

Beszámoló jelentés a 'Ritka minták off-axis hologramjának gyors, nagy felbontású fázis rekonstrukciója' 124602 azonosítójú projektről.

Ritka minták fázisvisszaállítása off-axis hologramból.

Korábban publikáltuk, hogy ritka minták esetén egy mért off-axis (OA) és egy in-line (IL) digitális hologram segítségével az OA objektumtagjának a felhasználásával, az IL hologram fázisának a rekonstrukciója jelentősen felgyorsítható. Mivel ekkor nem limitálja a rekonstrukció felbontását az objektum tag és az egyéb tagok elválasztásához használt térfrekvencia szűrés, azaz az objektum tag sávszélessége, a rekonstrukció felbontása jelentősen megnő. Az általunk javasolt eljárásban az OA objektum tag rekonstrukciója határozza meg a visszahívás során az objektum alacsony térfrekvenciáit egy IL hologram módosított Gerchberg-Saxton (GS) típusú algoritmus alkalmazásával történő fázisrekonstrukciójakor. Így gyors és pontos fázisrekonstrukció lett elérhető.

Az IL hologramok fázisvisszaállítására legszélesebb körben a módosított GS algoritmust, illetve annak nemlineáris módon gyorsított verzióját: a Fienup féle Hibrid Input Output algoritmust használják. Meg kell jegyezni, hogy léteznek a minta ritkaságát, redundanciáját kihasználó más hatékony eljárások is. Ezek viszont egyrészt több feltételezésre szorulnak az objektummal kapcsolatban, másrészt gyakran több független mérésre van a végrehajtásukhoz szükség.

A GS eljárás felváltva használja a hologram amplitúdó megkötését, amit a mérés, a mért hologram intenzitása rögzít, illetve az objektumtartó megkötést, ami feltételezi, hogy az objektumok véges kiterjedésűek. Ez ritka minták esetén teljesül. A tartó pontos meghatározása viszont nem mindig egyszerű. A jó rekonstrukcióhoz pontos tartó kell, de ezt az IL hologram esetén az ikerkép diffrakciói, OA rekonstrukció felhasználásakor a rossz felbontás nehezíti. Célunk, hogy egy viszonylag pontatlan, durván becsült tartó esetén is működjön a fázisrekonstrukció.

Az általunk korábban javasolt eljárás azért tudja gyorsítani az algoritmus konvergenciáját, mert egyrészt az OA rekonstrukciója csak az alacsony térfrekvenciák rekonstrukciója esetén pontos, hisz a sávszűrés miatt esetleg hiányoznak is a magas térfrekvenciák. Viszont az IL fázisrekonstrukció objektumtartó megkötése épp ezeknek az alacsony térfrekvenciás komponensek becslése esetén lassul le, hiszen az ikerkép diffrakcióinak az alacsony térfrekvenciás részei általában az alkalmazott tartón belülre esnek, és nem nyújtanak információt ezek rekonstrukciójához.

A probléma ezzel a megközelítéssel az volt, hogy a módszer alkalmazásához két - egy IL és egy OA - hologram felvételére volt szükség. Két felvétel készítése nem mindig elvégezhető: például időben akár csak lassan, de változó minták estében sem. Továbbá a két mérés automatizálásához az egyik optikai út vezérelhető mechanikus megszakítására is szükség van, ami nehézkes és lassítja a mérést. Ráadásul, időközben találtunk az irodalomban egy eljárást, ahol két fáziseltolt OA hologram felvételnek az alkalmazásával az objektum tag szeparálható és így a pontos fázisvisszaállítás is megvalósítható.

A projekt elsődlegesen kitűzött feladata az volt, hogy oldjuk meg ezt a rekonstrukciót egyetlen OA hologram felhasználásával.

Itt a probléma az, hogy bár az OA hologram mindig tartalmazza az IL hologramot is, de ezek: az OA objektum tagok és az IL komponens (még a frekvenciatérben is) jelentősen átfednek egymással. Amennyiben ezt az alkalmazott optika nagyítása, térfrekvencia szűrése meg is tudná gátolni, ahogy azt mérések összeállításánál gyakran meg is teszik, akkor ez jelentősen csökkenti a rekonstrukcióról elérhető képméretet/felbontást, a tér-sávszélesség szorzatot. Azaz nem nyernénk a módszerrel semmit.

A kutatás során többféle módon is próbálkoztunk a különböző OA hologram tagok (OA objektum, OA konjugált, IL) szegmentálásával, elválasztásával, de ezek nem vezettek megfelelő eredményre. Korábban ezt többen megpróbálták már, épp azért, hogy optimalizálni lehessen az objektum tag sávszélességét, de ezek közül egyik eljárás se bizonyult megfelelően pontosnak, sikeresnek. Vizsgálataink során viszont úgy sikerült módosítani a GS algoritmust, hogy az alkalmazhatóvá vált OA hologramok esetén is. Egyszerűsége ellenére ilyen nem találtunk az irodalomban, hiszen az OA holográfiát épp azért vezették be, hogy egyrészt sűrű, nagy kitöltésű minták esetén is megoldható legyen a fázis rekonstrukciója (esetünkben ez épp nem teljesül), másrészt hogy maga a rekonstrukció is egyszerű legyen (esetünkben ez egy iteratív eljárás, bár jelentősen felgyorsítható!).

Módosított GS algoritmus OA hologramok rekonstrukciójára

Ehhez a hagyományos GS algoritmus során alkalmazott hologram amplitúdó megkötést kellett módosítani: A fázisrekonstrukciós iteráció adott állapotában rekonstruált, és a hologram síkjáig terjesztett objektum hullámfronthoz hozzá kell adni az OA hologram ferde referencia hullámfrontját. Ez egyszerűen a szimulációja az OA hologram fizikai keletkezésének. Értelemszerűen, erre a szimulált próba OA hologramra kell alkalmazni az amplitúdó megkötést, a mért OA hologram magnitúdó felhasználásával. Ezután ki kell vonni a korábban hozzáadott ferde referencia hullámfrontot és így megkapjuk a korrigált, javított objektum hullámfront becslését a hologram síkjában.

Az algoritmus további részei változatlanok. Így a Fienup féle HIO algoritmus is alkalmazható. Meg kell jegyezni, úgy tapasztaltuk, hogy az általunk vizsgált Fresnell hologramok esetében ennek nincs a konvergenciát olyan mértékben gyorsító hatása, mint amit a Fourier hologramok esetén találtak.

Minden más, a fázisvisszaállításhoz használt további megkötés továbbra is alkalmazható marad. Például, ha tisztán amplitúdó vagy tisztán fázistárgyról van szó, akkor az ezeknek megfelelő megkötések alkalmazhatók. Ilyen az is, amikor a tartóból kizárják a háttér megvilágításnál nagyobb magnitúdójú területeket, hiszen ezek diffrakciók eredményei.

Szimulációk azt mutatták, hogy jelentősen javul a rekonstrukció pontossága, illetve az IL és a különböző OA tagok átfedéséből eredő zajok eltűnnek. Meglepő módon, a hasonló módon modellezett IL hologram GS fázisvisszahívásához képest is megnőtt a konvergencia sebessége (~3x). Ennek pontos okát még nem látjuk.

A konvergencia sebességét tovább növeli (~10x), ha a korábbi elképzelésnek megfelelően, az OA objektum tagjából rekonstruált objektum hullámfrontból indítjuk az algoritmust, hiszen ez tartalmazza az alacsony térfrekvenciákat és azok ismerete a fent leírt módon segíti a fázisvisszaállítás konvergálását.

Konvergencia sebesség, pontosság

A projekt folyamán vizsgáltuk, pontosítani tudtuk az alkalmazott GS (Fienup) algoritmusok konvergenciáját, pontosságát meghatározó paramétereket. Kiderült, hogy csak részben igaz az az irodalomban közismert állítás hogy a gyors konvergencia csak kis Fresnell számok esetén érhető el. Kiderült, hogy a korábban említett, az objektumtartón kívülre szóródó ikerkép diffrakciók határozzák meg a konvergencia sebességét. Viszont ez általában nagy objektum-hologram távolság esetén teljesül (kis Fresnell szám). Ekkor viszont a hologramból a szenzor véges apertúrája miatt hiányoznak a magas térfrekvenciák és a rekonstrukció ezért hibás lesz.

Így a hologram fázisvisszahívása vagy gyors és pontatlan, vagy pontos, de nagyon, esetleg elfogadhatatlanul lassú! Van egy átmeneti távolság és apertúra ahol azért biztosítható a megfelelő pontosság és sebesség. A kísérletek során tehát érdemes olyan távolságot választani, ahol a

konvergencia sebességének a növekedése jelentős az új addicionális információ, az OA rekonstrukció alacsony térfrekvenciái felhasználásával. Ekkor az elérhető pontosság is megnő, hisz a magas térfrekvenciákat is tartalmazza a hologram (nagyobb Fresnell szám).

In-line hologramok fázisvisszaállítása

Ezt a felismerést sikerült IL hologramok fázisvisszaállításának a gyorsításához, pontosításához is felhasználni. Látható, hogy míg az alacsony térfrekvenciákat a távoli hologram tudja gyorsan visszaállítani, de ekkor a magas térfrekvenciák hiányosak, addig a magas térfrekvenciákat csak közeli (nagy Fresnell számú) hologram tartalmazza. Mivel ez utóbbiak jórésztben a tartón kívülre szóródnak, ezek rekonstrukciója gyors. Ekkor viszont épp az alacsony térfrekvenciák rekonstrukciója lassú, hiszen ezek jórészt a tartón belülre diffraktálódnak, és így nem adnak ezek eloszlásának becsléséhez további információt.

A két mérés kombinációjával kölcsönösen ki lehet egészíteni az amúgy hiányzó vagy rosszul becsülhető adatokat. Tehát egy távoli IL hologram segítségével az objektum hullámfrontjának az alacsony térfrekvenciás részét becsüljük meg, míg ugyan erről az objektumról készült közeli IL hologramból, az alacsony térfrekvenciák ismeretében már nagy felbontású, pontos fázisrekonstrukció lesz elérhető.

Ráadásul az alacsony térfrekvenciákat akár egy alul mintavételezett hologramból is meg lehet becsülni és ezzel még gyorsabbá válik annak működése.

Más fázisrekonstrukciós eljárások esetén is alkalmazható, sőt alkalmazandó a megfigyelt viselkedés. Például ha több különböző távolságban rögzített hologramból állítjuk helyre a fáziseloszlást. Ilyenkor az eredeti, nem módosított, eredeti GS eljárás alkalmazandó, ahol a hologram amplitúdó megkötéseket alkalmazzuk a különböző hologram síkokban. Ilyenkor, ha nagy távolságú a terjesztés az a magas térfrekvenciák hiánya miatt torzított lesz. Viszont a fázisvisszaállítás sebességét ekkor is növeli az, hogy a nagyobb távolságú terjesztés nagyobb hullámfront változással jár együtt. Ekkor érdemes ezeket a távoli hologramokat csak az alacsony térfrekvenciák becslésére használni, és ezek után a kis távolságú hologramok alkalmazásával pontosítani a fázisrekonstrukciót.

Ezek a megfigyelések azt mutatják, hogy a hologram rögzítés geometriája limitálja a rekonstrukció pontosságát. Ezen viszont, a mérések megfelelő paraméterezésével és az algoritmusok megfelelő kombinációjával felül lehet emelkedni.

Mérések

Korábbi kísérleteink során az OA hologramok rögzítéséhez készített mérőrendszerek igen érzékenyek voltak a rezgésekre és a felbontásukat se sikerült megfelelően nagyra beállítani. A kísérleti igazoláshoz összeállítottunk egy mérő berendezést, ami viszont már sokkal robusztusabb. Ez két afokális mikroszkóp ágból áll, amely egyrészt a minta megfelelően nagyított képét és egy megfelelően párhuzamosított OA referencia hullámfrontot biztosít. Megvilágítást szálcsatolt lézerek optikai szállal szétcsatolt részei biztosítják. A megfelelő úthosszkülönbség és az ágak megfelelő szöge biztosítja az OA objektum tag pozícióját és magnitúdóját (OA interferencia). Fontos feladat volt az alkalmazott kísérleti referencia hullámfront fázis és amplitúdóeloszlásának a pontos meghatározása, mert ez elengedhetetlen az algoritmus pontos működéséhez. Kísérletek azt mutatták, hogy jó beállítás esetén a referencia hullámfront görbülete kicsivé tehető és az jól kompenzálható, a végeredményből kiszűrhető.

Az IL hologramok fázisvisszaállításához is végeztünk kísérleteket ahol két vagy több felvételt használtunk a fázisrekonstrukcióhoz. Ehhez megépítettünk egy digitális holografikus mikroszkópot, ami hullámhossz szűrt LED-es megvilágítást alkalmaz, ahol a szabad téri terjedés során kialakult térbeli

koherencia (Van *Zittert*-Zernike) biztosítja a megfelelő koherencia hosszú megvilágítást. Ekkor jelentősen kisebb a koherens zaj (speckle) és az optikai rendszerben távol elhelyezkedő porszemek, karcok diffrakciói kevésbé rontják a kép minőségét. A berendezés képes több hologram egymástól különböző távolságban történő felvételére. Ezeknek a kísérletileg nyert hologramoknak az esetén, ha a mérés során az optikai tengellyel nem párhuzamosan is volt az elmozdulás, biztosítani kellett a felvételek rekonstrukcióinak a pontos egymáshoz illesztését. Ezt megfelelő fáziskorrelációs módszer alkalmazásával sikerült is pontosan, automatikusan elvégezni.

A kapott hologram rekonstrukciók ugyan mutatják a feltevésünk által jóslott viselkedést, de sajnos továbbra is maradt a fázisrekonstrukció során némi jól látható hiba. További probléma volt, hogy ha az alkalmazott tartó nem volt elég szűk, akkor a távoli rekonstrukciónak is nagy volt a hibája és ez öröklődött a közeli rekonstrukciójában is. Ha szűk volt a tartó - amit mérésekből gyakorlatilag lehetetlen mindig meghatározni – akkor a közeliből is viszonylag jó és gyors a rekonstrukció, és így nem demonstrálja jól a feltevésünket. Ráadásul a kísérleti eredmények kiértékelése azt mutatja, hogy szemben a szimulációval a konvergencia vagy gyors (5-15 iteráció) volt, vagy egyáltalán nem működött jól (15-100 iteráció), és ez a visszaállított kép minőségének a romlásához (speckle zaj) vezetett.

Ezt valószínűleg az okozza, hogy a mérés bizonyos tulajdonságai különböznek a szimulációtól. Szimulációink azt mutatták, hogy a megvilágítás viszonylag nagy (10-20nm) sávszélessége miatt a mért diffrakciós kép nem egy hologram. hanem hologramok integráljának tekinthető és ez az egy hullámhosszon mért rekonstrukciótól jelentősen eltérő rekonstrukcióval rendelkezik. A kísérleteket ezért zajosabb, de ténylegesen csak egy hullámhosszt tartalmazó lézer megvilágítással is elvégeztük. Így a kísérleti elrendezés további átalakítására, pontosítása folyamatban van.

Az eredmények:

Mindazonáltal az eddigi kísérleti eredmények alátámasztják az elméleti számításokat és az eredmények a cikkek publikálásához már elegendőnek tűnnek. A cikkek várhatóan április és május folyamán készülnek el és lesznek beküldve.

A tervezett cikkek címei:

Modified Gerchberg-Saxton Algorithm for Sparse Off-Axis Holograms.

Geometrical Constraints of the Phase Retrieval of In-Line Holograms.

Az eredményeinket eddig két konferencián mutattuk be:

SPIE OPTO, Paper No: 10944-17,

SPIE Optics and Optoelectronics, Paper No: EOO106-11.

Budapest, 2020. 02. 29.

Orzó László