ellenőrzi az optimumot. A optimalizáció módszere általános, más holografikus adattároló rendszer esetében is felhasználható.

Majd bemutatom a HMC rendszer optimalizációját. Egy nagy tárolókapacitású memória rendszernél a tárolt adatsűrűség és a bit hiba arány közötti kompromisszum kulcskérdés. Az optimalizálás során a következő paramétereket vizsgáltam: a referencia nyaláb profilja, a hologram geometriája, a szomszédos hologramok távolsága, az adatok megjelenítésében használt szűrkeszintek száma, a hologram mérete, a térbeli fénymodulátor kitöltési tényezője és kontrasztja és a detektor dinamikai tartománya. Ezen paraméterek hatásai, majd az optimális beállításuk és az adatsűrűségben, írási sebességben és bit hiba arányban elért javítás szerepel a fejezet további részében. Eredményeim nagyobb része a HMC rendszertől függetlenül is használható, illetve ezzel a szimulációs módszerrel és a modellem segítségével más rendszerekre is meghatározható az optimum ilyen módon.

Dolgozatomban végül a hatodik fejezetben a 4. tézisemet fejtem ki. Megalkottam egy új eszközt, a véletlen alaphálós kötött fázislépésű négyzintes fázismaszkot. A különböző intenzitás simító módszerek (fázismaszkok, axikon, defókuszálás) összehasonlító elemzését

elvégeztem, amely alapján az új fázismaszk mind a nagy intenzitáscsúcsok simításában, mind a rendszerben elérhető bit hiba arány és írási sebesség szempontjából optimális. A simításra a Fourier síkban megjelenő nagy intenzitáscsúcsok miatt van szükség, ha ezek kisimulnak csökkenhet a tároló anyag telítődése és ezáltal javulhat a diffrakciós hatások és javul a tárolás: nőhet az adatsűrűség, csökkenhet a bit hiba arány és az írási idő. Szakirodalomban legismertebb módszerek a defókuszálás, a fázismaszk és az axikon. Fejezet elején ezeket mutatom be általánosan.

A szakirodalom nem tárgyalja a holografikus adattárolásban használatos fázismaszkok készítését. Ezért a modellem alapján kifejlesztettem algoritmusokat amelyekkel különböző kettő és négy szintes fázismaszkok tervezhetőek. Szintén bemutatom a véletlen alaphálós kötött fázislépésű négyszintes fázismaszkot és tervezését. Bemutatom az algoritmusokat és az általuk készített maszkok összehasonlítását. A bit hiba arány segítségével összehasonlíthatóak a fázismaszkok a simító hatásuk és az általuk okozott destruktív hibák szempontjából.

A fejezetben ezután a jelenlegi HMC rendszerben felhasznált fázismaszkot mutatom be. Ez egy kétszintes adatok struktúrájának megfelelő fázismaszk. Az algoritmusaim és a modellem segítségével terveztem meg és készítettük el. A kísérleti eredmények, és a felhasználhatósága megfelel a tervezettnek.

Végül a fázismaszkokat összehasonlítom a többi simítási módszerrel is, a defókuszálással és az axikkal. Vázlatosan bemutatom az fénymodulátor eszközök felhasználási lehetőségeit is, amely eszközök megfelelő beállítások mellett mint adatmegjelenítő és fázismaszk is használhatóak egyben.

Doktori dolgozatomat összefoglalás zárja, majd a függelék részben segítséget adok a dolgozatom olvasásához. Először is leírom a dolgozatomban is megtalálható „Szimu” szoftvercsomag használatát és lehetőségeit. Majd mivel dolgozatomban sok helyen szerepelnek rövidítések, ezért ezeket is összegyűjtöttem, hogy olvasás közben meg lehessen találni a pontos jelentésüket egy helyen. Ugyanitt a dolgozatomban szereplő változók is megtalálhatóak.

A dolgozatomban felhasznált irodalmat a dolgozat végén sorolom fel, és a szöveg közben szögletes zárójellel jelzem. A hivatkozások [1-10] a saját téziseimhez kapcsolódó tudományos közleményeim, [11-21] kollégáim közleményei, amelyekben modelletem vagy eredményeimet használták fel saját kutatásaikhoz. A további [22-89] hivatkozások a doktori munkámhoz kapcsolódó szakirodalmat tartalmazzák.

2 A holografikus adattárolás és modellezése

Ebben a fejezetben egy átfogóbb bevezetőt adok a doktori dolgozatomhoz. Bemutatom a holografikus adattárolás alapelvét, történetét, elméletét és alapfogalmait. A későbbiekben az itt leírtakra fogok támaszkodni. A holografikus rendszereken túl azok modellezésének lehetőségeit, modellezésének szükségességét is ismertetem. Szintén ebben a fejezetben mutatom be a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem és az Optilink Kft. közös fejlesztésében készülő Holografikus Memória Kártya (Holographic Memory Card – HMC) rendszert amelyre sikeresen alkalmaztuk az általam kifejlesztett modellt. A további fejezetekben sok helyen veszem a HMC rendszert példák és kísérletek alapjául ezért éreztem szükségesnek alaposabb bemutatását.

2.1 A holografikus adattárolás alapjai

2.1.1 A holografikus adattárolás célja

A holografikus memóriák célja digitális információ tárolása hologramok formájában [22]. Az információt a hagyományos rendszerekben, mint például magnó, floppy, CD egy vonal mentén, vagyis egy dimenzióban jelenítik meg. Ezt a vonalat helyezik el azután a tároló eszköz felületén. Ezzel szemben a holografikus adattárolás során az információ akár kettő vagy három dimenzióban tárolódik, tehát egyből valamilyen kép vagy alakzat formájában.

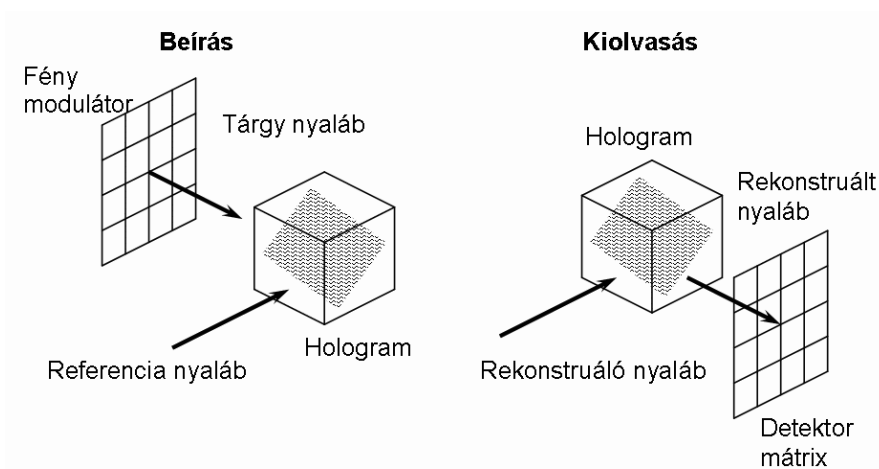
Ennek a tárolásnak sok előnye van: Nagy adatsűrűség érhető el azáltal, hogy nem csak a hordozó felületén, hanem a térfogatában is tárolódhat az adat. A képek illetve alakzatok formájában rögzített információ egyszerre olvasható ki, ezáltal gyors olvasási sebesség érhető el. Más alkalmazásokban pedig nagyon gyorsan kereshetünk az alakzatok között korrelációs módszerekkel. A hologram redundánsan tárolja az információt, ezáltal egy holografikus tárolóban nagy adatbiztonság érhető el a sérülésekkel szemben. Az optikai titkosítás alkalmazásával pedig a közönséges software alapú titkosításoknál biztosabban védhető az információ az illetéktelen hozzáférés ellen.

A holografikus adattárolásnak rengeteg lehetséges alkalmazása létezik. Legalapvetőbb és legsokoldalúbban használható a bináris adatok tárolása [22,23], amelyről dolgozatom is szól, de ezenkívül képfeldolgozó optikai rendszerek részeként, vagy gyors korrelációs kereső memóriákként is használnak holografikus adattároló rendszereket [24-27]. A titkosított rendszereket fel lehet használni bizalmas adatok tárolására, azonosító rendszerek részeként mint a kulcsok tárolója, ujjlenyomat ellenőrző rendszerben vagy hamisításvédelemben [28].

2.1.2 A holografikus adattároló rendszerek általános felépítése és alapfogalmi

A holografikus adattárolás alapelve, hogy két fénynyaláb interferencia mintázatát rögzítjük egy megfelelően érzékeny tároló közegben. Általában az egyik nyaláb hordozza a tárolni kívánt információt, ez a tárgynyaláb, a másik az interferencia létrejöttéhez szükséges, ez a referencianyaláb. Ezt a folyamatot nevezzük a hologram létrehozásának, egyszerűbben beírásnak. A tárolt információt a referencianyalábhoz hasonló rekonstruáló nyalábbal olvassuk ki, amely a rögzített interferencia mintázaton diffraktálódik, és létrehoz egy

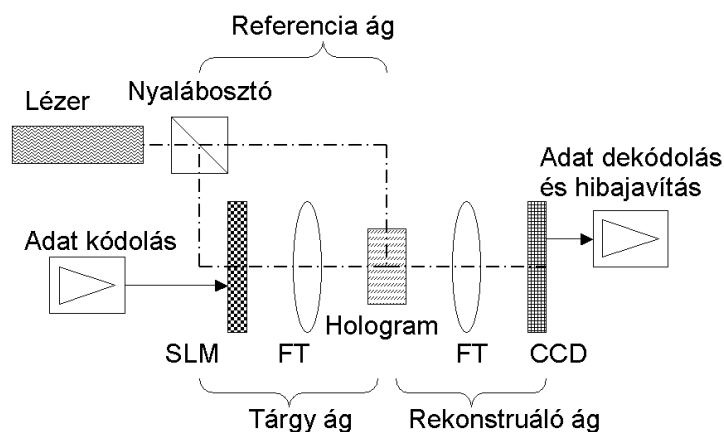
nyalábot, amely tartalmazza az információt. Ez a kiolvasás, vagy más néven rekonstrukálás. A folyamatot az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra A holografikus adattárolás alapelve

A holografikus adattároló rendszerek az információt leggyakrabban kétdimenziós kép formájában jelenítik meg, ezért a lap szervezésű optikai memóriák csoportjába tartoznak. Az információ egy fény modulátor segítségével fekete-fehér vagy szürke képben jelenik meg, és a képpontok szűrkeségében tárolódik. Ebből a képből általában Fourier hologramot készítenek, és rögzítenek a holografikus tároló anyagban. Az eltárolt hologramot a kiolvasás során rekonstruáljuk, és így visszakapjuk a képet, amelyből valamilyen fajta detektor mátrixszal nyerjük ki a tárolt információt.

Egy általános holografikus adattároló rendszer vázlatát a 2. ábra mutatja. Beírásnál a hologram rögzítéshez lézer szolgáltatja a koherens fényt, amelyet két nyalábra, a tárgy és a referencia nyalábra osztunk. A tárgy ágban az információt megfelelő formába alakítjuk, kódoljuk, és egy térbeli fény modulátorral (Spatial Light Modulator – SLM) jelenítjük meg. Az információt tároló nyalábot Fourier transzformáljuk (FT) és a kapott Fourier spektrumot rögzítjük, mint hologramot, a referencianyaláb segítségével. A rögzítés a holografikus tároló anyagban többféleképp történhet, intenzitásban, fázisban, polarizációban, stb. Az 1. és 2. ábra a legelterjedtebben használt merőleges tárgy és referencia nyaláb esetét mutatja.



2. ábra Általános holografikus adattároló rendszer vázlatja (4f rendszer)

Kiolvasás során a beíráshoz használt referencianyalábbal rekonstruáljuk a hologramot, vissza Fourier transzformáljuk, és egy CCD vagy hasonló detektor mátrixszal érzékeljük. Ezután a kapott képet vissza kell alakítani információvá, ha szükséges, akkor a keletkezett hibákat ki kell javítani. A fent ábrázolt holografikus elrendezést 4f rendszernek szokás nevezni, mert a két Fourier transzformáció során négyszeres fókusz távolságot használunk.

A digitális holografikus adattároló rendszerek jellemzésének két fontos mérőszáma van. Az első az adatsűrűség. Ez a felület vagy térfogat egységben eltárolt bitek mennyiségét mutatja meg. Mértékegysége általában a $\text{bit} / \mu\text{m}^2$ vagy $\text{bit} / \mu\text{m}^3$. Nagysága elméletileg a tárolás során felhasznált fény hullámhosszától függ, kb. 1 bit tárolható a hullámhossz köbének megfelelő térfogatban.

A másik mérőszám a bit hiba arány (Bit Error Rate – BER). A BER azt mutatja meg, hogy az adatok kiolvasása során a bitekből mennyi volt hibás. A felhasználó felé egy mai adattároló rendszernek 10^{-12} felhasználói BER-t kell teljesítenie. Ilyen hiba arányt semmilyen fizikai adattároló rendszer nem képes magától elérni, ezért mindenképp szükség van hibajavító kódok (Error Correction Code – ECC) használatára. Ennek során az adatbitek mellett hibajavító biteket is tárol a rendszer, és egy-két hibát ki tud velük javítani. Tehát valamennyivel csökken az adatsűrűség, de összességében megbízhatóbb lesz a rendszer. ECC segítségével a 10^{-12} felhasználói BER-t el lehet érni, ha a rendszer eredeti hibája, az úgynevezett nyers BER $10^{-4} - 10^{-2}$ nagyságrendű. Ezért ha a rendszer magát szeretnénk jellemezni, akkor a nyers BER értéket kell használnunk. A BER mellett szokás még a jel zaj viszonyt (Signal to Noise Ratio – SNR) is használni.

A Fourier holográfiának több fontos előnye van. Egyrészt a Fourier spektrum delokalizálva tárolja az információt, így egy a hologramot ért sérülés nem okoz egy helyen egy nagy hibát, hanem az egész adat minőségét csökkenti, amelyet azonban még elviselhet a rendszer. Másrészt a Fourier spektrum síkbeli elmozdulása az adatokra nézve csak fázisváltozást jelent, így a hologram síkbeli elmozdulása nem rontja el a rekonstruálást. Harmadrészt a Fourier spektrum tárolásával nagy adatsűrűség érhető el, és szűrésével pontosan beállítható a hologram mérete. Hátránya az, hogy a Fourier síkban nagy intenzitású csúcsok jönnek létre, amelyek telítésbe viszik a holografikus anyagot, és rontják a kiolvasás hatásfokát és minőségét, ezért valamilyen intenzitásimítási módszer használata feltétlen szükséges.

2.1.3 A holografikus adattárolás története

A hologramokban történő adattárolásra az alapelveket van Heerden [29] fektette le, 1963-ban. Az első kísérleteket 1960-as évek végén, '70-es évek elején végezték. A kísérletektől nagy adatsűrűséget és egy könnyen, gyorsan használható adattároló megalkotását várták. A kezdeti sikeres kísérletek ellenére nem készült el a kitűzött cél. A legfőbb ok a megfelelő tároló anyag hiánya volt. Ezenkívül a szükséges bonyolult optoelektronikai eszközöket is akkoriban kezdték csak el kifejleszteni, még bizonytalanok és túl drágák voltak.

Az azóta eltelt időben a tároló anyagok kutatásában óriási fejlődés ment végbe [30]. A digitális fényképezőgépek és videó projektorok elterjedésével megfelelő méretű és minőségű opto-elektronikai eszközök jelentek meg, valamint kis méretű, nagy teljesítményű lézerek is elérhetővé váltak széles hullámhossz tartományon. Ezek következményeképp a holografikus adattárolás kutatása is feléledt [31], az elmúlt években több kutatócsoport és cég kezdett komolyan foglalkozni a kérdéssel. Nagy számban jelentek meg a tudományos publikációk, és a konferenciákon is rendszeresen találkozni a témát elemző előadásokkal, poszterekkel. A

témában egy átfogó könyv [22] is megjelent, amely kb. 500 oldalon mutatja be a holografikus adattárolás lehetőségeit.

2.2 A modellezés szerepe a holografikus adattárolás kutatásában

A mai modern termékfejlesztési elvek [32] a termék fejlesztésével együtt egy modell kifejtését is ajánlják, hogy a termék jellemzőit, megbízhatóságát, felhasználhatóságát még a tervezés fázisában, vagy még inkább előtte meg lehessen ismerni.

Egy terméket azért fejlesztünk, hogy azt valakik felhasználják. Hogy a termék sikeres legyen, ahhoz el kell találni, hogy mit szeretnének a felhasználók. Holografikus adattároló rendszerek esetében a legfontosabb ilyen igények az adattárolás biztonsága, a tárolt adat mennyisége, az olcsóság és a kis méret. Magát a termék fejlesztését felfoghatjuk úgy, hogy egy olyan folyamat, amely az ötletekből ezen igényeknek megfelelő terméket készít.

Ezt a folyamatot segíti elő a modell készítése. Egy megfelelő, megbízható modell felhasználásának előnyeit három nagy csoportba oszthatjuk.

1. Segítségével meghatározhatjuk, analizálhatjuk, hogy mely paraméterei, mely részei azok a terméknek, amelyek a legkritikusabbak a felhasználás és a felhasználók igényei szempontjából. Ezeket az érzékeny paramétereket, részeket kell majd a legkörülményesebben megtervezni.
2. Megjósolhatjuk, hogyan fog a termék viselkedni a paraméterek vagy a környezet megváltozásakor. Költséges, nehéz és időrabló kísérleteket takaríthatunk meg ezáltal, és sokkal tágabb teret enged a modell a termék optimalizálásának.
3. A tervezés ellenőrzésére, toleranciák vizsgálatára is kiválóan alkalmas. Segítségével az elkészült terveket megvizsgálhatjuk, lehetséges hibákat még a gyártás megkezdése előtt kiszűrhetjük. Ez javítja a termék minőségét, növeli a megbízhatóságát.

A modell többféle lehet. A néhány kísérletre alapozott megfigyeléstől kezdve a matematikai formulákon át a fizikai vagy statisztikai modellekig, megvalósítását tekintve pedig lehet rajz, leírás, zárt matematikai képlet vagy számítógépes szoftver is. A modellek mindig méréseken és elméleteken alapulnak, és helyességüket is mindig ellenőrizni kell.

A modellekkel végzett vizsgálatokat nevezzük általában szimulációnak. „A rendszer szimuláció az a technika, amikor egy problémát a dinamikai modellje teljesítményének időbeni megfigyelésével oldunk meg” (Gordon, 1978 [33])

A szimulációs modell általában egy számítógépes modell, amely lehetővé teszi [33]:

- a rendszer vagy folyamat teljesítmény-idő összefüggésének mesterséges elkészítését,
- vizuálisan követhetővé tegye, dokumentálja ezt a viselkedést,
- kiértékelje a rendszer vagy folyamat kimenetét a bemeneti feltételek széles tartományára,
- feltárja a problémákat a rendszerben vagy folyamatban.

Modellvizsgálat nélkül a termék kevésbé lesz megbízható és lehet, hogy nem az optimális terméket készítettük el. Ezenkívül esetleges hibái csak az elkészült terméken vagy prototípuson jelentkeznek, amikor már sokkal nehezebb és költségesebb kijavítani azokat.

Ez az elv a holografikus memória rendszerek kutatására és fejlesztésére is igaz, itt szintén sok pénzt, időt spórolhatunk meg, és sok zsákutcát elkerülhetünk. A történeti részben bemutatott legtöbb kutatásban szintén fejlesztettek modellt is a kísérletek mellett. Ezek egy része kifejezetten sikeres, és lényeges segítséget nyújtó eszköz [31,34,35], ugyanakkor más esetben a rendszer bonyolultságára hivatkozva kevésnek érzik a modelljeik teljesítményét [36]. Az igazság valahol a kettő között van, modellre szükség van a holografikus adattárolás kutatásának segítésére, de a szimulációk és a modell eredményeit valódi kísérletekkel kell ellenőrizni. Dolgozatomban és kutatómunkám során mindig ezt próbáltam szem előtt tartani, ezért a kifejlesztett modell mellett bemutatom az ellenőrző kísérleteket is.

2.3 A HMC rendszer

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem és az Optilink Kft. közös fejlesztéseként született meg a HMC rendszer [3,8,10,11-19]. Ez az eszköz a világ első hordozható holografikus adattároló rendszere, melyből a beírt adatokat tartalmazó hordozókártyát ki lehet venni és egy másik eszközben ki lehet olvasni az adatokat. PhD munkám, kutatásaim elsődleges felhasználása az eszköz a kifejlesztése és lehetséges továbbfejlesztéseinek kutatása volt. Az elkészült készülékekről és a fejlesztésükről néhány képet mutat a 3. ábra.

A HMC rendszer fejlesztésének szempontjai a következők voltak:

- kicsi, kompakt rendszer
- hordozható, egyszerű, vékony, kártya alakú adattároló
- író–olvasó és csak olvasó (írni, törölni semmilyen módon nem tudó) készülékek
- törölhető, újraírható hologramok
- nagy adatsűrűség, nagy kapacitású kártyák
- megbízható, biztonságos adattárolás
- későbbiekben titkosítási lehetőségek integrálása

A lehetséges alkalmazások:

- személyes adathordozó
- nagy kapacitású adattároló
- egészségügyi adatokat tároló orvosi kártya
- beléptető rendszerek biztonsági kártyája
- bankkártya
- azonosító igazolvány

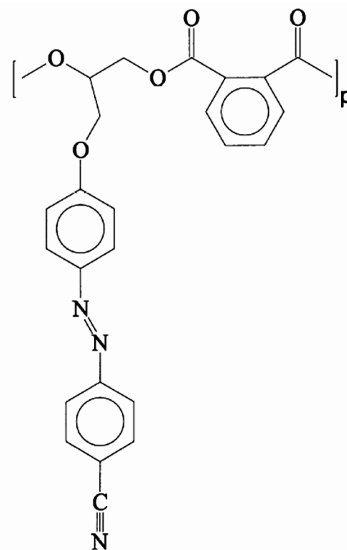
A HMC rendszer legfőbb különbsége az előzőekben bemutatott általános holografikus adattároló rendszerhez képest, hogy vékony rétegben tárolja az információt, és a hologram rögzítése nem a merőleges tárgy-referencia elrendezésben történik, hanem az eredeti Gábor Dénes-féle elrendezésben (tengely-menti vagy on-axis hologram). Ezáltal sem a térfogati adattárolás, sem a multiplexelés mint adatsűrűség növelési módszer nem alkalmazható. Viszont így reflexiós módon működhet a rendszer, a jelenleg használt kártyákhoz vagy lemezekhez hasonló adathordozóval. Ez teszi lehetővé a kis méretet és a hologramok könnyű megtalálását, tehát a hordozhatóságot. Szintén eltérés az általános rendszerekhez képest, hogy ez egy 8f rendszer és polarizációs holográfiára alapul. A továbbiakban bemutatom a HMC rendszer felépítését és működését.



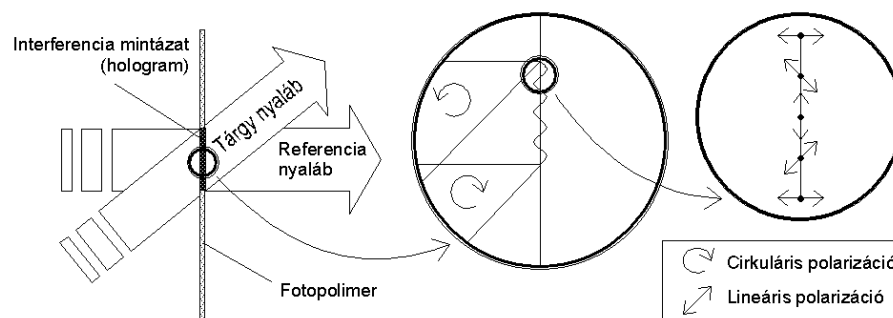
3. ábra A HMC rendszer képei, az író-olvasó készülék és a tápegysége, a csak olvasó készülék kinyitott állapotban, és az adattároló kártya.

A tároló anyag azobenzén oldalláncú poliészter, amely a fény polarizációját képes tárolni [37,38]. Az oldallánc, amelyet a 4. ábra mutat, lineárisan polarizált fény hatására megváltoztatja a cisz–transz izomériáját. Sok oldallánc változása együttesen makroszkopikusan mérhető kettőtörés változást okoz. Ezáltal a hologrambeírás menete a következő: a lézer fényét két ellentétesen cirkuláris nyalábra osztjuk, az egyik lesz a tárgynyaláb, a másik a referencia. A hologram síkjában a két nyaláb találkozásából lineárisan polarizált interferenciakép alakul ki, amely térben változó kettőtörésként rögzül az anyagban (5. ábra). Kiolvasás során a referenciával egyezően cirkulárisan polarizált fényvel világítjuk meg a hologramot, amely az anizotrop törésmutató rácson való diffrakció során létrehozza a tárgynyalábnak megfelelő nyalábot. A rekonstruáló és a rekonstruált nyaláb polarizációja szintén eltérő, így a kettő térben szétválasztható [8,10,11]. (Az azobenzén oldalláncú poliészter tároló anyag pontosabb leírása a 4. fejezetben következik.)

Ez a tároló anyag zöld fényvel, vagy ennél kisebb hullámhosszal írható, pirossal csak olvasható. Az írás olvasás váltása során minél nagyobb a hullámhossz változás, annál nagyobb torzítások lépnek fel a rekonstruáláskor, ezért az író-olvasó rendszer $\lambda = 532$ nm (zöld) hullámhosszú lézert használ, a csak olvasó rendszer pedig $\lambda = 635$ nm (piros) hullámhosszút.

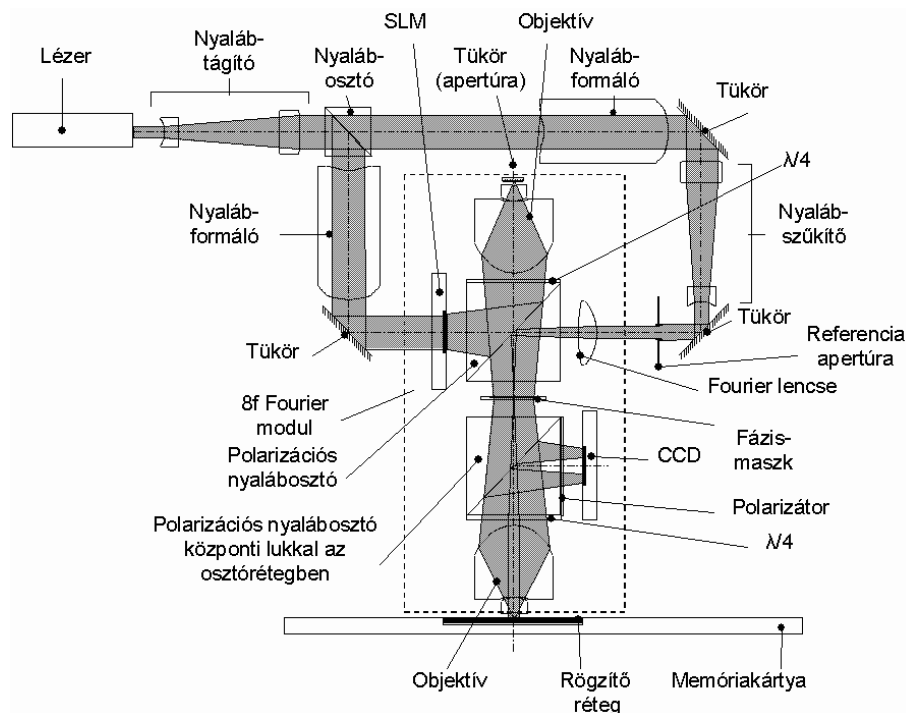


4. ábra Azobenzén oldalláncos poliészter

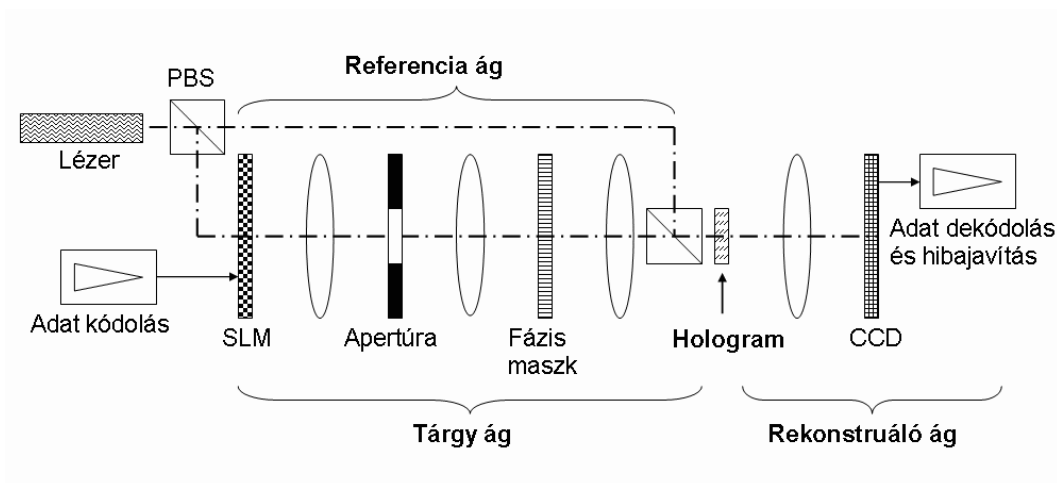


5. ábra A polarizációs hologram készítése cirkuláris beíró nyalábköböl

A tároló anyagot a kártyán egy tükröző rétegen helyezük el, ezáltal az írás és az olvasás ugyanarról az oldalról történik, az író-olvasó rendszer esetében ugyanazzal az optikai fejjel, reflexiós módban. A HMC rendszer Fourier hologramokban rögzíti az információt. A teljes optikai rendszert a 6. ábra mutatja [10,12,13,15]. A szerkezet két fő részből áll, amelyeket nagy- és kisblokknak nevezünk. A nagyblokk tartalmazza a lézert, a nyalábosztót, és feladata a két nyaláb alakítása, vezetése. A kisblokk tartalmazza magát a hologramot létrehozó optikát, az SLM-et, a CCD-t. Az ábrán a kisblokkot hivatalosan „8f Fourier modulnak” neveztük. A továbbiakban ennek a működését részletezem. (A csak olvasó eszköz optikai rendszere jelentősen egyszerűbb, de ezzel a továbbiakban nem foglalkozom.)



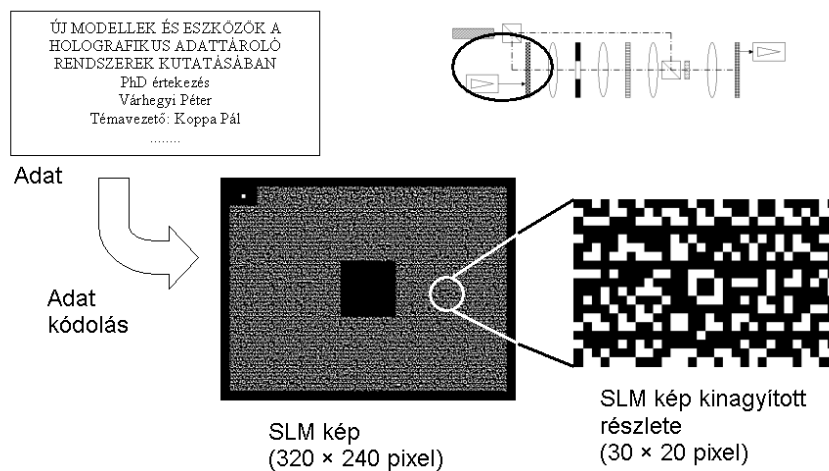
6. ábra A HMC rendszer teljes író-olvasó optikai rendszere



7. ábra A HMC 8f Fourier moduljának kiterített vázlata

A 7. ábra a 8f Fourier modulnak kiterített vázlatát mutatja, hogy jobban átláthatóvá tegyem az egyes elemek feladatát [1,2,6,7,8]. A nagyblokkból a lézert (frekvencia kétszerezett Nd:YAG lézer $\lambda = 532$ nm) és a polarizációs nyalábosztót (Polarization Beam Splitter – PBS) is ábrázoltam az átláthatóság kedvéért. Ez a modellábra nem mutatja a polarizációt, a tükröződések, és sok helyen leegyszerűsíti az optikát, de a megértést és későbbiekben (3. fejezet) a modellem bemutatását segíti.

A 8. ábra mutatja be az SLM kép készítését. Az adatokat megjeleníthetjük analóg módon, pl. egy kép formájában, vagy binárisan. Ez utóbbi esetet használjuk általában, ekkor a bináris adatokból kétdimenziós szimbólumokat állítunk elő. A kódolás során Reed-Solomon (RS) hibajavítást (ECC) alkalmazunk [39]. A kódolt adatokat az SLM-en sötét és világos pixelek formájában jelenítjük meg. A rendszerben egy KOPIN gyártmányú SLM-et használunk, amely 320×240 pixelt tartalmaz, $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ méretű és $50\% \times 75\%$ kitöltési tényezőjű pixelekkel. A jobb láthatóság kedvéért egy kinagyított 30×20 pixel méretű részletet használok a továbbiakban szemléltetésre.



8. ábra Az adatok kódolása és megjelenítése az SLM-en

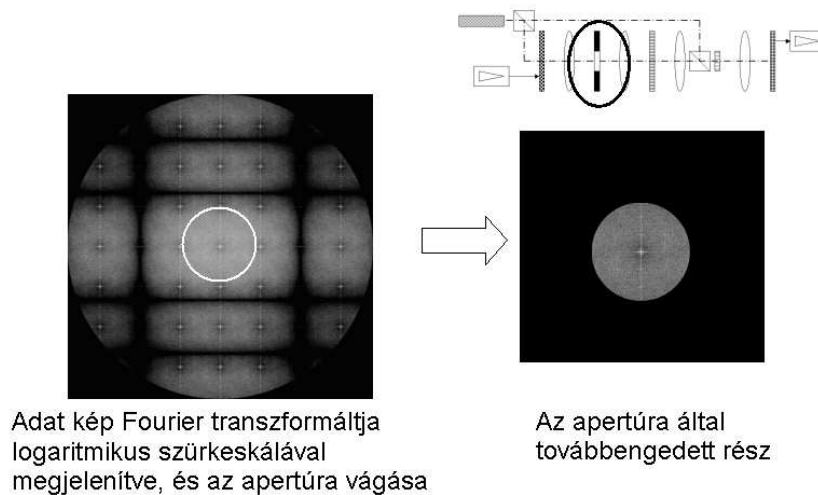
Az SLM képét Fourier transzformáljuk, és a transzformáltat a Fourier síkban megvágjuk. Ez a rendszer apertúra rekesze is egyben, és egy alul áteresztő Fourier szűrésnek felel meg. Az apertúrát a 9. ábra mutatja. A rendszer apertúra rekeszének méretét a Nyquist apertúra méretéhez viszonyítjuk. A Nyquist apertúra definíciója [22,40]:

$$D_N = \frac{\lambda f}{P}, \quad (2.1)$$

ahol λ a fény hullámhossza, f a felhasznált Fourier lencse fókusztávolsága és P az SLM pixelrácsának a mérete. Ha az apertúra rekesz átmérője egyenlő D_N -nel, akkor teljesül a Nyquist mintavételi feltétel, vagyis az adatokat tartalmazó frekvenciatartományt éppen átviszi a rendszer. Ha ennél kisebb az apertúra rekesz, az adatok mindenképpen sérülnek. A $2 \times D_N$ apertúra rekesz méret kb. megfelel a Rayleigh kritériumnak, ahol már az adatokat tartalmazó pixelek szerkezete is megőrződik. Erről bővebben lásd a 8.2 függelékben. Általában az apertúra rekesz D_N 1-5-szöröse a holografikus rendszerekben. A HMC rendszerben $\lambda = 532$ nm, $f = 4,4$ mm, $P = 15 \mu\text{m}$ és így $D_N = 156 \mu\text{m}$. A rendszert $1,8 \times D_N$ apertúrára, vagyis a Nyquist apertúrának 1,8-szorosának átvitelére méretezték, de az eredményeim

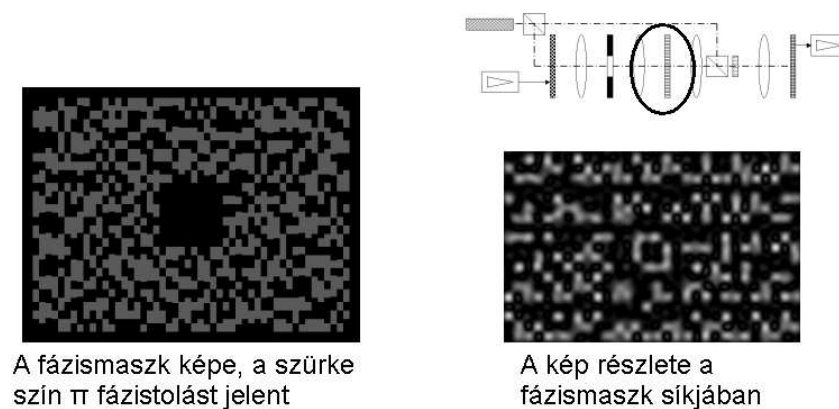
alapján jelenleg $220\ \mu\text{m}$ az apertúra rekesz mérete a rendszerben, amely kb. $1,4 \times D_N$ -nek felel meg.

A vágásnak az a szerepe, hogy beállítsa a beírni kívánt hologram méretét. Minél kisebb az apertúra rekesz, annál kisebb a hologram, és így annál több hologramot tudunk írni egy adott területre. De az apertúra rekesz csökkentése növeli a szűrést, ezáltal rontja a jelet, az adatokat. Az optimális apertúra rekesz méret megtalálása kutatásom egyik fő feladata volt, lásd az 5.3.4. fejezetben.



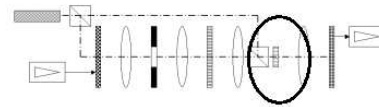
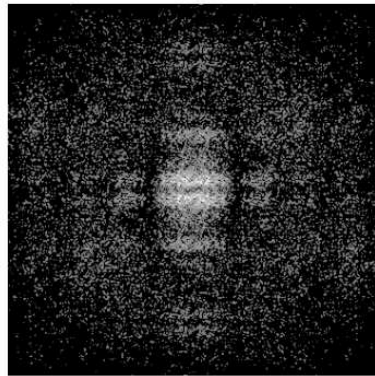
9. ábra Az apertúra rekesz szerepe

A megszürt jelet visszatranszformáljuk, és itt a valós síkban alkalmazzuk a fázismaszkot. A fázismaszkot a 10. ábra mutatja. Fázismaszk nélkül a kép Fourier transzformáltja hatalmas intenzitáscsúcsokat tartalmaz, amelyek telítésbe vinnék a holografikus anyagot, és rontanák a kiolvasás hatásfokát és minőségét. A központi csúcs a kép átlagos világosságából származik, ez a Fourier transzformált nulladrendje. A többi csúcs az SLM pixelek és az adatkódolás periodikusságából származik. A fázismaszk eltérő fázist ad a kép egyes pixelcsoportjainak, ezáltal mintegy szétszórja a Fourier síkban a csúcsokat, simítja a jelet, jobb hatásfokú hologramot tesz lehetővé. A rendszerben egy kétszintes, 0 vagy π fázistolású, 6×8 SLM pixelnek megfelelő blokkokból álló fázismaszkot használunk. A fázismaszkok vizsgálatát és tervezését a 6. fejezetben mutatom be.



10. ábra A fázismaszk alkalmazása

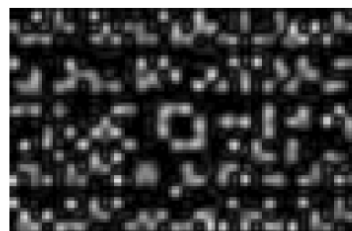
A fázismaszkkal módosított kép Fourier transzformáltját rögzítjük a hologramon. Ezt mutatja a 11. ábra. Itt a fázismaszk simító hatása miatt már lineáris szűrkeszintekkel is jól lehet ábrázolni a Fourier spektrum intenzitáseloszlását. A jelhez hozzáadjuk a referenciányalábót, és a már leírt módon polarizációban rögzítjük a hologramot. A referenciányaláb közel síkhullám. Kiolvasásnál a referenciányalábbal rekonstruáljuk a jelet.



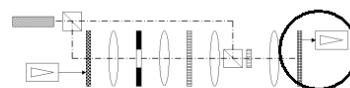
A hologram síkjában a módosított Fourier spektrum, lineáris szűrkeskálával ábrázolva

11. ábra A hologram

A rekonstruált és visszatranszformált képet CCD detektorral olvassuk ki (12. ábra). A felhasznált CCD 1024×768 pixel nagyságú, egy pixele $4,65 \mu\text{m} \times 4,65 \mu\text{m}$ méretű. Ezáltal a CCD kb. 3,2-szeresen túlmintavételezi az SLM-et, amely a biztonságos kiértékelést teszi lehetővé a jelenlegi erősen zajos CCD és elektronika környezetben. A felvett képben a kiértékelés során megkeressük az SLM pixeleinek megfelelő CCD pixelcsoportokat, és ezek fényességéből korrelációs módszerekkel visszaállítjuk a kódolt adatfolyamot [39]. Az adatok ekkor még hibákat tartalmazhatnak, ezért a dekódolás során hibajavítás is szükséges (ECC). A visszaállított adatokban 10^{-12} felhasználói BER pontossággal nem lehet hiba.



Az rekonstruált adatkép részlete a CCD mintavételezésével



Kiértékelés,
dekódolás,
hibajavítás



ÚJ MODELLEK ÉS ESZKÖZÖK A
HOLOGRAFIKUS ADATTÁROLÓ
RENDSZEREK KUTATÁSÁBAN
PhD értekezés
Várhegyi Péter
Témavezető: Koppa Pál
.....

A kiolvasott adatok, amelyek remélhetőleg egyeznek a beírtakkal

12. ábra A CCD kép és az adatok kiolvasása

A HMC rendszer egyes részeit pontosabban az adott rész modellezésének bemutatásánál a megfelelő fejezetekben ismertetem.

3 Új modell a Fourier típusú holografikus adattároló rendszerek vizsgálatára

Doktori munkám fő feladatának egy jól használható, általános modell készítését választottam, amely kutatás képezi 1. tézisem témáját.

Célul tűztem ki:

- egy megbízható, jól működő modell készítését, amelynek eredményeire támaszkodni lehet
- általános modellt kívántam alkotni, amely a legtöbb holografikus adattároló rendszer leírására alkalmas
- könnyen továbbfejleszthető megvalósítást, amely lehetőséget biztosít új optikai elemek hozzáadására
- könnyű felhasználhatóságot

A további célom, hogy a modell lehetőséget nyújtson:

- rendszerek vizsgálatára
 - meglévő rendszerek kritikus pontjainak keresésére
 - meglévő rendszerek továbbfejlesztési lehetőségeinek meghatározására
 - új rendszerötletek kipróbálására
- rendszerek optimalizálására
 - paraméterek hatásainak vizsgálatára
 - több paraméter együttes hatásának vizsgálatára
 - optimális működéshez szükséges paraméterek meghatározására
- rendszerek és alkatrészeknek tervezésére
 - a tervek kipróbálása révén
 - alkotóelemek optimalizációjára például iteratív algoritmussal

A továbbiakban bemutatom a szakirodalomban már meglévő és kutatók által használt modelleket, és hogy miért volt szükség egy új modell megalkotására. Bemutatom a modell megalapozására tett vizsgálataimat, majd magát az új modellt. Szemléltetem a modell alkalmazhatóságát a HMC rendszer példáján keresztül.

3.1 Holografikus adattároló rendszerek klasszikus modelljei

A modellezés nyújtotta előnyök kihasználására szinte minden holografikus adattároló rendszerek fejlesztésével foglalkozó kutatócsoport kifejlesztett egy modellt is a kutatásuk segítésére. Ezek általában speciális modellek voltak, egy-két kérdés megválaszolására készültek. Ezért a szakirodalomban viszonylag kevés a ténylegesen modellezéssel foglalkozó hivatkozás, inkább a cikkek részeként találkozni ilyen leírásokkal. Ebben a fejezetben ezeket fogom bemutatni.

A holografikus rendszerek modellezéséhez kétféle modell típus használatos, a konvolúciós és a Gyors Fourier transzformációs (Fast Fourier Transform – FFT) modell [31]. A kétféle modelltől a szakterületen azonban szinte kizárólag az első fajtát használják. Ezek az optikai rendszereket azok pont szórás függvényével (Point Spread Function – PSF)

modellezik, és konvolúciós modelleknek nevezik, mert a pont szórás függvény és az egyes pixelek szűrkeségének konvolúcióját számítják ki. A számítás tehát matematikai függvényeket és numerikus integrálokat használ a különböző effektusok leírására és ezért nem igényel sok memóriát. Általában egy pixelből indulnak ki, ez a vizsgált pixel. Ennek veszik figyelembe az alakját, néhány szomszédos pixel fényességét, a rendszer apertúra rekeszét és a detektor zajait.

A konvolúciós modellek nagy előnye, hogy ha csak egy-két kérdést szeretnénk megvizsgálni a akkor nagyon könnyű egy ilyen modellt felállítani. Az alapegyenletek jól dokumentáltak a szakirodalomban, és a numerikus integrálokat szinte bármilyen matematikai fejlesztőrendszerben ki lehet számítani. Némely kutatók azért választották ezt az egyszerű leírást, mert nem bíztak a holografikus rendszerek modellezhetőségében, vagy egyenesen lehetetlennek tartották azt [36].

Az egy pixel leírására példa a [41] de az ekkor használatos zajok egyik legteljesebb leírása a [42] hivatkozásban található meg, amely legrészletesebben a CCD detektor zajait tárgyalja.

Néhány szomszédos pixelt figyelembe vevő konvolúciós modellek leírásai találhatóak [34,43] hivatkozásokban. Először csak a vizsgált pixel négy közvetlen szomszédját figyelték [43], majd ezt 12 szomszédos pixelre terjesztették ki [34]. A szomszédos pixelek lehetséges értékei alapján kiszámították a vizsgált pixel kiolvasható fényességeit, ezeket hisztogramokon is ábrázolták, és ezt használták a teljes rendszer leírására.

Más úton indultak el a [44,45] szerzői, akik a holografikus adattároló rendszereket, mint digitális jelek csatornáit fogták fel. Ennek megfelelően csatornamodelleket alkottak, amelyeket szintén konvolúciósan lehet felhasználni.

Egyik legteljesebb konvolúciós modell a [35], amely egy *OASIS* nevű modell és szimulációs program. Céljuk egy általános modell megalkotása volt, amellyel bármely holografikus adattároló rendszer vizsgálható. Sokféle optikai eszköz, effektus és zaj hatását vették figyelembe, ezeket, mint egy csatorna részeit kezelik. A modelljük ellenőrzését azonban úgy végezték, hogy laboratóriumi kísérletekkel hasonlították össze a szimulációiból származó eredményeket, és a leíró paramétereiket addig változtatták, amíg a lehető legjobb eltérést meg nem találták. Az ilyen típusú összehasonlítás azonban szerintem hibás paraméterekhez is vezethet, mert lehet, hogy a vizsgált esetekben tényleg egyezés van, de nem a valódi rendszerbeli értékek születtek meg, és ez más esetekben hibát okozhat.

Összességében elmondható, hogy az általánosan használt konvolúciós modellekkel egyszerű rendszerek könnyen és megbízhatóan leírhatóak, de ha összetettebb rendszereket szeretnénk így vizsgálni, akkor a modellek túl bonyolultakká, nehézkesekké és kérdéses megbízhatóságúakká válnak. Egy másik alapvető tulajdonságuk, hogy csak egy vagy néhány pixelt vizsgálnak, a távolabbi pixelek hatásait nem veszik figyelembe. Ez, mint a későbbiekben bemutatom komoly hiányosságuk.

Ezzel szemben a holográfiában az FFT modellek a hullámfront ábrázolásán alapulnak, ez módosul a rendszer hatásainak megfelelően. Ezáltal lehetővé teszik a teljes képből való kiindulást. Elkészítik a hullámfront Fourier transzformáltját, itt alkalmazzák a Fourier síkbeli effektusokat, mint például az apertúra rekesz, majd visszatranszformálják, hogy megkapják rekonstruált képet. Az FFT a modellek felállítása nehezebb, kezdetben több munkát igényel, és a kiszámítására a nagy mennyiségű adat miatt jóval több memória szükséges. Előnyei viszont, hogy bonyolultabb rendszerek modellezése során is jól átlátható, könnyen bővíthető marad, és hogy a hullámfrontot direkt módon tartalmazza.

Számítógéppel generált hologramok (Computer Generated Hologram – CGH) esetében a teljes hullámfront megjelenítése szükséges. Ezért ezen a területen kezdetben szinte csak Fourier holográfiával foglalkoztak [46-49].

A holografikus adattárolás kutatásában FFT modell alkalmazására azonban az 1994-es [31] publikáción kívül nem találtam más tudományos közleményt. Ezen a szakterületen eddig még nem próbálkozott vele senki. Pedig a könnyű bővíthetőség és a teljes hullámfront ábrázolása itt is olyan előnyöket nyújt, amelyeket, mint a következőkben be is bizonyítom nem szabad figyelmen kívül hagyni.

Megjegyzés: Az FFT egy relatív gyorsan számítható algoritmus, ezért gyakran a konvolúció számítógépes kiszámításához is felhasználják. Azon modelleket, amelyek FFT algoritmust használnak a rendszer pont szórás függvényének és az egyes pixelek szűrkeségének konvolúciójára nem tekinthetjük FFT, hanem csak konvolúciós modellnek. Valódi FFT modellnek csak a hullámfronton alapuló modelleket nevezzük.

3.2 Új, kiterjesztett modell a Fourier hologramos adattárolás rendszerhez

Az FFT modellek előbb ismertetett előnyei alapján a célkitűzéseimnek ez a modellfajta felel meg. Modellem elkészítése során külön tanulmányoztam ez egyes optikai elemek működését, és ezekből az építőkövekből alkottam meg a teljes modellt. Az építőelemeket az FFT algoritmus fűzi egybe, így a modell könnyen bővíthető, és megbízható.

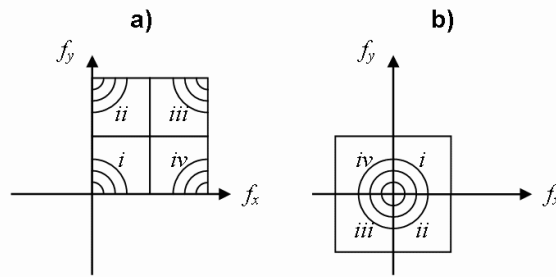
Megvizsgáltam a modell működésének alapjait is, mint például a mintavételezést, a felhasznált pixelmennyiséget, az adatok kiértékelésének módszereit, és az egyes optikai eszközöket.

A modell felépítését, működését, lehetőségeit kifejtettem az [1,2] tudományos közleményeimben, részeit bemutattam [3] előadásom keretében is, és felhasználásáról írok a többi tudományos közleményemben is [4-9].

3.2.1 A hullámfront ábrázolása és az FFT algoritmus

A holografikus adattároló rendszerekben létrehozott optikai hullámfrontot különálló pontonként, egy komplex mátrixszal írjuk le. A hullámfront kis területein levő, lokálisan állandónak feltételezett komplex amplitúdó értéke szerepel a mátrix megfelelő helyén. A hullámfront intenzitását így a következőképpen számíthatjuk ki: az egyes mátrixelemek abszolút érték négyzetét elosztjuk a mátrixelem által leírt terület nagyságával. Az így kapott intenzitás eloszlás a hullámfront képe, amely mint egy kép megjeleníthető. A hullámfrontot módosító hatások legtöbbször egyszerűen a mátrix módosításával modellezhető.

Az optikai Fourier transzformációt a kétdimenziós FFT algoritmussal modellezhetjük. Bővebb leírása a [50,51] könyvekben található. Az algoritmus bemenete az előbb bemutatott hullámfront mátrix, kimenete pedig ennek a Fourier transzformáltja. Továbbiakban az FFT algoritmusba beleérttem a „körbe csavarodás” (wrap-around) korrigálását is, tehát a Fourier transzformált térfrekvenciái az optikai esetnek megfelelően helyezkednek el, a nulladrendje a transzformált kép közepén található (13. ábra).



13. ábra A térfrekvenciák elhelyezkedése a) az FFT algoritmus közvetlen kimenetében, b) az optikai Fourier transzformáció esetében. A körívek az alacsony térfrekvenciákat jelölik.

A transzformáció után a komplex mátrix a Fourier transzformáltat tartalmazza. Minden eleme a megfelelő térfrekvencia komplex amplitúdójának felel meg, szintén az optikai transzformációnak megfelelően [52]. Ez lehetőséget ad a Fourier síkbeli hatások modellezésére a mátrixelemeken. Tehát bármilyen hatás, amely intenzitással leírható itt is alkalmazható az egyes mátrixelemekre külön-külön. A Fourier sík intenzitásképe a valós síkhoz hasonlóan kiszámítható és megjeleníthető.

Az FFT algoritmus kétdimenziós változatához a komplex mátrix oldalméretének kétszeresére kell lennie. Ha ez nem teljesülne, akkor ki kell terjeszteni ekkora méretűre, vagyis az adott mátrixot meg kell növelni, és az új helyeket 0 értékekkel kell feltölteni. Képek esetében ez egy fekete keret hozzáadását jelenti. Ez a transzformációt nem befolyásolja, sőt a Fourier sík ábrázolásának szempontjából még javítja is.

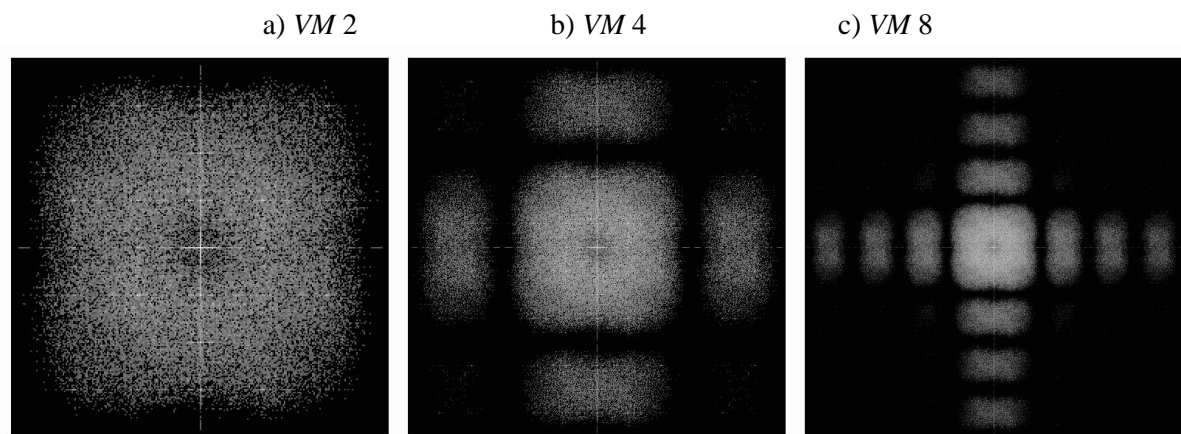
A továbbiakban a kiindulási mátrixot illetve a visszatranszformált mátrixokat valós síkknak fogom nevezni, és itt a mátrix elemeket gyakran mintavételi pontként vagy pixelként említem csak. A Fourier transzformált mátrixokat Fourier síkként említem, és az elemeit Fourier síkbeli pixeleknek is hívom.

3.2.2 A mintavételezés

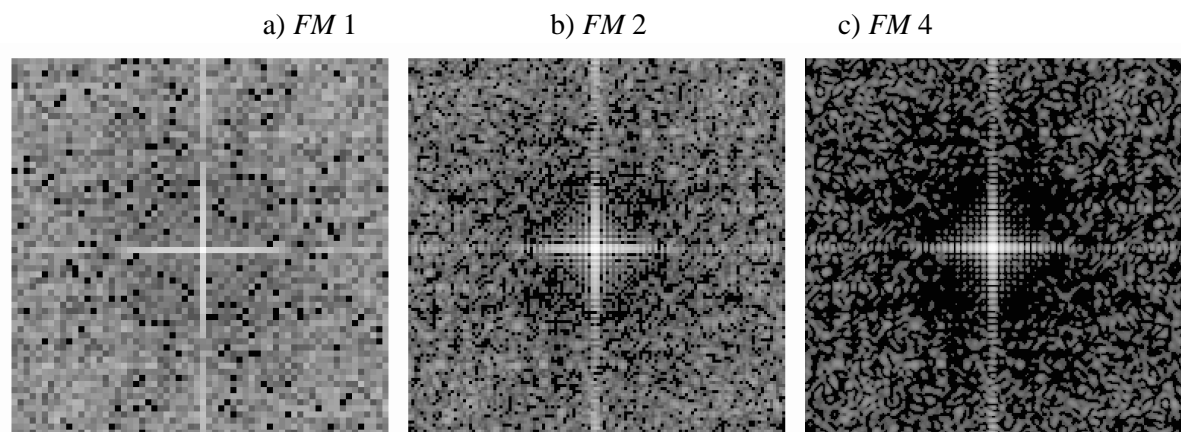
Mintavételezésnek azt nevezzük, hogy a holografikus adattárolásban használatos hullámfrontot hogyan jelenítjük meg a számolásokban használt komplex mátrixban [40]. Elektronikus és híradás-technikai készülékekben a mintavételezést a Shannon tétellel írják le [53]. Hasonló a feladat itt is, ha a holográfia leírására FFT-n alapuló szimulációs modellt használunk, akkor el kell dönteni, hogy mekkora mintavételezést használjunk. Kétféle mintavételezésről beszélhetünk, a valós síkbeli (*VM*) és Fourier síkbeli (*FM*) mintavételezésről.

A valós síkbeli mintavételezés az SLM-hez kapcsolódik, hiszen innen indul az adat optikai „útja”. Azt határozza meg, hogy egy SLM pixelt hány-szor hány mintavételezési pont fog leírni. Tehát pl. 5-szörös mintavételezésről beszélünk, ha egy SLM pixelt 5×5 mintavételi ponttal, 5×5 mátrixelemmel írunk le. Minél több mintát veszünk, annál pontosabban le lehet írni az SLM pixel fényáteresztő területének nagyságát (kitöltési tényező), alakját és értelemszerűen ezek hatását. Természetesen az SLM előtti hatások, mint például a megvilágító nyaláb alakja, is figyelembe vehető, és a kiértékelés során is számít a mintavételezés. A szakirodalomban felhasznált mintavételezések 8-szorostól [31] kezdődnek, és használtak 51-szeres mintavételezést is [34]. A nagy mintavételezés elvben pontosabb számolást eredményez, de négyzetesen növekvő memóriagigény szükséges hozzá. A szakirodalom általában csak a valós síkbeli mintavételezés kérdését vizsgálja.

A valós síkbeli mintavételezés adja meg azt is, hogy a Fourier síkban hány rend fog látszani, mint a 14. ábra mutatja. Tehát, ha VM a valós síkbeli mintavételezés értéke, akkor a Fourier síkban $VM / 2$ rend fog látszani. (Erre a Fourier szűrés modellezésénél kell tekintettel lenni, de a tipikusan használt 8-szoros valós síkbeli mintavételezés által megjelenített 4 rend elegendő a legtöbb esetben.) Ugyanakkor, az FFT algoritmus tulajdonságai miatt, a kép mérete megegyezik a kiindulási kép méretével. Így az, hogy milyen részletesen látszik egy rend a Fourier síkban az eredeti kép méretének növelésével javítható. FM szeres Fourier síkbeli mintavételezésről beszélünk, ha az eredeti kép méretét FM szeresére növeltük meg mindkét irányban. Ezáltal javítja tehát a fekete keret a Fourier sík ábrázolását. A Fourier mintavételezés hatását a 15. ábra mutatja. A Fourier síkbeli mintavételezésnek akkor van igazán jelentősége, ha ott nemlineáris hatásokat is figyelembe veszünk, mint pl. a holografikus anyag hatását. A mintavételezéseket a konkrét feladat céljának megfelelően kell megválasztani. A továbbiakban általános esetben vizsgálom meg a szükséges mintavételezés kérdését.



14. ábra Valós térbeli mintavételezés hatása a rendek számára.



15. ábra Fourier síkbeli mintavételezés szemléltetése. A képeken a Fourier sík közepe látható logaritmikus szűrkeskálákkal.

Elvégeztem egy szimulációs és kísérlettel megerősített vizsgálatot, ahol öt rögzített SLM képből készítettem hologramot és rekonstruáltam azt. A vizsgált SLM képek mérete 128×128 pixel volt. A kísérletet a HMC rendszerben végeztem, azobenzén poliészter tároló

anyaggal, $1,4 \times D_N$ méretű apertúra rekesszel, amely mellett a kísérletben 0,011 nyers BER-t mértem a rögzített adatokkal. (A nyers BER pontos definíciója a 3.2.4. fejezetben következik.) A szimulációs vizsgálatoknál a kísérletnek megfelelő paramétereket állítottam be, alkalmaztam a következő fejezetben bemutatásra kerülő anyagmodellt, és a mintavételezést növeltem. Megvizsgáltam, hogy a mintavételezés növelésével hogyan változnak a szimuláció eredményei, mennyire tartanak a kísérlet által elvárt eredményhez, mikortól fogadhatjuk el azokat. Mint a 2.1.2. fejezetben már írtam a nyers BER kiváló mérőszám a rendszer jellemzésére, de természetesen két rekonstruált kép összehasonlításához nem elegendő. Ezért az eredményeket képhűség szempontjából is ellenőriztem. A szimulációból kapott nyers BER értékeket az 1. táblázat tartalmazza.

Mintavétel	<i>FM 1</i>	<i>FM 2</i>	<i>FM 4</i>	<i>FM 8</i>	<i>FM 16</i>
<i>VM 2</i>	0,211 ±0,002	0,199 ±0,002	0,204 ±0,002	0,197 ±0,002	0,206 ±0,002
<i>VM 4</i>	0,028 ±0,002	0,023 ±0,002	0,024 ±0,002	0,024 ±0,002	0,022 ±0,002
<i>VM 8</i>	0,019 ±0,002	0,012 ±0,002	0,013 ±0,002	0,012 ±0,002	NA
<i>VM 16</i>	0,018 ±0,002	0,010 ±0,002	0,011 ±0,002	NA	NA

1. táblázat A valós síkbeli (*VM*) és Fourier síkbeli (*FM*) mintavételezés hatása a szimulációból kiszámolt nyers BER nagyságára. Az „NA” olyan kombinációt jelöl, amelyet az adott számítógép memóriájával nem tudtam megvalósítani.

Az 1. táblázat alapján a legkisebb mintavételezés, amely megközelíti a valódi eredményt a valós síkban 8-szoros és Fourier síkban 2-szeres. Ezt a képhűség vizsgálatok is megerősítették. Ezzel a mintavételezéssel tehát már megbízhatóan készíthetünk szimulációkat. A Fourier mintavételezés további növelése nem hoz további javulást, kisebb ingadozásokkal ugyanannyi marad a szimulált nyers BER. A valós mintavételezés növelése javít ugyan, de általános esetben, ha a számolási idő növekedését figyelembe vesszük, akkor nem érdemes nagyobb *VM*-et venni. Természetesen a mintavételezés helyes megválasztása a vizsgált problémától is függ, bármilyen irányban tovább finomítható.

A modellben az egyszerűbb kezelés érdekében négyzetes komplex mátrixot tételezek fel. Az FFT algoritmus miatt a komplex mátrixot úgy kell kibővíteni, hogy oldal éle kettő hatvány legyen. Oldal éle ennek megfelelően az SLM pixelben mért nagyobb oldal élének és a két mintavételezés szorzatának kiterjesztése a következő kettő hatványra. Képlettel:

$$M = 2^{\{\text{int}[\log_2(\max(N_{SLMX}, N_{SLMY}) \cdot VM \cdot FM)] + 1\}} \quad (3.1)$$

A mintavételezés a HMC rendszer esetében a következő méreteket jelenti. A valós síkban az SLM pixelei $15 \mu\text{m}$ távolságra helyezkednek el, ez a pixelrács mérete. A valós sík 8-szoros mintavételezése tehát azt jelenti, hogy egy mintavételi pontok távolsága $1,875 \mu\text{m}$. A Fourier síkban a Nyquist apertúra rekesz mérete $D_N = 156 \mu\text{m}$ (Lásd 2.3. fejezet és 8.2. függelék). A Fourier sík ábrázolásában ez M / VM mintavételi pontot jelent. 128×128 pixel adatpixel, *VM 8* és *FM 2* esetén $M = 2048$ és a Nyquist apertúra rekeszt 256×256 Fourier mintavételi pont írja le, amelyek $0,6094 \mu\text{m}$ távolságban vannak. Ez a távolság az alkalmazott fény hullámhosszával összemérhető, tehát a mintavételezés ebből a szempontból is megfelel a rendszernek.

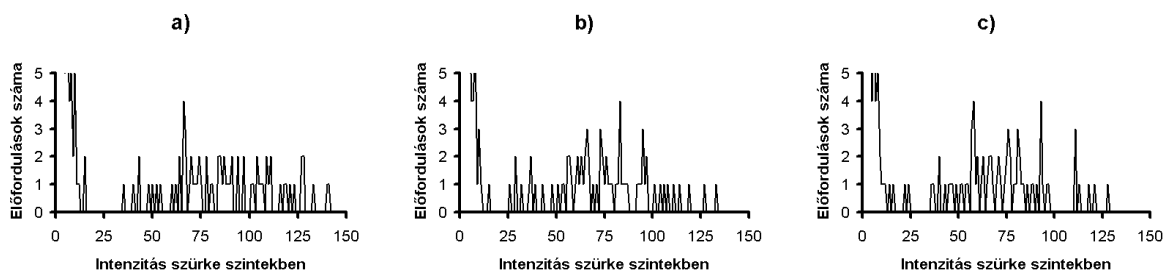
A számoláshoz szükséges minimális memória méretét a komplex mátrix méretének a négyzetéből és a komplex szám tárolására szolgáló adatmennyiség szorzatából kaphatjuk. A szimulációs programom esetében egy komplex szám 16 byte. A komplex mátrix méretéhez

képe általában minden más elhanyagolható, ezért ez a számolás jó közelítés. A szimulációhoz 128×128 pixel adatpixel, *VM* 8 és *FM* 2 esetén kb. 70 Mbyte memória szükséges, és számítógéptől függően egy-két perc alatt kiszámítható.

3.2.3 A felhasznált pixelek száma

Az egy SLM pixelen áthaladt fénymennyiség az apertúra rekesz hatására diffraktálódik, és átszóródik más pixelek képébe. A pixelek ilyen egymásra hatását pixelek közti áthallásnak (interpixel crosstalk) nevezzük. Ez hibákat okoz a kiolvasás során, növeli a BER-t. Mint a klasszikus modellek bemutatásánál (3.1. fejezet) írtam, a konvolúciós modellek csak a vizsgált pixelt, vagy a vele közvetlen szomszédos 4 – 12 pixel hatását veszik figyelembe. A pixelek egymásra hatása az r távolság növekedésével $1/r^2$ -tel arányosan csökken. Ugyanakkor vegyük észre, hogy a pixelek mennyisége viszont r^2 arányában növekszik! Ezért szükségesnek tartottam megvizsgálni, hogy mennyire kell a távolabbi pixelek hatását figyelembe venni.

Szimulációs vizsgálatokat végeztem, amely során egy rögzített 15×15 pixel nagyságú képrészletet vettem alapul. Ezt a képrészletet helyeztem el különböző adatokat tartalmazó 128×128 pixeles képekben. (A szimulációs kísérlet beállításai megfelelnek az előző fejezetben szereplővel, *VM* 8 és *FM* 2 esetén.) Először a részlet közvetlen környezetébe tettem csak pixeleket 5 pixel távolsáig, a kép maradék része teljesen üres, fekete volt. (A 12 szomszéd egy irányban 2 pixel távolságot jelent, én ennél eleve nagyobb távolságot vizsgáltam.) Ezután a már meglévőket változatlanul hagytam, és a kép maradék részét is feltöltöttem véletlenszerű adatokat tartalmazó pixelekkel. Ha a távolabbi pixelek hatása elhanyagolható lenne, akkor az eredeti 15×15 pixeles rész képe változatlan lenne. A kép emberi szemmel feldolgozhatatlan, ezért a 15×15 pixeles részről hisztogramot készítettem, hogy szemléltessem a változásokat. A két hisztogram a 16. ábra a) és b) részén láthatóak. A hisztogram szerkezetének változása jól látszik, amely azt jelenti, hogy megváltoztak a pixelek kiolvasott fényességei a távoli pixelek megjelenésének hatására, és ez megváltoztatja a BER-t is. A vizsgálatot elvégeztem más adatokkal is, hogy ellenőrizsem, nem a pixelszám változás okozta-e a hatást, ez látható a 16. ábra c) részén. A b) és c) rész is különbözik, amelyek pedig ugyanannyi pixelt tartalmaznak.

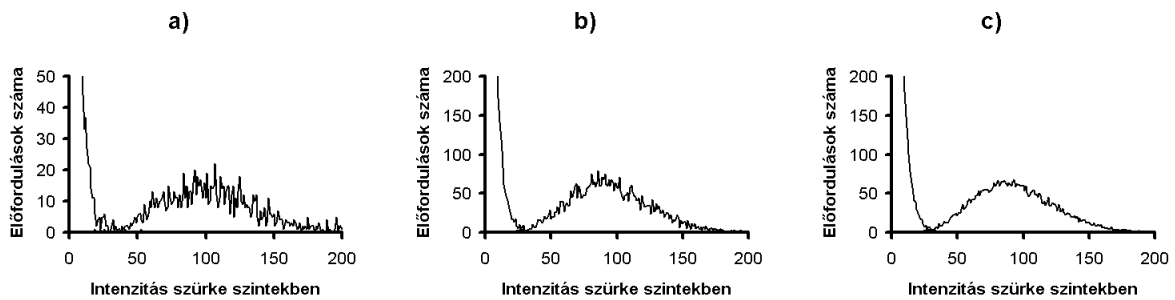


16. ábra Távoli pixelek hatása a rögzített 15×15 pixeles rész hisztogramjára egy 128×128 pixeles képekben. a) csak 5 pixeles környezetben van adat b), c) különböző adatok töltik ki a távolabbi területeket is.

Tehát szükséges a távolabbi pixelek hatását is figyelembe venni, vagyis ebből a szempontból az FFT modell célszerűbb, mert eleve tartalmazza ezt a hatást. Az egész képek figyelembevételének még egy nagy előnye van, mégpedig a periodikusság szempontjából. Az

adatokkal feltöltött SLM kép általában tartalmaz periodikus részeket a kódolás miatt, azonos szimbólumok, mérőjelek formájában. Ezek a periodikusságok pedig csúcsokat okoznak a Fourier síkban, amelyek telítésbe vihetik a holografikus anyagot. Ez a hatás is csak az FFT modellekben kerül elő a teljes adatkép vizsgálata során.

Végezetül a teljes képekkel való vizsgálatok előnye az is, hogy eleve több pixelt tartalmaznak, nagyobb statisztikát biztosítanak. Ez a kiértékelés szempontjából fontos, minél több pixel képét kapjuk meg, annál pontosabban becsülhetjük a BER-t. A 17. ábra mutatja, hogyan simul ki a hisztogram a pixelek és képek számának növelésével. A kiértékelést és a pixelszám hatását a következő alfejezetben részletezem.



17. ábra Hisztogram változása a pixelek számának növekedésével. a) 64×64 pixel, b) 128×128 pixel, c) 5 db. 128×128 pixeles képből számított átlag.

Az FFT modellnek a teljes képekkel tehát a következő előnyei vannak:

- tartalmazza a távoli pixelek hatását
- tartalmazza a képből előforduló periodikusságokat és ezek hatását
- nagyobb pixelszámot biztosít a statisztikus feldolgozáshoz.

3.2.4 Az eredmények kiértékelése

A modellben az eredmények kiértékelése során a két fontos mérőszámot használunk, az SNR-t és a BER-t. Sok cikk foglalkozik ezzel a kérdéssel, a legfontosabbak a [44,54,55]. Először a BER kiszámításának lehetőségeit mutatom be. Definíciója [22]:

$$\text{BER} = \frac{\text{hibás bitek száma}}{\text{összes bit száma}} \quad (3.2)$$

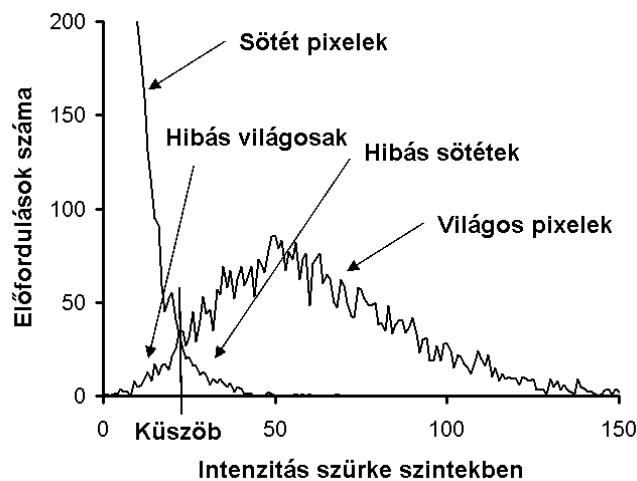
Sokféleképp lehet a fenti BER definíciót használni. A két legtipikusabb a felhasználói BER (User BER) és a nyers BER (Raw BER). A felhasználói BER a beírt és kiolvasott információ bitjeire vonatkozik, azokra, amelyeket a felhasználó lát. A nyers BER pedig az adat kódolt, ECC bitekkel kibővített, ténylegesen eltárolt bitjeire vonatkozik. A kívánt felhasználói BER 10^{-12} , ezt $10^{-4} - 10^{-2}$ nagyságrendű nyers BER-ből lehet előállítani.

A különféle BER-ek nagyon szorosan kapcsolódnak az alkalmazott kódoláshoz. A mai holografikus rendszerekben az adatokat több pixelt tartalmazó szimbólumokban tárolják, mint például a „constant weight sparse modulation code”, és korreláción alapuló kiolvasást használnak [39,56,57]. Ezért a hibák arányát úgynevezett szimbólum hiba aránnyal (Symbol Error Rate – SER) jelölik. A szimbólum alapú tárolásnak sok előnye van, többek között a sötét és világos pixelek arányát nagyon pontosan lehet tartani. Az állandó sötét és világos

pixelarány a tárgynyaláb összes intenzitását is állandóan tartja, amely jobb diffrakciós határfok elérését teszi lehetővé. A kódolási és kiolvasási módszerek mellett az eredeti adatok visszaállítására hibajavító algoritmusokat is használnak. A modell nagyon fontos segítség a megfelelő kódolás kiválasztásához és optimalizálásához is, azonban az optikai rendszer szempontjából olyan rendszerleíró szükséges használni, amely az alkalmazott kódolástól függetlenül is jellemzi azt. Erre használjuk a nyers BER értékét, amely lapszervezésű holografikus memória rendszerekre a tárolt pixeleken alapul és a definíciója [22]:

$$\text{Nyers BER} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{hibás sötét pixelek száma}}{\text{sötét pixelek száma}} + \frac{\text{hibás világos pixelek száma}}{\text{világos pixelek száma}} \right). \quad (3.3)$$

Ez a nyers BER abban az esetben egyezik meg az (3.2) egyenletben definiált BER-rel, ha egy pixel egy bitet tárol, vagyis például, ha a sötét pixel jelenti a bit „0” értékét, a világos pedig az „1” értéket. Egy példa hisztogramot mutat a 18. ábra, amelyen láthatóak a sötét és világos pixelek görbéi, és a hibásnak értékelt részek. A modellben a pixelek meghatározásához egy küszöbértéket használunk. Az a pixel, amely szürkeségének értéke a küszöbértéknél kevesebb a „sötét”, amelynek több az pedig a „világos”. Ily módon döntünk minden pixelről, és ha összehasonlítjuk az eredeti adatokkal, akkor meghatározhatjuk a hibás sötétek és világosak számát.



18. ábra Példa hisztogram a sötét és világos pixelek hibás részeinek bemutatására.

A rendszer optimalizálás során a megfelelő küszöbértéket is meg kell határoznunk, amellyel a lehető legkisebb a BER. Ez azonban nem lehetséges a (3.3) egyenlet minimalizálásával, mert ha nem egyenlő a sötét és világos pixelek aránya, akkor a többségben levő pixelek hibái kevésbé számítanak. Tehát szükséges a pixel hiba arány (Pixel Error Rate – PER) bevezetése [58]:

$$\text{PER} = \frac{\text{hibás pixelek száma}}{\text{összes pixel száma}}. \quad (3.4)$$

A nyers BER kiszámítása tehát adott szimulációra a következő: a (3.4) egyenlet minimalizálása révén meghatározzuk az optimális küszöbértéket, ezzel döntünk a pixelekről, majd a (3.3) egyenlettel kiszámítjuk a nyers BER-t. Ezzel a módszerrel általában jól közelíthetjük a hibajavítás előtt mérhető nyers BER vagy SER nagyságát. A közelítés pontossága az alkalmazott kódolástól függ, bizonyos kódolásokra nagyon jó egyezést, másokra kevésbé jót ad. Ennek teljes tárgyalása túlmutat a dolgozatom keretein, viszont az általam kitűzött célnak, hogy az optikai rendszernek egy minősítő jelzője legyen, tökéletesen megfelel. A továbbiakban, ha nyers BER-t írok, mindig a (3.3) és (3.4) egyenletek által adott definíciót értem alatta.

A számítás megbízható és pontos, de az eredményül kapott nyers BER nagyságrendje korlátozott. Egy tipikus szimuláció során például 5 db 128×128 pixeles képből 81 920 pixel szűrkeségét kapjuk meg (lásd 17. ábra), amely egy-két hibás pixel esetén 10^{-5} pontosságú eredményt ad. Ez nem elegendő pontosság, ezért más, közelítő megoldást kell találni a nyers BER meghatározására. A hisztogram görbéi jól közelíthetők Gauss görbékkel a sötét pixelek hisztogramjának felső és a világos pixelek hisztogramjának alsó végén [22]. Jelölje a sötét pixeleket közelítő Gauss görbét w_0 , a világosakét w_1 és a küszöbértéket K . Ebben a közelítésben a w_0 és w_1 értelmezési tartománya $(-\infty, \infty)$. Ezekkel a jelölésekkel a nyers BER közelítése:

$$\text{nyers BER} \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\int_K^\infty w_0(x) dx}{\int_{-\infty}^\infty w_0(x) dx} + \frac{\int_{-\infty}^K w_1(x) dx}{\int_{-\infty}^\infty w_1(x) dx} \right). \quad (3.5)$$

A (3.4) egyenlet segítségével becsülhető a BER akár 10^{-12} nagyságrendben is.

A másik használt mérőszám az SNR, amely szintén a hisztogramokhoz kapcsolódik. Szemléletes jelentése az, hogy mennyire különülnek el egymástól a sötét és világos pixelek, mennyire lehet azokat megkülönböztetni a zajoktól. A definíciója [22]:

$$\text{SNR} = \frac{\mu_0 - \mu_1}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2}}. \quad (3.6)$$

Ahol μ_0 és σ_0 a sötét pixelek, μ_1 és σ_1 a világos pixelek hisztogramjának várható értéke és szórása.

3.2.5 Az egyes optikai elemek modelljei

Röviden felsorolom a legfontosabb optikai elemek modellezése során figyelembe vett jelenségeket, hiba és zajforrásokat. Az itt felsoroltakat a modell tartalmazza, a paramétereik állíthatóak. A modell más speciális elemeket, lehetőségeket is tartalmaz, de ezek ismertetése túlmutat ezen a felsoroláson.

Lézer és megvilágítás: A megvilágító nyaláb kiszámított vagy megmért hullámfrontja megjeleníthető a komplex mátrixban, ezáltal az intenzitás és fázishibákat is kezeli a modell.

SLM: A pixelek fényáteresztő területének nagyságát és alakját (kitöltési tényező) a mintavételezés során veszi a modell figyelembe úgy, hogy az SLM pixel fényességét csak az adott mintavételi pixeleken módosítja, a többi mintapixelen pedig kinullázza. A pixelek intenzitása és fázisa beállítható, valamint ezek szórása, fix vagy véletlenszerű hibája is. Az

SLM véges kontrasztját a sötét pixelek szűrkeségével veszi figyelembe, amellyel egyben a szűrkeskálás adatkódolás is működik.

Apertúra rekesz és Fourier szűrés: A modellben Fourier síkban található apertúra rekeszt tételeztek fel, amely beállítja a hologramméretet a jel Fourier szűrésével. Ez egy aluláteresztő szűrő, amelyet a Fourier sík megfelelő részeinek kitörlésével kezel a modell. Az apertúra rekesz alakja, elmozdulása, áteresztési függvénye megadható a modellben.

Fázismaszk: A fázismaszk által az egyes SLM pixelek, pixelcsoportok területén módosul a jel fázisa. Ezt szintén a komplex mátrix megfelelő elemeinek fázisváltogatásával kezeli a modell. A fázismaszk fázishibája, elmozdulása megadható, a fázismaszk felületi hibái is kipróbálhatóak. A modellben a defókuszálás és a különböző axikonok is kezelhetőek a fázismaszk helyett és mellett, erről bővebben a 6. fejezetben írok. Ha szükséges (pl. titkosított rendszerekben) a referencia ágba is helyezhető fázismaszk.

Holografikus tároló anyag: Az anyag lineáris vagy nemlineáris hatását tartalmazza a modell, de ez annyira kulcsfontosságú a rendszer modellezése szempontjából, hogy külön tárgyalom a 4. fejezetben. A hologram anyaga mellett porszemek és karcok hatása is vizsgálható.

Referencia nyaláb: A referencia nyaláb hullámfrontja, amelynek a hologram keletkezésénél és rekonstruálásánál van szerepe szintén része a modellnek. Állítható az alakja (sík, gömb, Gauss), mérete, tartalmazhatja a titkosításhoz szükséges kódokat.

Detektor (CCD): A detektor pixelméretére összegezve a mintavételi pontokat számíthatjuk ki az egyes pixeleken mért intenzitást. Itt figyelembe veszi a modell a detektor kvantumzajait, hibás pixeleit, elmozdulását. Így nemcsak pixel illesztett holografikus rendszerek, hanem tetszőleges CCD–SLM pixelméret aránnyal rendelkező eszközök modellezhetőek.

Kódolási algoritmusok: A modellben többféle kódolási algoritmus kipróbálható, bár ezek a bonyolultságuk miatt nem részei közvetlen a modellnek. A CCD–SLM túlmintavételezést és az ehhez kapcsolódó pixelkereséseket tartalmazza a modell, valamint az előzőekben bemutatott nyers BER számítást is, de a kódokat egy külön program rész állítja elő és dolgozza fel, amelyet doktorandusz kollégám, Sütő Attila készített. Ezt a szoftvert nem tartalmazza a dolgozatomhoz mellékelte CD.

3.2.6 A modell korlátai

A modell Fourier transzformációra épül, ezért csak a valós és Fourier síkokban fellépő jelenségeket tudja leírni. Tartalmazza az egyes síkokban elhelyezkedő optikai elemek síkbeli elmozdulásait, de nem tartalmazza a síkból való kimozdulásukat. Ez alól kivétel a hologram elmozdulása a Fourier síkból, amelyet a defókuszálás mint intenzitásimítási módszert a 6.4.1. fejezetben részletesen bemutatok. A hologram elmozdulása a tárgynyaláb gömbi fázisával modellezhető. Ha szükséges lenne ezen jelenségek részletesebb vizsgálata, akkor a modellbe nyalábterjedési számításokat (Beam Propagation Method – BPM) lehetne integrálni.

Másrészről a modell jelenleg csak vékony adattároló rétegekben létrejövő hologramokat ír le a fenti okból. A kutatás következő fázisa a modell kiterjesztése vastag ún. Bragg hologramok kezelésére, amellyel a nagy adatsűrűségű adattároló rendszerek és a multiplexelés különböző formái is hűen leírhatók.

A modell képes figyelembe venni több kép interferenciáját, ha azokat külön kiszámítjuk. Ezzel a módszerrel vizsgáltam a 5.3.5. fejezetben a hologramok közötti áthallást.

Tehát elvben a polarizációs holográfiában nem megfelelő polarizációs viszonyok között fellépő ikerkép hatása is vizsgálható lenne, de ez nincs integrálva a szoftverbe, és dolgozatomban sem foglalkozom a kérdéssel.

3.2.7 A teljes modell

A modellt a következőképpen lehet felhasználni. Az optikai rendszernek megfelelő sorrendben és paraméterekkel felvesszük a modell építőköveit, ha szükséges, bármelyikből lehet többet is. Az elemeket a komplex mátrix és az FFT fűzi össze. Bonyolultabb rendszereknél a modell több szálból is állhat, például elkészítjük külön a referencia ágat a saját apertúra rekeszével, majd a tárgy ágat, és a kettő a hologram modellezésénél egyesül. A rekonstruált hologramot kiértékeljük, és az eredményeket értelmezzük.

3.3 A modell számítógépes megvalósítása és felhasználása

A modellt megvalósítottam egy felhasználóbarát számítógépes szimulációs szoftvercsomagban. A szoftvercsomag neve „Szimu”, a továbbiakban így hivatkozom rá. A Szimu egy eszköz, amely lehetőséget ad az optikai rendszereknek megfelelően felépíteni és működtetni a modellt, paramétereit beállítani és megvizsgálni. De a Szimu nem maga a modell, hanem egy környezet, amely lehetőséget ad az előzőekben bemutatott számítások elvégzésére. Természetesen a számításokat el lehetne végezni más szoftverekben is, mint MATLAB vagy CODE V, de ezen rendszerekben is először be kellene táplálni a modellt számításokkal és paraméterekkel, valamint ellenőrizni kellene a működését. Ez nehezebb lenne, mert amíg a Szimu szoftvercsomagot speciálisan a holografikus adattárolás vizsgálatának igényeihez alakítottam ki ezek általános feladatokra készített eszközök.

A dolgozatomhoz mellékeltem CD lemezen megtalálható a szoftvercsomag kipróbálásra szánt demó verziója. Ennek bővebb leírását lásd a 8.1. függelékben. Ebben a fejezetben a számítógépes megvalósítást és felhasználását mutatom be.

A szimulációs szoftvercsomagot Delphi™ / Kylix™ fejlesztőrendszerben készítettem. A Delphi™ / Kylix™ fejlesztőrendszer a Borland® cég terméke, a Delphi Windows, a Kylix pedig Linux operációs rendszer alatt használható úgynevezett keresztplatformos rendszer. A fejlesztőrendszer az objektum orientált Pascal programozási nyelv egyik széles körben elterjedt változatát, az Object Pascal-t használja.

A szimulációs szoftvercsomagom tehát Windows és Linux operációs rendszer alatt egyaránt és egyformán használható. Továbbiakban operációs rendszertől függetlenül írom le felépítését és működését.

3.3.1 A szimulációs szoftver felépítése

A program a beállításait „.ini” kiterjesztésű úgynevezett inicializációs fájlokban tárolja, ezek akár szövegszerkesztő programmal is módosíthatóak. (A CD-n általában „Szimu.ini” néven találhatóak.) Az „.ini” fájlt az elvégzett szimulációkkal együtt célszerű tárolni, így utólag ellenőrizhető a szimuláció összes paramétere. Tehát ez mint egy leírás is használható. A lehetséges beállításokat a „Szimu.txt” fájl tartalmazza, itt találhatóak meg az alapértelmezett értékek is, amelyek a HMC rendszert írják le. A program „.pgm” (Portable Gray Map) típusú képformátumot kezel, amelyet a legtöbb képszerkesztő

program is ismer. Azért választottam ezt a képtípust, mert a legkönnyebben átlátható, szerkeszthető típus, amelyet direkt szürke árnyalatos képek tárolására fejlesztettek ki.

A komplex számokat nem tartalmazza a Pascal nyelv, ezért definiáltam két dupla pontosságú valós változóból egy rekordot, a komplex típust, a hozzá tartozó főbb műveletekkel. A komplex mátrixot egy komplex típusú változókat tartalmazó dinamikus tömb tárolja. A komplex mátrix memóriaigénye ezáltal: méret \times méret \times 16 bájtt. Méréseim szerint ez a megoldás a mai számítógépeken semmivel sem lassabb, mintha mutatókkal vagy egyéb direkt módon kezelném az adatokat, valószínűleg belül pontosan így történik. Az FFT algoritmust is saját programmal valósítottam meg, amelyet [50,51] alapján a modell feladatára optimalizáltam.

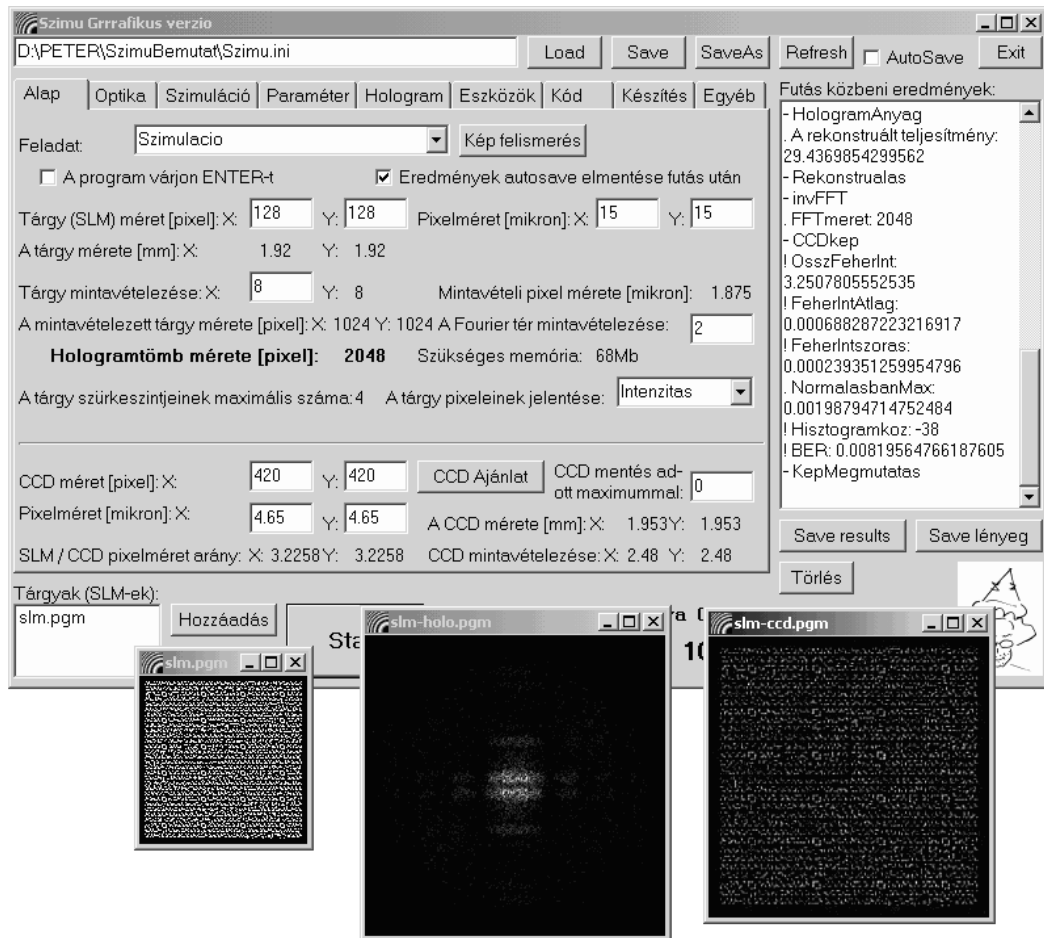
A program írásakor az átláthatóságot és a bővíthetőséget vettem alapul. Ezért a különböző feladatokat elkülönítettem, a Pascal nyelv szintaxisa szerint külön „unitokat” hoztam létre a külön feladatoknak. A programnak a CD-n megtalálható futtatható változata még csak részben objektum orientált, működése függvényhívásokon alapul. További terveim között szerepel egy teljesen objektum orientált változat készítése is. Az egyes unitok a következőket tartalmazzák:

- SzimuGrrraf.dpr – ez a projekt fájl, ez kapcsolja össze a programot egy egésszé.
- Header.pas – ez a unit tartalmazza az egész program által használt típusokat, definíciókat, be- és kimeneti függvényeket.
- Fourie.pas – tartalmazza az FFT algoritmus függvényeit.
- Fut.pas – a program tényleges irányítása itt történik, ez a unit hívja meg a többi függvényeit, objektumait a beállításoknak megfelelően.
- Memo.pas – a holografikus memória szimulációs függvények együttese.
- Kiert.pas – a kiértékeléshez szükséges függvényeket tartalmazza.
- Keszit.pas – SLM kép és fázismaszk készítés.
- RefKod.pas – Fáziskódolt referencia hatását vizsgáló függvények. Ezt a unitot részben Ujvári Tamás doktorandusz kollégám készítette, saját vizsgálataihoz.
- SzAblak.pas – a grafikus felület és adatok megjelenítését szolgáló unit.
- KepAblak.pas – a képek megjelenítését és nézését segítő unit.

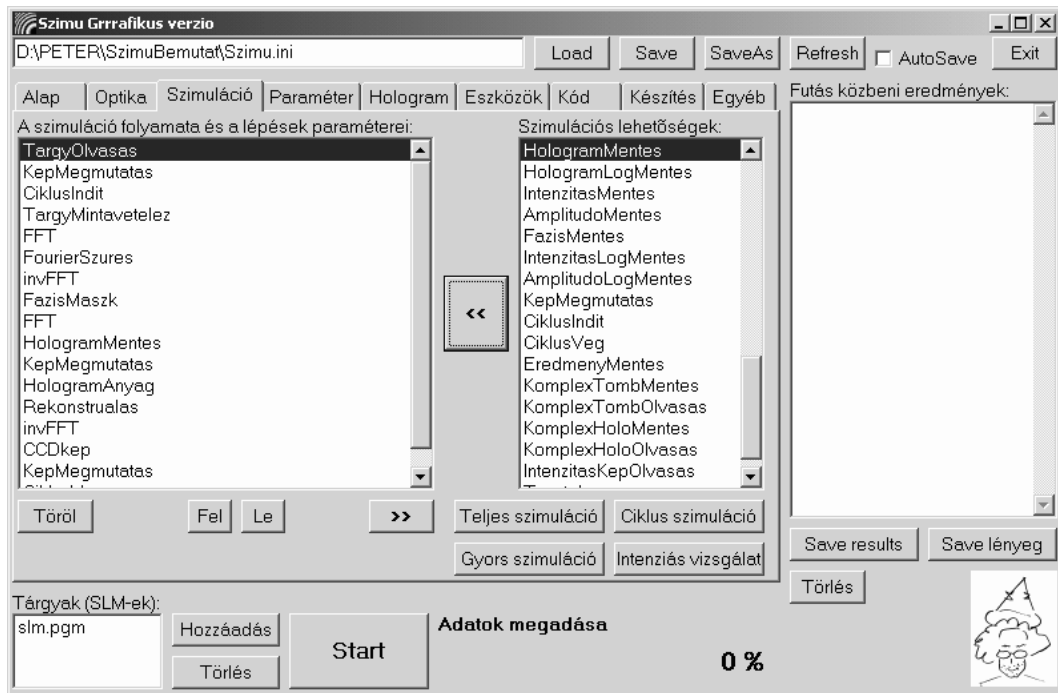
A fenti listából látható, hogy bármilyen irányban szeretnénk bővíteni a szoftvert csak az adott unithoz kell hozzányúlni. A modell megvalósítása szempontjából a „Memo.pas” és a „Kiert.pas” a lényeges, ez tárolja az összes optikai elem modelljének számítógépes megvalósítását.

3.3.2 A szimulációs szoftver felhasználása

A szoftver két fő módon működtethető. Az egyik a 19. ábra által mutatott grafikus kezelőfelület, ahol a beállításokat könnyen, gyorsan, átláthatóan el lehet végezni, és az eredmények is egyből megjelennek. A másik felhasználási mód a parancssori változat, amelynek a segítségével az előre elkészített beállításokkal nagy mennyiségű szimuláció végezhető egyszerre. A grafikus felületet célszerű használni egy-két szimuláció interaktív elvégzéséhez, de több napig tartó, hosszas szimulációkhoz célszerűbb a parancssori változatot használni parancsfájlok segítségével.



19. ábra A szimulációs szoftvercsomag kezelőfelülete.



20. ábra A modell optikai elemeinek megadása

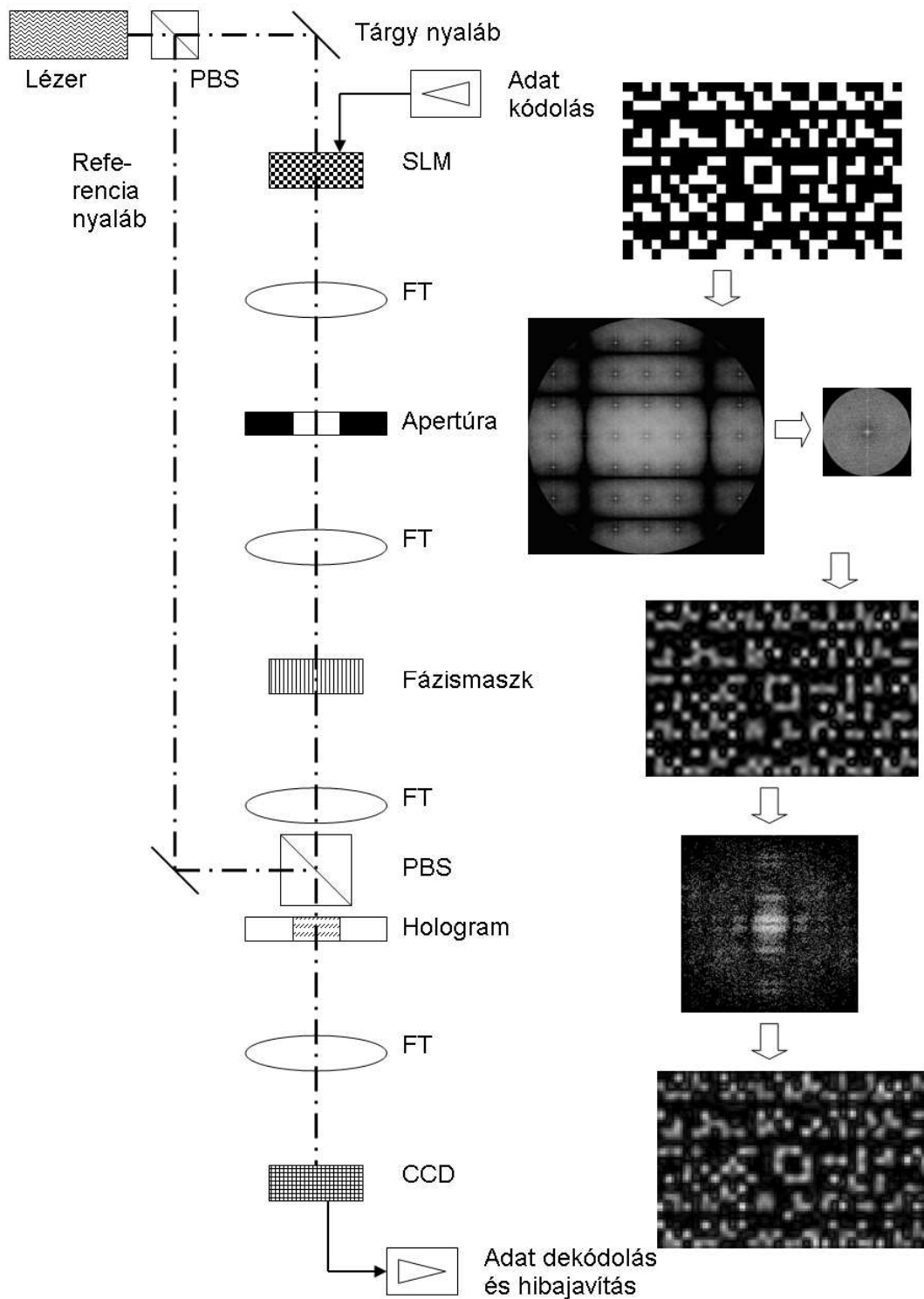
A grafikus változat a „SzimuGrrraf.exe” programmal indul. Először a beállításokat tartalmazó „.ini” fájlt kell megadni, majd az SLM képet tartalmazó „.pgm” képet vagy képeket. Ezután lehet a beállításokat megváltoztatni, vagy a szimulációkat futtatni. Az eredmények a jobb oldali ablakban egyből megjelennek. A program képes a kiszámított képeket egyből megmutatni, és ezeket világosítani és nagyítani a jobb láthatósághoz. A program futása bármikor megszakítható.

A modellezett rendszer paramétereit az adott mezőkben lehet beállítani (19. ábra). A program a mező elhagyásakor automatikusan ellenőrzi a beírt értéket és kiszámítja annak következményeit. A rendszer felépítését a „Szimuláció” oldalon lehet megadni, amelyet a 20. ábra mutat. Az oldal jobb oldalán láthatóak a rendelkezésre álló eszközök, amelyeket a bal oldalon látható szimulációs sorba lehet áttenni a „<<” gomb segítségével. Ott a „Fel” és „Le” gombokkal lehet mozgatni, illetve a „>>” gombbal törölni. Az eszközökön kívül itt adhatóak meg a szoftver speciális lehetőségei is, hogy megmutassa a kiszámított képet („KepMegmutatas”) vagy iterációsan ismételje a feladatot paraméterek változtatásával („CiklusIndit”, „CiklusVeg”).

A parancssori változat a „SzimuCons.exe inifájl.ini SLMkép1.pgm [SLMkép2.pgm ...]” paranccsal indítható. (Az egyszerűbb használat érdekében a grafikus változatot is meg lehet hívni ilyen paraméterekkel.) Az adott parancsablakban a futásának menetét írja ki, az eredményeket a megfelelő fájlokba menti el, onnan lehet azokat kiolvasni, feldolgozni. Több beállítással is lehet futtatni, ekkor parancsfájlból („.bat” file) kell meghívni a különböző beállításokat tartalmazó „.ini” fájlokkal. A CD-n erre is mellékelek példát.

3.4 A modell működésének bemutatása a HMC rendszer példáján

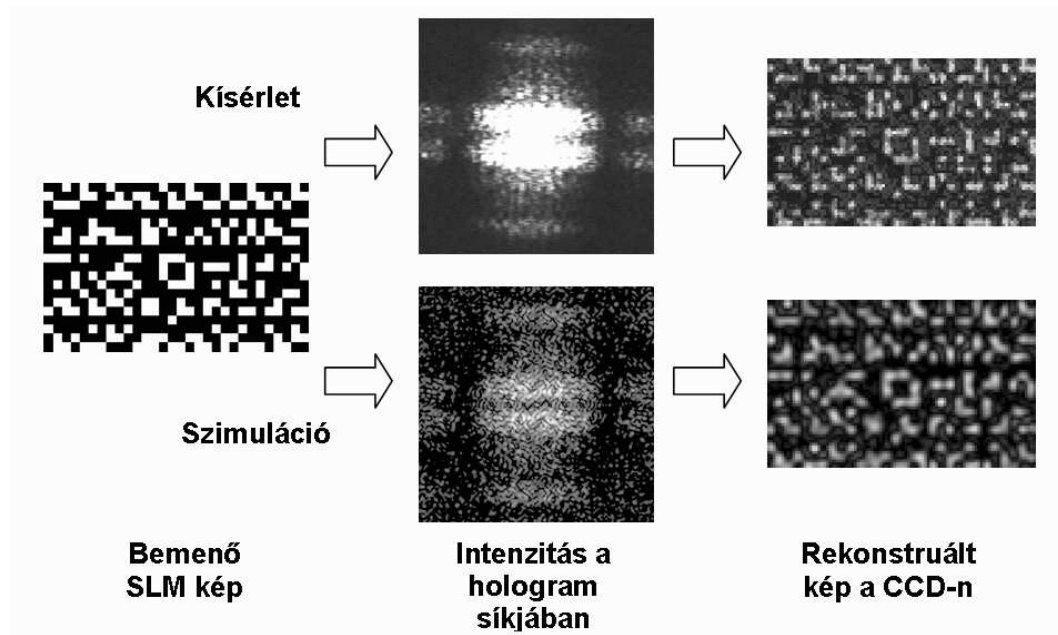
A HMC rendszert a 2.3. fejezetben ismertettem. Ebben a fejezetben a modell alkalmazását mutatom be a HMC rendszerre. A 7. ábra mutatta be az optikai rendszer kiterített vázlatát. A modell is ezt a vázlatot követi. A HMC rendszerben a modellt elég egy szálnak kezelni, a referencianyalábot a hologram rögzítésének és rekonstruálásának szimulálásakor veszem figyelembe. Tehát a megvilágítás figyelembevétel után jön az SLM, majd a Fourier transzformáció után az apertúra rekesz, visszatranszformálás után a fázismaszk. Ezután újabb Fourier transzformálás és a hologram rögzítés és rekonstruálás, visszatranszformálás és képkiolvasás. A számítógépes szoftverben ez az alapbeállítás, és egyetlen gombbal vissza is lehet térni ide. A HMC rendszer modelljét az adott lépésben szimulált képekkel a 21. ábra mutatja be.



21. ábra A HMC rendszer modelljének vázlata az adott lépésben szimulált képekkel.

A teljes HMC rendszer szimulációját is ellenőriztem, a kapott eredményeket valódi rendszerbeli kísérletekkel vettem össze képhűség, és BER szempontjából, és az eredmények jó egyezést mutatnak. A szimuláció és a kísérlet szemléletes összehasonlítását mutatja a 22. ábra. A modell részletesebb ellenőrzését egyrészt a modell alapjainál már bemutattam, és a [1,2] publikációkban is megtalálhatóak, másrészt a modell alkalmazásánál fogom még

bemutatni. A 4. fejezetben a holografikus anyag hatását külön is ellenőrzöm, és közzétettem a [4,5] publikációkban. Az 5. fejezetben a modell segítségével vizsgálom a HMC rendszer optimalizálásának lehetőségeit, amely vizsgálatokat kísérlettel megerősíték, a vizsgálatok egy része megtalálható a [6,7,8] közleményekben. A 6. fejezetben pedig a fázismaszkot vizsgálom, amelyet szintén kísérletig is ellenőrzök, ezekről a [9,10] tartalmaz részleteket. Kollégáim eredményei is bizonyítják a modell helyességét és felhasználhatóságát, amelyeket a [11-21] tudományos közlemények tartalmaznak.



22. ábra A szimuláció és a kísérlet szemléletes összehasonlítása.

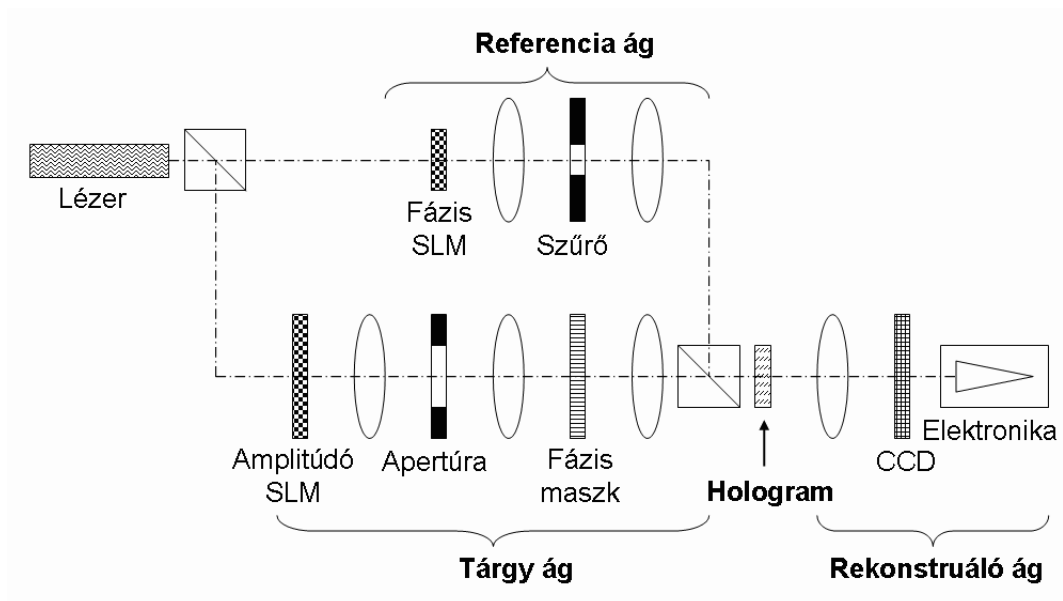
3.5 További lehetséges memória rendszerek modellezése

Mint az eddigiekben már bemutattam az új modellemmel a különböző lapszervezésű holografikus rendszerek úgy modellezhetőek, mintha optikai asztalon építenénk össze őket, vagy még inkább mintha lego kockákból építkeznénk. Ennek segítségével könnyedén modellezhetőek a szakirodalomban gyakran bemutatott 4f rendszerek is, amelyre egy példát az 2. ábra mutat.

Sikerrel használtuk a modellemt egy új, titkosított holografikus adattároló rendszer fejlesztésénél is. A titkosítás alapjait a [28] hivatkozás tartalmazza. Ennek az elrendezésnek egy lehetséges vázlatát a 23. ábra mutatja. Az ezzel kapcsolatos kutatásokat Ujvári Tamás és Lovász Mónika doktorandusz kollégáim végzik. Vizsgálataikat az általam kifejlesztett modellre alapozták, és azt részben tovább is fejlesztették. Eredményeiket a [20,21,59,60] tudományos közlemények tartalmazzák.

A 23. ábra esetében a modell három részből áll össze. Először elkészíti a referencia ágban a hologramra érkező referencia hullámfrontot a különböző vizsgált titkosító kulcsokkal. Ehhez a referencia optikáját veszi figyelembe. Majd a tárgy ág hullámfrontját készíti el a korábbiakban már bemutatott módon. A hologram számításához a korábban kiszámított referencia hullámfrontot veszi figyelembe, és a rekonstruáláshoz vagy ugyanezt, amely esetben visszkapjuk az adatokat, vagy egy másik kódot, amely esetben csak zajt kapunk

vissza. A kutatás a megfelelő kódok megtalálására, ezen rendszerek felhasználhatóságának vizsgálatára és megtervezésére irányul. A HMC rendszer titkosítási kibővítésének kísérletei most folynak.



23. ábra Titkosított holografikus adattároló rendszer vázlata.

4 Új összefüggések feltárása a tároló anyag telítődése és a holografikus rendszer tulajdonságai között

A holografikus rendszer kulcsa a holografikus tároló anyag. Hatása meghatározó az egész rendszer viselkedésére nézve, ezért a modellezésben is kiemelt szerepet érdemel. A szakirodalomban sok publikáció foglalkozik a tároló anyag tulajdonságaival, elsősorban mérési és elméleti szempontból. Szintén sok publikáció szól a különböző tároló anyagokban lehetséges multiplexelésről, de arról, hogy az milyen hatást gyakorol a holografikus adattárolásra jóval kevesebb.

Ezen fejezetben 2. tézispontom fejtem ki részleteiben, vagyis a holografikus tároló anyag dinamikai tulajdonságainak leírására szolgáló új vizsgálati eszközt mutatok be, amely a holografikus adattároló rendszerek leírásánál a tároló anyag hatását is figyelembe veszi és ezzel lehetővé teszi a tároló anyag nemlineáris válaszána és telítődésének nagy pontosságú modellezését.

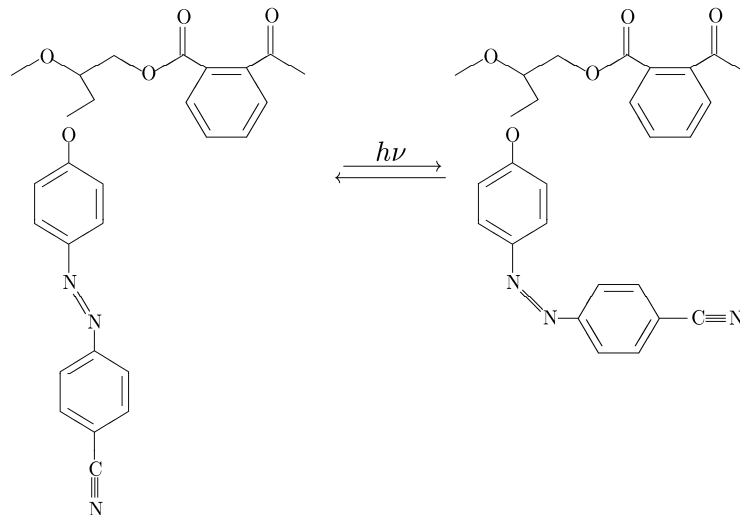
Először áttekintem a holografikus adattárolásban széles körben használt azobenzén oldalláncú poliészter tároló anyag kutatásának történetét, majd a tároló anyag hatásának beillesztését a modellbe. Végül az anyagot is tartalmazó kibővített modell által nyújtott új lehetőségeket és a modell ellenőrzését mutatom be.

4.1 Az azobenzén poliészter tároló anyag kutatásának előzményei

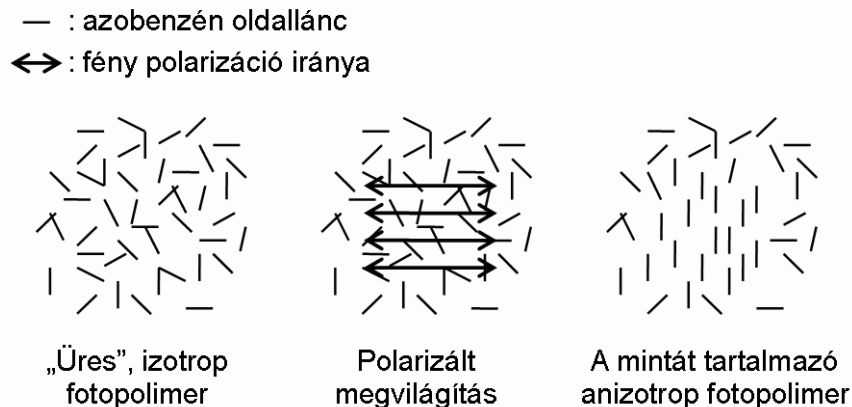
A HMC rendszerben, mint a 2.3. fejezetben bemutattam, polarizációs Fourier hologramokat rögzítünk azobenzén poliészter típusú anyagokban. Kollégáimmal megvizsgáltuk ezen anyagok telítődési és dinamikai viselkedését. A vizsgálatához szükséges méréseket Kerekes Árpád, az elméleti számításokat Sajti Szilárd doktorandusz kollégáim végezték. Ebben az alfejezetben röviden bemutatom az ő eredményeiket is, amelyek alapján kibővítettem a modellt a tároló anyag leírásával, amelyet a 4.2. fejezetben mutatok be.

4.1.1 Az azobenzén poliészter

A vizsgált holografikus tároló anyag amorf halmazállapotú oldalláncos azobenzén poliészter. Ez a holografikus adattárolás egyik ígéretes tároló anyaga [37]. Polarizált fény hatására optikai anizotrópia lép fel az anyagban [38], amely kialakulása során fellépő jelenségek még nem teljesen ismertek, elsősorban közelítő képleteket alkalmaznak a kutatók. Az oldalláncnak két lehetséges izomerje van, egy cisz és egy transz forma. Megfelelő megvilágítás hatására egyikből másikba alakulhatnak át egy foton elnyelésével (24. ábra). Ezek a molekulák erősen anizotropak, ezért a foton abszorpció valószínűsége függ a fény polarizációs síkjának és a molekula dipólmomentumának szögétől. Merőleges szög esetén nem jöhet létre abszorpció. A transz-cisz izoméria során a molekulák helyzete is megváltozik. Egy terület lineárisan polarizált fényvel történő megvilágítása után a molekulák nagy része merőlegesen helyezkedik el a fény polarizációs síkjára (25. ábra). Mivel a molekulák anizotropok, ezért ilyen módon makroszkopikus anizotrópia jön létre az anyagban, az adott területen kettőstörővé válik.



24. ábra Azobenzén oldalláncok izoméria váltása foton hatására.



25. ábra Azobenzén oldalláncok elhelyezkedésének változása lineárisan polarizált fény hatására.

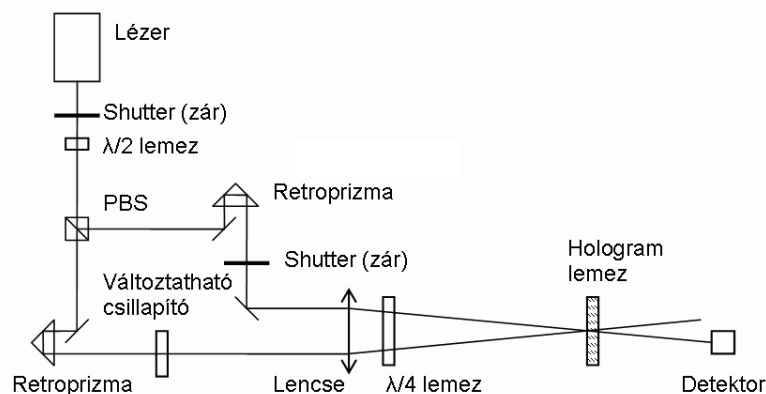
Először Kakichashvili [61] vezette le, hogy a fotóanizotrop anyagok polarizációs hologramok tárolására alkalmasak. Ezen hologramok a fény polarizációját is tárolják az intenzitása és fázisa mellett. Todorov és Nikolova [62] mutatta ki, hogy elméletileg a cirkulárisan polarizált nyalábokkal készített hologramok diffrakciós hatásfoka megközelítheti a 100 %-ot. A fény keltette kettőtörés időbeni kialakulásának leírására születtek ugyan elméletek [63-66], de az anyag választ továbbra is a Kakichashvili által bevezetett fenomenológikus kifejezésekkel írták le [67]. Tapasztalat szerint ezek a kifejezések használhatóak, de nem tartalmazzák sem az anizotrópia időbeni kialakulást, sem a telítődés jelenségét. Az anyag dinamikáját, a telítődés okozta diffrakciós hatásfok csökkenést Huang és Wagner [68] tanulmányozta elméleti és kísérleti úton. Ők numerikus számításokat végeztek, ahol a mikroszkopikus hatásokat a rate-egyenletekkel vették figyelembe. Az eredményeiket adalékolt poli-vinil-alkohol rétegre ellenőrizték, ahol a hologram írás két azonosan lineárisan polarizált nyalábbal történt.

A mi célunk, hogy a molekulák mikroszkopikus orientációját leíró rate-egyenletekből egy új leírást alkossunk a fotóanizotrop holografikus tároló anyag viselkedésére, amely tartalmazza Kakichashvili elméletét is, mint egy speciális esetet.

4.1.2 Kísérletek az azobenzén poliészter dinamikai tulajdonságaira

Az azobenzén poliészter dinamikai tulajdonságainak kísérleti vizsgálatát Kerekes Árpád végezte.

A kísérleti elrendezést a 26. ábra mutatja. A kísérlet a HMC rendszer tároló anyagával történt, a rendszerben fellépő körülmények lehető legjobb megközelítésével. Az elrendezésben két beíró nyalábbal (amelyek megfelelnek a tárgy és referencia nyaláboknak) készítünk polarizációs hologramot. A nyalábok ellentétesen cirkulárisan polarizált síkhullámok, amelyek a hologram anyagban találkoznak. A kísérlet célja, hogy lehetővé tegye a nyalábok intenzitásarányának széles tartományban történő változtatását, és az ennek hatására létrejövő diffrakciós hatások változásának mérését. A mérés során 500-szoros intenzitásarányt értünk el, amely megfelel a Fourier hologramokban létrejövő intenzitásarányoknak.



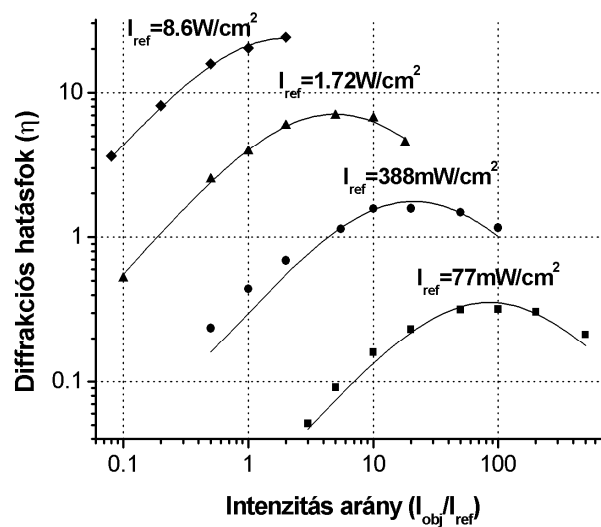
26. ábra Kísérleti elrendezés különböző intenzitásarányú nyalábokkal rögzített polarizációs hologramok hatásfokának mérésére.

A fényforrás frekvencia kétszerezett Nd:YAG ($\lambda = 532$ nm) lézer volt, amelynek kimenő teljesítménye $P_{out} = 50$ mW. A nyalábokat egy $f = 140$ mm fókusz távolságú lencsével egyesítettük a hologram lemezen, hogy minél kisebb hologramokat, ezáltal minél nagyobb teljesítményt érjünk el. A beírt hologramok sugara $r_{holo} = 0,27$ mm lett. A mérést a lézer teljesítménye, a detektálható minimális intenzitás és a kis hologramok miatti hullámfront torzulás korlátozta. A két retroprizma használatára a lézer kis ($\sim 1-2$ mm) koherencia hossza miatt volt szükség. A nyalábokat azonos optikai úthosszra állítottuk be az optimális interferenciához a diffrakciós hatások maximalizálásával.

A polarizációs hologramok írása azobenzén polimerben felületi hullámok kialakulásával járhat, az anizotropikus interferenciacsíkok mellett [69,70]. Hogy ezt elkerüljük rövid, $t_{exp} = 0,5$ s expozíciós időket használtunk. Ez ugyanakkor már lehetővé tette a jól mérhető diffrakciós hatások létrejöttét. A holografikus tároló anyagot üveg hordozó felületére vittük fel, vastagsága $2 \mu\text{m}$ körüli volt, és kemény SiO_2 védőréteg borította.

A mérés során először beírtuk a hologramot. A polarizációs osztó segítségével az intenzitás nagy részét a tárgy ágba irányítottuk, hogy nagy tárgy / referencia intenzitásarányt (I_{obj} / I_{ref}) tudjunk létrehozni. Az osztással a referencia ágban adott intenzitást állítottunk be, és a tárgy ágban található változtatható csillapító segítségével hoztuk létre a vizsgált tárgy /

referencia intenzitásarányt. Majd változtatható csillapítóval ellátott ágat használtuk rekonstruálásra mindig ugyanazzal a kis rekonstruáló intenzitással. A kiolvasás során mértük a diffraktált intenzitást, amelyből a diffrakciós hatások oszttással számítható. A hologram az olvasás során törlődik, ezért a maximális diffraktált intenzitást mértük. A kísérletek között a hologramot kitöröltük nagy intenzitású nyalábbal, hogy mindig a lemez azonos helyére írjunk. Az egyes mérési sorozatok között azonban elmozdult a minta, és a minta egyenetlensége miatt az anyagvastagság változása mérési hibát okozhatott. Több kísérletsorozatot végeztünk, különböző referencia intenzitásokkal. Az eredményeket a 27. ábra mutatja. Látható, hogy a diffrakciós hatások a tárgynyaláb intenzitásának növekedésével (arány növekedésével) egy darabig nő, majd telítődik, és további növelés hatására csökkenni kezd. Ez a telítődés és csökkenés az, amelyet le szeretnénk írni a továbbiakban.



27. ábra Mért (pontok) és számított (vonalak) a diffrakciós hatásokra a tárgy és referencia nyaláb intenzitásarányának függvényében különböző referencia intenzitások mellett. A diffrakciós hatásokot önkényes egységben jelenítettük meg.

4.1.3 A dinamikai tulajdonságok elméleti leírása

Az itt következő számításokat Sajti Szilárd készítette el [66,71]. Kakichashvili [67] kifejezésén alapul a legtöbb leírás [61,62,72], amely a fotóanizotropikus anyagok választát vizsgálja a polarizációs holográfiában. A dielektromos szuszceptibilitás fény által indukált része a következő alakban írható, ha csak a keltett kettőstörés van jelen:

$$\Delta\chi_{ij}^{ind} = \beta(E_i E_j^* + E_i^* E_j) , \quad (4.1)$$

ahol β az anyagi állandó, E a fényhullám elektromos térerősségének komplex vektora, és a csillag a komplex konjugálást jelöli. Ennek a kifejezésnek a levezetése során használt feltételek nem felelnek meg teljesen a mi általunk vizsgált anyagra. Az izoméria váltást nem veszi figyelembe, és azt feltételezi, hogy az anizotrópia azonnal létrejön. Hasonló egyenlet vezethető le a rate-egyenletekből is [63-66], amely már tartalmazza az izoméria folyamatát és a keltett anizotrópia időfüggését is:

$$\Delta\chi_{ij}^{ind} = \frac{\varepsilon_0 c}{4} \frac{\rho' t (E_i E_j^* + E_i^* E_j)}{1 + tDI}, \quad (4.2)$$

ahol ε_0 a vákuum dielektromos permittivitás, c a fénysebesség, t az expozíciós idő, I a fény intenzitás, ρ' és D pedig anyagi állandók. A kifejezés teljes levezetése megtalálható Sajti Szilárd cikkében [71]. Itt most csak a (4.1) és (4.2) kifejezések közötti különbségeket ismertetem, hogy bemutassam a hatását a polarizációs holográfiára. A két kifejezésben a fény által létrehozott kettőtörés alapelvei azonosak. A különbség a szorzó tényező, amely a (4.2) kifejezésben tartalmazza az expozíciós időt és az intenzitást is. Ezért tartalmazza ez az okozott kettőtörés időbeni kialakulását is. E szerint az anizotrópia telítődik nagy idő és/vagy intenzitás hatására. Mint megmutatjuk, a telítődés jelentősen befolyásolja a polarizációs hologramok készítését. Ez a telítődés magyarázza az előző kísérletben tapasztaltakat. A telítődés erősségét a D anyagi, nevezük telítődési állandónak, határozza meg. Ha az értéke 0, akkor nincs telítődés, és visszakapjuk a (4.1) egyenletet, mint azt el is vártuk.

Most az ellentétesen cirkulárisan polarizált nyalábokkal létrehozott, és cirkulárisan polarizált nyalábbal kiolvasott hologramok esetét vizsgáljuk. Ezentúl feltesszük, hogy a nyalábok jó közelítéssel síkhullámok. Így csak az $(E_i E_j^* + E_i^* E_j)$ tenzorral leírható interferencia lép fel, és ezáltal az indukált kettőtörés iránya periodikusan változik. Ez a periodikus csíkrendszer tulajdonképpen a polarizációs hologram. A (4.1) [62] és a (4.2) [71] kifejezések következménye, hogy csak egy diffraktált nyaláb jön létre, a rekonstruáló nyalábbal ellentétesen cirkulárisan polarizáltan. A (4.2) kifejezésből a diffrakciós hatások a Jones-mátrixok módszerével vezethető le [71]:

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda n_0} \frac{t \rho' \sqrt{I_{obj} I_{ref}}}{1 + tD(I_{obj} + I_{ref})} d \right), \quad (4.3)$$

ahol d a holografikus tároló anyag vastagsága, n_0 az átlagos törésmutatója, λ a kiolvasó fény hullámhossza, I_{obj} és I_{ref} a tárgy és referencia nyalábok intenzitása. (4.3) szerint csak egy diffraktált nyaláb van, amely elméletileg az $\eta = 100\%$ diffrakciós hatásfokot is elérheti vékony hologramoknál is. Lapszervezésű holografikus memóriáknál általában megelégszünk viszonylag alacsony ($\sim 1-10\%$) diffrakciós hatásfokkal is, hogy elkerüljük a nemlineáris tartományt és kis expozíciós időket használhassunk (vagyis gyorsan lehessen hologramokat írni). Ebben az esetben a $\sin^2 x \approx x^2$ közelítés alkalmazható. Ezenkívül a kísérletben csak az intenzitások változtak, ezért bevezetjük a $C = (\pi t \rho' d)^2 / (\lambda n_0)^2$ és az $F = tD$ kísérletre és anyagra jellemző állandókat. Ezek segítségével a (4.3) képletet a következő alakba írhatjuk:

$$\eta = C \frac{I_{obj} \cdot I_{ref}}{(1 + F \cdot (I_{obj} + I_{ref}))^2}. \quad (4.4)$$

Ez a kifejezés jól leírja a 27. ábra által mutatott telítődést. A különböző referencia intenzitásoknál mért pontokra külön-külön ráillesztettük a (4.4) képletet. Az illesztett görbéket a 27. ábra folytonos vonalai mutatják, és az illesztési paramétereket a 2. táblázat tartalmazza. Az illesztett paraméterek jól láthatóan egy nagyságrendbe esnek, az eltérések a kísérlet hibáiból, elsősorban a minta vastagságának hely szerinti pontatlanságából adódhattak. Tehát elmondhatjuk, hogy az általunk levezetett (4.4) képlet megfelelően írja le az azobenzén poliészter holografikus tároló anyag viselkedését a kísérletben vizsgált körülmények között. A C és F paraméterek értékeit az adott esetekhez kell meghatározni, és a diffrakciós hatásfok kiszámítható.

I_{ref} [W / cm ²]	C [ö.e.]	F [cm ² / W]
0,077	2,88 ± 0,29	0,154 ± 0,014
0,388	2,46 ± 0,26	0,129 ± 0,013
1,72	3,09 ± 0,20	0,149 ± 0,008
8,6	2,66 ± 0,52	0,120 ± 0,017

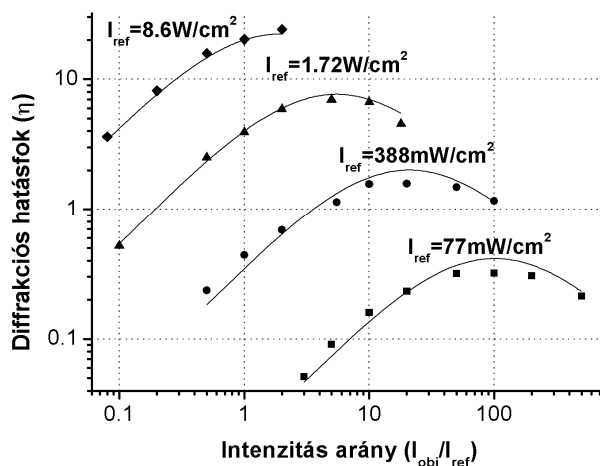
2. táblázat A mért adatokra illesztett görbék illesztési paraméterei.

4.2 Az azobenzén poliészter tulajdonságainak dinamikai modellje

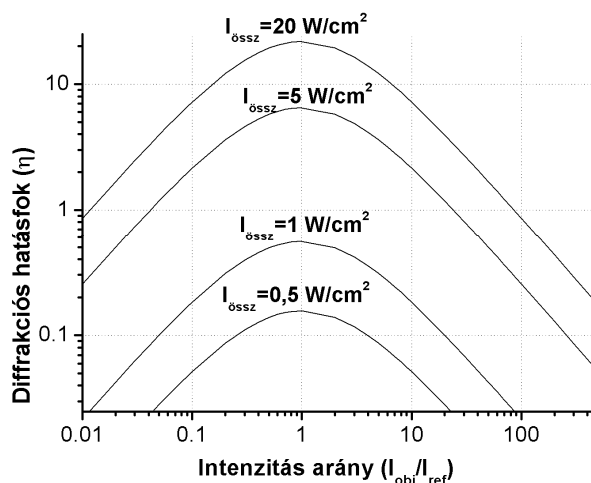
Az előző fejezetben bemutatott (4.4) kifejezés tehát alkalmas az azobenzén poliészter tároló anyagok polarizációs hologramok tárolása közben fellépő viselkedésének leírására. A továbbiakban saját eredményeimet mutatom be, az anyag leírásának beépítéséről a modellbe, a kibővített modell a felépítéséről, vizsgálatáról, felhasználásáról. Eredményeimet a [4,5] tudományos közleményekben is megjelentettem.

A (4.4) kifejezés szimmetrikus a tárgy és referencia intenzitására. A hozzá vezető kísérletek során két nyalábbal írtunk hologramot, és az eredmények csak az intenzitástól függtek egy konkrét mérés esetén. Az intenzitásokon kívül természetesen az írási idő, a tároló anyag fajtája, vastagsága, védőréteg jelenléte mind befolyásolják az eredményeket. Modellemben egy olyan leírást szerettem volna beilleszteni, amely nagy pontossággal számítja a tároló anyag hatását, de egyszerűen paraméterezhető. Az előző fejezetben a C és F anyagi és kísérleti paraméterek értékeire egy táblázatot adtunk meg, amely a referencia intenzitástól függött, márpedig egy számításban ez nem megfelelő. Ezért a kísérleti eredményekre egységesen illesztettem a görbéket, és a következő paramétereket kaptam: $C = 2,83$ ö.e. és $F = 0,13$ cm²/W. Ezekkel az egységesített paraméterekkel újraszámítottam a 27. ábra illesztett görbéit, és az eredményeket a 28. ábra görbéin ábrázoltam. A paraméterek egységesítése által okozott hiba (az illesztés pontossága ±10 %) kisebb mint a mérés és a tároló anyag vastagságának bizonytalansága által okozott, hiszen C paraméter négyzetesen tartalmazza a d anyagvastagságot. Tehát ez alapján ezek a paraméterek megfelelőek a HMC rendszerbeli számításokhoz.

A 27. és 28. ábra nem mutatja be szemléletesen a nyalábok szimmetriáját. Ezért elkészítettem egy másik ábrázolást, ahol a tárgy / referencia intenzitásarányt az összesített beíró intenzitás állandó értékei mellett ábrázoltam ($I_{össz} = I_{obj} + I_{ref}$). A grafikont a 29. ábra mutatja. Az ábrán jól látható, hogy az egyenlő tárgy és referencia intenzitásarány a legkedvezőbb, attól eltérve csökken a diffrakciós hatások.



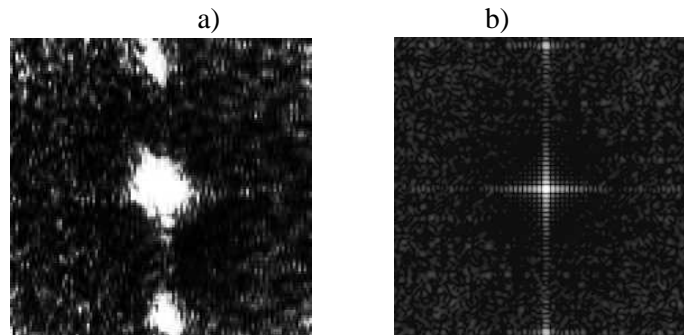
28. ábra Mért (pontok) és számított (vonalak) a diffrakciós hatásokra a tárgy és referencia nyaláb intenzitásarányának függvényében az egységesített leíró paraméterek használatával. A diffrakciós hatásfokot önkényes egységben jelenítettük meg.



29. ábra A számított diffrakciós hatásfok állandó összesített beíró intenzitás érték mellett. ($I_{\text{össz}} = I_{\text{obj}} + I_{\text{ref}}$) A diffrakciós hatásfokot önkényes egységben jelenítettük meg.

A (4.4) kifejezés modellezésbeli alkalmazhatóságának vizsgálatához nézzük meg újra a mintavételezés kérdését. A polarizációs hologramok írása közben a referencia általában sík, gömb vagy Gauss nyaláb. A tárgynyaláb azonban az adatok módosított Fourier spektrumát tartalmazza, tehát térben gyorsan változó intenzitású. A hologramok írása során felléphetnek hibák mindkét nyalábban, amelyek a referencia nyalábot is megzavarhatják. A 30. ábra a) része mutatja a tárgynyaláb Fourier transzformált képét, amelyet egy CCD kamerával vettünk fel. A kép erős csúcsai telítésbe vitték a kamerát, és a technikai nehézségek miatt nem látszik a kép finomabb szerkezete. A b) rész ugyanennek a szimulált párja. A csúcsoknak itt jól látszik a szerkezete is, de továbbra is elnyomják a transzformált többi részét. A szimuláció a bemutatás kedvéért négyszeres Fourier síkbeli mintavételezéssel készült, bár mint a 3.2.2. fejezetben bemutattam (lásd 15. ábra és 1. táblázat) kétszeres mintavételezés is már hullámhossz nagyságrendű felbontást tesz lehetővé. Emiatt az ábra további nagyítással nem

lesz részlet gazdagabb, csak az egyes részek nőnének meg. (Az ottani 1. táblázat eredményei már az anyagmodell felhasználásával készültek. A szükséges mintavételezés és az anyagmodell témáját eredetileg egyszerre vizsgáltam, csak a logikai sorrend miatt választottam ketté a dolgozatomban.)



30. ábra A Fourier sík intenzitás eloszlása fázismaszk alkalmazása nélkül, a) CCD kamerával mért kép (a CCD kamera telítődött a csúcsonál) b) szimulált kép.

Az optikai rendszer szempontjából a kísérleti elrendezés jó közelítéssel megfelel a HMC rendszernek. A kísérlet vékony anyagra vonatkozott.

A szimulációban a hullámfrontot a komplex mátrix jeleníti meg. A valós síkban (SLM, fázismaszk, CCD síkja) a mátrix az adott területen mérhető komplex amplitúdót tárolja. A Fourier síkban (apertúra rekesz, hologram síkja) az adott térfrekvenciáknak megfelelő komplex amplitúdót, amely persze szintén létrehoz egy intenzitásképet ebben a síkban (30. ábra). Az anyag hatását leíró (4.4) kifejezés pedig csak az intenzitásokról függ, ezért minden mátrixelem intenzitására lokálisan alkalmazható.

A (4.4) alapján az azobenzén poliészter típusú tároló anyagok számítása a következő: Meghatározzuk az adott területen mérhető tárgy (I_{obj}) és referencia (I_{ref}) intenzitást, ezekkel kiszámoljuk a lokális diffrakciós hatásfokot (η), amellyel megszorozzuk a rekonstruáló intenzitást (I_{rek}), így kapjuk meg a rekonstruált intenzitást, amelyet a könnyebb olvashatóság végett kimenő intenzitásnak írok (I_{ki}). A komplex amplitúdókat jelölje A (rendre: A_{obj} , A_{ref} , A_{rek} , A_{ki}) a mátrixelem által leírt négyzet alakú terület oldalhossza legyen a , ekkor ez a számítás a következő:

$$I_{obj} = \frac{|A_{obj}|^2}{a^2}, \quad I_{ref} = \frac{|A_{ref}|^2}{a^2}, \quad (4.5)$$

$$I_{ki} = I_{rek} \cdot \eta = I_{rek} \cdot C \frac{I_{obj} \cdot I_{ref}}{(1 + F \cdot (I_{obj} + I_{ref}))^2}. \quad (4.6)$$

A fázis információt viszont elveszítjük ebben a számolásban. A polarizációs hologram megőrzi a nyálábok intenzitását és fázis különbségét is.

Ezért intenzitás és diffrakciós hatásfok helyett a komplex amplitúdókkal való számolást ajánlom a következőképpen: A két nyáláb fáziskülönbségét tartom meg, amellyel módosítom a számolás során a rekonstruált (kimenő) komplex amplitúdót. A fázisokat jelölje φ (rendre: φ_{obj} , φ_{ref} , φ_{rek} , φ_{ki}). A másik célszerű módosítás, amelyet javasolok az, hogy visszahozom a t expozíciós időt, mert amíg a tároló anyag és hordozó általában ugyanaz,

addig a beíró időt gyakran változtatjuk, és jobb a modellben is meghagyni ezt a lehetőséget. A modell tároló kártyára (anyag és vastagsága egyben) jellemző két paramétere legyen:

$$G = \frac{\sqrt{C}}{t} = \frac{\pi \rho' d}{\lambda n_0}, \quad D = \frac{F}{t}. \quad (4.7)$$

Ezekkel a diffrakciós hatások gyöke, amelyet az amplitúdó számításban használhatunk majd:

$$\sqrt{\eta} = \frac{\sqrt{C \cdot I_{obj} \cdot I_{ref}}}{1 + F \cdot (I_{obj} + I_{ref})} = t \cdot \frac{G}{a^2} \cdot \frac{|A_{obj}| \cdot |A_{ref}|}{1 + tD \cdot (I_{obj} + I_{ref})}, \quad (4.8)$$

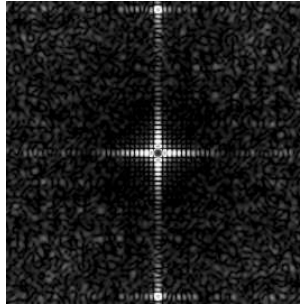
$$|A_{ki}| = |A_{rek}| \cdot t \cdot \frac{G}{a^2} \cdot \frac{|A_{obj}| \cdot |A_{ref}|}{1 + tD \cdot (I_{obj} + I_{ref})}, \quad (4.9)$$

$$\varphi_{ki} = \varphi_{rek} + (\varphi_{obj} - \varphi_{ref}). \quad (4.10)$$

Az időfüggetlen leíró paraméterek így $G = 3,36$ ö.e., $D = 0,26 \text{ cm}^2/\text{J}$. Tehát ez alapján ezek a paraméterek megfelelőek a HMC rendszerbeli számításokhoz, és lehetőséget adnak különböző expozíciós idők modellezéséhez is. Ha más körülményeket vizsgálnánk, vagy megváltoztatjuk a tároló anyagot, akkor a 4.1.2. fejezetben bemutatott kísérletet újra el kell végezni, és illesztéssel újra meg kell határozni a paramétereket, vagy a számítási képletek szerint módosítani kell azokat. A tároló anyag ritkán változik, és akkor az új anyag bevezetése során amúgy is sok vizsgálatot kell elvégezni, ezért ez nem okoz problémát.

Az azobenzén poliészter tároló anyag új modellje tehát a (4.9) és (4.10) kifejezések által leírt számítás. A G és D paraméterek mérésekből vagy számításokból kaphatóak. A leírás egyetlen hiányossága, hogy kollégáim a kísérletek során a diffrakciós hatásfokot önkényes egységekben határozták meg. Ezáltal a G paraméter is önkényes egységű, és a kiszámított intenzitás is az. Tehát két pont intenzitása összemérhető, de a rekonstruált nyaláb energiáját nem adja meg pontosan a számítás. Ez a hátrány a CCD detektor dinamikájának és zajainak leírását nehezíti meg. A kutatás tervezett folytatása, hogy megismételjük a kísérletet az újabb adattároló kártya mintákon is, illetve kollégáim a kísérlet egyszerűsítésén és pontosításán dolgoznak. Az újonnan elvégzett kísérletekben pontosabban mérnénk a rekonstruált intenzitást, amely a képletek és számítás módosítása nélkül kijavítja ezt a hiányosságot.

Az anyag telítődésének hatását a kimenő (rekonstruált) nyalábon is megfigyelhetjük. A rekonstruált hullámfrontot technikai nehézségek (nem férnek el, illetve kitakarják egymást a műszerek és nagyon kicsi intenzitások) miatt nem tudtuk mérni, csak szimulálni. A szimulált rekonstruált hullámfrontot a 31. ábra mutatja. Jól látható, hogy a szerkezete hasonló a 30. ábra b) részéhez, de a csúcsok közepei mind telítésbe mentek, és a tároló anyag kísérleteknek megfelelően nemcsak stagnál a diffraktált teljesítmény, hanem vissza is esik. A modell helyességét tehát inkább a rekonstruált és szimulált CCD képből ellenőrizhetjük.

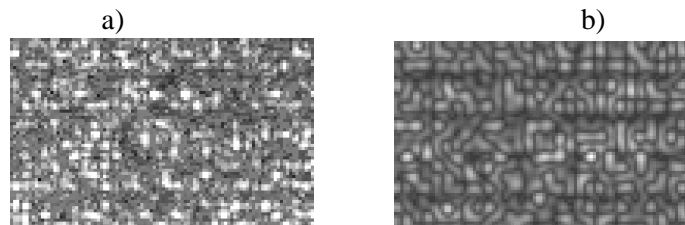


31. ábra A fázismaszk nélkül készített hologram rekonstruált hullámfrontjának szimulált intenzitásképe.

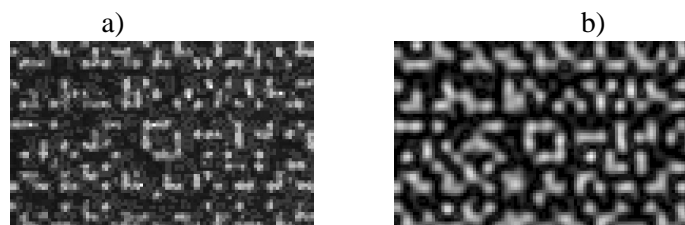
4.3 Kutatásaim a telítődési modell ellenőrzésére

Az anyag hatása akkor jelentkezik erősebben, ha a hologram síkjában nagy intenzitáscsúcsok vannak jelen. Ez akkor lép fel, ha nem használunk a rendszerben fázismaszkot. A 30. ábra és a 31. ábra is már ezt a fázismaszk nélküli esetet mutatta be, láthatóak rajtuk a nagy intenzitáscsúcsok és a telítődés roncsoló hatása is a csúcsokon. A további vizsgálatok során a CCD-n mérhető rekonstruált képek tulajdonságait vizsgáljuk. A vizsgálatokat a HMC rendszer tipikus paramétereivel végeztem (lásd 5. fejezet), és az eddig is használt 30×20 pixeles SLM kép részleten mutatom be.

A fázismaszk nélkül készített hologramok rekonstruált képei a CCD detektoron az anyag hatása miatt teljesen szürkék, zajosak, kiértékelhetetlenek. A kiolvasott kísérleti és szimulált képeket a 32. ábra mutatja. A legerősebb telítődés a központi csúcsban tapasztalható, amely felül áteresztő Fourier szűrőként viselkedik, ez szürkíti el a képet. Emellett természetesen a többi csúcs telítődése is zajokat okoz.



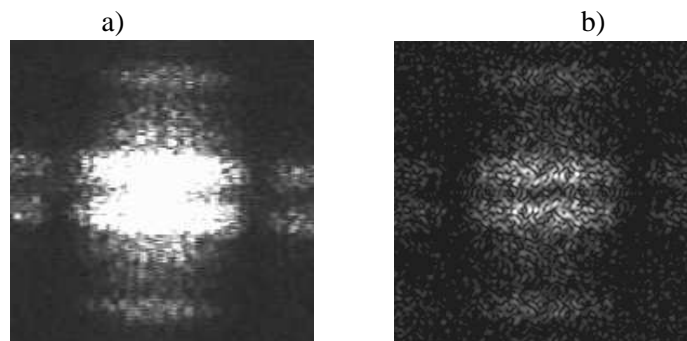
32. ábra Fázismaszk nélkül készített hologramok rekonstruált CCD képeinek részlete
a) kísérleti kép, nyers BER $\approx 0,5$
b) szimuláció, nyers BER = 0,32.



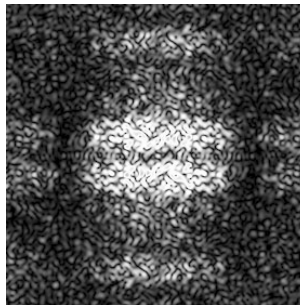
33. ábra Fázismaszk nélkül készített direkt CCD képek részlete
a) kísérleti direkt kép, nyers BER = 0,007
b) anyagmodell használata nélkül készített szimuláció, nyers BER = 0,0001.

A kiolvasott adatra a nyers BER 0,5 a kísérletben, és 0,32 a szimulációban. Az eltérésnek két oka van, először, hogy a szimulált képen az algoritmusom pontosan ismeri a pixelek helyét, a kísérletben viszont ehhez a szinkronblokkokat meg kellene előbb találni. Másodszer a hibajavítás kis zaj esetén nagyon jól működik, nagyobb zaj esetén azonban hirtelen romlik el. Tehát az ilyen nagy szimulált BER már kiolvashatatlanak tekinthető, és a szimuláció és kísérlet megfelelő egyezését mutatja.

Ha ugyanezt a részletet az anyagmodell felhasználása nélkül vizsgáljuk, akkor a 33. ábra által mutatott képeket kapjuk. Az a) rész az optikai rendszerben készült hologram felvétele nélkül, ezáltal csak az optika hibáit és a tároló anyag szórását tartalmazza, a telítődését nem. Ezt nevezzük direkt képnek. A b) rész szimulációval készült fázismaszk és anyagmodell nélkül. A nyers BER a kísérletben 0,007-nek adódott, a szimulációban közelítőleg 0,0001. Az eltérés oka, hogy az optikai rendszer hibás tartományait nem vettem figyelembe a szimulációban.

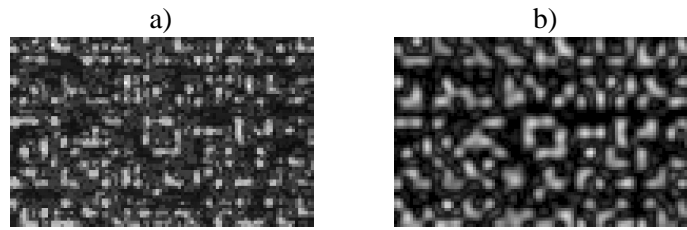


34. ábra Fázismaszk hatására a hologram síkjában a tárgynyaláb intenzitásképe a) CCD detektorral mért b) szimulált esetben.

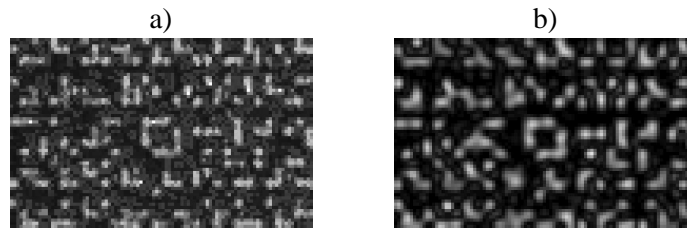


35. ábra A fázismaszkkal készített hologram rekonstruált hullámfrontjának szimulált intenzitásképe.

Fázismaszk alkalmazásával a Fourier síkban található csúcsok intenzitása csökken, simább lesz a hologram intenzitáseloszlása, kevésbé lesz destruktív az anyag telítődési hatása. A mért és szimulált tárgynyaláb hullámfrontot a hologram síkjában a 34. ábra mutatja. A rekonstruált hullámfront szimulált képét 35. ábra mutatja, amelyen jól látható, hogy itt a telítődésnek már alig van destruktív hatása.



36. ábra Fázismaszkkal készített hologramok rekonstruált CCD képeinek részlete
a) kísérlet, nyers BER = 0,011 b) szimuláció, nyers BER = 0,012±0,002.



37. ábra Fázismaszkkal készített direkt CCD képek részlete
a) kísérleti direkt kép, nyers BER = 0,008
b) anyagmodell használata nélkül készített szimuláció, nyers BER = 0,007±0,001.

A rekonstruált CCD képek itt is jó egyezést mutatnak a mért és szimulált esetekben, ezt a 36. ábra mutatja. A mért nyers BER 0,011 volt, a szimulációban pedig $0,012 \pm 0,002$ lett. Fázismaszkkal is elkészítettem a direkt képeket is, ezeket mutatja a 37. ábra. Itt a kísérletben a nyers BER 0,008 a szimulációban $0,007 \pm 0,001$.

A 32-33. ábra valamint a 36-37. ábra összehasonlítása a holografikus tároló anyag figyelembevételének szükségességét mutatja. A 3. fejezetben bemutatott modell az anyag hatása nélkül csak a 33. és 37. ábra szerinti állapotot tudja modellezni, a 32 és 36. ábra képeihez feltétlenül kellene ennek a fejezetnek az eredményei.

Ezen vizsgálatok holografikus tároló anyag modelljének ellenőrzésére készültek, és elmondhatjuk, hogy a modell a kísérleteknek megfelel. Ezeken a kísérleteken kívül más kísérletek is alátámasztják a modellt, ezekből a fehér arány vizsgálatát emelném ki, amellyel az 5.3.1. fejezetben foglalkozom. Ott is összehasonlítom a direkt képek és a rekonstruált hologramok kísérleteit és szimulációit, amely szintén az anyagmodell felhasználhatóságát bizonyítja.

5 Vékony holografikus adattároló rendszerek optimalizálása szimulációs vizsgálatokkal

Ebben a fejezetben a 3. tézisemet fejtem ki. A fejezet elején bemutatom az általam használt optimalizálási módszert, majd további kísérleti bizonyítékokat mutatok be arról, hogy a szimulációs modellem helyesen jósolja meg a HMC rendszer viselkedését. Ezeknek a bizonyítékoknak a folytatásaképp bemutatom a HMC rendszer optimalizációját a rendszer fejlesztése során. A meghatározó paraméterek egy olyan új kombinációját javasolom, amely nagyobb adatsűrűséget és írási sebességet eredményez kisebb bit hiba arány mellett. Végül a szimulációk segítségével javaslatokat is adok a térbeli fénymodulátor és a detektor optimális megválasztására a HMC rendszer továbbfejlesztéséhez.

A fejezet legtöbb vizsgálata a HMC rendszerhez kapcsolódik, de sok eredmény e rendszertől függetlenül is használható, illetve a szimulációs módszerrel és a modellem segítségével más rendszerekre is meghatározható az optimum.

5.1 Az optimalizálás módszerei

A szimulációs vizsgálataimhoz a holografikus adattároló rendszerek 3. és 4. fejezetben bemutatott modelljét használtam a HMC rendszer esetében.

Az optimalizálás célparaméterei a rendszer adatsűrűsége, az írási idő, a megbízható adattárolás, tehát a kis BER. Ezek javítása általában a többi rovására megy, tehát például ha megnöveljük az adatsűrűséget vagy az írási időt, akkor általában elromlik a BER, nehezebb lesz visszanyerni az adatokat. Az optimalizálás során a következő paramétereket változtattam: az adatok megjelenítésében használt szűrkeszintek száma, a referencia nyaláb profilja, a hologram mérete, a szomszédos hologramok távolsága, a hologram geometriája, a térbeli fénymodulátor kitöltési tényezője és kontrasztja és a detektor dinamikai tartománya.

A célparamétereket nagyban befolyásolja a 6. fejezetben tárgyalt fázismaszk. A különböző típusú fázismaszkok és egyéb simítási módszerek tulajdonságait, használatukkal elérhető javulás ott vizsgálom. Ebben a fejezetben a HMC rendszer jelenlegi fázismaszkjának használatával végeztem a számításaimat.

A célparaméterek közül a BER értelmezését már bemutattam a 3.2.4. fejezetben. Az írási idő a 4.2. fejezetben szerepelt. Ezek mellett a holografikus adattároló rendszerek talán legfontosabb kérdése az adatsűrűség. Ez határozza meg egy adathordozón (kártyán, lemezen, stb.) tárolható információ mennyiségét. Felületi hologramoknál a tárolt adatsűrűséget $\text{bit}/\mu\text{m}^2$ mértékegységben mérik, amely az anyag vastagságát is figyelembe véve átszámítható a térfogati holográfiában általánosabban használt $\text{bit}/\mu\text{m}^3$ -ra. Az adatsűrűséget a következőképpen számíthatjuk ki:

$$\rho_{\text{adat}} = \frac{N_{\text{adat}} \rho_{\text{kód}}}{A_{\text{holo}}} \quad (5.1)$$

ahol az SLM-en a tárolt információ pixelszáma N_{adat} , a felhasznált kód kihasználtság $\rho_{\text{kód}}$, a hologramot területe A_{holo} . A kód kihasználtság (angol szakirodalomban „code rate”) azt mutatja meg, hogy 1 pixelen átlagosan hány bit információ tárolódik. Általánosan $0 < \rho_{\text{kód}} \leq \log_2(g)$, ahol g az adatok ábrázolásához használt szűrkeszintek száma (lásd később a 5.3.2-ben). Binárisan tárolt adatokra, vagyis két szűrkeszint esetében $0 < \rho_{\text{kód}} \leq 1$.

Az adathordozó által tárolt információ mennyiségét az adatsűrűség és a felület szorzatából kapjuk, ha a hologramokat egymás mellé helyezhetjük (lásd 5.3.5.), és lefedik a síkot (lásd 5.3.6.). (Ha A_{holo} nem a hologram fizikai felülete, hanem a szomszédos hologramok középpontja által meghatározott elemi cella felülete, akkor minden külön feltétel nélkül akár térbeli multiplexeléssel egymáson átlapoló vagy az áthallás miatt egymástól tágasan elrakott hologramok esetében is jó a fenti definíció).

Egy rendszer optimalizációja során a célparaméterek maximalizálásához kell megtalálni a változók megfelelő kombinációját. Célszerű, és én is ezt az utat követem, először megvizsgálni az egyes változók hatásait. Ekkor az adott paraméter változásának hatását vizsgáljuk, amíg a többi paraméter változatlan. A hatást a nyers BER változásával szoktuk mérni. Tehát nem az adatsűrűséget kapjuk meg egyből, csak utalást rá, hogy ha a nyers BER csökken, akkor az adatsűrűség valószínűleg növelhető. Az eredményekkel együtt egy nagyon szemléletes képet is kapunk a paraméterek által létrehozott effektusokról.

Az egyes változók hatásainak ismeretében globálisan is meg kell vizsgálni a rendszert. Az összes változó optimális értékeinek beállítása után együttes hatásukat figyelembe véve ellenőrizni és finom hangolni kell az eredményeket.

5.2 A HMC rendszer alap paramétereit

A HMC rendszert a 2.3. fejezetben bemutatam. Ebben a fejezetben a tervezési paramétereket szeretném vázlatosan leírni, hogy tudományos közleményeimben és a dolgozatomban következő eredményeim megértéséhez viszonyítási alapot nyújtsak.

Az optikai, opto-elektronikai rendszertervek, valamint az előkészítő kísérletek alapján a rendszer fejlesztése a következő paraméterekkel indult.

A rendszert $1,8 \times D_N$ apertúrára, vagyis a Nyquist apertúrának 1,8-szorosának átvitelére méretezték, hogy a pixeleket közel diffrakció limitáltan vigye át. (A Nyquist apertúra definícióját lásd a 2.3 fejezetben és a 8.2. függelékben.) A holografikus anyagot a számolásokban lineárisan közelítették. A kártyán négyzet alakú hologramok helyezkedtek volna el, egymás mellett négyzetrácsban. Kódolásnak az kísérletek alapján a 3-16-os kódot választották (lásd 5.3.1.). A rendszerbe sík referencianyaláb került. A rendszer adatsűrűsége így $0,4 \text{ bit} / \mu\text{m}^2$ volt.

Az én feladatom a tervezésben a rendszer optimalizálása, és a fázismaszk megtervezése (6. fejezet) volt. A tervezés folyamatát és a fázismaszkot a [10] tudományos közleményben mutattuk be, a korai eredményeimet, amelyek alapján a tervezett Gauss nyaláb referenciát méreteztük a [7] publikáció részletezi. A HMC rendszer javított változatát a [3,8] közleményekben ismertettem. Ezen eredmények a holografikus tároló anyag 4. fejezetben bemutatott modellje és a kódolás figyelembevétele nélkül készültek, és ezért nagyon optimista becslést adtak az elérhető adatsűrűségről, hogy akár $1,53 \text{ bit} / \mu\text{m}^2$ is elérhető.

A szimulációs vizsgálataimat a holografikus tároló anyag tulajdonságainak modellbe illesztése után megismételtem. Az beillesztést, mint korábban is írtam, a [4,5] közleményekben publikáltam. Az újraszámolt szimulációs eredményeim a [2,6] publikációkban jelentettem meg. A teljes modell bemutatását végül az [1] tartalmazza. Eszerint az adatsűrűség $0,8 \text{ bit} / \mu\text{m}^2$, amely még nem veszi figyelembe az általam ajánlott összes javítási lehetőséget. Dolgozatomban bemutatam, hogy $1,2 \text{ bit} / \mu\text{m}^2$ adatsűrűség elérhető a HMC rendszer továbbfejlesztésével. Kollégáim közben a kódok továbbfejlesztésén dolgoznak, amely további javulásokat hozhat.

5.3 A HMC rendszer optimalizálása

5.3.1 Az adat kódolás során alkalmazott fehérarány

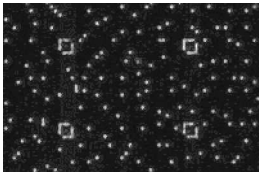
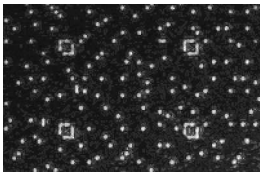
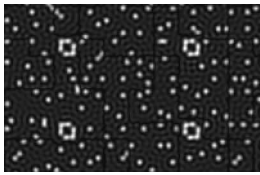
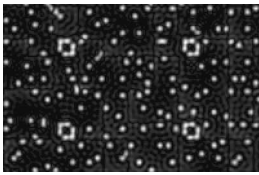
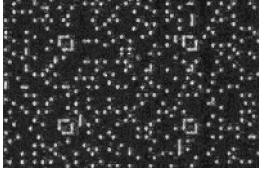
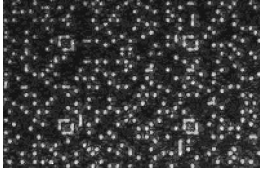

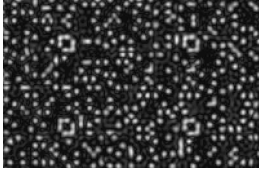
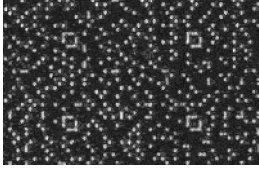
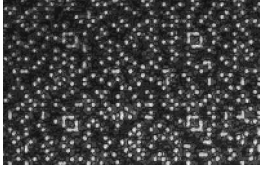

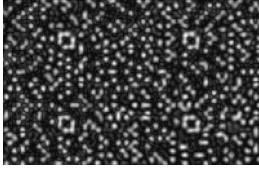




Fehérrálynak nevezzük a sötét és világos pixelek mennyiségének arányát százalékban kifejezve [56]. Ha kevesebb világos pixel van és több sötét van körülöttük, akkor nőhet a köztük levő távolság, és így a pixelekből tárolt információ erősebb Fourier szűrést vagy nagyobb zajt is elviselhet.

Mint a szimulációk kiértékelésénél (3.2.4. fejezet) már írtam, az adatok megjelenítésével, kódolásával kollégám, Sütő Attila foglalkozott [39], én ezért most is csak az adott kódok által felhasznált fehérarány hatását fogom vizsgálni. Sütő Attila négy lehetséges kódolást javasolt a HMC rendszerhez, amelyeket 1-16, 3-20, 3-16, 4-12 jelöl. Ezen kódolásokra tudott megfelelő szimbólumábrázolást és hibajavítást találni. A kód nevében az első szám az egy szimbólumban található világos pixelek száma, a második számjegy pedig a szimbólum pixelszáma. Ebből kiszámítható a kódok fehéraránya az adatokra nézve. A teljes SLM kép az adatokat ábrázoló szimbólumokon kívül a tájékozódást segítő úgynevezett szinkronblokkokat, és üres területeket is tartalmaz. A fehérarány adatokra és teljes képre számított értékeit, és a kód kihasználtság értékeit a 3. táblázat tünteti fel. A továbbiakban fehérarányként inkább az adatokra számított értéket használom, mert az független az SLM alakjától, felhasznált területétől.

Kód	Fehérrány adatokra	Fehérrány teljes SLM képre	Kód kihasználtság
1-16	6,3 %	6,1 %	0,25
3-20	15,0 %	12,7 %	0,40
3-16	18,8 %	15,5 %	0,50
4-12	33,3 %	26,6 %	0,67

3. táblázat A fehérarány és a kód kihasználtság nagysága a különböző kódolásokban.

Az adott kódolású képekkel szimulációs és kísérleti vizsgálatot végeztünk a HMC rendszer jelenlegi állapotában ($1,4 \times D_N$ kör alakú apertúra rekesz, közel sík referenciával). A HMC rendszeren a kísérleteket Ujhelyi Ferenc kollégám végezte. Mindegyik képből hologramot rögzítettünk, és mértük a rekonstruált adatok nyers BER értékét. Ezáltal mint az 3.2.4. fejezetben írtam, a kódolás hibajavító hatásától független mérőszámot kaptunk, amely az optikai rendszer szempontjából minősíti a kódot. Teljes mértékben azonban nem független a vizsgált kódtól, mert a különböző szimbólumok periodicitása és a szimbólumok belső szerkezete is befolyásolhatja az eredményt. A teljes kísérletsorozatban a direkt képeket is felvettük, hogy megvizsgálhassuk, mi az optikai rendszernek a hatása, és mi a tároló anyagnak. A 38. ábra nyers BER értékei közelítő jellegűek, különböző SLM képekre 10 %-ot is szórhatnak.

Kód	Kísérlet		Szimuláció	
	Direkt kép	Rekonstruált hologram	Direkt kép	Rekonstruált hologram
1-16	 BER=0,007	 BER=0,009	 BER=0	 BER=0,003
3-20	 BER=0,006	 BER=0,009	 BER=0,001	 BER=0,004
3-16	 BER=0,008	 BER=0,011	 BER=0,007	 BER=0,012
4-12	 BER=0,016	 BER=0,057	 BER=0,011	 BER=0,042

38. ábra A fehérarány hatása direkt képek és rekonstruált hologramok esetén kísérlettel és szimulációval, $1,4 \times D_N$ apertúra rekesz használatával.

38. ábra alapján elmondhatjuk, hogy az $1,4 \times D_N$ apertúra rekesz mellett a 1-16 és 3-20 kódok teljes biztonsággal használhatóak a HMC rendszerben, a 3-16 az optimum, jelenleg is ezt használjuk. A 4-12 azonban megbízhatatlan, az adathordozó kártya minőségétől függ. Természetesen nagyobb apertúra rekesz használatával a 4-12-es is jól használható lenne.

Mint látható a kódolásnak nagy hatása van a rendszer adatsűrűségére. Ennek vizsgálata kollégáim feladata volt, így én a továbbiakban csak a rendszerben leginkább használható 3-16-os kódot használom.

A kísérleti és szimulált direkt képek és rekonstruált hologramok közti különbségeket ha megvizsgáljuk, jó egyezést tapasztalunk. Ez a holografikus rendszer modelljének és a tároló anyag modelljének további megerősítése.

5.3.2 Az adatok megjelenítése során az SLM pixelein használt szűrkeszintek száma

A számítástechnikában általánosan binárisan, azaz „0” és „1” formájában jelenítik meg az adatokat, és az előző fejezet kódjai is binárisak. Optikában ez megfelel a sötét és világos pixeleknek. Kérdés, érdemes-e esetleg több szintet, úgynevezett szűrkeskálát használni [58,73,74].

A szűrkeskálás adattárolást akkor lehet alkalmazni, ha a jel hisztogramjában az egyes szintek élesen elválnak, és közülük egy vagy több szint beilleszthető. A szűrkeszintek számát jelölje: g . A két szűrkeszint alkalmazása esetén rendelkezésre álló SNR-t a g szint alkalmazása $g - 1$ részre osztja. A felhasználás feltétele az, hogy az így kapott maradék SNR is nagyobb legyen egynél, vagyis ne vesszen el az információ a zajban. Az SNR általános több szűrkeszintes definíciója [73]:

$$\text{SNR} = \frac{1}{g-1} \sum_{i=0}^{g-2} \frac{\mu_{i+1} - \mu_i}{\sqrt{\sigma_{i+1}^2 + \sigma_i^2}} . \quad (5.2)$$

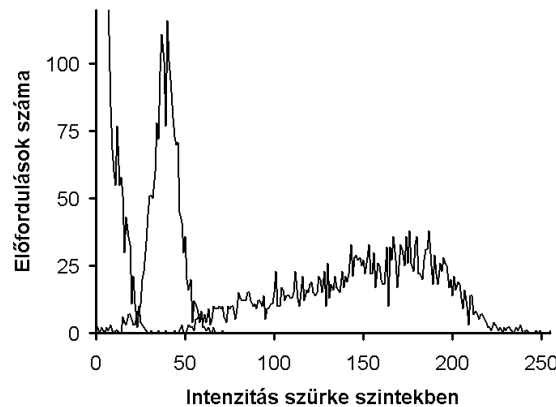
Ahol μ_i és σ_i az a i . szűrkeszint pixeleinek várható értéke és szórása. A szűrkeszintek alkalmazása során, ha 50 %-os fehérarány mellett, egy pixelen nem csak egy bit, hanem $\log_2(g)$ bit információ tárolható, tehát a lehetséges maximális adatsűrűség növelés is $\log_2(g)$ -szeres.

A szakirodalom alapján várhatóan három szűrkeszint tárolható. A [73] cikk három szintet javasol, amely segítségével a kódolást is megváltoztatva 30 % adatsűrűség javulást értek el. A [74] három-négy szűrkeszint lehetőségét veti fel, de további vizsgálatokat javasol.

A szűrkeskálás adattárolás felhasználhatóságára kétféle szimulációs kísérletet végeztem. Az elsőben azt vizsgáltam, hogy a rendszerünkben jelenleg használt erős Fourier szűrés mellett hogyan lehetne három szűrkeszintet ábrázolni. Azonban így nem áll elegendő SNR rendelkezésünkre ezért megpróbálkoztam az 1-16-os kód módosított képeinek használatával, ahol a három szintből a két világos együttes aránya a sötétekhez 6 % volt. Ennek az esetnek a hisztogramját mutatja a 39. ábra. Még ebben az esetben is csak 0,0276 lett a nyers BER, amely a feldolgozhatóság határán van. A tárolt adatmennyiség növekedése az 1-16 bináris kódhoz képest maximálisan 1,58-szoros lenne ($\log_2(3) = 1,58$), ugyanakkor ha ehelyett a 3-16-os bináris kódot használunk az kétszeres adatmennyiség növekedést jelentene ($0,5 / 0,25 = 2$). Tehát megállapíthatjuk, hogy a szűrkeskálás adattárolás ilyen felhasználása nem növeli az adatsűrűséget, ugyanakkor bonyolultabbá teszi a rendszert.

Másodszor azt vizsgáltam, hogy milyen méretű hologramot kellene írunk (lásd 5.3.4.), hogy a 3-16 kód három szűrkeszintes változatával a binárishoz hasonló, megfelelően feldolgozható 10^{-2} nyers BER-t kapjunk. Az eredmény legalább $1,9 \times D_N$ hologramméret, amely adatmennyisége az $1,4 \times D_N$ binárishoz képest $1,58 \cdot 1,4^2 / 1,9^2 = 0,86$, tehát ez a módszer sem növeli az adatsűrűséget.

Eredményeim alapján tehát az adattároló rendszerekben bináris (két szűrkeszintes) adatábrázolást célszerű használni, amely megbízhatóbb működést és könnyebb kiértékelést biztosít nagyobb adatsűrűség mellett.



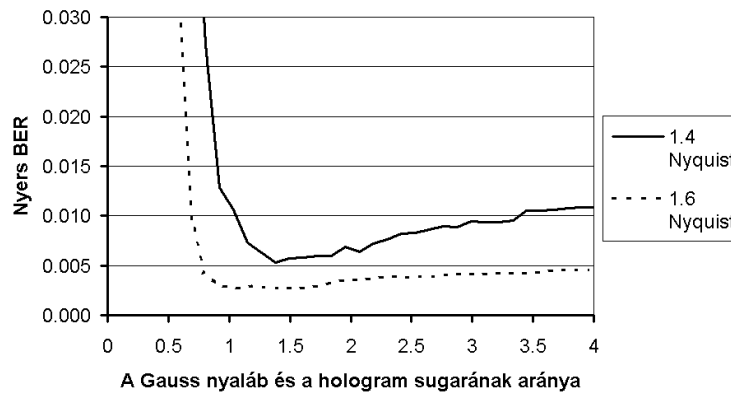
39. ábra Rekonstruált CCD kép histogramja három szűrkeszint alkalmazásával, nyers BER = 0,0276.

5.3.3 A Gauss nyaláb alkalmazása

A HMC rendszerbe kezdetben Gauss nyaláb alakú referenciát terveztünk, amely sugarát a szimulációim alapján határoztuk meg [7]. A Gauss nyaláb referenciát előállító nyalábformálót azonban nem lehetett a rendszer összeépítése során megfelelően beállítani, ezért végül sík referencianyaláb került a rendszerbe. A jelenlegi referencianyaláb intenzitása a széleken kb. 0,9-ed része a közép intenzitásának. A [1] tudományos közleményemben újra megvizsgáltam a kérdést, ennek eredményeit mutatom itt is be, és javaslom a HMC rendszer továbbfejlesztése során figyelembe venni.

A Fourier spektrum holografikus rögzítése során a felhasznált referencianyaláb alakja befolyásolja a jel szűrését. A hologram széle, mint a 2.3. fejezetben az apertúránál írtam, egy aluláteresztő szűrőnek megfelelő vágás, amely diffrakciót okoz. Ez kombinálódik a holografikus anyag hatásával is. Ha referenciának síkhullám helyett gömbhullámot vagy Gauss nyalábot használnánk, akkor az apertúra rekesz szélek okozta hatásokat tompíthatjuk [76].

Szimulációs vizsgálataimat az anyag hatásának figyelembevételével és a jelenlegi rendszer paramétereivel végeztem. Példaként két apertúra rekesz méretet vizsgáltam meg, amelyeket a 40. ábra mutat. A Gauss nyaláb átmérőjét relatív méretben adom meg, az aktuális apertúra rekesz mérethez viszonyítom. A nyers BER a síkhullámhoz viszonyítva csökken egy ideig a Gauss átmérő csökkenésével, majd egy optimum után drasztikusan növekedni kezd. Ez a hatás a kisebb $1,4 \times D_N$ apertúra rekesz esetén erősebb, $1,6 \times D_N$ apertúra rekesz esetén kevésbé jelentős. Tehát a Gauss nyaláb felhasználható a rendszer javításához, ha biztosítjuk a megfelelő beállíthatóságot. A hologram átmérőjének 1,5-szerese az optimális méret. Tervezés során a tűréseket úgy kell beállítani, hogy inkább nagyobb átmérő keletkezzen.



40. ábra A Gauss nyaláb hatása a nyers BER-re különböző apertúrák mellett.

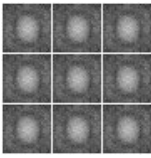
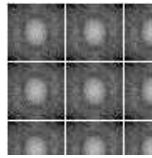
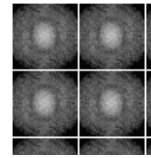
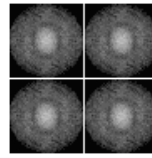

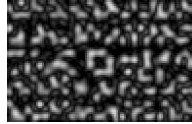


A Gauss nyaláb hatása a következő szempontból is meghatározó. A lézerek kibocsátott nyalábja is Gauss, ezáltal ahhoz, hogy közel síkhullámot készítsünk belőle a nyaláb jelentősen veszít energiájából. Ha megtartjuk a nyaláb természetes Gauss alakját, akkor a referencianyaláb energiáját kb. hétszeresére lehetne növelni, ezáltal az írási idő is jelentősen csökkenne.

5.3.4 A hologram mérete

A HMC rendszer esetében az adatsűrűség növelése elsősorban a hologram méretének csökkentésével lehetséges, amely a rendszerben az apertúra rekesz, azaz a Fourier szűrés változtatásával egyezik meg. Ez eltér a szakirodalomban kutatott rendszerektől, mert azoknál térfogati hologramokat írnak általában és az adatsűrűséget multiplexeléssel növelik [23,36,58]. A [75] cikk megközelítése hasonlóbb a mienkhez, de más oldalról, ők az adott optikai átvitelhez keresik a lehető legkisebb SLM pixelméretet. Ez a megközelítés azonban ellentmond a mi céljainknak, hogy olcsó, egyszerű SLM-et használjunk fel.

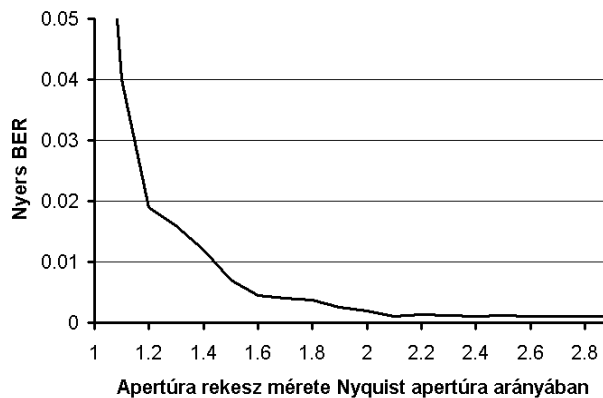
Első eredményeimet a [7,8] tartalmazza, amelyek az anyag hatásának figyelembevétele nélkül készültek. Az anyag hatásának figyelembevételével újraszámolt eredményeket megjelentettem a [2,6] publikációkban, majd tovább pontosítottam az [1] közleményemben.

A hologram méret változtatásának hatását a 41. ábra mutatja. Ez egy szemléltető ábra, hogyan helyezkednek el a hologramok a hordozón és milyenek a rekonstruált CCD képek.

Apertúra rekesz	$1,2 \times D_N$	$1,4 \times D_N$	$1,6 \times D_N$	$1,8 \times D_N$
Hologramok elhelyezkedése a hordozó felületén 560 μm oldalú területen (illusztráció)				
Szimulált rekonstruált CCD kép				

41. ábra A hologram méretének hatása.
(A hologramok elhelyezkedését mutató ábrák illusztrációk)

Szimulációs vizsgálataimat a HMC rendszer jelenlegi állapotának megfelelően elvégeztem, és megvizsgáltam a hologram méret változtatásának a hatását. A szimuláció eredményeit a 42. ábra grafikonjai mutatják. Eszerint az $1,4 \times N_D$ apertúra rekesz nagyság éppen a lehetséges határ, hogy hibajavítással ki tudjuk értékelni a rekonstruált hologramot. Ezt a vizsgálatot minden rendszer esetében célszerű megismételni, ellenőrizni.



42. ábra A hologramméret hatása a nyers BER nagyságára.

Megjegyzés: A hologram méretére vonatkozó első eredményeimet tartalmazó [7,8] publikációkban másfajta leírást használtam. A tároló anyag nélkül a szimulációk nem tartalmaztak hibás pixelt, ezért a nyers BER helyett a hisztogramban a sötét és világos pixeleknek elkülönülését jellemző távolságot adtam meg, a hisztogramközt. Ez a legsötétebb világos pixel és a legvilágosabb sötét pixel távolsága szürkeszintben. Emellett a Nyquist apertúra rekesz kétszereséhez, a D_P apertúra rekeszhez viszonyítottam a hologram méretét (lásd a 8.2. függelékben), tehát a helyes értékekhez ezeket kettővel szorozni kell.

5.3.5 A hologramok egymás mellé írásának lehetőségei

A következő szimuláció-kísérlet párt a [1] tudományos közleményben megjelentettem. Ha két hologramot egymás mellé írunk, akkor figyelembe kell venni az alkalmazott szervó motor pontosságát, és a hologramok megtalálási pontosságát is. A HMC rendszer esetében a motor $2\ \mu\text{m}$ pontossággal lép, de a sebesség miatt néhány lépés tévedést is meg szoktak engedni, a kártya behelyezése során a pontatlanság kb. $10\ \mu\text{m}$. Ha beírunk egy hologramot valahova, majd a kiolvasás során máshol levő optikai fejjel próbáljuk kiolvasni romlik a jel minősége. Két esetet vizsgálok meg: 1. ha egy üres terület felé mozdulunk el kiolvasáskor, illetve 2. ha egy másik hologram területe felé. Az első eset során csökken a diffrakciós hatások, és aszimmetrikus Fourier szűrés következik be, a második esetben ezenkívül hologramok közötti áthallás (úgynevezett interpage crosstalk) is létrejön. Az elmozdulást a hologram méretének arányában, százalékban mérem.

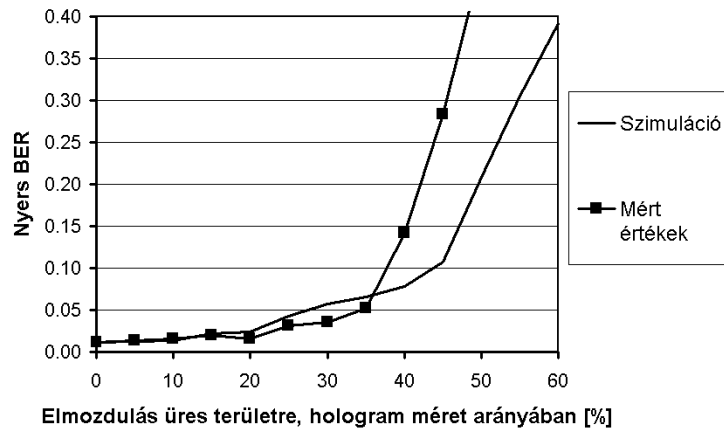
A vizsgálat egyszerűsítésére ezt a szimulációt és mérést négyzetesen elrendezett, közvetlenül egymás mellé írt hologramokra vizsgáltuk. A mérést a HMC rendszer jelenlegi állapotában ($1,4 \times D_N$ kör alakú apertúra rekeszt, közel sík referenciával) Ujhelyi Ferenc végezte el. A szimuláció és a mérés eredményeit a 43. ábra és a 44. ábra mutatja, amely eredmények jól egyeznek, újabb bizonyítékként a modell felhasználhatóságára. Látható, hogy még a 20 %-os üres területre elmozdulásnál fellépő relatív nyers BER csökkenés is megfigyelhető mindkettőben, amelynek az oka a Fourier spektrum speciális szerkezete.

Nagyobb elmozdulásokra ($> 30\%$) a modell és a kísérlet eredményei különbséget mutatnak. Ennek oka a kép kiértékelésében van, amely a modell esetében küszöbértékkel, a kísérletben pedig szimbólumok korrelációjával történik. Az utóbbi kis zaj esetén nagyon jól működik, nagyobb zaj esetén azonban hirtelen romlik el.

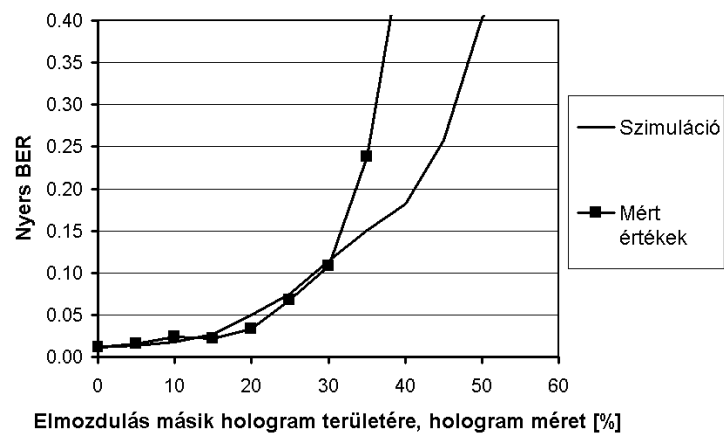
Az eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy ha a hologram megtalálási biztonsága kisebb mint a méretének 20 %-a, akkor nem szükséges két hologram között biztonsági helyet hagyni. Ha a megtalálás ennél pontatlanabb, akkor a biztonságos visszaolvasáshoz egymástól megfelelően távolabb szükséges írni a hologramokat. Illetve ez esetben lehet, hogy a hologramok méretét is meg kell növelni.

A HMC rendszerben a hologram méret 20 %-a $44\ \mu\text{m}$ amely jelentősen nagyobb a kártya behelyezés pontosságánál, és még a motor számára is jelentős tartalék marad így. Tipikusan 4 lépés pontatlanságot szoktunk engedni a motornak, így a hologram méret 10 %-án belül marad a pontatlanság.

Megjegyzés: A kísérlet során nem vizsgáltam, hogy ha a hologramok írása nem egy sorozatban történik, akkor az írás során is fellépnek elhelyezési bizonytalanságok.



43. ábra A hologram írása és olvasása közötti elmozdulás vizsgálata, ha az olvasáskor egy üres terület fölé mozdulunk el.



44. ábra A hologram írása és olvasása közötti elmozdulás vizsgálata, ha az olvasáskor egy már megírt másik hologram területe fölé mozdulunk el.

5.3.6 A hologram geometriája, alakja

A tervezett négyzetes hologrammal ellentétben elképzelhetőek más geometriai alakzatok is. A felhasználás szempontjából azok a formák érdekesek, amelyekkel le lehet fedni a síkot, hogy a rendelkezésre álló területet a legjobban kihasználjuk. A háromszög alakot nem vizsgálom, mert a tároló felület lefedéséhez forgatni vagy mozgatni kellene a Fourier tükröt, amely extrém nehézségeket okozna. A vizsgált formák tehát a négyzet, a hatszög és a kör. A négyzetes elrendezéshez képest a méhsejtszerűen lerakott hatszögekkel vagy körökkel jobban kihasználható a terület, mert elvileg a Fourier spektrum sugarasan értelmezett közepe tartalmazza az információ lényeges részét. A körnek pedig az ad létjogosultságot, hogy egyszerűbben készíthető és kezelhető, mint a hatszög.

Szimulációs vizsgálataimban a két legjobban felhasználható alakot, a négyzet és a kör alakot vizsgáltam meg, a HMC rendszer jelenlegi állapotában, két különböző apertúra rekesz méret mellett. A négyzet oldalhosszát nevezem az apertúra rekesz átmérőjének, ezzel egyezik meg a kör alak átmérője is, tehát a négyzetet és beírt körét vizsgáltam. Az eredmények

kimutattak eltérést a négyzet javára, elsősorban a kisebb apertúra rekeszeknél, ahol fontosabb szerepet kap minden Fourier-spektrum rész. Az eltérés csak 25 % körül van ott is, és a nagyobb apertúránál 17 %-ra csökken. Az eredményeket a 4. táblázat mutatja. Tehát érdemesebb kör apertúrát használni, és így a méhsejtszerű elrendezéssel kb. 15 % tárolókapacitást lehet nyerni.

Apertúra rekesz méret	Négyzet alak	Kör alak (beírt kör)
$1,4 \times D_N$	$0,0087 \pm 0,002$	$0,012 \pm 0,002$
$1,6 \times D_N$	$0,0038 \pm 0,001$	$0,0045 \pm 0,001$

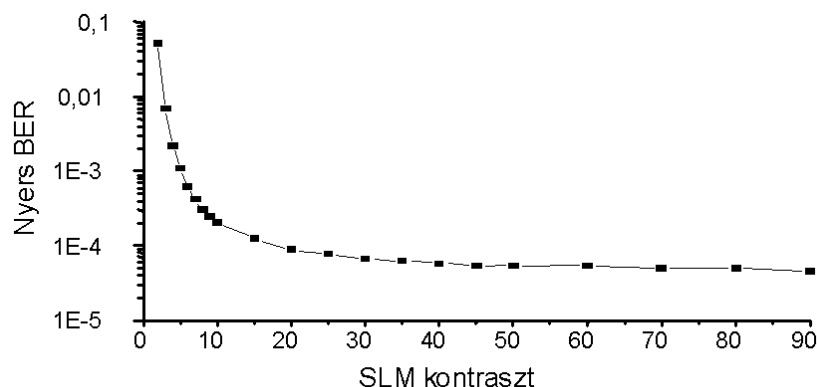
4. táblázat A hologram geometriájának hatása a nyers BER-re.

A HMC rendszerben az apertúra rekeszt szimulációim eredményeképpen kicseréltük négyzet alakról kör alakra. A kísérletek során nem sikerült a két alak között eltérést kimutatni, a mérések szórása nagyobb volt mint a mért eltérés. Ez tehát a kör alak használhatóságát bizonyítja, amellyel adatsűrűség és tárolókapacitás érhető el.

5.3.7 Az SLM kulcsparamétereinek vizsgálata

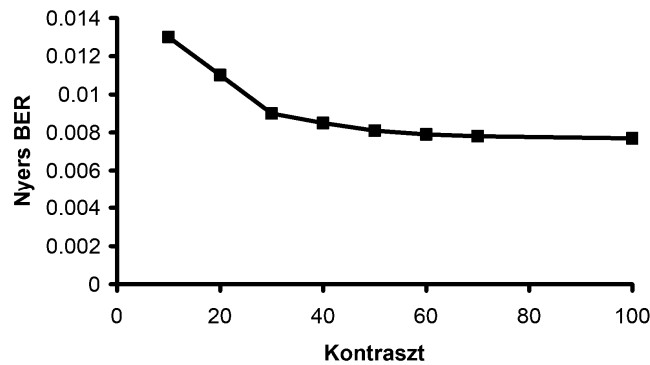
Az SLM meghatározó paraméterei a kontrasztja és a kitöltési tényezője. A továbbiakban megvizsgálom ezek hatását.

A kontraszt hatását megvizsgáltam a [9] publikációban ideális 4f rendszerre. Ekkor a 45. ábra által mutatott görbét kaptuk. A nyers BER 10-es SLM kontraszt alatt drasztikusan romlik, afelett nagyjából állandó, jól felhasználható.



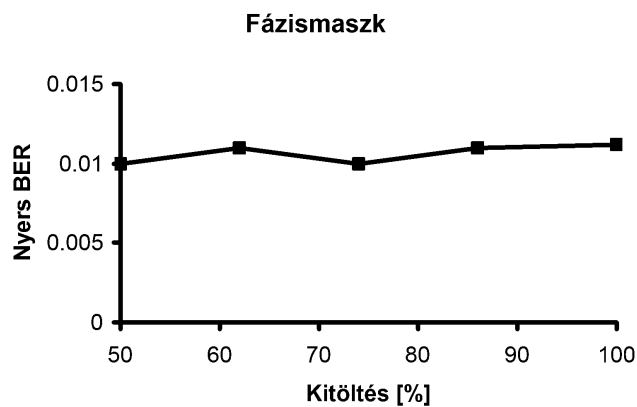
45. ábra Ideális 4f rendszer esetében az SLM kontraszt hatása.

A szimulációkat a HMC jelenlegi állapotához képest is elvégeztem. (A HMC rendszer SLM-jének a kontrasztja 20 körül van.) Az eredményeket a 46. ábra mutatja. A HMC rendszer korlátai kevésbé pontos szimulációkat tesznek lehetővé (az eredmények szórása 10 % körüli) de a tendencia itt is megfigyelhető, csak itt a határ kevésbé éles, kb. 30-as kontraszt alatt romlik erősebben a BER.

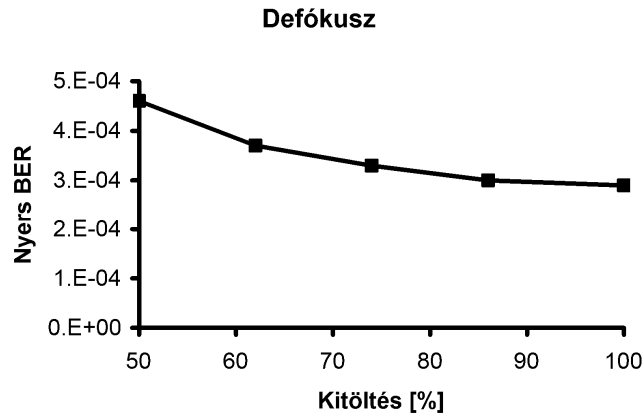


46. ábra SLM kontrasztjának hatása

A kitöltési tényezőt is a HMC rendszer jelenlegi állapotához képest vizsgáltam. Az eredményeim szerint fázismaszk használata mellett a kitöltési tényező változása nem befolyásolja érdemben a nyers BER nagyságát (47. ábra). Valószínűleg a fázismaszk vonalai olyan korlátok, amelyeket nem lehet ezzel számottevően befolyásolni, hiába jobb a kitöltés a maszk vonalai miatt ez nem tud érvényesülni. Hogy ezt ellenőrizsem elkészítettem defókuszálás használatával is a szimulációt és e szerint 2 %-os ideális defókuszálásnál (lásd 6.4.1. fejezetben) valóban javít a jobb kitöltési tényező (48. ábra). A szimulációkban négyzet alakú kitöltési tényezőt vettem figyelembe, és az SLM pixel egyik oldalának arányában adom meg.



47. ábra Az SLM pixelek kitöltési tényezőjének hatása fázismaszkkal simított intenzitású hologramok esetében.



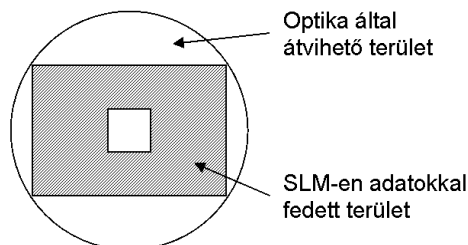
48. ábra Az SLM pixelek kitöltési tényezőjének hatása ideális defókuszálással simított intenzitású hologramok esetében.

Az SLM jobb kontrasztja és kitöltési tényezője a nyers BER javításán túl a lézer teljesítményének jobb kihasználásában is segíthet. Minél kisebbek az optikai rendszer veszteségei, annál több energia áll rendelkezésre a hologram íráshoz, ezáltal az írási időt lehet csökkenteni.

Az SLM fázis moduláló képességeinek felhasználását, mint a fázismaszk egy lehetséges alternatíváját a következő fejezetben vizsgálom.

5.3.8 Az adatok elrendezése, megjelenítése

A jelenleg használt SLM és annak adatok megjelenítésére használt tartománya (lásd 8. ábra) optikai szempontból nem praktikus. Az optikai rendszer körszimmetrikus elemekből áll, és az SLM alakja ennek a körnek beírt téglalapja. Az optikának ennek megfelelően a téglalap sarkát is jól kell átvinnie, viszont így az SLM kép csak a 60 %-át fedi le. Ezt ábrázolja a 49. ábra. Az SLM kép közepén az adatokban a „lyuk” szükségszerű, az optikai rendszerben ott vezetjük át a referencia és rekonstruáló nyalábokat (lásd 6. ábra). Célszerű lenne viszont az optikai rendszer egészét kihasználni, a lyuk kivételével, vagyis egy nagyobb SLM-en egy kör alakú területen jeleníteni meg az adatokat.



49. ábra Az SLM által adatokkal fedett terület és az optika viszonya.

Ezt a kérdést is megvizsgáltam szimulációval. Ehhez négyzet alakú 256×256 pixel méretű SLM-et vettem fel, amelyre először 208×148 pixel méretű adat téglalapokat tettem középre. Ez az oldalarány megfelel a miáltalunk használt kb. 1,4:1 aránynak. Azután ugyanilyen adatstruktúrával feltöltve elkészítettem az SLM képet 128 pixel sugarú kör alakú adattartománnyal. Ez így a téglalap körülírt köre. A kör alak a határain megbontja az adatok struktúráját, de mivel a körön belül továbbra is érintetlenek az adatok ez legfeljebb a kódolást és dekódolást nehezítené, amivel én most nem foglalkozom. A szimulációk eredményeit a 5. táblázat tartalmazza. A nyers BER növekedése a téglalap alakról kör alakra $1,4 \times D_N$ apertúra rekesznél 33 %, $1,6 \times D_N$ apertúra rekesznél 17 %. Az adatsűrűség növekedése pedig 67 %! A két százalék megint csak nem összemérhető, de ilyen mértékű adatsűrűség növeléshez akár a hologramméretet is meg lehet növelni kicsivel. Egy új rendszer tervezése esetében mindenképp érdemes ezt figyelembe venni, és elkészíteni a konkrét rendszerre a vizsgálatát.

Apertúra rekesz méret	Adatok téglalap alakban	Adatok kör alakban (körülírt kör)
1,4	$0,012 \pm 0,002$	$0,016 \pm 0,002$
1,6	$0,0045 \pm 0,001$	$0,0056 \pm 0,001$

5. táblázat Az adatok SLM-en való elrendezésének hatása a nyers BER-re.

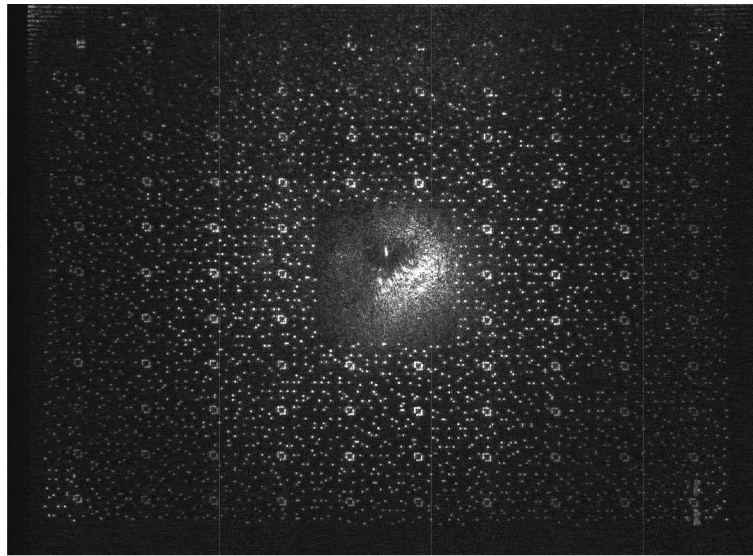
5.3.9 A CCD detektor

A CCD detektort három fő szempontból vizsgálhatjuk. Az első, a túlmintavételezés, vagyis hogy egy SLM pixelt hány CCD pixel fed le. A leggyorsabb holografikus adattároló rendszerek pixel illesztett SLM CCD párt használnak, de ennek eltalálása, beállítása problémás [77,78,79]. Mi más utat választottunk, egy SLM pixelt kb. mint $3,2 \times 3,2$ CCD pixel fed le. Modellemmel ennek a túlmintavételezésnek a hatását is meg lehet vizsgálni, de ez elsősorban kódolási kérdés, így ennek a dolgotat kereteiben nem foglalkozom vele.

A második szempont a CCD detektornak a kitöltési tényezője. A HMC rendszerben használt 3,22-szeres túlmintavételezés mellett a kitöltési tényező növelése szimulációim szerint nem hoz javulást a nyers BER-re nézve. Szerepe mégis lényeges a rendelkezésre álló kevés fényintenzitás jobb kihasználásában, az írási és olvasási idő csökkentésében.

A leglényegesebb a CCD zaja és dinamikai tartománya. A HMC rendszer jelenlegi detektora és elektronikája annyira zajos, hogy kb. csak négy értékes bitet ad vissza a szokásos 8-10 bit helyett és így a dinamikai tartománya is nagyon kicsi. A beérkező képen alacsony intenzitásokat elnyomja a zaj, de ezenkívül a kis dinamikai tartomány is levágja a magas intenzitásokkal együtt, a maradék intenzitás tartományt pedig durván kvantálja a CCD. A jelenlegi beállításokkal a CCD a lehető legjobban kiértékelhető képet adja, a rekonstruált kép lehető legnagyobb területén. Azonban, mint például a 50. ábra is mutatja ez nem mindig elég. Ezen a korai időkből származó rekonstruált hologramon a szélek dekódolhatatlanok. A CCD beállításával el lehet érni azt is, hogy ugyanezen a képen a szélek legyenek kiértékelhetőek, de akkor a közepe megy telítésbe és válik kiértékelhetetlenné. Ez azt mutatja, hogy az optika átvinné a jelet csak a CCD nem képes felfogni. Nagyobb dinamika tartomány esetében a széleken is vissza lehetne nyerni az adatokat. Ehhez nem készítettem szimulációt, az én modellemben ilyen képeket nem vizsgáltam. Az egyik lehetséges továbbfejlesztése a

modellnek a dinamikus küszöbérték használata a kiértékeléskor, amely pont az ilyen változó intenzitásokat hivatott követni.



50. ábra Rekonstruált hologram a korai időkből, amelyen jól látható a CCD kis dinamikai tartománya, a jel a széleken dekódolhatatlan.

5.4 A javasolt optimális rendszer és az eredmények

Eddig az egyes paraméterek hatását vizsgáltam, a többi hatástól a lehető legjobban elkülönítve. Az egyes változók hatásainak ismeretében globálisan is megvizsgálom a rendszert, hogy az összes változó optimális értékeinek beállítása után együttes hatásukat figyelembe véve ellenőrizni és finom hangolni tudjam az eredményeket.

A rendszer kiinduló paramétereit a 6. táblázat táblázatban foglaltam össze. A táblázat másik két oszlopában a jelenleg megvalósult rendszert, és az általam javasolt rendszert mutatom be. Az írási idő nagyban függ az alkalmazott tároló anyag típusától, vastagságától, ezért a megadott értékek változhatnak, de arányaikban hasonlóak.

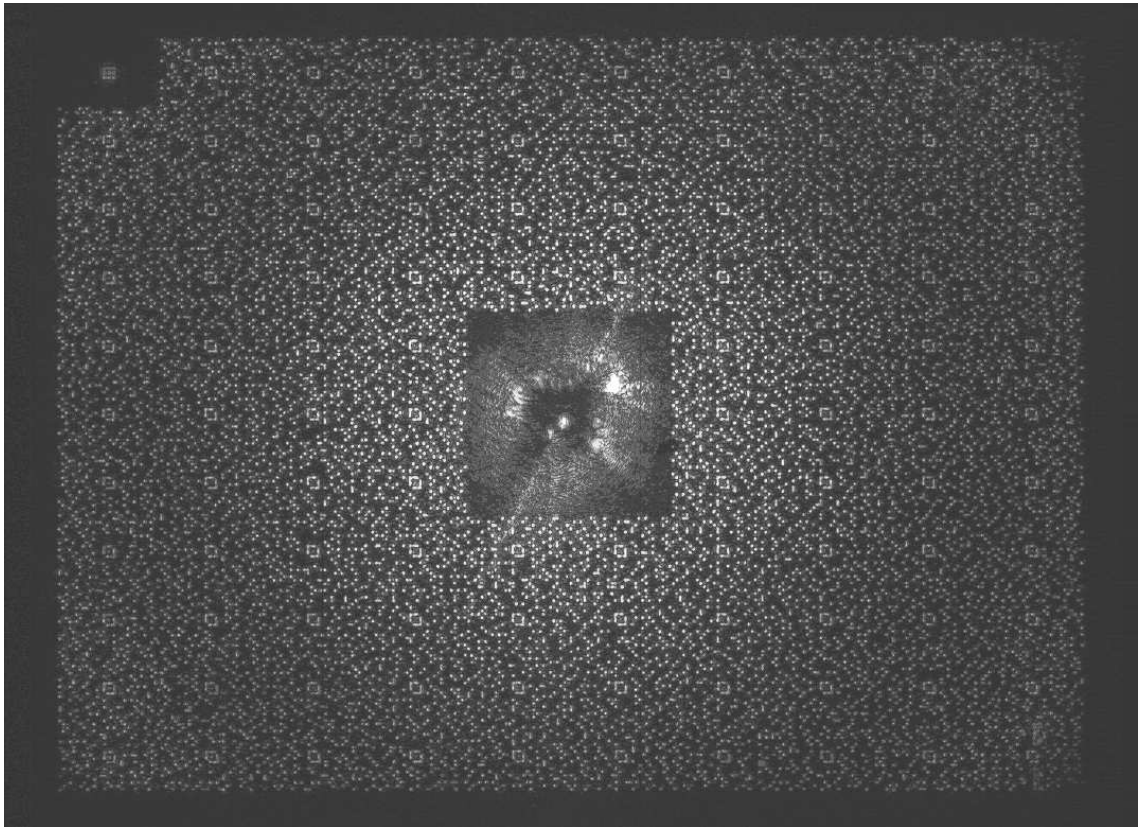
A megengedhető nyers BER értéke 0,01 körül van, a jelenlegi rendszer 0,011 nyers BER értékkel még megfelelően működik. Ebből a nyers BER értékből a korrelációs kiolvasás hibajavítással még el tudja érni a kívánt 10^{-12} felhasználói BER-t.

Megvizsgáltam a javasolt rendszer paramétereinek együttes hatását. Ezekkel megvizsgáltam a lehetséges hologram méretet, amely a 0,01 nyers BER elérését lehetővé teszi. Ez ebben az esetben is $1,4 \times D_N$ apertúra rekesz méretnek adódott. Az eredmények szerint ez a paraméterkombináció megfelelő működést biztosít a rendszernek, beállításával elérhető a 0,01 nyers BER, 0 felhasználói BER, $1,2 \text{ bit} / \mu\text{m}^2$ adatsűrűség. Az Ezen kombinációval elérhető írási idő becslésem szerint kb. negyede a kiindulásinak.

A HMC rendszer megvalósult állapotában, mint látható már felhasználtuk eredményeim egy részét. Példaképp a rendszerben felvett és rekonstruált hologram képét mutatja a 51. ábra. Remélem a közeljövőben megvalósuló további fejlesztések során még több eredményem kerülhet be a rendszerbe, ezáltal tovább javítható annak teljesítménye.

Tulajdonság	Kiindulási állapot	Megvalósított HMC rendszer	Általam optimalizált rendszer
Adatok megjelenítésében a szűrkeszintek száma	2 (bináris)	2 (bináris)	2 (bináris)
Alkalmazott kódolás	3-16 (19 % fehérarány)	3-16 (19 % fehérarány)	3-16 (19 % fehérarány)
Referencia nyaláb	Közel sík	Közel sík	1,5 × hologram sugár sugarú Gauss nyaláb
Hologram méret	1,8 × D_N	1,4 × D_N	1,4 × D_N
Hologramok között kimaradó távolság	NA	0	0
Hologram alakja	négyzet	kör	kör
SLM kitöltés	50 % × 75 %	50 % × 75 %	90 % × 90 %
SLM kontraszt	20	20	50
Adatok az SLM-en	téglalap alakban	téglalap alakban	kör alakban
Használt SLM pixelszám	62 400	62 400	108 644
Adatsűrűség	0,4 bit / μm^2	0,8 bit / μm^2	1,2 bit / μm^2
Nyers BER	0,001	0,011	0,01
Írási idő	90 sec/hologram *	100 sec/hologram *	25 sec/hologram *

6. táblázat A kiinduló, megvalósított és általam ajánlott rendszerek főbb jellemzői, és az eredmények.
 (*: Az írási idő nagyban függ az alkalmazott tároló anyag típusától, vastagságától, ezért a megadott értékek változhatnak, de arányaikban hasonlóak.)



51. ábra Az HMC rendszerben felvett hologram rekonstruált képe.
Nyers BER = 0,011; felhasználói BER = 0; adatsűrűség = 0,8 bit / μm^2 .

6 Új módszerek a Fourier síkbeli intenzitás-eloszlás simítására, és ezáltal a Fourier hologramok hatásfokának javítására

Ebben a fejezetben a 4. tézisemet fejtem ki. A hologram síkjában fellépő intenzitáscsúcsok simítására megalkottam egy új eszközt, a véletlen alaphálós kötött fázislépésű négyszintes fázismaszkot. A különböző intenzitás simító módszerek (fázismaszkok, axikon, defókuszálás) összehasonlító elemzését elvégeztem, amely alapján az új fázismaszk mind a nagy intenzitású csúcsok simításában, mind a rendszerben elérhető bit hiba arány és írási sebesség szempontjából optimális.

Először áttekintem a szakirodalomban megtalálható módszereket és azok elméletét, majd kifejtem az általam kifejlesztett algoritmusokat. Részletezem a véletlen alaphálós kötött fázislépésű négyszintes fázismaszkot. Ennek használhatóságának bizonyítására a HMC rendszer általam tervezett fázismaszkjának kísérleteit mutatom be. A különböző típusú fázismaszkokat és simítási módszereket összehasonlítottam, amely alapján az algoritmusaim alkalmazásával készített fázismaszkokkal megfelelő simítás érhető el. Kutatásaim során ilyen mélységű összehasonlítást sem találtam a szakirodalomban.

6.1 Az eddig használt simítási eljárások

A Fourier hologramokon alapuló adattárolás nagy adatsűrűséget tesz lehetővé azáltal, hogy az adatok spektruma egy kompakt tárgynyalábbá alakítható. De az adatokban illetve az adatok megjelenítésében előforduló periodikusságok nagy intenzitású csúcsokat hoznak létre a spektrumban.

Ha egy általános SLM-et használunk az adatok megjelenítésére, akkor a kétdimenziós transzmissziós függvényét az (x,y) síkon a következőképpen írhatjuk fel [22]:

$$t(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{P} - m\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y}{P} - n\right), \quad (6.1)$$

ahol az $M \times N$ adatpixelt tételeztünk fel P pixelrács mérettel, 100 %-os kitöltéssel. a_{mn} az (m,n) helyen levő SLM pixel transzmissziója, pl. bináris esetben 0 vagy 1 értékkel vagy szűrkeskálával. (Hasonló kifejezéssel leírható a nem tökéletes kitöltés is.) Ennek a Fourier transzformáltja az (f_x, f_y) frekvenciasíkon:

$$u(f_x, f_y) = k \operatorname{sinc}(f_x P) \operatorname{sinc}(f_y P) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} \exp[-j2\pi(mf_x + nf_y)P], \quad (6.2)$$

ahol k a megfelelő konstans. Az intenzitás ebben a síkban:

$$I(f_x, f_y) = u \cdot u^*. \quad (6.3)$$

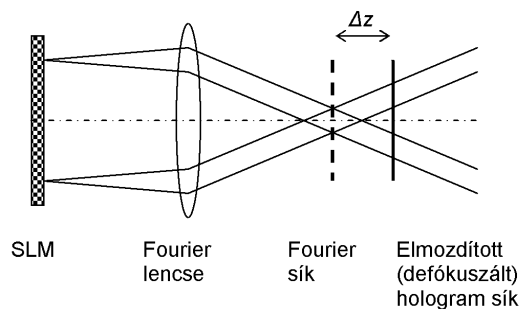
Ha f_x és f_y 0, vagyis a transzformált közepét nézzük, látható az egyenszintnek megfelelő csúcs, amely $\left(\sum \sum a_{mn}\right)^2$ nagyságával arányos.

Ezen csúcs rögzítése lehetetlenül nagy dinamikai tartományt követelne a tároló anyagtól, vagy telítésbe viszi azt. A telítés hatásait, pl. diffrakciós hatások csökkenés, jel romlása, stb., a 4.3. fejezetben mutattam be, itt ezen kívül azt emelném ki, hogy a tárgy / referencia intenzitásarány mérését és beállítását is nehezíti ez a csúcs. Tehát szükséges valamilyen simítási eljárást használni a hologram rögzítése során.

A szakirodalom három fő csoportba osztja a simítási módszereket, a defókuszálás, a fázismaszk és az axikon, és a módszerek kombinációja is lehetséges. Ezeknek az alapelveit mutatom be a következő alfejezetekben. A részletekre itt nem térek ki, a további fejezetek tartalmazzák majd a simító eljárások konkrét összehasonlítását kísérleti eredményekkel.

6.1.1 A defókuszálás

A defókuszálás során a hologramot nem a Fourier síkban rögzítjük, hanem attól távolabb, lásd a 52. ábra. Ez, mint az ábrán is látható megnöveli a hologram méretét, viszont ezzel együtt a központi csúcs, és a többi csúcs területét is. A csúcsok által hordozott intenzitás így nagyobb területen oszlik el, tehát nem okoznak olyan kiugró intenzitásmaximumokat. A defókuszálás leírásához Fresnel közelítés szükséges [52].



52. ábra Defókuszálás elvi vázlata

A hologram és a csúcsok méretének a növekedése kis elmozdulásokra arányos a Δz elmozdulással:

$$r' = r + \frac{D}{f} \Delta z, \quad (6.4)$$

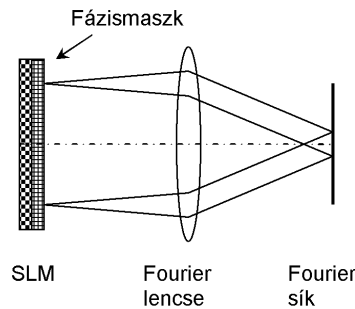
ahol f a Fourier lencse fókusztávolsága, D a lencse átmérője. Az intenzitáscsúcsok csökkenése arányos az új méret négyzetével.

A defókuszálás előnye tehát az egyszerű megvalósítás, hátránya az adatsűrűség csökkenése, a hologramméret növekedése miatt.

6.1.2 A fázismaszk

A fázismaszkot dolgozatomban már sok helyen említettem, hiszen a jelenlegi HMC rendszer ezt az eszközt használja. Itt a fázismaszk működésének elméleti alapját, és fő típusait mutatom be, a részletekre még bőven kitérek a továbbiakban. A fázismaszkok

vizsgálatáról bővebben a következő hivatkozásokban lehet olvasni [80-84]. Egy elméletileg lehetséges, de gyakorlatban nehezen használható elrendezést mutat be a 53. ábra.



53. ábra A fázismaszk működésének elvi vázlata

A fázismaszk az SLM pixeleihez úgynevezett véletlen fázistagokat ad hozzá, amelyeket jelöljön $\Phi(m,n)$. Ezzel a (6.1) kifejezés:

$$t(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} \exp[j\Phi(m, n)] \text{rect}\left(\frac{x}{P} - m\right) \text{rect}\left(\frac{y}{P} - n\right). \quad (6.5)$$

És a Fourier transzformáltja, (6.2) ezzel a fázistaggal:

$$u(f_x, f_y) = k \text{sinc}(f_x P) \text{sinc}(f_y P) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} \exp[-j2\pi(mf_x + nf_y)P + j\Phi(m, n)]. \quad (6.6)$$

Ha $\Phi(m,n)$ megfelelően véletlenszerű, akkor a csúcsok energiája szétszóródik. Az $f_x = f_y = 0$ térfrekvencián a $\sum \sum a_{mn} \exp[-j\Phi(m, n)]$ tag akár nulla is lehet. Az SLM-en áthaladó intenzitás ekkor közel egyenletesen oszlik meg a P pixelrác méretnek megfelelő sinc^2 függvény alatt.

A fázismaszk tehát nem növeli a hologramméretet, hanem jobban kihasználja a rendelkezésre álló területet. Az SLM pixelekhez adott fázisoknak azonban negatív hatása is van, destruktív interferenciát, azaz zajt okoz az eltérő fázisok határánál. Ennek bemutatására vegyünk két pixelt, amelyeknek megfelelő rect függvényeket jelölje R_1 és R_2 . A két pixel között a fáziskülönbség legyen Φ . A rendszer pont szórás függvényét az egyszerűbb leíráshoz jelöljük H -val, a konvolúciót pedig jelölje \otimes . Ekkor a két pixel eredő amplitúdója:

$$t' = [R_1 + R_2 e^{j\Phi}] \otimes H. \quad (6.7)$$

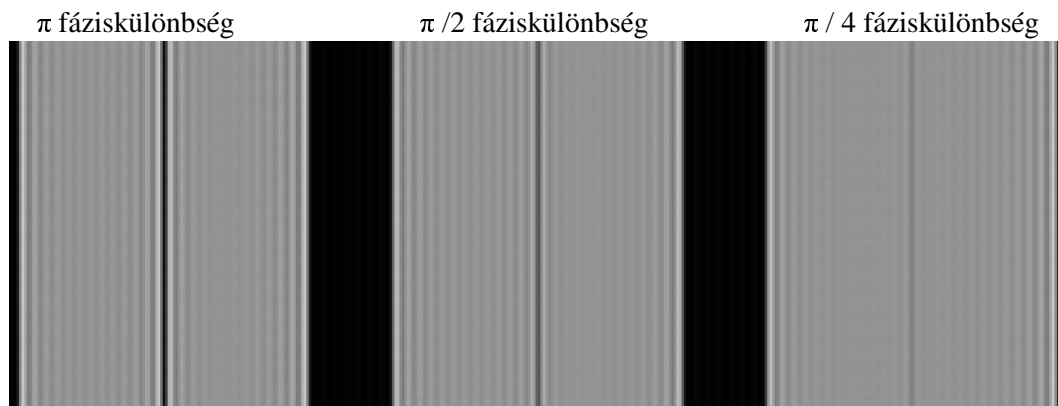
Az eredő intenzitás:

$$I_\Phi = t' t'^* = (R_1 \cdot H)^2 + (R_2 \cdot H)^2 + 2 \cos(\Phi) (R_1 \cdot H) (R_2 \cdot H), \quad (6.8)$$

ahol az utolsó tag az interferencia a két pixel között. Ha ezt összehasonlítjuk a fázismaszk nélküli, vagyis a $\Phi = 0$ esettel, az intenzitásváltozás a következő alakba írható:

$$\Delta I = I_0 - I_\Phi = 2[1 - \cos(\Phi)] (R_1 \cdot H) (R_2 \cdot H). \quad (6.9)$$

Ez az intenzitáskülönbség legnagyobb $\Phi = \pi$ esetben, tehát a zaj szempontjából ez a legrosszabb eset. A különböző Φ által okozott destruktív interferencia mint egy fekete vonal jelenik meg a pixelek között. Ezt szemlélteti a 54. ábra.



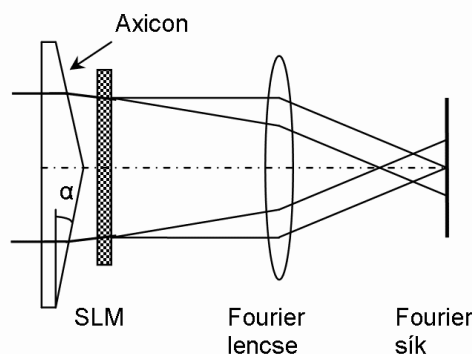
54. ábra Különböző fáziskülönbségek által okozott destruktív interferencia megjelenése teljesen világos pixelekkel fedett területeken (anyagmodell nélkül készített szimuláció).

Hogy szabályozzuk a fázismaszk által okozott zajt, úgynevezett pseudo-véletlen fázismaszkokat is alkalmaznak, amelyekben megkötik a lehetséges fáziskülönbségeket. Tehát nem használnak π fáziskülönbséget, hanem pl. $\pi/2$ vagy $\pi/4$ különbségeket, de ennek megfelelően nem a P pixelrácshoz, hanem $2P$ vagy $4P$ rácshoz megfelelő kisebb sinc^2 függvény alatt szóródik szét a csúcsok intenzitása.

A fázismaszk használata során az elkészítési, pozicionálási és diffrakciós szempontokat is figyelembe kell venni, amelyek további nehézségeket okoznak.

6.1.3 Az axikon

Az axikon a fázismaszkhoz hasonlóan egy külön fázismoduláló eszköz. Ez egy nagy nyílásszögű kúp, amely körkörös, a pixelektől függetlenül változó fázist visz a rendszerbe [85]. Gyártása az aszférikus lencsékhez hasonlóan lehetséges, beillesztése a rendszerbe a fázismaszkkal ellentétben nem igényel nagy pontosságot. Elméleti vázlatát a 55. ábra mutatja be.



55. ábra Az axikon működésének elvi vázlatja

Az axikon hatására a csúcsok körökké változnak, tehát energiájuk nem egy pontban összpontosul, hanem egy körvonal mentén. Az axikon jellemzéséhez az ábrán α -val jelölt szöveget használom, ezt fogom a továbbiakban axikon szögnek nevezni.

6.2 Új algoritmusok fázismaszkok tervezéséhez

A HMC rendszer tervezői egy fázismaszk alkalmazását választották a hologram intenzitás eloszlásának simítására. A fázismaszk megtervezése az én doktoranduszi munkám részét képezte. A szakirodalomban, mint az előző fejezetben bemutattam, megtalálható a fázismaszk elmélete és főbb típusai. De a tervezés algoritmusai, lehetőségei nem. Ezért ebben a fejezetben bemutatom az általam alkotott algoritmusokat, az általuk tervezett fázismaszkok előnyeivel és hátrányaival. A HMC rendszerhez tervezett fázismaszk leírása megtalálható a [10] közleményben, az alkalmazásával elért javulást pedig a [4,6] közleményekben jelentettem meg.

6.2.1 A fázismaszk felépítése és jellemzése

A fázismaszkok alapja egy üveg hordozó lemez. (A HMC rendszerben 2 mm vastag üveget terveztek az optikai út számolásánál, amelyből 1 mm vastag hordozón helyezkedne el a maszk, másik 1 mm vastag védő üveggel fedve.) A hordozó felületére ráépítjük, vagy belemarjuk a fázismaszk fáziskülönbségeinek megfelelő vastagságot, lépcsőket. Ezt általában valamilyen litográfiával tehetjük meg. A tervezésben tehát a fázismaszk blokkjait kell kijelölni, a kívánt fázisváltoztatással. Blokknak nevezem a fázismaszk azon egységeit, amelyek valahány SLM pixel területét fedik le, és amelyen belül nem változik a fázis. Az algoritmusnak is ezeket a blokkokat kell megadnia. A fázismaszk felületét a végén antireflexiós felülettel kell ellátni. A fázismaszk vázlatos rajzát mutatja a 56. ábra.

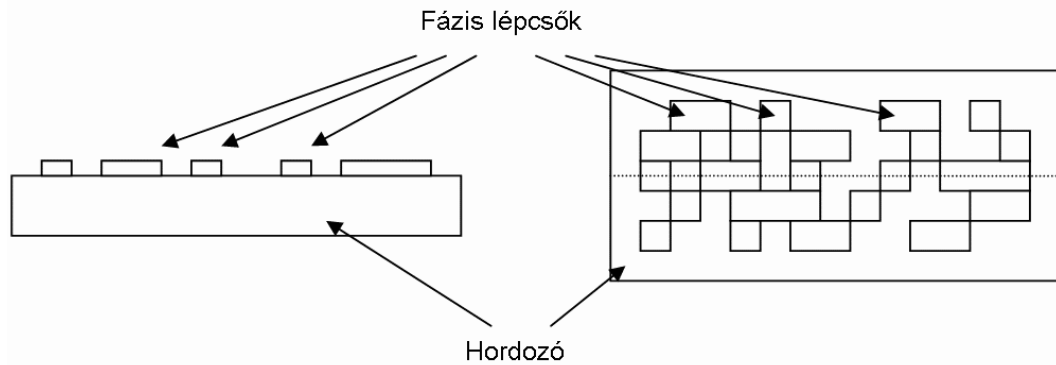
Legyen L fázismaszk fázislépcsőinek a száma, nézzük az l -edik lépcsőt, ahol $l = 0, 1, \dots (L - 1)$. Ekkor a fázis változtatása az alapszinthez ($l = 0$) képest:

$$\Phi = 2\pi \frac{l}{L} . \quad (6.10)$$

A fázismaszk fázislépcsőjének a vastagsága:

$$h = \lambda \frac{l}{L(n-1)} , \quad (6.11)$$

ahol λ a fény hullámhossza, szintű n a fázislépcső anyagának törésmutatója, a levegő törésmutatóját pedig 1-nek vettem. Szükséges feltétel, hogy a lépcső és a hordozó törésmutatója közel azonos legyen, a reflexiók csökkentése érdekében.



56. ábra A fázismaszk felépítésének vázlata keresztmetszetben és felülnézetből.

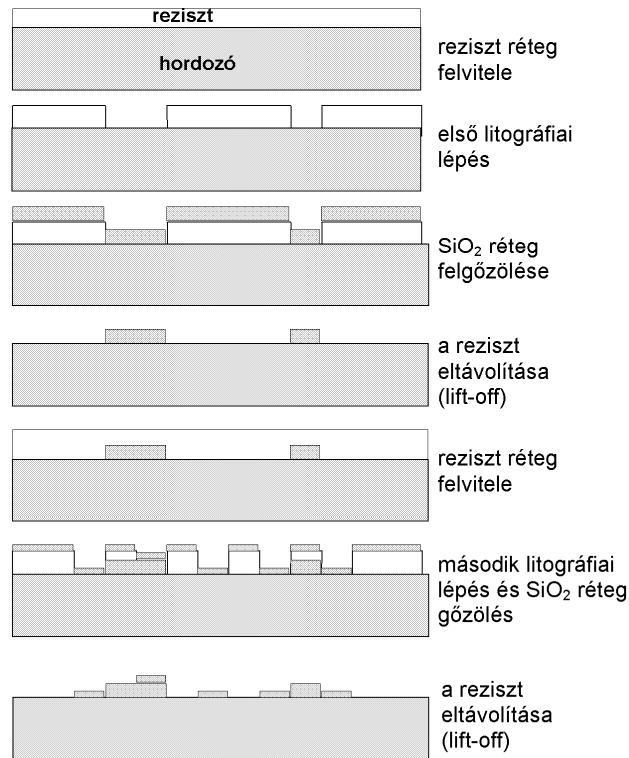
A fázismaszkok jellemzéséhez két változót használok. Az első a BER, amely tulajdonképpen önmagában is elég lenne a jellemzéshez, mert tartalmazza a maszk által okozott zajt, és a maszk simító hatását is, az anyagmodell telítődésének felhasználásával. A másik változó konkrétan a fázismaszk simító hatását jellemzi a Fourier síkban, ezt Q -val fogom a továbbiakban jelölni, és a következőképpen definiálom:

$$Q = \frac{I_{\max}}{I_{\text{átlag}}}, \quad (6.11)$$

ahol $I_{\text{átlag}}$ a teljes hologram területre mért átlagos intenzitás, I_{\max} pedig a legnagyobb csúcs maximális intenzitása. Ez az érték minél kisebb, annál simább intenzitás eloszlást jelent, annál kevésbé ugranak ki a csúcsok az átlagból. Tehát egy jó fázismaszkot kis BER és kis Q jellemez. A fázismaszkok vizsgálata során a két változót egy grafikon két tengelyén ábrázolom, ekkor egy fázismaszkot egy pont jellemez, ezt nevezem a továbbiakban „maszktérképnek”.

A fázismaszkokat csoportosíthatjuk fázisszintjeik száma és blokkméretük szerint. A gyártás során 2, 4, 8, stb. fázisszintű fázismaszkokat lehet könnyen készíteni, mert egy litográfiai lépéssel el lehet készíteni a π fáziskülönbségnek megfelelő lépcsőt, amely két szintet ad, majd a következővel ezt folytatni lehet $\pi/2$ fáziskülönbséggel, amely már négy szintet ad, majd $\pi/8$ a nyolc szinthez, stb. Négy fázisszint esetén a litográfiai eljárás vázlatát a 57. ábra mutatja. Más gyártástechnológiával lehetne készíteni más szintszámot is, de mint látni fogjuk nem nagyon érdemes. A blokkok méretét a lefedett SLM pixelek számával jellemzem. Ez általában egy téglalap alakú terület, $n_x \times n_y$ alakban írom fel.

A tervezéshez tehát a következőt ajánlom: a maszktérkép segítségével meg kell vizsgálni a különböző fázislépésű és blokkméretű maszkokat, ki kell választani az adott helyzethez megfelelőt, majd a bemutatott tervezési algoritmusokkal el lehet készíteni.



57. ábra A négy fázisszintű fázismaszk elkészítésének vázlatos bemutatása litográfiai lépésekkel.

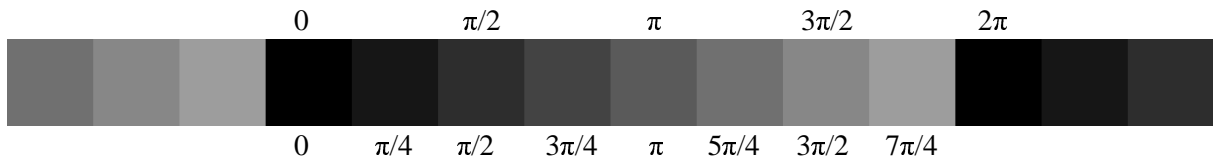
6.2.2 Véletlen fázismaszkok tervezése

Kétszintes fázismaszkok esetében a tervezésre a következő algoritmust használom. Mivel kétféle fázisból áll a maszk, ezért véletlen számok segítségével eldöntöm, hogy egy blokk milyen fázist kapjon. A szükséges feltétel, hogy a különböző fázisú pixelek száma megegyezzen, és ez nemcsak a világos pixelekre, hanem az SLM véges kontrasztja miatt a sötét pixelekre is kell, hogy teljesüljön. Ezért a fázismaszk tervezése szorosan kapcsolódik az adatok kódolásához is.

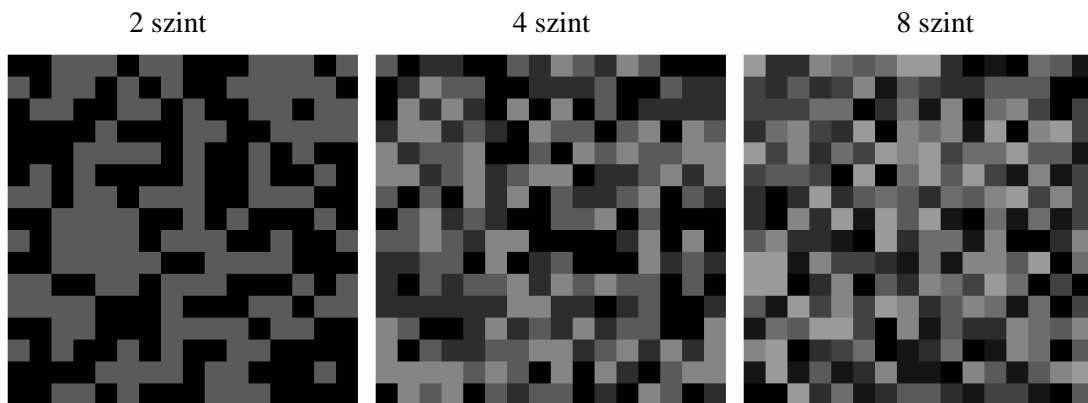
A blokkok megválasztásánál is célszerű az adatblokkokhoz alkalmazkodni. A HMC rendszer esetében például az adatokat 3×4 pixeles blokkokban ábrázoljuk, és a blokkokat korrelációval olvassuk ki. Ezért nagyobb BER növekedést okozhat egy a szimbólumon áthaladó fázisváltozás vonal a maszkon, mint a szimbólumok határán. Tehát itt 3×4 , vagy többszöröseit célszerű használni. Az ilyen fázismaszkot adatokhoz igazított fázismaszknak nevezem.

Hasonló módon lehet többszintes véletlen fázismaszkokat is tervezni. Itt több fázisszint közül kell véletlenszerűen sorsolni, de a feltétel ugyanúgy az, hogy közel azonos számú pixelt kapjunk minden fázisszinten.

A vizsgált véletlen fázismaszkokból mutat egyet-egyét a 59. ábra. Ezek a különböző szintszámú 8×8 pixel blokkos maszkok. A fázisokat színek jelölik, amelyek értelmezését a 58. ábra mutatja. Fokban értelmezve egy szürkesség érték a 256-os skálán két fokot jelent. Így 180 szürkességgel leírható a 360° (2π). Az ábra azt is szemlélteti, hogy a fázis „körbe záródik”, vagyis a 2π és a 0 fázisok megegyeznek.



58. ábra Fázismaszkok ábrázolásában használt színek jelentése, felül a négy szintes maszkok által használt színek, alul a nyolc szinteseké. A skála mindkét irányban folytatódik, jelezve, hogy a fázis periodikus.



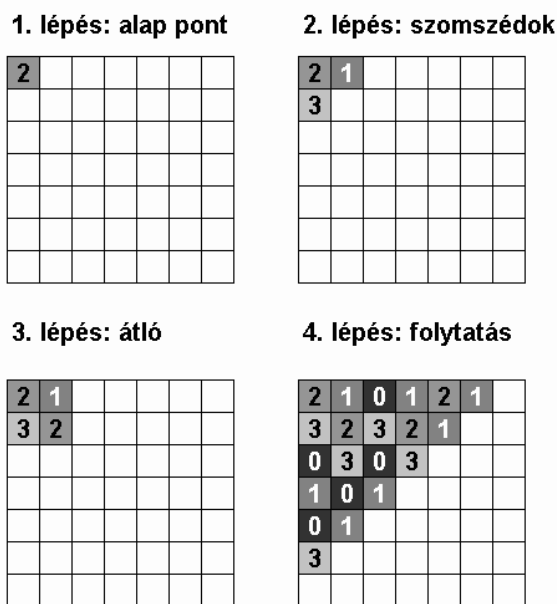
59. ábra Példák véletlen fázismaszkokra.

6.2.3 Pszeudo-véletlen fázismaszk tervezése

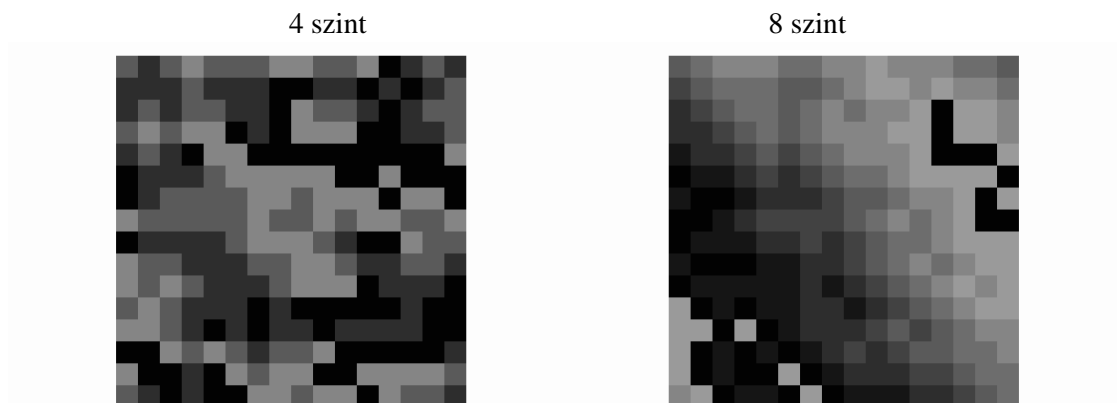
Pszeudo-véletlen fázismaszkoknál két szomszédos pixel közti fáziskülönbség nem lehet nagyobb mint egy adott érték. Ezt nevezik fázismegkötésnek, vagy kötött fáziskülönbségnek is. A maszkok tervezésénél figyelembe kell ezt venni. Két algoritmust fejlesztettem ki, az elsőt térképesnek neveztem el, a másodikat pedig véletlen alaphálós kötött fázislépésű négy szintes fázismaszkoknak.

A térképes fázismaszkoknál kiindulunk egy blokkból, és ennek szomszédait meghatározzuk úgy, hogy véletlenszerűen változtatunk 0 vagy ± 1 fáziskülönbségnyt. Így mindig megtartjuk a szükséges fáziskülönbséget. Azután, mint egy életjátékban haladunk tovább a távolabbi pixelek felé. Az algoritmusra mutat egy példát az 60. ábra. Így készítettem a fenti vizsgálatban az alap négy és nyolc szintes maszkokat. Az algoritmusnak két nagy hibája van. Először nehéz elérni, hogy azonos számú pixelt kapjunk minden fázisszinten. Ezt az elkészítés után ellenőrzöm, és ha az összesített eltérés a várt számtól meghalad 5 – 10 %-ot, akkor törölöm az elkészített maszkot és újat sorsolok. Tökéletes egyezést itt nem célszerű megkövetelni, mert a számítás a véletlen sorsolás miatt nagyon sokáig tartana. Második, súlyosabb hibája, hogy nem biztosít kellő véletlenséget, mert a kiinduló pixelből a haladási irányban csíkok keletkeznek: ha pl. az alatta levő $+1$ fáziskülönbséget kap, a mellette levő -1 fáziskülönbséget, akkor az átlósan levő pixel meg kell, hogy egyezzen vele, vagyis 0 különbségű lesz. A „csíkhúzó” hatás különösen nyolc szintes maszkoknál szembeűnő.

Térképes algoritmussal készített maszkokra mutat példákat az 61. ábra. A nyolcszintes maszknál jól megfigyelhetőek a csíkok, és hogy mennyire lassan változik a fázis. Nyolc szintes maszkoknál más algoritmusokkal is próbálkoztam, de nem vezetett jobb eredményre. Négy szintes maszkokra viszont kitaláltam egy nagyobb véletlenséget biztosító algoritmust, amelyet véletlen alaphálós kötött fázislépésű fázismaszkoknak neveztem el.



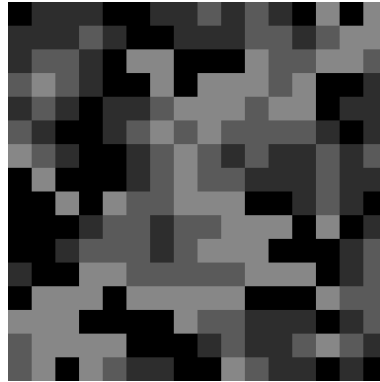
60. ábra Példa a térképes fázismaszkok készítési algoritmusának működésére. Az ábrán a fázislépcsők számát tüntettem fel, a fázisukat $\pi/2$ -vel való szorzással kaphatjuk meg.



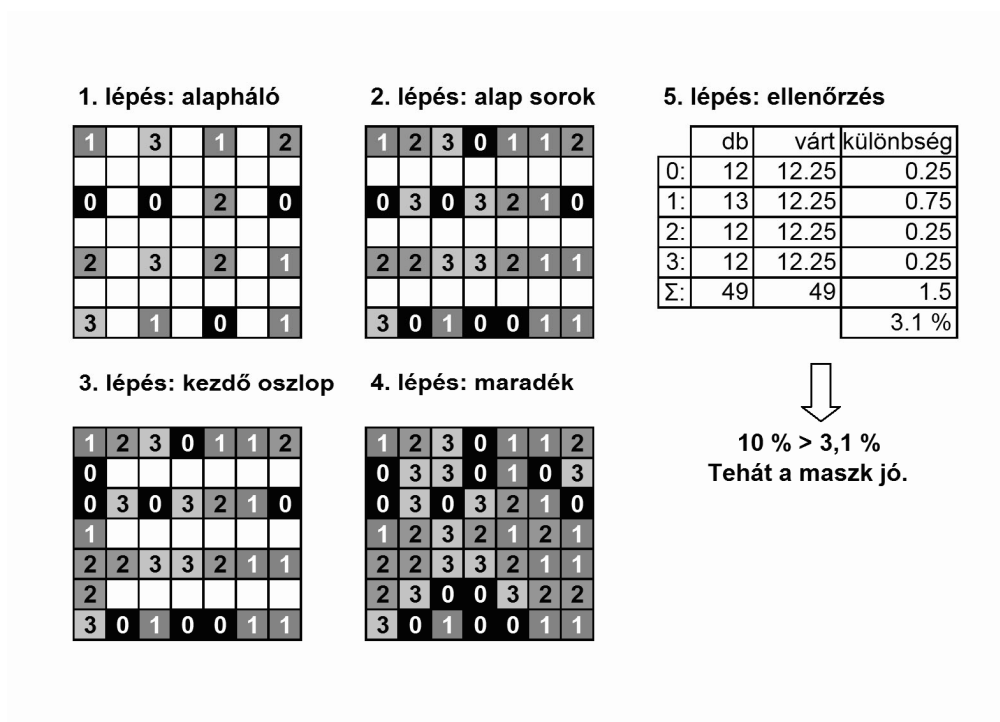
61. ábra Példák térképes algoritmussal készített pszeudo-véletlen fázismaszkokra.

A véletlen alaphálós kötött fázislépcsű négyszintes fázismaszkok tervezésének algoritmusára mutat egy szemléltető példát az 63. ábra. Az ábrán a fázislépcsők számát tüntettem fel, a fázisukat $\pi/2$ -vel való szorzással kaphatjuk meg. A tervezésben kihasználom, hogy a fázisok „körbe záródnak” 3 után 0 jön majd újra 1. Az algoritmusom szerint az 1. lépésben véletlen számokkal kisorsoljuk a síkban minden második blokk fázisát megkötések nélkül. Ez a véletlen alapháló, amely a megfelelő véletlenséget biztosítja a maszknak. A 2. lépésben a sorokban a közbülső blokkokat töltjük ki, a fáziskülönbség megkötés figyelembevételével. Minden esetben lehetséges ez a kitöltés, hiszen a fázislépcsők különbsége ebben a körkörös számtérben maximum kettő, így mindig van legalább kettő olyan érték, amely mindkét szomszédjától legfeljebb egy különbségre lesz. Ezek közül szintén véletlenszerűen sorsolok. A 3. lépésben az első oszlopot töltöm ki a 2. lépéshez hasonlóan. Majd a 4. lépésben a kimaradt sorokat töltöm fel, balról jobbra. Ekkor minden

blokkot három szomszédjához kell igazítanom, amely szintén minden esetben lehetséges, mert a négy szám közül akármelyik három szerepelne is, azok közül a körkörösén értelmezett középső mindig megfelelő. (Tehát pl. 2, 3, 0 közül a 3 a középső.) Végül ellenőrzöm, hogy a különböző szürkességű blokkok nagyjából azonos számban vannak-e jelen. Itt összesítve 5 – 10 %-ot lehet megengedni, ha ezen kívül esne a készített maszk, akkor kitörlöm, és újat sorsolok. Egy véletlen alaphálós maszkot ábrázol a 62. ábra.



62. ábra Példa véletlen alaphálós kötött fázislépésű négszintes fázismaszkra.



63. ábra Példa a véletlen alaphálós kötött fázislépésű négszintes fázismaszk készítésére. Az ábrán a fázislépcsők számát tüntettem fel, a fázisukat $\pi/2$ -vel való szorzással kaphatjuk meg.

A véletlen alaphálós kötött fázislépésű négszintes fázismaszknak a következő előnyei vannak: A véletlen alapháló mindig kellő változatosságot biztosít a szükséges simításhoz. A kitöltés minden esetben megtehető kötött fázislépéssel is, így a fázislépések destruktív hatása csökken. Tervezési algoritmus mégis egyszerűen kivitelezhető. Ezen előnyök egyedülállóvá teszik, és mint a későbbiekben bemutatom, a szimulációs eredményeim igazolják ezt.

6.2.4 Fázismaszkok vizsgálata maszkterképpel

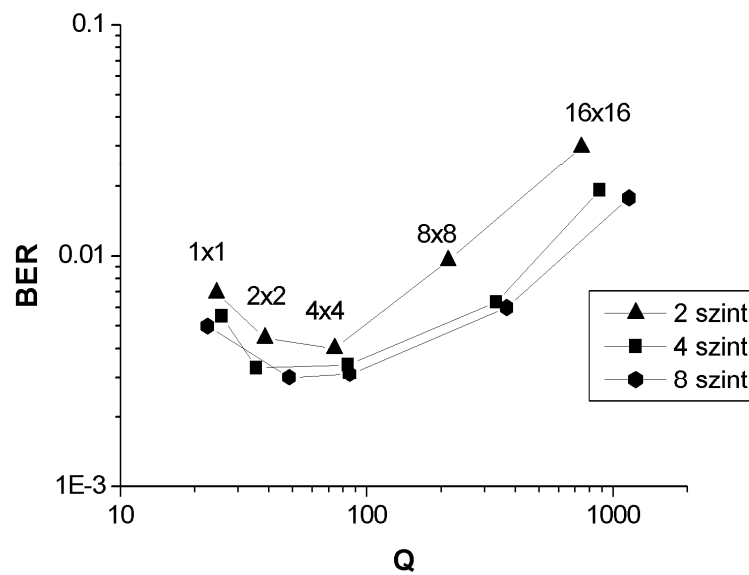
A vizsgálatban az egyszerűség kedvéért négyzetes blokkokat vizsgálok, tehát $n \times n$ nagyságú blokkokból összeállított fázismaszkot. Ezen belül is $n = 1, 2, 4, 8, 16$ értékeket. A vizsgált SLM képek 128×128 pixel méretűek, így ezek a blokkok jól illeszkednek hozzájuk. Egy vizsgálat 7 különböző SLM kép statisztikája alapján készült, amely a tendenciákat kiválóan mutatja. A szimuláció paraméterei a többi tekintetben megegyeznek a HMC rendszer jelenlegi állapotával, tehát az apertúra rekesz $1,4 \times D_N$ és kör alakú, a fehérarány 19 %-os. A kísérletben szórásokat nem ábrázoltam, mert átláthatatlanná tenné az eredményeket.

A viszonyítási alap a fázismaszk nélküli eset, amelyet nem ábrázoltam a maszkterképeken, mert elnyomta volna a lényeges tartományt. Adatai a következők: $Q = 15030$, Nyers BER = 0,32. Ez alapján el lehet képzelni a helyét, messze jobbra fent, és mint a Q paraméter bevezetőjénél írtam, egy maszk pontja minél közelebb van az origóhoz, annál jobb az a maszk.

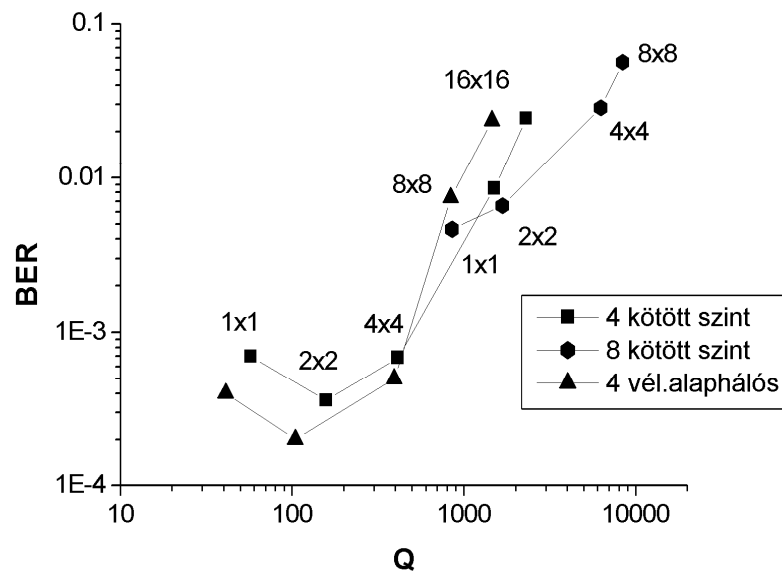
A véletlen fázismaszkok, amelyekben nem kötjük meg a fázislépést, esetét mutatja a 64. ábra. Elkészítettem a fenti összes kombinációt, amelyekből az azonos színtszámúakat folytonos vonallal kötöttem össze. Ezen vonalak semmilyen jelentést nem hordoznak, kizárólag a könnyebb láthatóság kedvéért ábrázoltam így. A grafikon és az adatok alapján megállapíthatjuk, hogy a blokkméret csökkenésének két ellentétes hatása van. Először minél kisebb a blokkméret, annál kisebb Q , vagyis annál erősebb a simítás. Ez kisebb telítődés okozta zajt és jobb diffrakciós hatásfokot jelent. Másodszor viszont, a kisebb blokkméret több fáziskülönbséget, több destruktív interferenciát okoz. Ezért minden színtszámnál megtalálható egy optimális blokkméret, amely két szintnél a 4×4 pixeles blokknál található, négy és nyolc szintnél a 2×2 pixeles blokknál van. Látható az is, hogy a négy és nyolc szintes maszkok jobb BER-t eredményeznek, mint a két szintesek, mert kevesebb a π nagyságú fáziskülönbségük.

A kötött fáziskülönbségű, pseudo-véletlen fázismaszkokat ábrázolja 65. ábra. Ezen értelemszerűen négy és nyolc szintes maszkokat ábrázoltam, amelyekben a négy szintesnél $\pi / 2$ a legnagyobb megengedett fáziskülönbség, a nyolc szintesnél pedig $\pi / 4$. A négy szintes fázismaszkokra a két algoritmusnak megfelelően két görbe látható.

Itt négy szint esetében az előzőeknél jobb BER értékeket kapunk, vagyis a π fáziskülönbség kizárása valóban jelentős javulást eredményez ebből a szempontból. A simítás tekintetében azonban romlanak az eredmények, mert nem jön létre a „megfelelő véletlenség” a fázisokban. Ez okozza a nyolc szintes fázismaszkokra kapott eredményeket is, a megkötés túl erős, nem tud a fázismaszk megfelelően simítani, így hiába nem okoz destruktív interferenciát, a telítődés a Fourier spektrum csúcaiban nagyobb zajt okoz.

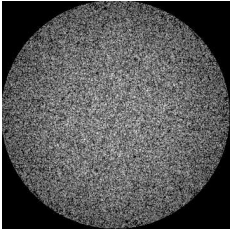
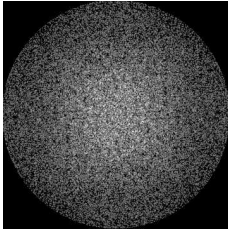
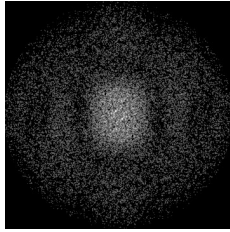
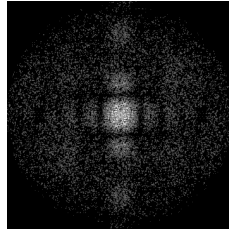
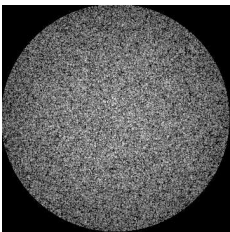
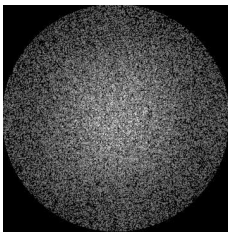
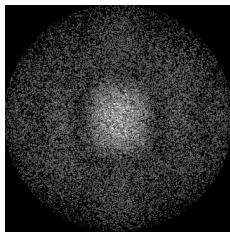
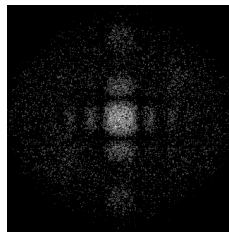
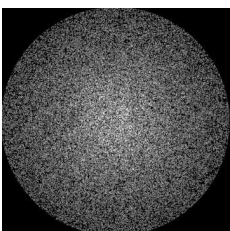
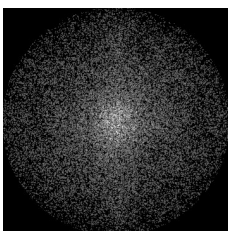
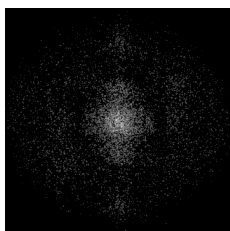
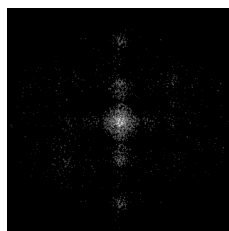
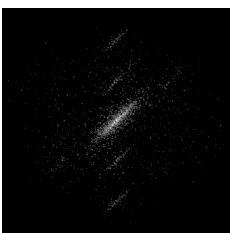
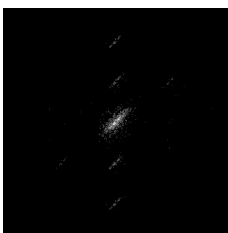
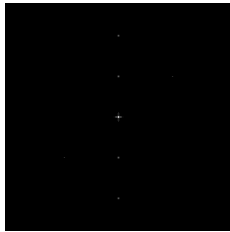


64. ábra Különböző szintszámú és blokkméretű véletlen fázismaszkok összehasonlító maszkterképe.



65. ábra Különböző szintszámú és blokkméretű kötött fázislépésű pseudo-véletlen fázismaszkok összehasonlító maszkterképe.

Végezetül a 66. ábra bemutatja a különböző fázismaszkok keltette intenzitásképet a hologram síkjában. A szimulált képeket mind a HMC rendszernek megfelelően készítettem, de más rendszerek esetében is hasonló eredményeket kaphatunk.

	1 × 1 blokk	2 × 2 blokk	4 × 4 blokk	8 × 8 blokk
2 szint véletlen				
Nyers BER:	0,0067	0,0044	0,004	0,0096
8 szint véletlen				
Nyers BER:	0,0052	0,003	0,0031	0,0064
4 szint, véletlen alaphálós				
Nyers BER:	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	0,0074
8 szint térvételes			-	-
Nyers BER:	0,0046	0,0065		
Fázismaszk nélkül:				
Nyers BER:	0,32			

66. ábra A fázismaszkok keltette intenzitáskép a hologram síkjában és az általuk elérhető nyers BER.

6.2.5 Az iteráció szerepe a fázismaszkok tervezésében

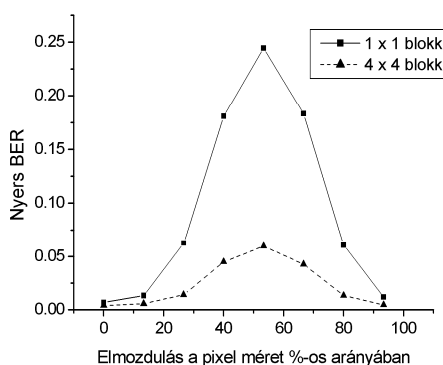
A fázismaszkok tervezésében két helyen is használok iterációt. Először amikor ellenőrzöm, hogy a különböző szűrkeségű blokkok nagyjából azonos számban vannak-e jelen. Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor újrakezdem a fázismaszk véletlenül alapuló tervezését. A nem megfelelő arányú fázismaszkok tapasztalataim alapján nem javíthatóak, mert ha megpróbáltam egy tartomány megváltoztatásával „kijavítani” az arányt, akkor elrontottam a véletlenséget. Ezért jobb az újrakezdés, még ha lassabb is.

Fontosabb szerepe van az iterációnak a fázismaszkok ellenőrzésében. Mivel a fázismaszkok tervezési algoritmusai véletlen számokon alapul, ezért a terv elkészültével nem lehet megmondani, hogy megfelelő fázismaszk lenne-e. Ekkor használom fel a modellezés nyújtotta lehetőségeket a tervezésben, és konkrét SLM képekkel kipróbálom a megtervezett fázismaszk lehetőségeit. Az egyes SLM képekre egy fázismaszk szórása 10 % körüli, ezért célszerű minél több képpel megvizsgálni a fázismaszkot. A tervezés során a minél kisebb nyers BER a cél.

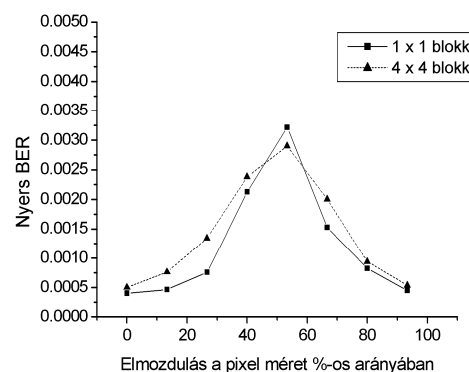
6.2.6 A fázismaszkok pozicionálási követelménye

A fázismaszk az SLM pixeleinek megfelelően változtatja a jel fázisát. Felmerül a kérdés, hogy mennyire pontosan kell a fázismaszkot a rendszerben elhelyezni, hogy megfelelően működjön. Ezt nevezem a fázismaszk pozicionálásának. Szimulációs vizsgálatot végeztem, amelyben a fázismaszkot elmozdítottam az egyik irányban, és figyeltem a nyers BER változását. A szimuláció eredményeit a 67. ábra mutatja. A kísérletben az 1×1 , 4×4 pixeles blokkméretű, kétszintes és véletlen alaphálós négy kötött szintes maszkokat vizsgáltam.

Két szintes véletlen fázismaszkok:



Véletlen alaphálós kötött fázislépésű négy szintes fázismaszkok:



67. ábra Szimulációs vizsgálat a fázismaszkok elmozdulásának hatása a nyers BER értékre.

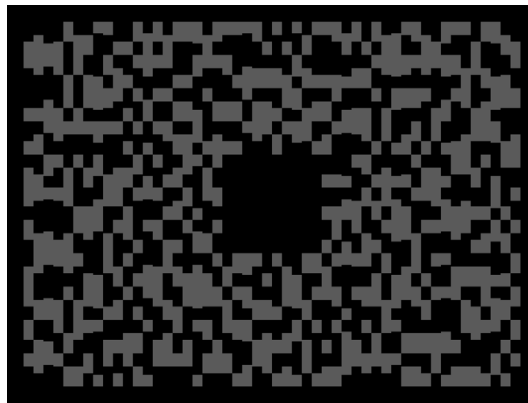
A BER megváltozásának az oka, hogy a fázismaszk vonalai tönkreteszik azon pixeleket a képét, amelyekbe belemozdulnak. A 67. ábra alapján elmondhatjuk, hogy legérzékenyebbek azok a fázismaszkok, amelyekben a π fázisváltoztatásnak megfelelő lépcső megengedett. Ezen belül is elsősorban a kisebb blokkméretűek. A nagyobb blokkméret esetében is tönkreteszik a pixeleket a maszk vonalak, de kevesebb van belőlük. Négy kötött szintes fázismaszkok érzéketlenebbek az elmozdulásra. A megengedett elmozdulási toleranciák ez alapján kétszintes maszkokra az SLM pixelméretének 10 – 15 % (HMC rendszer esetében 2 μm), négy kötött szintű maszkokra 20 – 25 % (HMC-nél 4 μm).

6.3 A HMC rendszerben jelenleg használt fázismaszk

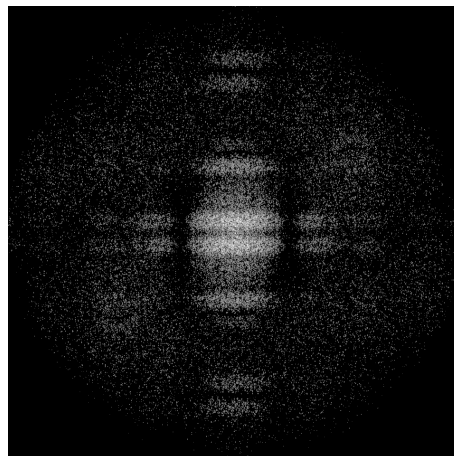
6.3.1 A fázismaszk tervezése és elkészítése

A HMC rendszer tervezésekor a holografikus tároló anyag modellje még nem áll rendelkezésre. Ezért a maszkterképek sem mutatták megfelelően az optimumot. Akkor az egyszerűbb elkészítés miatt két szintes fázismaszk mellett döntöttünk. A blokkméretet 6×8 pixelesnek választottam, és az adatok tervezett struktúrájához igazítottam. Ezért a tervezett fázismaszkban egyaránt találhatóak 6×6 , 6×8 , 6×12 pixeles blokkok is. Mivel ekkor az adatok kódolása sem dőlt még el a nagyobb blokkok a kódolásban is nagyobb szabadságot adtak.

A tervezett fázismaszkot mutatja a 68. ábra, amelyet a [6,10] közleményben bemutatunk. A maszk az SLM felhasznált területeit fedi le. Az optikai rendszerben a közepén, a „lyukas” területen halad át a referencia nyaláb, ezért itt nincs fázislépcső, és az SLM-en sem jelenítünk meg itt adatokat. A fázismaszk által keltett intenzitás képet a hologram síkjában a 69. ábra mutatja.



68. ábra A tervezett fázismaszk.

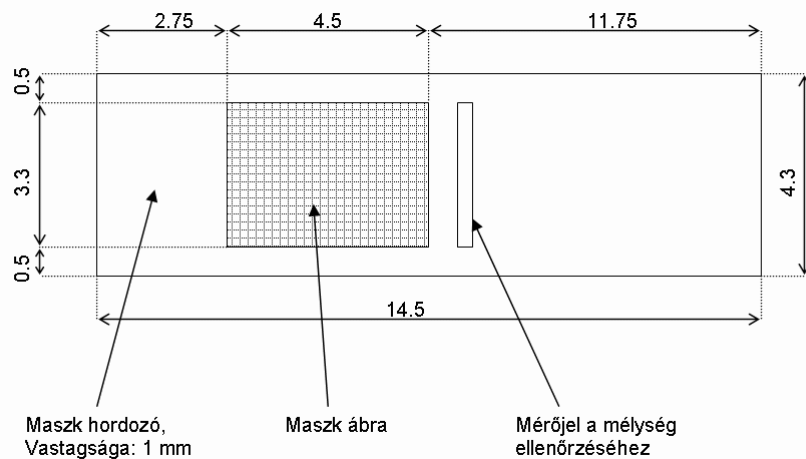


69. ábra A fázismaszk által keltett intenzitás kép a hologram síkjában.

A maszkot a véletlen fázismaszkok tervezésénél leírt módon terveztem, tehát az előre meghatározott blokkszerkezetre sorsoltam a fázisokat. Több, kb. 10 db. fázismaszkot

terveztem, ezekből választottam ki a legjobbat sok SLM képpel készített szimuláció alapján. Ezen vizsgálatokat, a terjedelmük miatt, itt nem mutatom be.

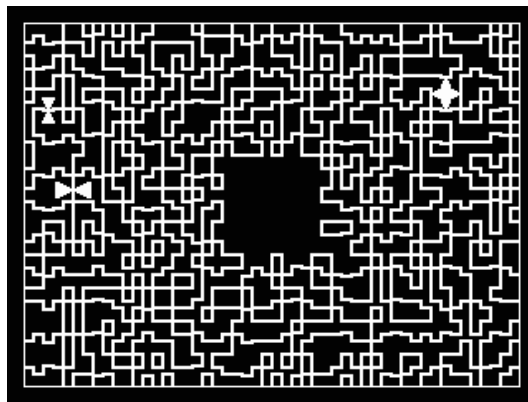
A fázismaszk gyártásához a meghatározott blokkok alapján gépészeti tervező programok által használt „dwg” fájlt készítettem. Az elkészített fázismaszk méreteit mutatja a 70. ábra.



70. ábra A fázismaszk tervezett méretei a hordozón.

A fázismaszk pozicionálásához szükséges terveket is elkészítettem. A fázismaszk vonalait az általuk okozott destruktív interferencia révén láthatjuk, ez ad lehetőséget pozicionálásra. A szükséges pontosság a 6.2.6. fejezet eredményei alapján $2\ \mu\text{m}$ mindkét koordináta irányában, és $0,02^\circ$ elfordulásra.

A fent meghatározott tűrésekre egy kétlépéses pozicionálási tervet adtam, amely során először a teljes SLM adatterület megvilágításával pontatlanabban el lehet helyezni a maszkot (lásd 72. ábra), majd a megadott jelölőket és maszkvonalakat tartalmazó SLM kép segítségével, és vonalprofilok alapján finoman tovább pozicionálni a kívánt tűrésig. Ezt a pozicionáló ábrát az 71. ábra mutatja.

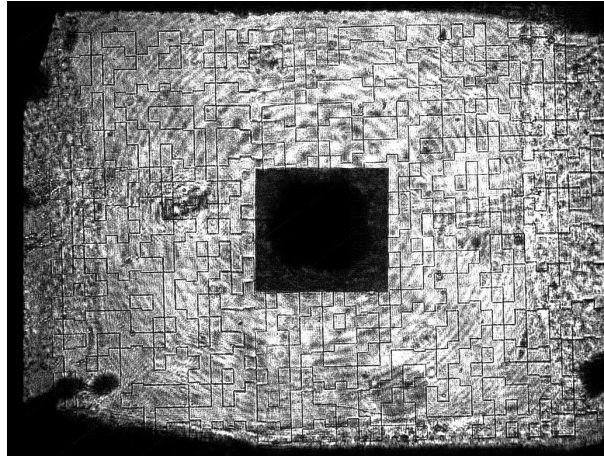


71. ábra A fázismaszk finom pozicionálására szolgáló SLM ábra.

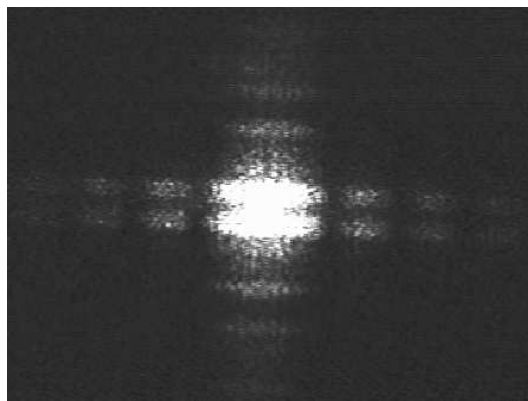
6.3.2 A fázismaszk beépítése és vizsgálata

Az elkészült fázismaszkot többféleképpen vizsgáltuk. Vizuálisan mikroszkóppal, majd megmértük a méreteit mérőmikroszkóppal, és a fázislépcsők vastagságát a mérőjelen Form talysurf profilométer készülékkel.

A mérések után a fázismaszkot beépítettük a rendszerbe. A teljesen világos SLM képpel megvilágított fázismaszk vonalait mutatja a 72. ábra. A fázismaszk diffrakciós képét pedig a 73. ábra. (A fázismaszk diffrakciós képének kísérleti és szimulációs összehasonlítását már a 4.3. fejezetben is bemutattam.)



72. ábra A teljesen világos SLM-mel megvilágított fázismaszk vonalainak képe a rendszerben (a rendszer optikai hibáival együtt).



73. ábra A fázismaszk kivetített diffrakciós képe.

A kísérletek alapján elmondhatjuk, hogy a fázismaszk a tervezettnek megfelel. A fázismaszk felhasználásában azonban akadtak nehézségek, amelyek közül a legsúlyosabb, mint már említettem a kis simító hatás. Ezt és az egyéb problémákat, a megoldásukra irányuló kutatásaimmal együtt, a következőkben mutatom be.

6.3.3 A HMC rendszer fázismaszkjának továbbfejlesztése

A fázismaszk diffrakciós képének részletesebb vizsgálata azt mutatja, hogy a kép közepén továbbra is látható egy csúc, pedig egyenlő arányban vannak 0 és π fázissal mind a világos, mind a sötét pixelek. A jelenség magyarázatát az SLM által megjelenített adatok szerkezetében, és az SLM rossz kontrasztjában találtam meg. Az SLM mérete 320×240 , amelyből az adatok 300×220 pixelt töltenek ki, középen 60×60 pixeles lyukkal. A fázismaszk csak az adatok területét fedi le. A kimaradó pixelek száma 14400, amely az összes pixelek 18,75 %-a. Ezek a pixelek a működés során sötétek, mégis az SLM kontrasztja miatt jelentős fény mennyiség jut át rajtuk konstans 0 fázissal. Ha 20-as SLM kontraszttal számolunk, ez az átjutó fény mennyiség kb. 4 %-a.

Megoldásképpen az új fázismaszkokat, kiterjesztett méretben terveztem. Tehát 320×240 pixeles méretben, és a lyuk méretét is csökkentettem 32×32 pixelre, amely az optika által minimálisan szükséges méret a referencia számára.

Ideiglenes megoldásként a megnövelt mérettel terveztem kétszintes, 3×4 pixeles blokkméretű, adatokhoz illesztett fázismaszkot. A jövőben azonban célszerű lenne áttérni a véletlen alaphálós kötött fázislépésű négyzintes fázismaszk alkalmazására. Ennek elkészítésére a kísérletek jelenleg folynak.

6.3.4 A HMC rendszer továbbfejlesztése a fázismaszk problémáinak javítására

A második felmerült probléma az optikai rendszer szerkezetéből adódott. Ha megnézzük a 6. ábra vagy a 7. ábra által bemutatott rendszert, láthatjuk, hogy a fázismaszk a rendszer apertúrája után következik. Ez pedig azt jelenti, hogy a fázismaszk pixelein létrejövő diffrakció szétszórja az apertúra rekesz képét, amely megjelenik a hologramon! A tervek szerint a hologram mérete megegyezik az apertúra rekesz méretével, tehát a kiszóródó fény mennyiség a szomszédos hologramokba töröl bele, ezáltal rontja azokat. Ez a hatás 5.3.5. fejezetben tárgyalt kérdést is befolyásolja, tehát hogy mekkora közöket kell az egyes hologramok között hagyni.

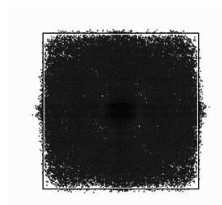
Megvizsgáltam mekkora ez a hatás. Szimulációkkal megvizsgáltam, a fényintenzitás hány százaléka szóródik ki az apertúra rekesz képén kívülre. Az eredmények azt mutatják, hogy minél erősebb a fázismaszk simító hatása, annál nagyobb arányban szórnak. A kiszóródás mértékét grafikusán is szemlélteti a 74. ábra. Az eredmények a következők lettek:

- Jelenlegi fázismaszk: 6.085%
- 2 szintes 1×1 pixel blokkos fázismaszk: 24.797%
- 2 szintes 2×2 pixel blokkos fázismaszk: 15.952%
- 4 szintes 1×1 pixel blokkos fázismaszk: 19.249%

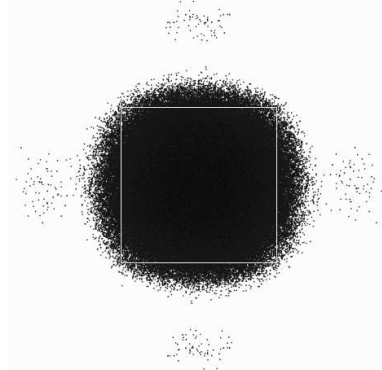
Ezt a problémát nem lehet a fázismaszk változtatásával megoldani. A jelenlegi fázismaszkkal ez a 6 % kiszóródás a rendszerben nem okoz komoly hibát, a hologram pozicionálási tűrései elviselik ez a hatást is. Azonban ha javítanánk a fázismaszkot, és egy erősebben simítóra cserélnénk, akkor a kiszóródást figyelembe kell venni. Egy lehetséges megoldás, a fázismaszk és az SLM összeépítése egy elektro-optikai elembe. Ilyen eszköz gyártása a lehetőségeinken messze túlmutat, a fázismaszkot ráragasztása, vagy más módon rögzítése az SLM üvegjére pedig a pixelek diffrakciója miatt nem lehetséges. Egy lehetséges megoldás egy új optikai rendszer, amelyben a fázismaszk megelőzi az SLM-et és egy képáttevő optikával vetítjük a fázismaszk képét az SLM-re, 75. ábra. Modellem képes ennek

az elrendezésnek a vizsgálatára is. A fázismaszk pozicionálása azonban továbbra is probléma, és az optikai rendszer is bonyolultabb.

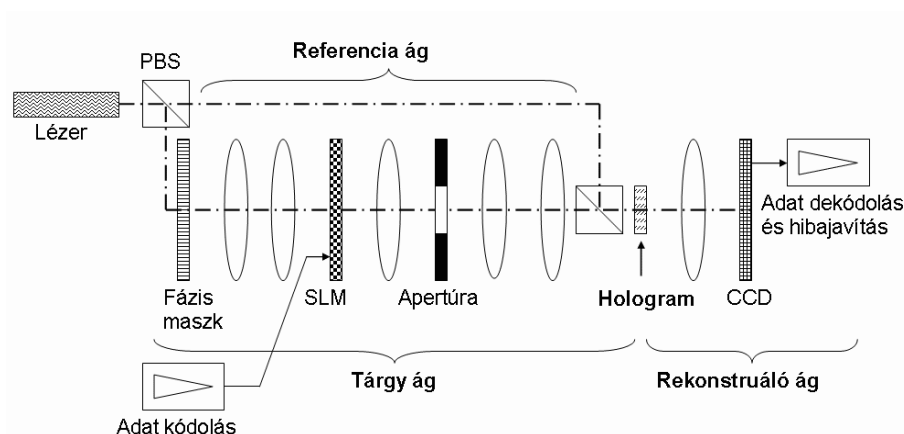
Jelenlegi fázismaszk



2 szintes 1 × 1 pixel blokkos fázismaszk



74. ábra A fázismaszkok által kiszórt intenzitás grafikus szemléltetése. Az ábrákon látható négyzet az apertúra rekesz méretét szemlélteti, a feketesség pedig a maximális intenzitás 1 %-ának megfelelő mennyiségű intenzitás meglétét mutatja.



75. ábra A vizsgált optikai rendszer kiterített vázlatja, amelyben a fázismaszk az SLM előtt található.

6.4 A simítási módszerek összehasonlítása és javasolt új eszközök

Az előző fejezetben bemutattam a fázismaszk tervezését, használatát és továbbfejlesztését a HMC rendszer esetében. Most megvizsgálom, hogy milyen előnyei, hátrányai lennének másfajta simítási módszerek használatának. A dolgozat terjedelme miatt nem mellékelek egy teljes és részletes elemzést, azt az adott rendszerre kell elvégezni tervezéskor, hanem a módszerek hatásaira és ezek szerepére koncentrálok.

A defókusz és az axikon számolása és szimulálása nagyon függ az optikai rendszer geometriájától. A fázismaszkok vizsgálata során azt tapasztaltam, hogy nem jelentős az eltérés a különböző SLM méretű szimulációk között. Ezért a fázismaszkokat 128×128 pixeles SLM mérettel vizsgáltam, a szimulációk egyszerűsítése végett. Ezzel szemben a defókuszálás okozta vignettálás és az axikon hatása erősebben jelentkezik nagyobb SLM

méretnél. Ezért a továbbiakban a teljes méretű HMC rendszert veszem alapul a valódi 320×240 pixeles SLM mérettel. A fázismaszkokkal való összehasonlíthatóság csak közelítőleg marad meg, de a következtetések levonásához ez elegendő. A következő generációs holografikus memória rendszerek tervezésénél ezeket az eredményeket mint iránymutatókat lehet használni, és a tényleges tervezést újra el kell végezni.

6.4.1 A defókuszálás


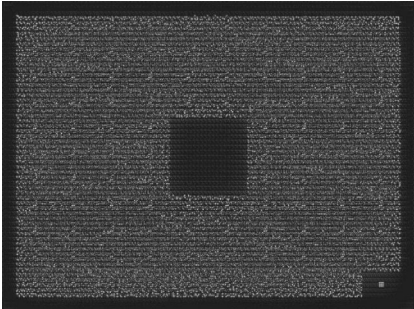
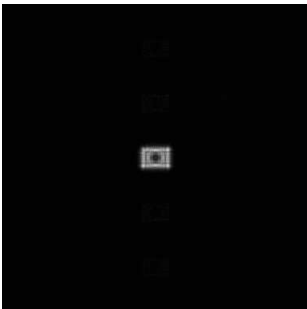
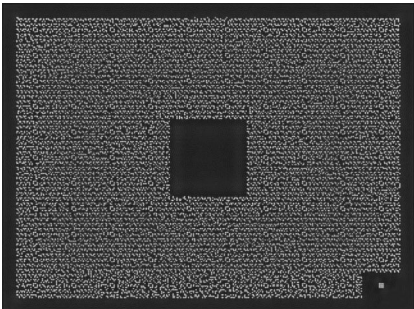
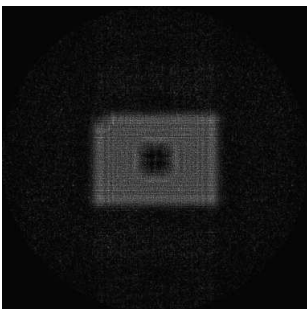
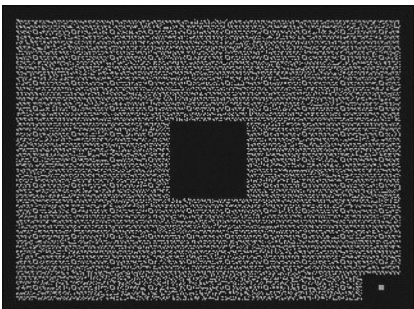
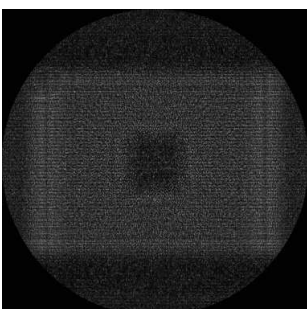
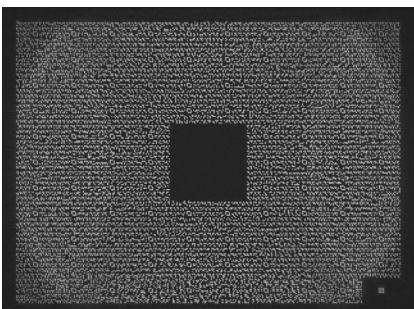
A defókuszálás modellezését a következő optikai elv alapján valósítottam meg. A lencse a beeső párhuzamos nyalábokat a fókusz síkjában gyűjti össze, amíg a beeső gömbhullámot a fókusz síkja elé vagy mögé, a gömbhullám sugarától függően. Az összefüggés a geometriai optika alaptörvényeiből kiszámítható:

$$\Delta z = \frac{f^2}{R - f}, \quad (6.12)$$

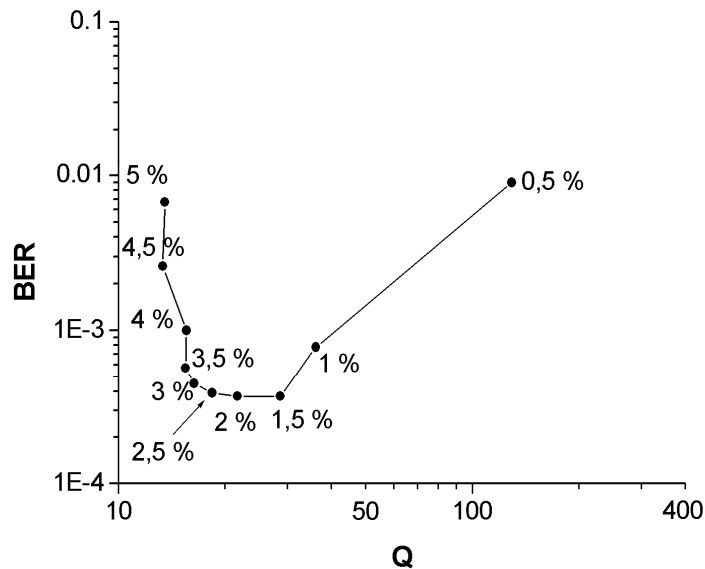
ahol f a lencse fókusztávolsága, R a gömbhullám sugara, Δz pedig a távolság a fókusz síktól. ($R = f$ esetben a nevező nulla, amely azt jelenti, hogy párhuzamos nyaláb keletkezik.) Ha tehát az SLM-et síkhullám helyett gömbhullámmal világítjuk meg, akkor a Fourier lencse fókusz síkjában nem a Fourier transzformált, hanem annak Δz -vel defókuszált képe jelenik meg. Ezt a modellemben az SLM-et megvilágító nyaláb gömbi fázisával modellezem, így a Fourier transzformált módosulása is teljesül.

Szimulációimban a defókuszáltság nagyságát a fókusztávolsághoz vett százalékos arányában adom meg. Ebből és a fókusztávolságból kiszámítható a defókuszáltság mértéke μm -ben is, de ez a megközelítés általánosabb. Figyelembe kell venni a Fourier objektív numerikus apertúráját is, amely a HMC rendszer esetében nagy $NA = 0.68$. A szimulációk eredményeit mutatja a 77. ábra. Az ábra jól szemlélteti, hogy ha kicsi a defókusz, nagy a középső intenzitáscsúcs, és így a holografikus anyag által okozott telítődés, ha pedig nagy a defókusz, akkor a hologram növekedése miatt a Fourier szűrés vignettálásba megy át, ez okozta a CCD kép szélein 76. ábra. Az optimum tehát 1,5 - 2 % defókuszálás körül van.

A defókuszálás előnye, hogy könnyen megvalósítható a legtöbb holografikus adattároló rendszerben, és jó simítási tulajdonságai vannak. Hátrányai azonban, hogy nagyobb defókuszálás esetén erősen vignettál, és mivel a hologram eltávolodik a Fourier síktól, ezért annak előnyös tulajdonságai is csökkennek. Tehát, mint azt a 76. ábra is mutatja, az információ lokalizáltabban jelenik meg a hologramon, érzékenyebbé válik az elmozdulásokra, sérülésekre, szennyeződésekre.

Defókusz százalékos aránya	Hologram síkjában az intenzitás képe	Rekonstruált CCD kép
0 %	 $Q = 16920$	 nyers BER = 0,32
0,5 %	 $Q = 129$	 nyers BER = 0,009
2 %	 $Q = 21,6$	 nyers BER = $3,7 \cdot 10^{-4}$
4 %	 $Q = 15,5$	 nyers BER = $1,2 \cdot 10^{-3}$

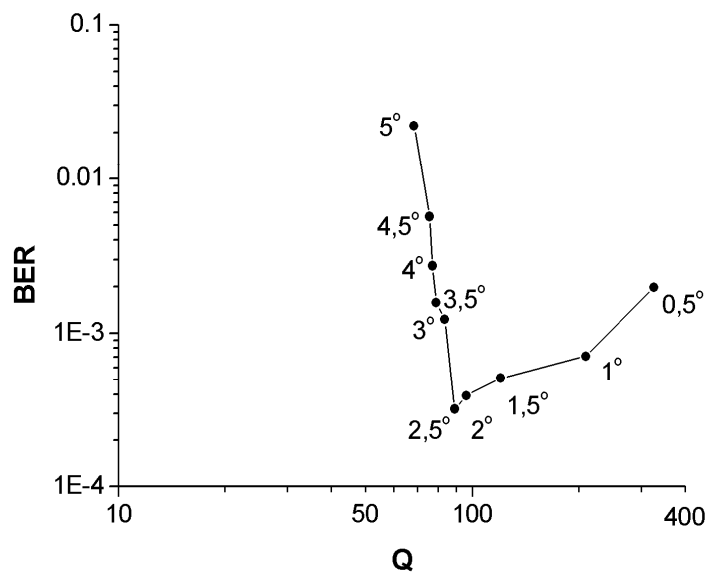
76. ábra Defókuszálás hatásával készített szimulált hologram és CCD képek



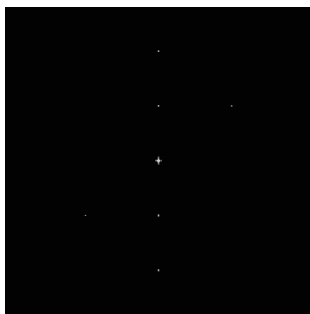
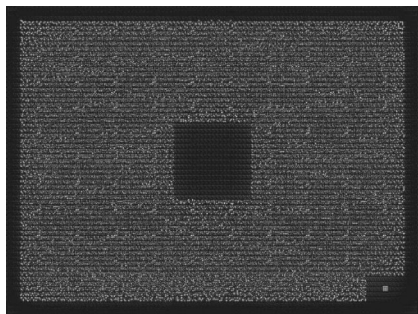
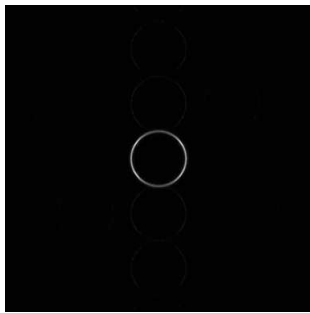
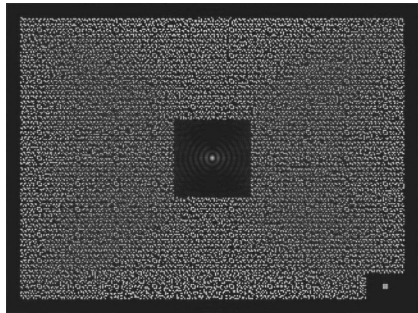
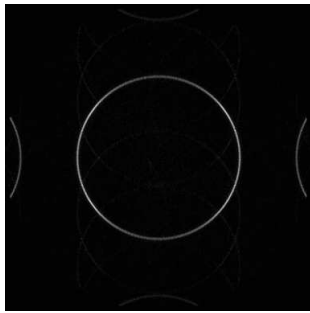
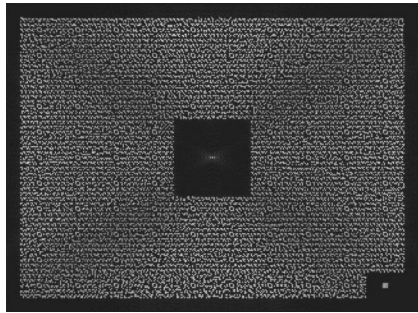
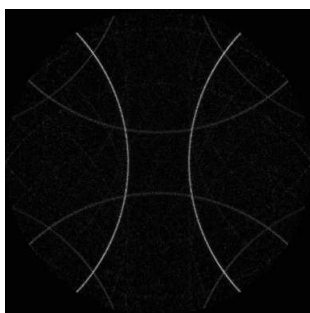
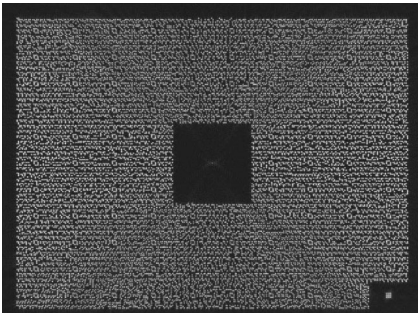
77. ábra Defókusz szimulációk térképe, a feltüntetett értékek a defókuszáltság nagyságát a fókusz távolsághoz vett százalékos arányban adják meg $NA = 0.68$ esetén.

6.4.2 Az axikon

A defókuszhoz hasonlóan az axikont is az SLM-et megvilágító nyaláb fázisával modellezem. Axikon esetében a fázis lineárisan változik a kép közepéből indulva koncentrikusan kifelé. Az axikonokat az α axikon szöggel (55. ábra) jellemzem, ennek függvényében készítettem el az axikonok térképét, amelyet az 78. ábra mutat. Itt is az figyelhető meg, hogy a szög növelése kezdetben javít a hologramon, majd ahogy az axikon által keltett kör túlnő a hologram méretén a rekonstruált CCD kép elromlik, benne sugárirányú vonalak jelennek meg. Ezt a hatást mutatja a 79. ábra.



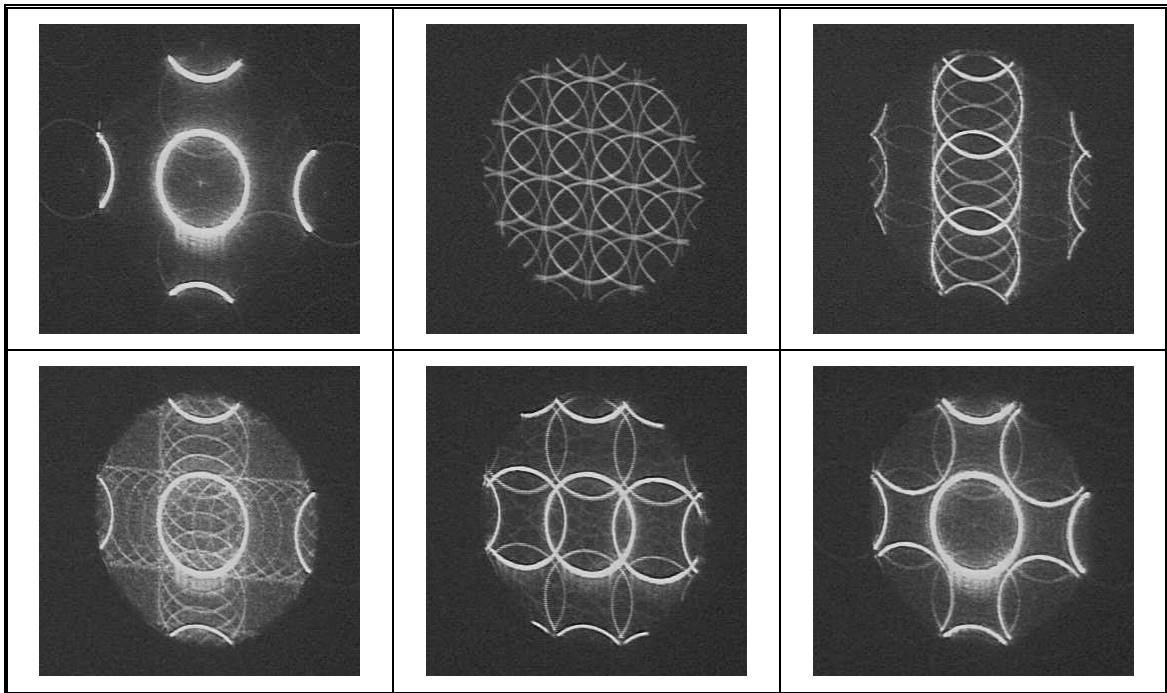
78. ábra Axikon szimulációk térképe, az értékek az α axikon szöget jelölik.

Axikon szög	Hologram síkjában az intenzitás képe	Rekonstruált CCD kép
0°	 <p>$Q = 16920$</p>	 <p>nyers BER = 0,32</p>
0,5°	 <p>$Q = 326$</p>	 <p>nyers BER = 0,0019</p>
1,5°	 <p>$Q = 120$</p>	 <p>nyers BER = $3,2 \cdot 10^{-4}$</p>
3,5°	 <p>$Q = 79$</p>	 <p>nyers BER = 0,0016</p>

79. ábra Axikon hologram és CCD képek

A HMC rendszer fejlesztéséhez elkészítettünk a terveim alapján egy axikont, amely ellenőrzése folyamatban van. Dolgozatomban néhány fényképet tudok bemutatni, amikor az SLM elé helyeztük és a falra kivetítettük a képét. Ezeket mutatja be a 80. ábra inkább csak a szépségük kedvéért.

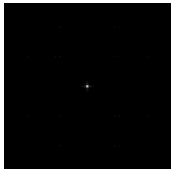
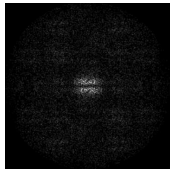
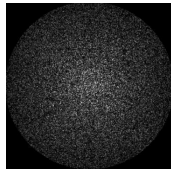
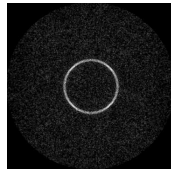
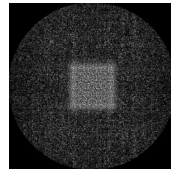
Az optimális axikon szög a HMC rendszerben 2° körül van. Az axikon előnyei, hogy elég jó simítási tulajdonságai vannak, és a fázismaszkhoz képest sokkal könnyebb pozicionálni. Hátránya viszont, hogy egy aszférikus módszerekkel nehezen készíthető optikai elem.



80. ábra Fényképek az axikon által vetített képekről különböző periodikus SLM képek mellett.

6.4.3 Összehasonlítás

Az előzőekben bemutatott simító módszereket összefoglaltam egy összehasonlító táblázatba, amely alább látható (7. táblázat). Az eredményekből látható, hogy a nyers BER tekintetében az összes módszer közül legeredményesebb a véletlen alaphálós kötött fázislépésű négyszintes fázismaszk. Azonban a fázismaszk gyártása és rendszerbeli elrendezése okozhat problémákat. Szintén jó eredmény érhető el az axikon használatával. Mindkét módszer vizsgálata jelenleg folyik. A táblázatban a defókuszálás is hasonlóan jó nyers BER értéket ért el, de mivel ebben az esetben a hologram elveszíti a Fourier holográfia legfontosabb előnyeit, a redundáns adattárolást, vagyis érzékennyé válik az elmozdulásokra és sérülésekre, és a hologramméret is megnő, ezért nem megfelelő vékony hologramos adattároló eszközökben.

Módszer	Simítás nélkül	2 szintes nagy blokkméretű fázismaszk	véletlen alaphálós 4 szintes 2×2-es blokkméretű fázismaszk	Axikon	Defókuszálás
Intenzitás kép a hologram síkjában					
Nyers BER	0,32	0,012	$2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$
Megjegyzés	nem használható	jelenleg ezt használjuk a HMC rendszerben	további vizsgálatokat igényel	további vizsgálatokat igényel	vignettál és érzékeny a felületi sérülésekre

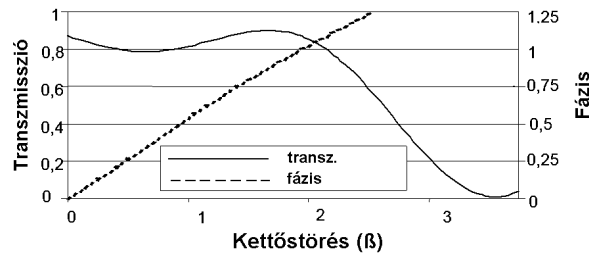
7. táblázat A simító módszerek összehasonító táblázata.

6.5 Az SLM fázisainak felhasználása az intenzitás simítására

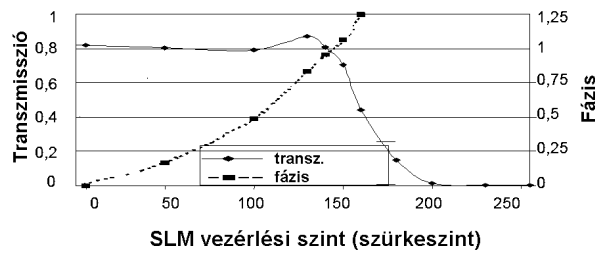
A fázismaszk továbbfejlesztése részben (6.3.4. fejezet) említettem, hogy a mi kereteink nem teszik lehetővé a fázismaszk és az SLM egybeépítését. Kollégáim megvizsgálták annak a lehetőségét, hogy magát az SLM-et működtessük úgy, hogy intenzitást és fázist is moduláljon. Ennek a lehetőségnek az elméleti alapjai és megvalósítása megtalálható a [9,86,87] hivatkozásokban. A jelenségek vizsgálatához és a kísérletek megtervezéséhez, megkönnyítéséhez modellem segítségét vették igénybe. Dolgozatomban nem mutatom be az SLM működtetését, csak a lehetőség felhasználását a hologram síkjában levő intenzitás simítására.

Az SLM tipikus működtetése során két állapotot használunk, egy sötétet és egy világosat. Ekkor a fázis általában nem érdekes, csak a kontraszt. Fázist is figyelembe véve három esetleg négyállapotú működésről beszélhetünk. Holografikus adattárolás szempontjából a háromállapotú működés (Hybrid ternary modulation – HTM) a legjobban felhasználható. Ekkor egy sötét állapotot használunk, és két világosat, amelyek fázisai között kb. π a különbség (81. ábra). Az ábra a) része egy SLM pixel folyadékkristályának a kettőtörését mutatja, a b) része pedig ennek létrehozását az SLM vezérlésével, vagyis melyik vezérelt szűrkeszintnek melyik amplitúdó és fázis felel meg. Ezáltal a fázismaszknak megfelelő hatás könnyen előállítható.

Kollégáim több kérdést vizsgáltak meg az SLM ezen működésének, mint a fázismaszk helyettesítőjének felhasználásával kapcsolatban. Az SLM kontrasztjának kérdését már bemutattam a 5.3.7. fejezetben. A másik fő problémakör az volt, hogy mekkora fáziskülönbség kell legyen a két világos állapot között a megfelelő simító hatás eléréséhez. Szimulációs modellemmel segítettem kutatásukat és a következő eredményeket kaptuk, legjobb a π fáziskülönbség, de $< 10\%$ eltérés még megengedett (82. ábra). A 83. ábra már 20% eltérést mutat, amely túl nagy a mi alkalmazásainkhoz.

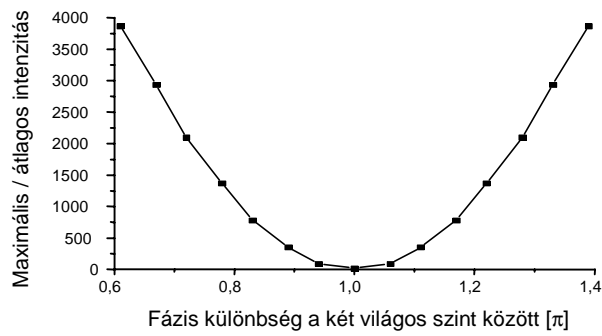


(a)

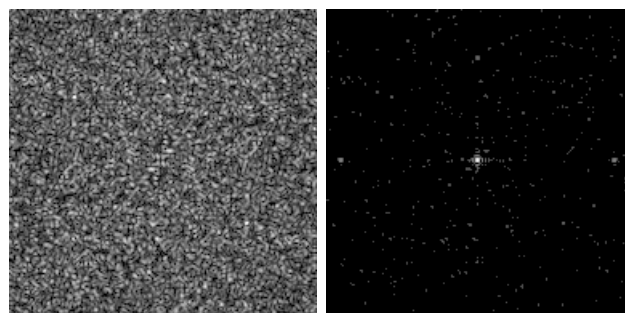


(b)

81. ábra Az SLM háromállapotú működése [9].



82. ábra A két világos állapot fáziskülönbségének hatása hologramsíkokban mérhető csúcs és átlagos intenzitásarányra (Q).



a)

b)

83. ábra Hologram közepe a) π fáziskülönbség esetén, b) $0,8\pi$ fáziskülönbség esetén

7 Összefoglalás

Kutatómunkám eredményei alapján megállapíthatom, hogy a létrehozott holografikus adattároló rendszerek általános modellje hűen írja le ezen rendszerek viselkedését. Tehát olyan modellt és számítógépes algoritmust alkottam, amely megfelel az elvárásoknak, képes megjósolni az adattároló rendszerek tulajdonságait, segítségével értelmezni lehet a fellépő jelenségeket. Ez a hiánypótló modell felhasználható analízisére, optimalizálására és tervezésére.

Különös figyelemmel kezeltem az anyag hatását a rendszer tulajdonságaira. Bemutattam a tároló anyag telítődésének következményeit és bizonyítottam figyelembevételének szükségességét.

Sikerrel alkalmaztam a modellt szimulációs vizsgálatokban a teljes rendszer optimalizálására, fejlesztésére. Az elkészült HMC rendszer eredményei is igazolják munkámat.

Megalkottam a véletlen alaphálós kötött fázislépésű négyzintes fázismaszkot, amely a megfelelően rekonstruálható hologramok írásához feltétlenül szükséges. Ezen eszköz megtervezése bizonyítja, hogy az FFT alapú modell alkalmas új rendszerelemek analízisére, tervezésére és iteratív optimalizálására.

A modell alkalmas további kutatások és fejlesztések támogatására, és jelenleg is intenzíven használják a holografikus adattárolás biztonsági alkalmazásai területén, ahol lehetőséget ad a fázisban kódolt tárgy és referencia hullám modellezésére, valamint az ehhez kapcsolódó kísérleti rendszer megtervezésére és optimalizációjára. A kutatás következő fázisa a modell kiterjesztése vastag ún. Bragg hologramok kezelésére, amellyel a nagy adatsűrűségű adattároló rendszerek és a multiplexelés különböző formái is hűen leírhatók.

8 Függelék

8.1 CD melléklet

A „Szimu” szimulációs szoftvercsomagot (SzimuGrrraf.exe, SzimuCons.exe) doktoranduszi munkám keretében fejlesztettem, és ennek a programnak segítségével számítottam ki az elért eredményeimet. Dolgozatommal együtt közreadom a szoftver demó változatát, amely kipróbálható, de csak a doktori dolgozatommal együtt használható fel, azon kívül nem másolható, nem terjeszthető semmilyen formában. A demó korlátozott méretű szimulációt tesz lehetővé, viszont ezen korlátozással minden funkciója működik, kipróbálható. A demó szoftver indításakor és elmentett eredményeiben figyelmezteti a felhasználót demó voltára.

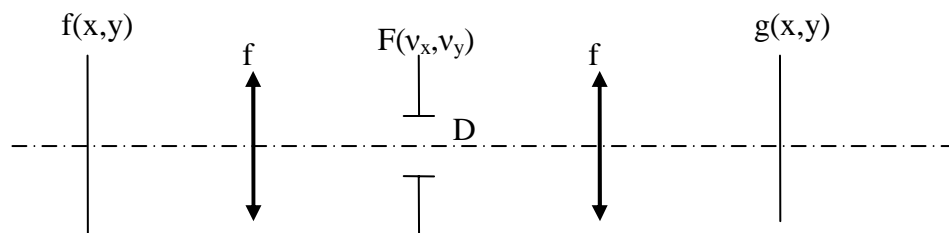
A programot körültekintően teszteltem több számítógépen is, és nem okozott hibát. Mindezek ellenére sajnos nem zárható ki eddig ismeretlen problémák fellépése, ezekért és az általuk okozott esetleges adatvesztésért semmilyen felelősséget nem vállalok.

Amennyiben szeretné felhasználni a szoftvert teljes változatban kutatásra is, kérem lépjen kapcsolatba velem.

A szimulációs program nem igényel külön telepítést, másolja át egy szabad könyvtárba, és onnan indítsa el a 3.3. fejezetben foglaltaknak megfelelően. A CD lemezen megtalálhatóak a grafikus és parancssori futtatható fájlok, Windows és Linux környezethez egyaránt, a példa beállítási fájlokkal és képekkel egyaránt. Ezen szimulációk csak közelítőleg fogják visszaadni a dolgozatomban bemutatott eredményeket, a nagyobb pontossághoz a teljes változat által felhasználható nagyobb méret és így nagyobb statisztika szükséges.

8.2 Apertúra rekesz méretezésének számítása

Pixeles tárgy, pl. SLM felhasználásával a $4f$ térszűrő leképezést a következő (84. ábra) szerint értelmezhetjük:



84. ábra $4f$ Fourier szűrő

Ahol f a fókusz táv, D az apertúra rekesz átmérője, $f(x,y)$ a tárgy sík, $F(v_x, v_y)$ a Fourier sík, $g(x,y)$ a kép sík, λ a hullámhossz. Az x,y a valós sík térkoordinátái, v_x, v_y a Fourier sík térfrekvenciái. Az SLM pixelrácsának mérete legyen P , és az átengedett maximális térfrekvencia v_s .

Az apertúra rekesz nagysága és az átengedett maximális térfrekvencia közötti összefüggés[88: II 62.old]:

$$D = 2 \cdot v_s \cdot \lambda \cdot f \quad (8.1)$$

A pixelezettségnek megfelelő térfrekvencia nagysága $v_s = 1 / P$. Annak az apertúrának a nagysága, amely épp ezt a térfrekvenciát engedi át:

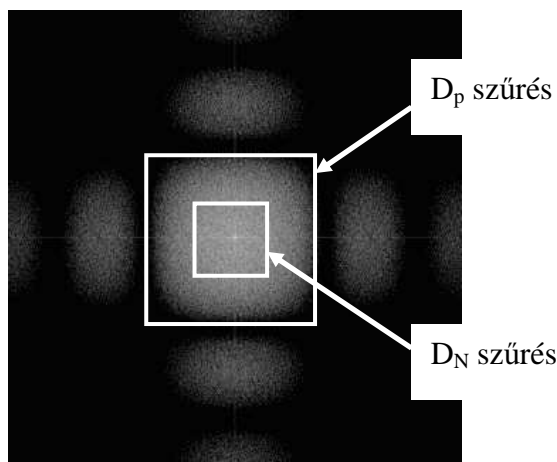
$$D_P = \frac{2 \cdot \lambda \cdot f}{P} \quad (8.2)$$

A Nyquist apertúra definíciója ezzel szemben [22: 335. old]:

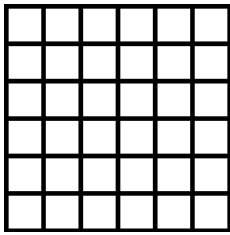
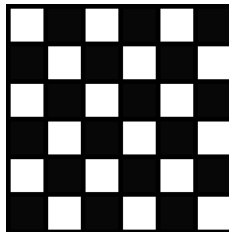
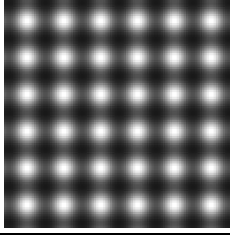
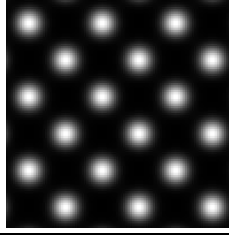
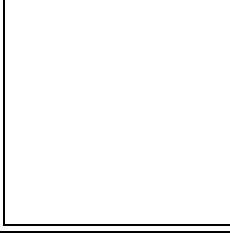
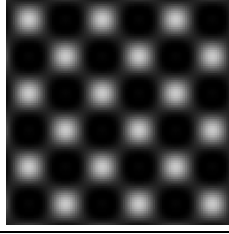
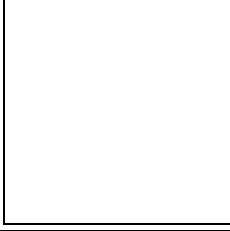
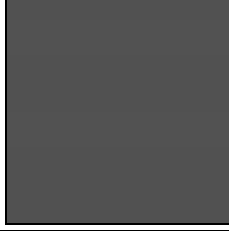
$$D_N = \frac{\lambda \cdot f}{P} \quad (8.3)$$

A különbség a következő ábrán látható. Vagyis ha D_P apertúra szerint szűrünk, akkor a pixelek megkülönböztethetőek lesznek, erre vonatkozott a feltétel. Ha viszont D_N a szűrő apertúra, akkor magukat a pixeleket nem lehet megkülönböztetni, viszont az adatok visszanyerhetőek. Másként megfogalmazva számunkra a $2P$ frekvenciát kell átvenni, abból nyerhető vissza, hogy két szomszéd pixel között volt-e átmenet, van-e ott információ.

Optikai szempontból ez a következő, a 85. ábra mutatja a Fourier síkot a szűrőkkel, a 86. ábra pedig egy teljesen fehér és egy sakkszerű SLM képet $90\% \times 90\%$ kitöltési tényezővel különböző Fourier szűréseknél.

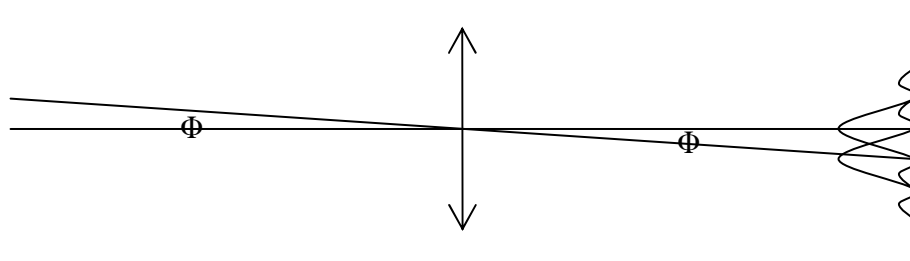


85. ábra A Fourier sík logaritmikus szűrkeskálával ábrázolva valódi adat esetén, a két Fourier szűrővel.

	Fehér SLM kép	Sakk SLM kép
Intenzitás az SLM után		
D_P szerint szűrt intenzitás		
D_N szerint szűrt intenzitás		
Szűrés kisebb mint D_N		

86. ábra A hullámfront intenzitás képei különböző Fourier szűréseknél.
Az SLM kitöltési tényezője $90\% \times 90\%$

Továbbviszem az elvet más optikai területre, a Rayleigh kritérium az, hogy két csillagot külön látunk a távcsőben (87. ábra):



87. ábra Rayleigh kritérium ábrázolása.

Képlettel [89: 393. old]:

$$\Phi_{\min} = \frac{1.22 \cdot \lambda}{d} \quad (8.4)$$

ahol λ a hullámhossz, d a lencse átmérője, Φ_{\min} a szükséges minimális szög.

Ehhez kapcsolódik az Airy korong is, amely sugara definíció szerint az első minimum távolsága a közepétől [89: 363. old]:

$$r_{\text{korong}} = \frac{1.22 \cdot \lambda \cdot z}{d} \quad (8.5)$$

ahol z az ernyő távolsága lencsétől.

Tehát mivel $\Phi \approx r / z$, ezért a Rayleigh kritérium éppen azt jelenti, hogy a két Airy korong úgy helyezkedik el, hogy egyik maximuma éppen a másik minimumába esik.

8.3 Felhasznált rövidítések

4f – 4 fókusz távolságú holografikus rendszer

8f – 8 fókusz távolságú holografikus rendszer

BER – Bit Error Rate – bit hiba arány

BPM – Beam Propagation Method – nyaláb terjedés számítása

CCD – Charge Coupled Device – töltés csatolt eszköz

CGH – Computer Generated Hologram – számítógéppel generált hologram

ECC – Error Correction Code – hibajavító kód

FFT – Fast Fourier Transform – Gyors Fourier transzformáció (algoritmus)

FT – Fourier Transform – Fourier transzformált

HMC – Holographic Memory Card – Holografikus Memória Kártya

HTM – Hybrid ternary modulation – az SLM háromállapotú működése

NA – Not Available, Not Applicable – Nem elérhető, nem megvalósítható

PBS – Polarization Beam Splitter – polarizációs nyalábosztó

PER – Pixel Error Rate – pixel hiba arány

PSF – Point Spread Function – pontszórás függvény

RS – Reed-Solomon – Reed-Solomon hibajavító algoritmus

SER – Symbol Error Rate – szimbólum hiba arány

SLM – Spatial Light Modulator – térbeli fény modulátor

SNR – Signal to Noise Ratio – Jel zaj viszony (arány)

8.4 Felhasznált jelek és változók

*: komplex konjugálás

\otimes : konvolúció

D_N : a Nyquist apertúra átmérője

λ : a fény hullámhossza

f : a felhasznált Fourier lencse fókusztávolsága

P : az SLM pixelrácsának a mérete

VM : Valós síkbeli Mintavételezés

FM : Fourier síkbeli Mintavételezés

N_{SLMX}, N_{SLMY} : az SLM oldalainak mérete pixelben

M : a komplex mátrix mérete ($M \times M$ mátrixelem)

N_{SLM} : az SLM pixelszáma

r : centrálisan értelmezett távolság síkban

$w_{0,I}(x)$: a sötét ill. világos pixelek hisztogramjára illesztett Gauss görbe

$\mu_{0,I}$: a sötét ill. világos pixelek hisztogramjának várható értéke

$\sigma_{0,I}$: a sötét ill. világos pixelek hisztogramjának szórása

K : küszöb

P_{out} : lézer teljesítmény

r_{holo} : hologram sugara

t_{exp}, t : expozíciós idő

I : intenzitás

I_{obj}, I_{ref} : tárgy és referencianyaláb intenzitása

β, ρ' : anyagi állandók

χ : dielektromos szuszceptibilitás

E : a fényhullám elektromos térerősségének komplex vektora

ϵ_0 : a vákuum dielektromos permittivitás

c : a fénysebesség

n_0 : a tároló anyag átlagos törésmutatója

d : tároló anyag vastagsága

C, D, F, G : anyag leírására használt paraméterek

η : diffrakciós határfok

$I_{obj}, I_{ref}, I_{rek}, I_{ki}$: a különböző nyalábok intenzitásai az egyes mátrixelemekre

A : komplex amplitúdó

$A_{obj}, A_{ref}, A_{rek}, A_{ki}$: a különböző nyalábok komplex amplitúdói az egyes mátrixelemekre

φ : fázis

$\varphi_{obj}, \varphi_{ref}, \varphi_{rek}, \varphi_{ki}$: a különböző nyalábok fázisai az egyes mátrixelemekre

- a : a mátrixelem által leírt négyzet alakú terület oldalhossza
- g : szűrkeszintek száma
- μ_i : az i -edik szűrkeszint pixelei hisztogramjának várható értéke
- σ_i : az i -edik szűrkeszint pixelei hisztogramjának szórása
- ρ_{adat} : a tárolt adatsűrűség
- N_{adat} : az SLM-en a tárolt információ által elfoglalt terület pixelszáma
- $\rho_{kód}$: a kód arányt
- A_{holo} : a hologram területe, illetve a hologramot befoglaló cella területe
- d_{holo} : a hologramot befoglaló négyzet oldal éle
- s : a hologram mérete hányszorosa a Nyquist apertúrának
- $M \times N$: SLM pixelszáma
- (m,n) : pixelek számozása a síkban
- a_{mn} : az (m,n) helyen levő SLM pixel szűrkesége
- $t(x,y)$: valós síkbeli transzmissziós függvény
- (x,y) : a valós sík koordinátái
- $u(f_x, f_y)$: Fourier síkbeli függvény
- (f_x, f_y) : a frekvenciasík frekvencia koordinátái
- k : konstans
- Δz : defókuszálás során a hologram elmozdulása
- D : a Fourier lencse átmérője
- $\Phi(m,n)$: a fázismaszk véletlen fázistagjai az (m,n) pixelen
- R_1, R_2 : szomszédos pixelek rect függvényei
- Φ : fáziskülönbség
- H : a rendszer pont szórás függvénye
- L : a fázismaszk fázislépcsőinek a száma
- l : az l -edik lépcső
- h : az l -edik lépcső vastagsága
- n : a fázislépcső anyagának törésmutatója
- Q : a Fourier tér simításának jelzőszáma
- $I_{\text{átlag}}$: a teljes hologram területre mért átlagos intenzitás
- I_{max} : a legnagyobb csúcs maximális intenzitása
- $n_x \times n_y, n \times n$: a fázismaszk blokkjainak mérete SLM pixelben
- R : a gömbhullám sugara
- NA : numerikus apertúra
- α : az axikon szöge

9 Irodalomjegyzék

- [1] P. Várhegyi, P. Koppa, E. Lőrincz: „System modeling and optimization of Fourier holographic memory” elfogadott, várható megjelenés májusban, Applied Optics (2005)
- [2] Várhegyi Péter, Koppa Pál: „Polarizációs Fourier holográfia modellezése és szimulációja”, V. Szimpózium „A Hazai Kvantumelektronikai Kutatások Eredményeiről” (2003)
- [3] Ujvári T., Várhegyi P., Koppa P., Szarvas G., Lőrincz E., Ujhelyi F., Kerekes Á., Domján L., Kalló P., Richter P.: „Holografikus adattárolás”, Magyar Optik konferencia, (2000)
- [4] P. Várhegyi, Á. Kerekes, Sz. Sajti, F. Ujhelyi, P. Koppa, G. Szarvas, E. Lőrincz, „Saturation effect in azobenzene polymers used for polarization holography”, Applied Physics B, Vol. 76 No. 4 pp. 397-402 2003
- [5] P. Várhegyi, Á. Kerekes, Sz. Sajti, P. Koppa, E. Lőrincz, G. Szarvas, P.S. Ramanujam, S. Hvilsted and P. Richter: „Nonlinear saturation effect in azobenzene polymers used for polarization holography; experiments and theoretical modeling”, COST P2, 16-19 May 2001, Budapest, Hungary
- [6] P. Várhegyi, P. Koppa, E. Lőrincz, G. Szarvas and P. Richter, „System modeling and optimization of the polarization Fourier holographic memory card”, ICO 19 International Conference on Optics, 25-30 August 2002, Firenze, Italy
- [7] P. Várhegyi, P. Koppa, E. Lőrincz, G. Szarvas, and P. Richter, „Optimization of the storage density in thin polarization holograms”, Holography 2000, 10-14 July 2000, St. Pölten, Austria, Tung H. Jeong, Werner K. Sobotka, Editors, Proc. of SPIE Vol. 4149 (2000)
- [8] P. Koppa, P. Várhegyi, T. Ujvári, G. Szarvas, S. Hvilsted, P. S. Ramanujam, P. Richter, „Storage density enhancement in holographic memory card system”, Nonlinear Optics for the Information Society, ed. Alfred Driessen, pp. 179-184, ISBN 1-4020-0132-0, Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [9] J. Reményi, P. Várhegyi, L. Domján, P. Koppa, E. Lőrincz, „Amplitude, phase and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid-crystal display at ~400 nm”, Appl. Optics, Vol. 42, No. 17, pp. 3428-3434, 2003.
- [10] G. Erdei, G. Szarvas, E. Lőrincz, J. Fodor, F. Ujhelyi, P. Koppa, P. Várhegyi, P. Richter, „Optical system of Holographic Memory Card writing/reading equipment”, Proc. SPIE, Vol. 4092, pp. 109-118, Novel Optical System Design and Optimization III, Ed. Jose M. Sasian, 2000
- [11] P. Koppa, G. Erdei, F. Ujhelyi, P. Várhegyi, T. Ujvári, E. Lőrincz, G. Szarvas, S. Hvilsted, P. S. Ramanujam and P. Richter, „Data storage on holographic memory card”, in Holography 2000, Tung H. Jeong, Werner K. Sobotka, Editors, Proc. of SPIE Vol. 4149, pp. 309-314, 2000
- [12] E. Lőrincz, F. Ujhelyi, P. Koppa, A. Kerekes, G. Szarvas, G. Erdei, J. Fodor, Sz. Mike, A. Sütő, P. Várhegyi, P.S. Ramanujam, S. Hvilsted, „Read/write demonstrator of rewritable holographic memory card system”, in Optical Data Storage 2001, Terril Hurst, Seiji Kobayashi, Editors, Proc. of SPIE Vol. 4342, pp. 566-573, 2001

-
- [13] E. Lőrincz, F. Ujhelyi, G. Szarvas, P. Koppa, G. Erdei, F. Józsa, Sz. Mike, A. Sütő, P. Várhegyi, P. S. Ramanujam, S. Hvilsted, P. I. Richter: „Polarization holographic data storage system”, invited lecture at the Fourth Annual Meeting of the COST Action P2, 16-19 May 2001, Budapest
- [14] Á. Kerekes, E. Lőrincz, Sz. Sajti, P. Várhegyi, P. S. Ramanujam, S. Hvilsted, „Dynamic behavior of azobenzene polyester used for holographic data storage”, in Applications of Ferromagnetic and Optical Materials, Storage and Magneto-electronics, Matthias Wuttig, Lambertus Hesselink, Herman J. Borg, Editors, MRS Proceedings Volume 674, V3.4, MRS Spring 2001
- [15] G. Szarvas, P. Koppa, A. Sütő, P. Várhegyi, Sz. Mike, G. Erdei, F. Ujhelyi, L. Gazdag, E. Lőrincz, „Multilayer Thin-film Holographic Storage - a New Approach”, Technical Digest of ISOM / ODS 2002, Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage 2002, 7-11 July 2002, Hawaii, pp. 240-242, IEEE Catalog No. 02EX552, 2002.
- [16] E. Lőrincz, G. Szarvas, P. Koppa, F. Ujhelyi, G. Erdei, Sz. Mike, A. Sütő, P. Várhegyi, Sz. Sajti, Á. Kerekes, P.S. Ramanujam, „Different solutions of high density holographic data storage”, invited talk at Kick Off Meeting of the COST Action P8, "Materials and Systems for Optical Data Storage and Processing", June 24-25 2002, Berlin.
- [17] E. Lőrincz, G. Szarvas, P. Koppa, F. Ujhelyi, G. Erdei, A. Sütő, P. Várhegyi, Sz. Sajti, Á. Kerekes, T. Ujvári, P. S. Ramanujam, „Polarization holographic data storage using azobenzene polyester as storage material”, invited paper at Photonic West, Conference 4991 Organic Photonic Materials and Devices VI, Optoelectronics 2003, 25-31 January 2003. San Jose, California, USA, published in Proc. of SPIE 4991 Organic Photonic Materials and Devices VI., J. G. Grote, T. Kaino editors, pp. 34-44.
- [18] P. Koppa, G. Szarvas, F. Ujhelyi, G. Erdei, A. Sütő, P. Várhegyi, T. Ujvári, Sz. Sajti, P. S. Ramanujam, E. Lőrincz, „Holographic data storage with organic polymer films”, invited paper at SPIE Annual Meeting, 3–8 August 2003, San Diego, California, USA, Conference AM436, Proc. of SPIE 5216, Organic Holographic Materials and Applications, ed. Klaus Meerholz, pp. 165-177.
- [19] P. Koppa, P. Várhegyi, T. Ujvári, M. Lovász, G. Szarvas, F. Ujhelyi, G. Erdei, J. Reményi, Domján, A. Sütő, E. Lőrincz, „Application of polarization holography for data storage”, COST P8 Workshop in Paris, 16-17 September, 2004.
- [20] T. Ujvári, P. Koppa, M. Lovász, P. Várhegyi, Sz. Sajti, E. Lőrincz, P. Richter, „Secure data storage system based on phase-encoded thin polarization holograms”, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 6, pp. 401-411, 2004.
- [21] M. Lovász, T. Ujvári, P. Várhegyi, A. Sütő, P. Koppa, „Security application of polarization holography”, COST P8 Workshop in Paris, 16-17 September, 2004.
- [22] H. J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox, “Holographic Data Storage”, Springer-Verlag, Berlin 2000.
- [23] J. T. LaMacchia, D. L. White „Coded multiple exposure holograms” Applied Optics, Vol. 7. No. 1. 1968.
- [24] Hua-Kuang Liu, Yahong Jin, Neville I. Marzwell „Advanced ultra-high-capacity optical random access memory and pattern recognition techniques” Optical Engineering, Vol. 37. No. 3. 1998.
-

-
- [25] Luzhong Cai, Hua-Kuang Liu „Massive parallel optical pattern recognition and retrieval via a two-stage high-capacity multichannel holographic random access memory system” *Optical Engineering*, Vol. 39. No. 2. 2000.
- [26] Geoffrey W. Burr, Sebastian Kobras, Holger Hanssen, Hans Coufal „Content-addressable data storage by use of volume holograms” *Applied Optics*, Vol. 38. No. 32. 1999.
- [27] George A. Betzos, Alexandre Laisné, Pericles A. Mitkas „Improved associative recall of binary data in volume holographic memories” *Optics Communications*, 171.1999.
- [28] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, T. Tschudi „Potentialities and limitations of hologram multiplexing by using the phase-encoding technique” *Applied Optics*, Vol. 31. No. 26. 1992.
- [29] P. J. van Heerden, “Theory of optical information storage in solids”, *Applied Optics*, Vol. 2. No. 4. p. 393-400. 1963.
- [30] M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, G. T. Sincerbox, and G. Wittmann, „Holographic-data-storage materials” *MRS Bulletin*, 21(9), p 51-60, September 1996
- [31] J. T. Gallo; M. L. Jones; C. M. Verber, “Computer modeling of the effects of apertures in the fourier-transform plane of fourier-transform imaging-systems”, *Applied Optics*, Vol. 33. No. 14. p. 2891-2899. 1994.
- [32] Six Sigma web resources, <http://www.isixsigma.com/>
- [33] Geoffrey Gordon, 1978, *System Simulation* (2nd ed.), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [34] María-P. Bernal, Geoffrey W. Burr, Hans Coufal, Manuel Quintanilla, "Balancing interpixel cross talk and detector noise to optimize areal density in holographic storage systems", *Applied Optics*, Vol. 37. No. 23. 1998.
- [35] George A. Betzos, Michael S. Porter, John F. Hutton, Pericles A. Mitkas, "Optical storage interactive simulator (OASIS): an interactive tool for the analysis of page-oriented optical memories", *Applied Optics*, Vol. 37. No. 26. 1998.
- [36] G. W. Burr, W. Chou, M. A. Neifeld, H. Coufal „Experimental evaluation of user capacity in holographic data-storage systems” *Applied Optics*, Vol. 37. No. 23. 1998.
- [37] J. Eickmans, T. Bieringer, S. Kostromine, H. Berneth, R. Thoma, Photoaddressable Polymers: A new class of materials for optical data storage and holographic memories, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 38. p. 1835-1836, 1999.
- [38] P.S. Ramanujam, C. Holme, S. Hvilsted, M. Pedersen, F. Andruzzi, M. Paci, E. L. Tassi, P. Magagnini, U. Hoffman, I. Zebger, H. W. Siesler “Side-chain liquid crystalline polyesters for optical information storage” *Polymer for Adv. Tech.* Vol. 7. p. 768. 1996
- [39] Attila Sütő, E. Lőrincz, "Optimisation of data density in Fourier holographic system using spatial filtering and sparse modulation coding", *Optik, International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. **115**, pp. 541-546. 2004
- [40] L. Onural, „Sampling of the diffraction field” *Applied Optics*, Vol. 39., No. 32. 2000.
- [41] Mark A. Neifeld, Binling Zhou „Optimal pixel profiles for spatially discrete coherent imaging systems” *Optics Communications*, 193. 2001.
-

-
- [42] Adil Lahrichi, "Bit error rate and system limitations on the storage capacity of volume holographic memory systems", *Optical Engineering*, Vol. 40. No. 11. 2001.
- [43] M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, E. Oesterschulze, R. M. Shelby, G. T. Sincerbox, M. Quintanilla, "Effects of multilevel phase masks on interpixel cross talk in digital holographic storage", *Applied Optics*, Vol. 36. No. 14. 1997.
- [44] Venkatesh Vadde, B. V. K. Vijaya Kumar, "Channel modeling and estimation for interpage equalization in pixel-matched volume holographic data storage", *Applied Optics*, Vol. 38. No. 20. 1999.
- [45] M. Keskinöz, B. V. K. Vijaya Kumar, "Discrete magnitude-squared channel modeling, equalization, and detection for volume holographic storage channels", *Applied Optics*, Vol. 43. No. 6. 2004.
- [46] G. Tricoles „Computer generated holograms: an historical review” *Applied Optics*, Vol. 26. No. 20. 1987.
- [47] W. H. Lee: "Sampled Fourier Transform Hologram Generated by Computer" in: "Applied Optics Vol. 9, No. 3", March 1970.
- [48] W. H. Lee: "Computer-generated holograms: Techniques and applications" in: "Progress in optics (volume XVI)", North-Holland, Amsterdam, 1978.
- [49] A. D. Boardman & M. E. S. Chapman: "Computer-generated holograms" in: "Physics Programs", John Wiley & Sons, 1980.
- [50] Székely Vladimír, "Képkorrekció, hanganalízis, térszámítás PC-n, Gyors Fourier transzformációs módszerek", Computer Books, Budapest, 1997.
- [51] William H. Press, et al. „Numerical recipes in Pascal” Cambridge Univ. Pr. ISBN 0-521-37516-9 1992.
- [52] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1988.
- [53] Robert J. Marks II, "Introduction to Shannon sampling and interpolation theory", Springer-Verlag New York, 1991.
- [54] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, L. Hesselink „Channel codes for digital holographic data storage” *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 12. No. 11. 1995.
- [55] Venkatesh Vadde, B. V. K. Vijaya Kumar „Parity coding for page-oriented optical memories with interpage intensity variations” *Optics Letters*, Vol. 24. No. 8. 1999.
- [56] Brian M. King, Mark A. Neifeld „Sparse modulation coding for increased capacity in volume holographic storage” *Applied Optics*, Vol. 39. No. 35. 2000.
- [57] Hossein Pishro-Nik, N. Rahnavard, J. Ha, F. Fekri, A. Abidi „Low-density parity-check codes for volume holographic memory systems” *Applied Optics*, Vol. 42. No. 5. 2003.
- [58] Brian M. King, Geoffrey W. Burr, and Mark A. Neifeld, "Experimental demonstration of gray-scale sparse modulation codes in volume holographic storage", *Applied Optics*, Vol. 42. No. 14. 2003.

- [59] T. Ujvári, P. Koppa, E. Lőrincz, G. Szarvas and P. Richter, "Phase Coded Recording in Polarization Holograms for Data Multiplexing and Encryption", in *Holography 2000*, Tung H. Jeong, Werner K. Sobotka, Editors, Proc. of SPIE Vol. 4149, pp. 342-352, 2000
- [60] G. Erdei, A. Sütő, P. Koppa, E. Lőrincz, F. Ujhelyi, T. Ujvári, G. Szarvas, P.S. Ramanujam, "Application of thin-film holography in optical data storage and data security", presentation and demonstration in the ERASMUS Intensive programme "Thin films and multilayers as seen by local probes", Budapest, 9 - 14 May, 2004.
- [61] Sh. D. Kakichashvili "Method for phase polarization recording of holograms" *Sov. J. Quant. Electron.* Vol. 4. p. 795. 1974
- [62] L. Nikolova, T. Todorov "Diffraction efficiency and selectivity of polarization holographic recording" *Optica Acta* Vol. 31. p. 579. 1984
- [63] Z. Sekkat, M. Dumont "Photoinduced orientation of azo dyes in polymeric films. Characterization of molecular angular mobility" *Synth. Met.* Vol. 54. p. 373. 1993
- [64] S.P. Palto, V.A. Khavrichev, S.G. Yudin, L.M. Blinov, A.A. Udál'yev "On a model of photoinduced optical anisotropy in Langmuir-Blodgett films: low temperature studies" *Mol. Mat.* Vol. 2, p. 63. 1992
- [65] Thomas Garm Pedersen, Per Michael Johansen, Niels Christian Rømer Holme, P.S. Ramanujam "Theoretical model of photoinduced anisotropy in liquid-crystalline azobenzene side-chain polyesters" *J. Opt. Soc. Am. B* Vol. 15. p. 1120. 1998
- [66] Sz. Sajti, Á. Kerekes, M. Barabás, E. Lőrincz, S. Hvilsted, P.S. Ramanujam "Simulation of erasure of photo-induced anisotropy by circularly polarized light" *Opt. Com.* Vol. 194. p. 435. 2001
- [67] Sh. D. Kakichashvili "Regularity in photoanisotropic media" *Opt. Spectrosc.* Vol. 52. p. 191. 1982
- [68] T. Huang, K. H. Wagner "Effect of saturation from dynamic photoanisotropic organic materials", in *Nonconducting photopolymers and applications*, SPIE Vol.1774. p. 160. 1992
- [69] N. C. R. Holme, L. Nikolova and P.S. Ramanujam, S. Hvilsted, An analysis of the anisotropic and topographic gratings in side-chain liquid crystalline azobenzene polyester, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 70. No. 12. p. 1518-1520. 1997
- [70] Á. Kerekes, Sz. Sajti, E. Lőrincz, S. Hvilsted, P. S. Ramanujam, Rewritable azobenzene polyester for polarization holographic data storage, in *Holography 2000*, Tung H. Jeong, Werner K. Sobotka, Editors, Proc. of SPIE Vol. 4149, pp. 324-331. 2000
- [71] Sz. Sajti, Á. Kerekes, E. Lőrincz, P. S. Ramanujam "Response function for characterization of photo-induced anisotropy in azobenzene containing polymers" *Applied Physics B75*, pp. 677-685, 2002
- [72] T. Huang and K. H. Wagner "Coupled Mode Analysis of Polarization Volume Hologram", *IEEE Journal of Quantum Electronics* 31, 372 1995
- [73] Geoffrey W. Burr, Gabrielle Barking, Hans Coufal, John A Hoffnagle, C. Michael Jefferson "Gray-scale data pages for digital holographic data storage", *Optics Letters*, Vol. 23. No. 15. 1998.

-
- [74] Shiquan Tao, Bin Tang, Yan Zhou, Lanson Shen "Quantitative study of the gray-scale fidelity of volume holographic images", *Applied Optics*, Vol. 38. No. 17. 1999.
- [75] Wenhai Liu, Demetri Psaltis „Pixel size limit in holographic memories” *Optics Letters*, Vol. 24. No. 19. 1999.
- [76] Foster Dai; Claire Gu, "Effect of Gaussian references on cross-talk noise reduction in volume holographic memory", *Optics Letters*, Vol. 22. No. 23. 1997.
- [77] Geoffrey W. Burr and Timo Weiss „Compensation for pixel misregistration in volume holographic data storage” *Optics Letters*, Vol. 26. No. 8. 2001.
- [78] Geoffrey W. Burr „Holographic data storage with arbitrarily misaligned data pages” *Optics Letters*, Vol. 27. No. 7. 2002.
- [79] Laure Menetrier and Geoffrey W. Burr „Density implications of shift compensation postprocessing in holographic storage systems” *Applied Optics*, Vol. 42. No. 5. 2003.
- [80] María-P. Bernal, Geoffrey W. Burr, Hans Coufal, John A. Hoffnagle, C. Michael Jefferson, E. Oesterschulze, Roger M. Macfarlane, Robert M. Shelby, Manuel Quintanilla „Experimental study of the effects of a six-level phase mask on a digital holographic storage system” *Applied Optics*, Vol. 37. No. 11. 1998.
- [81] Jianwen Yang, Michael R. Wang „Uniformizing field distribution along optical axis for volume holographic data storage” *Optics Communications*, 192. 2001.
- [82] You-Seok Bae, Jianwen Yang, Sang-Il Jin, Soo-Young Lee, Cheol-Hoon Park „Synthesis of phase encoded mask to improve holographic data storage” *Optics Communications*, 170. 1999.
- [83] Qiang Gao, Raymond Kostuk „Improvement to holographic digital data-storage systems with random and pseudorandom phase masks” *Applied Optics*, Vol. 36.No. 20. 1997.
- [84] W. C. Stewart, A. H. Firester, E. C. Fox „Random phase data masks: Fabrication tolerances and advantages of four phase level masks” *Applied Optics*, Vol. 11. No. 3. 1972.
- [85] John H. McLeod „The Axicon: A new type of optical element” *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 44. No. 8. 1954.
- [86] J. Reményi, P. Koppa, L. Domján, E. Lőrincz, "Phase modulation configuration of a liquid crystal display", in *ICO XIX: Optics for the Quality of Life*, A. Consortini, G. C. Righini, Eds., *Proc. SPIE 4829*, pp 793-794, 2002.
- [87] L. Domján, P. Koppa, G. Szarvas, J. Reményi, "Ternary phase-amplitude modulation with twisted nematic liquid crystal displays for Fourier-plane light homogenization in holographic data storage", *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, November 2002, vol. 113, no. 9, pp. 382-390(9), © Urban & Fischer Verlag.
- [88] Füzessy Zoltán, „Fotonika Optikai alapjai I, II”, Műegyetemi kiadó, 1997.
- [89] M. V. Klein, T. E. Furtak, "Optics", Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 1986.