

**VALÓS HULLÁMFRONT ELŐÁLLÍTÁSA  
A SZÁMÍTÓGÉPES ÉS A DIGITÁLIS  
HOLOGRÁFIÁBAN**

**PhD téziszfüzet**

**PAPP ZSOLT**

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Fizika Tanszék**

**2003**

## Bevezetés

A lézerek megjelenését követően – 1960-tól – a holográfia ugrásszerű fejlődésnek indult. A "hagyományos" holográfia a hologram mint információ rögzítésére, ill. tárolására általában nagyfelbontású fotólemezeket használ. Ennek segítségével – a hívás és rögzítés kémiai eljárását követően – valamely térbeli tárgy képének igen jó minőségű rekonstrukciója (akár a hullámhossz töredékének pontosságával) végezhető el. A hologram elkészítéséhez (az expozícióhoz) azonban szükség van magára a háromdimenziós tárgyra is.

A számítógépes holográfia új lehetőségeket kínál tárgyak megjelenítésére. Módszerének lényege abban áll, hogy a tárgy (pontosabban a tárgy felületének) megadására elegendő annak matematikai leírása. Ily módon nem létező tárgyak rekonstrukciója is lehetséges.

Számítógéppel generált hologramok (CGH) először a 60-as években jelentek meg. Azóta mind a számítógépek, mind pedig a hologram fizikai megvalósítását lehetővé tevő – egyre nagyobb felbontást biztosító – technológiák sokat fejlődtek. Ennek eredményeképpen ma már nem csak a kezdeti időket jellemzően "uraló" Fourier-típusú hologramok realizálására van lehetőség. A tudományterület fejlődésének köszönhetően ma már számos alkalmazásra láthatunk példát. Számítógéppel generált hologramok segítségével valósítottak meg például holografikus csatolóelemeket, speciális optikai szűrőket, stb.

A 60-as ill. a 70-es években főként a kis számításigénye valamint a nem túl bonyolult elrendezést igénylő rekonstrukció miatt a Fourier-típusú számítógépes hologramok terjedtek el. Az egyre gyorsabb (és nagyobb memóriával rendelkező) számítógépek lehetővé teszik az ún. nem-Fourier-típusú hologramok generálását is. Ezek számos gyakorlati problémára jobb megoldást adhatnak, mint a Fourier-típusúak. A numerikus módszerekkel kiszámított hologram leképezési tulajdonságait meg lehet határozni egyrészt a realizált hologramon történő méréssel, másrészt pedig a rekonstrukció modellezésével. Ez utóbbi főként optimalizációs eljárások esetén nélkülözhetetlen.

A digitális holográfia a "hagyományos" optikai holográfiától abban különbözik, hogy a hologramot nem fotoemulzióban rögzíti, hanem általában egy CCD kamera segítségével a hozzá kapcsolt számítógép memóriájában raktározza. Ezután a rekonstrukció történhet "virtuálisan", azaz szimulációval – a számítógéppel generált hologramok esetéhez hasonlóan – vagy SLM alkalmazásával a valós térben. A digitális holográfia egy igen új, perspektivikus fejlődési irány, hiszen az interferenciakép rögzítése nem igényel időigényes kémiai eljárásokat. Segítségével a holografikus mérés technika módszereinek egy része jóval gyorsabbá tehető, ezáltal azok az ipari felhasználásra alkalmassá válhatnak.

## Célkitűzések

Célul tűztem ki olyan számítógépes eljárás kidolgozását, amely alkalmas nem-Fourier-típusú hologramok generálására, valamint a valós tárgy hullám rekonstrukciójának szimulálására. Ennek érdekében célszerű numerikus módszerekkel megvizsgálni a számítógépes hologramról rekonstruált kép minőségét a hologram paramétereinek függvényében. A számítógépes futásidő csökkentésére kis műveletigényű algoritmus kifejlesztése szükséges. Egy olyan közelítő módszer kidolgozását is megcéloztam, melynek segítségével a rekonstrukció (leképezés) minősítésére szimulációval kapott numerikus eredmények becülhetők. A kidolgozandó eljárás gyakorlati problémákra történő alkalmazása is a tervek között szerepelt.

További célom volt, hogy a számítógéppel generált hologramok rekonstrukcióját modellező eljárást a digitális holográfiában is használni lehessen. Ennek érdekében a digitális holográfia technikai lehetőségeit (korlátait) figyelembe vevő olyan új mérési módszer kidolgozása is szükségessé válhat, melynek segítségével a képrögzítés és a valós hullámfront komplex amplitúdójának meghatározása elvégezhető.

## Vizsgálati módszerek

A kutatásokat a Budapesti Műszaki Egyetem Fizika Tanszékén az Optikai Méréstechnika Csoport tagjaként végeztem.

A számítógépes valamint a digitális holográfia rekonstrukciót modellező numerikus módszeréhez szükséges szoftverek egy része Turbo Pascal nyelven íródott. Ezek futtatását egy Silicon Grafics munkaállomáson Bokor Nándor doktorandusz segítségével végeztem. A modellvizsgálat másik fele egy Pentium-4 típusú személyi számítógépen Visual Basic programozási nyelven általam írt számítógépes program segítségével történt.

A digitális holográfia két referenciasugaras elrendezése a Fizika Tanszék optika laboratóriumában lett összeállítva. A kezdetekben He-Ne lézert, majd Argon-ion lézert használtam. A hologramok rögzítését egy 1024x1024-es (10 bit) felbontású CCD kamerával végeztem.

A „pálcikaember” valamint a BME felirat monogramjának hologramját egy 35mm széles, kereskedelmi forgalomban kapható fekete-fehér filmre fényképeztem Csuka Györgyi fotólaboráns segítségével.

## Új tudományos eredmények

### **1. Számítógéppel generált nem-Fourier típusú hologramok leképezési tulajdonságainak modellezése egy Monte-Carlo eljáráson alapuló módszer segítségével.**

Megmutattam, hogy a rekonstrukció numerikus vizsgálatához a – hologram nagyfokú redundanciáját kihasználva – a M-C algoritmus jól használható. Az eljárás lényege abban áll, hogy a hologram pixeleinek egy (általában töredék) részét véletlenszám generátor segítségével választjuk ki. Ezután a tér megadott tartományában a rekonstruált valós hullám intenzitásértékét az így kiválasztott pixelek ill. a hozzájuk tartozó hologram mátrixelem értékek segítségével határozzuk meg. A módszer alkalmazásával megvizsgáltam, hogy a „visszaállított” kép minősége hogyan függ a hologram paramétereitől. Minthogy csak a pixelek egy részét kell figyelembe venni a számítások során, így a számítógépes futásidő jelentősen csökkenthető. [1,7,8]

### **2. A számítógépes hologramok rekonstrukciójának jellemzése a visszaállított kép és az eredeti tárgy intenzitáseloszlása közötti korrelációval.**

Számítógéppel generált hologramok leképezésének minősítésére ezidáig főként a jel/zaj hányadost (SNR), valamint a négyzetes középhiba [MSE] értékét használták. Megmutattam, hogy a rekonstrukció jellemzésére szolgáló korrelációs együttható numerikus értéke igen szemléletes jelentéssel bír. (Azaz ha értéke 1-nél nem sokkal kisebb, akkor igen jó az egyezés a tárgy és képe között. Ha értéke nullához közeli érték, akkor a két intenzitáseloszlás egymástól függetlennek tekinthető.)

Ugyanakkor a korrelációs együttható használata megoldást jelent az olyan típusú problémákra, amely az SNR valamint az MSE alkalmazása során felléphetnek. [2]

### **3. A rekonstrukció konvergenciáját javító fontossági-mintavételezés alkalmazása.**

A Monte-Carlo algoritmus alkalmazása során akkor kaphatjuk a legkisebb szórást a diffrakciót leíró paraméteres integrál becslésére, ha a hologrampontokat nem teljesen véletlenszerűen, hanem a fontossági mintavételezés segítségével választjuk ki. Az eljárást

számítógépes hologramok leképezésének szimulációjához is használtam. A numerikus vizsgálatok igazolták az elméleti előrejelzést. (Ez nem volt teljesen egyértelmű a szimulációs vizsgálatok előtt, ugyanis nem a M-C módszerrel kapott komplex értéket hasonlítjuk össze a tárgy hullám komplex amplitúdójával, hanem az abszolútértékük négyzetét. Ilyenkor - „zajos” képek esetén - a konvergencia javulása nem magától értetődő tény.) [2,10]

#### **4. Az ú.n. „kettős” Monte-Carlo eljárás bevezetése a számításigény csökkentésére, valamint a periódikus mintavételezésből adódó problémák elkerülésére.**

A hologram pixeleinek figyelembevételével a rekonstrukció többféleképpen számítható. Például a pixelek – mint négyzet vagy téglalap alakú rés – diffrakciós képe koherensen összegezhető (Fraunhofer közelítés). Másrészt megtehetjük azt is, hogy a véletlenszerűen kiválasztott pixelen belül még a számításhoz felhasználandó pontforrás helyét is véletlenszám generátor alkalmazásával határozzuk meg. A két eljárás eredményeinek összehasonlítása azt mutatja, hogy a két eljárás konvergenciája között nincs lényeges különbség. A kisebb számításigényű „kettős” Monte-Carlo eljárással tehát helyettesíteni lehet a Fraunhofer-közelítést. Másrészt a módszer használatával egyszerűen vizsgálható a hologram pixelméretének hatása a rekonstrukcióra. [2]

#### **5. A rekonstrukció modellezésére kidolgozott szimulációs eljárás alkalmazása lefókuszált rövid fényimpulzus intenzitáseloszlásának meghatározására és kinoform lencsék optimalizálására.**

Mind a mérés technikában, mind a távközlésben egyre rövidebb fényimpulzusokat használnak. Ezért mindkét területen felmerülő jogos igény a rövid (vagy „ultrarövid”) impulzusok formálása. Rövid fényimpulzusok leképezhetők (lefókuszálhatók) számítógéppel generált fázishologramok, kinoformok segítségével. Ilyenkor nem okoz nem kívánt hatást az üveglencsékre jellemző – a lencse anyagának tulajdonságaitól függő – diszperzió.

A rekonstrukció modellezésére kidolgozott szimulációs eljárás alkalmazásával meghatároztam 0.2ps, 0.4ps, ..., 2.0ps-os fényimpulzusok intenzitáseloszlását (jelalak-változását) egy 4.2cm fókusztávolságú kinoform lencse fókuszpontjának közelében. Az eredmények a 2.3.5. pontban találhatók.

A Monte-Carlo szimulációs eljárás gyorsaságát (kis műveletigényét) kihasználó „iteratív M-C algoritmus”-t dolgoztam ki kinoform lencsék optimalizálására. [3,9]

## **6. Közelítő összefüggés a korrelációs függvény konvergenciájának becslésére.**

A képhűséget jellemző paraméter definícióját pontosítani kellett. Ennek célja az volt, hogy a kvantálásból, átlagolásból, stb. származó hibák ne jelentsenek problémát a korrelációs függvény konvergenciájának statisztikai vizsgálatánál. A leképezés minőségét a M-C algoritmussal meghatározott valós hullám intenzitáseloszlásának ill. a hologram összes pixelének figyelembevételével kapható kép összehasonlításával definiáltam. (A gyakorlati szempontból fontos többfókuszú holografikus lencsék esetén a két definíció által meghatározott numerikus értékek között igen kicsi a különbség.)

A matematikai statisztika és valószínűségelmélet néhány tételének felhasználásával egy közelítő formulát vezettem le. Ez az összefüggés bizonyos – a gyakorlati életben általában előforduló – méret-elrendezés esetén a korrelációs görbe közelítésére (fittelésére) használható. A becsléssel ill. a szimulációval kapott eredmények összehasonlítása a dolgozat 2.3.6. alfejezetében található.

## **7. Digitális holográfia két referencianyalábbal.**

Javasoltam egy olyan – két referencianyalábot tartalmazó – elrendezést, melynek alkalmazásával a hologram fázistoló eszköz használata nélkül rögzíthető (ill. tárolható). A kifejlesztett algoritmus segítségével a számítógépben tárolt interferencia mintázatokból a tárgyhullám fázisa kiszámítható. Így a rekonstrukció – a számítógépes holográfiában már kidolgozott módszerekkel – szimulálható. Két elrendezés (ill. a megfelelő algoritmusok) alkalmazását mutatom be a 3.2. fejezetben. [4, 5, 6]

### **Az eredmények hasznosítása**

A nem-Fourier-típusú hologramok leképezési tulajdonságainak vizsgálatára kidolgozott módszer a szintén az értekezésben bemutatott optimalizációs algoritmussal együtt holografikus optikai elemek (főként holografikus csatolók) tervezésében nyújthat komoly segítséget. Rövid fényimpulzusok holografikus lencsével történő lefókuszálásának modellezése az optikai mérés technikában alkalmazható. A digitális hologram rögzítésére és rekonstruálására bemutatott eljárás a holográfia ipari felhasználására nyújt lehetőséget.

## A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

1. N.Bokor, Zs. Papp: "Computational method for testing computer generated holograms", *Opt. Eng.*, 35 (10), pp. 2810-2815 (Oct. 1996.)
2. N. Bokor, Zs. Papp: "Monte Carlo method in computer holography", *Opt.Eng.* 36 (4), pp. 1014-1025 (April 1997.)
3. N. Bokor, Zs. Papp: "Optimization of kinoform lenses with Monte-Carlo method", *Appl. Opt.* Vol. 37., No. 17, pp. 3685-3688. (1998)
4. Zs. Papp, J. Kornis: "Digital holography by two reference beams", *Proc. Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology*, SPIE Vol. 4416. p. 112-115. Yokohama, June 2001
5. Zs. Papp, J. Kornis, B. Gombkötő: "New methods in recording and reconstruction digital holograms", *Optical Metrology 2003*, München, megjelenés alatt.
6. Zs. Papp, J. Kornis, B. Gombkötő: "Monte-Carlo method in digital holography", *Speckle Metrology 2003*, *SPIE 4933*, editors: Kay Gasting, Ole Johan Lkberg, Svein Winther, Trondheim, June 2003, pp. 39-41.
7. N. Bokor, Zs. Papp: "An easily understandable method for making computer generated holograms...", "Education and Training in optics" ICO topical meeting, 1993. aug. 16-19, Pécs, Vol. I., p. 164-166.
8. N. Bokor, Z. Füzessy, Zs. Papp: "Számítógépes holográfia", *Kvantum-elektronika'94*, P. 35.
9. N. Bokor, Zs. Papp: "Optization of kinofem lenses"; in *Simulation and Experiment in Laser Metrology*; pp. 100-105, Akademie Verlag, Berlin (1996), pp. 100-105.
10. Bokor Nándor, Papp Zsolt: "Monte Carlo módszer a számítógépes holográfiában", *Kvantumelektronika '97*; p 77-78

## További tudományos közlemények

11. Papp Zsolt: "Kisméretű plánparalell üveglemez ékességének meghatározása és prizmahibák mérése", *A hazai kvantumelektronikai kutatások eredményei*. Bp. 1991.IX.31., p. 41.

12. Takács Sándor, Papp Zsolt: "Szolitonok a távközlésben", Magyar Távközlés 1992. aug., p. 9.
13. Zs. Papp, J. Kornis, Z. Füzessy: "A method for measuring the shape of aspherical lenses by holography and computing", 16th Congress of the International commission for Optics, "Optics as a Key to High Technology", Bp. 1993., p. 955.
14. Zs. Papp, L. Nádai: "Numerical study of influence of ultrashort light pulse on thin optical layer", "Education and Training in optics" ICO topical meeting, 1993. aug. 16-19, Pécs, Vol. I., pp. 126-128.
15. Zs. Papp, J. Kornis, Z. Füzessy: "Computer aided measuring the shape of aspherical lenses", "FRINGE'93", 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Pattern, Akademie Verlag (1993), pp. 476-478.
16. Z. Füzessy, J. Kornis, Zs. Papp, I. Frigyes, B. Molnár: "Nagystabilitású fálvezetőlézer", Kvantumelektronika'94, P. 10.
17. J. Kornis, Z. Füzessy, Zs. Papp: "Kétfrekvenciás útmérő", Kvantum-elektronika'94, P. 40.
18. L. Nádai, Zs. Papp,...: "Identification and Control for Optimal Stabilization of Lasers"; Workshop of Automation and Control Engineering in Higher Education Vienna; July 5-7. (1995)
19. F. Ráksi, Zs. Papp: "Measurement of ultrashort X-ray pulses by photon correlation" SPIE Conference 2523, Appl. of Laser Plasma Radiation II., San Diego 1995.
20. Zs. Papp, P. Várlaki, L. Nádai: "Wave-packet model and Mach-Zehnder-type interferometers", Proceedings of Conference "Causality and Locality", York University (Toronto), (Aug. 1997) pp. 373-381.



