

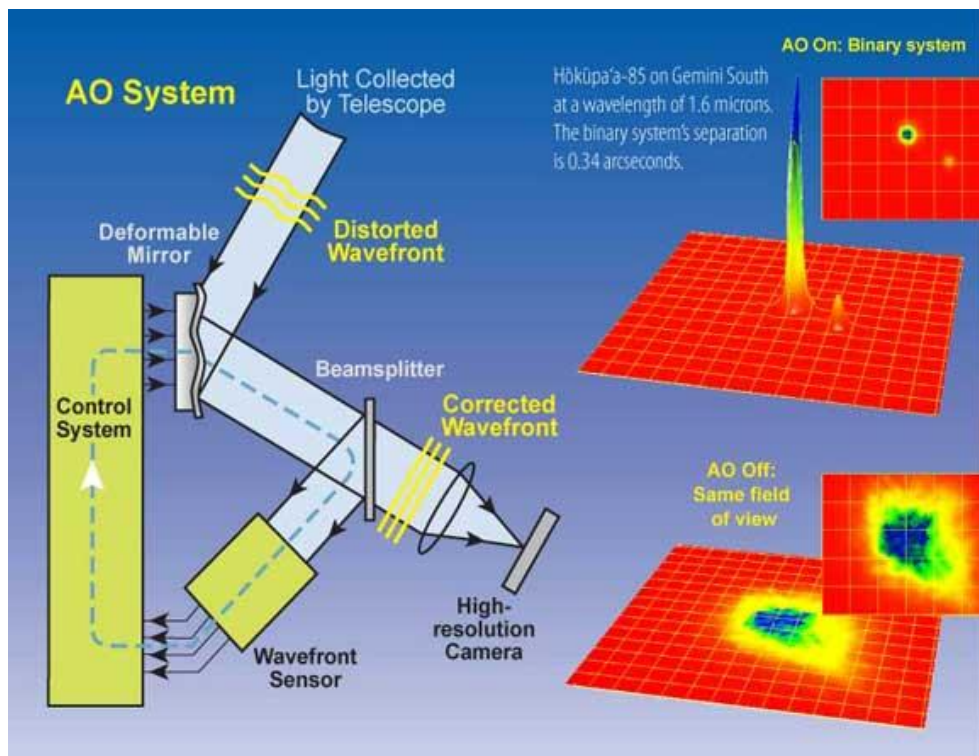
Lézernyaláb vizsgálata Shack-Hartmann hullámfrontszennozorral

2016.09.29, BME AFT, Barócsi Attila, Erdei Gábor

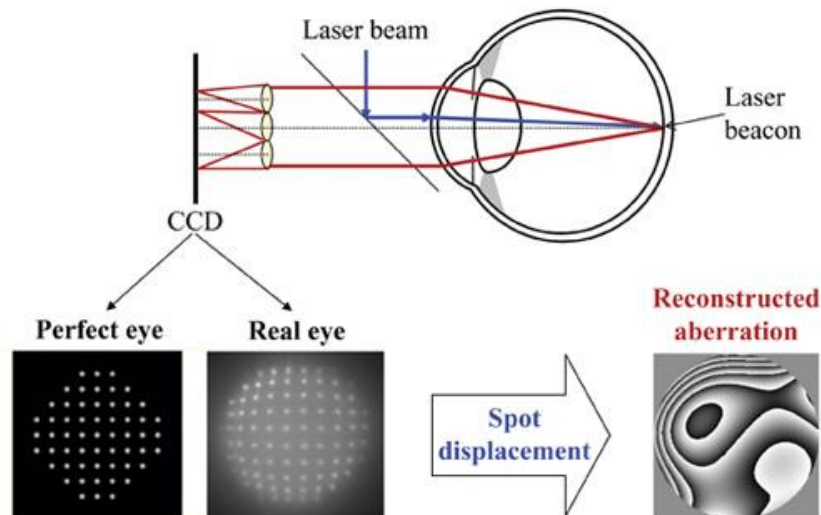
Bevezetés

Elektrodinamikából jól ismert fényterjedési formák a sík- és gömbhullám (vagy más szóval pontforrás). További fontos hullámoptikai modell a lézerrezonátorok leggyakoribb (TEM_{00}) módusa terjedésének leírására kiválóan használható ún. Gauss-nyaláb, amely az előbbiekkal együtt szintén megoldása a hullámegyenletnek. Optikai műszereken (ld. távcső, mikroszkóp stb.), vagy természetes törésmutató-eloszlásokon (pl. földi légkör vagy az emberi szem) keresztülbocsájtva ezen idealizált sugárzásokat, a fázisfelületeik általában eltorzulnak. Ezt a jelenséget hullámfront-aberrációnak nevezzük, amely megzavarja a nyalábterjedést (pl. növekszik a divergencia), illetve elrontja a képalkotás minőségét.

A korszerű optikai műszerektől elvárt mérési pontosság megköveteli a szinte tökéletes, aberráció-mentes működést, amelyhez nélkülözhetetlen, hogy az eszközökön áthaladó fény hullámfrontját precízen, gyakran valós időben lehessen kvantitatíve vizsgálni. Laborkörülmények között erre alkalmazhatók különböző interferométerek (pl. nyíró, Fizeau, Michelson stb.), de ezek működése erősen rezgésérzékeny és relative lassú. Ipari, vagy bármely egyéb, kevésbé kontrollálható környezetben történő hullámfront-aberráció mérésre alkalmas eszköz az ún. hullámfrontszennozor. Alkalmazási területe széleskörű: távcsőtükörök adaptív/aktív beállításától kezdve az emberi szem képalkotási hibáinak vizsgálatáig terjed (1. és 2. ábra). Mivel az eszköz nem tartalmaz saját fényforrást, ezért lézerek finomhangolására is kiválóan alkalmas (ezt a legtöbb interferométerrel nem lehet megtenni).



1. ábra. Hullámfrontszennozor alkalmazása csillagászati távcső adaptív tükreinek vezérléséhez. (Inst. of Astronomy, Univ. of Hawaii, Luise Good)

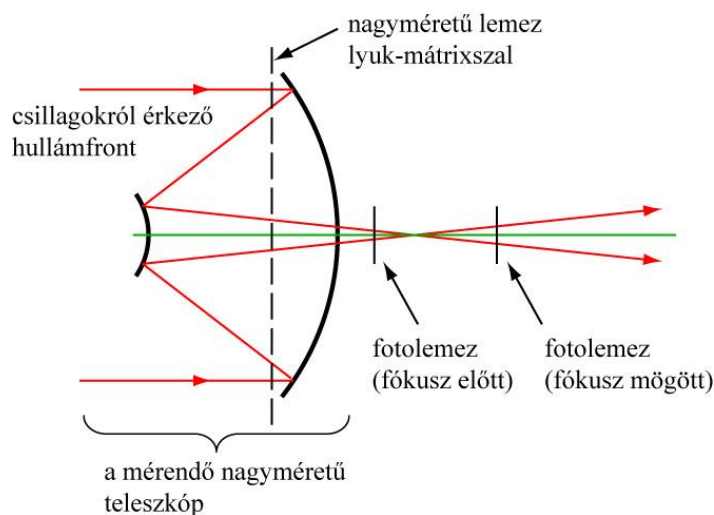


2. ábra. Emberi szem hullámfront-aberrációjának mérése hullámfrontszennorral. (Advanced Physiological Optics Lab., Univ. of Rochester)

Történeti áttekintés

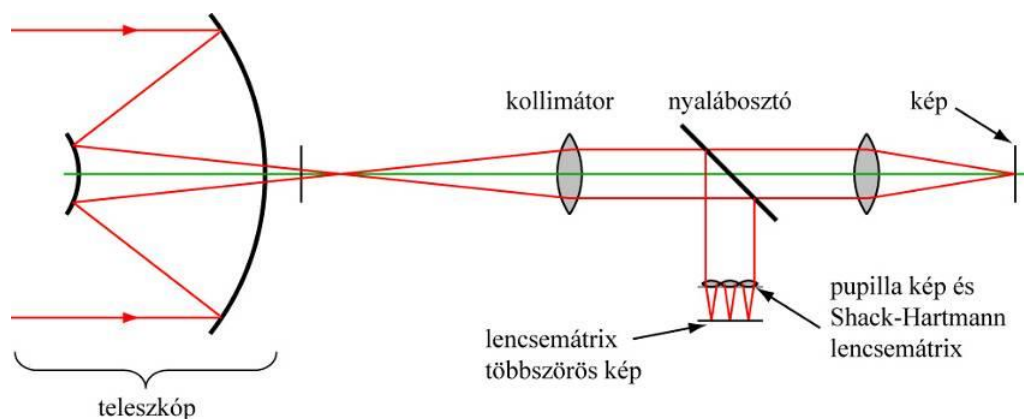
A Shack-Hartmann hullámfrontszennor egy konkrét probléma megoldásából fejlődött ki. Az 1960-as években az amerikai légierő a következő feladat elé állította az Arizonai Egyetemhez tartozó Optikai Tudományos Központot (Optical Sciences Center, OSC): hogyan javíthatóak a műholdak által a Föld felszínéről készített képek? Az atmoszféra ugyanis jelentősen korlátozza mind a képminőséget, mind az expozíciós időt. Dr. Aden Mienel az OSC akkori igazgatója a következőt javasolta: mérjék meg mind az atmoszféra, mind a rögzítendő kép optikai átviteli függvényét (Optical Transfer Function, OTF) majd osszák el a kép OTF-jét az atmoszféráéval. A megoldáshoz az kellett, hogy a két OTF-et egyidejűleg lehessen felvenni az expozíciós idő alkalmas megválasztásával úgy, hogy időbeli átlagolás helyett rögzíteni tudják a pillanatnyi atmoszferikus aberrációkat. A mért hullámfronthiba az expozíciós idő alatt $\lambda/10$ alatt kellett maradjon (λ jelöli a hullámhosszat vákuumban), ami $\sim 1/60$ s expozíciós időt adott. Mienel csillagász volt és így a standard Hartmann-eljárást alkalmazta (3. ábra), amelyben nagyméretű csillagászati teleszkóp apertúrájában lyukmátrixot tartalmazó panel helyezkedett el. Ez a teleszkóprendszeren a testtárgyról (pl. egy fényes csillag) érkező, lyukméretű nyalábokat engedett át. A fókuszon belül és kívül fotólemez helyezkedett el úgy, hogy az egyes nyalábok egymástól jól elváljanak. Két képet készítve egymástól ismert távolságra lévő lemezekre és megmérve a képek középpontját („súlypontját”), az egyes nyalábok követhetőek. Ezekből Hartmann a teleszkópok jóságai tényezőjét számolta ki, de más adatok is megkaphatók.

Mienel nem tudta az apertúrát a fenti módon kitakarni, ezért azt javasolta, hogy a távcső kimenő nyalábját az okulár mögött kollimálják és ide helyezzenek nyalábosztót, majd az osztott nyalábra helyezték a lyukmátrixot a pupilla képenek helyén. A képet vidikon cső jelenítette meg (ez egy a CCD és a képerősítők előtti időkből használatos kamera). Két probléma adódott: egyrészt az nyalábok intenzitása kicsi volt, másrészt az elmosódott folt középpontjának meghatározása nem volt elegendően pontos.



3. ábra. Korai Hartmann teszt optikai sémája.

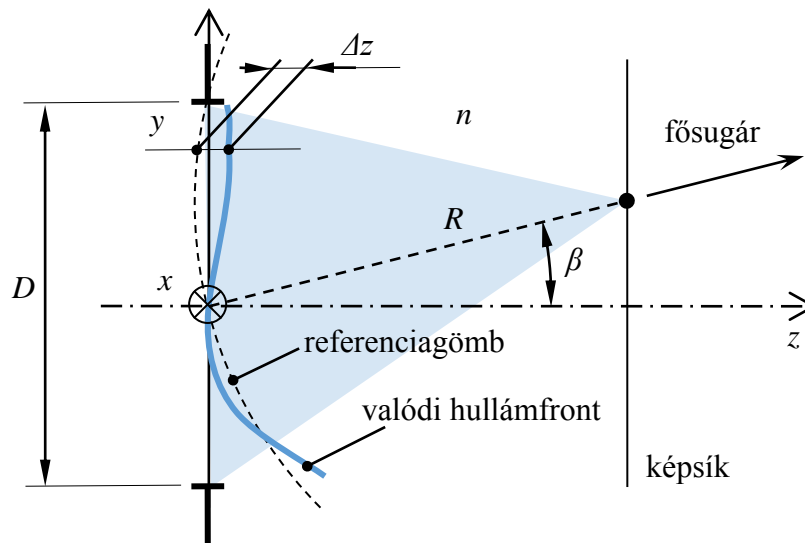
Az optimális paraméterek (lyukméret, képtávolság, szögmérési pontosság) meghatározásához tanulmány készült, amelyben Dr. Roland Shack is részt vett, és arra a következtetésre jutott, hogy az egyetlen működőképes megoldás, ha a nyílásokat lencsékre cserélik. Ezzel először adódott lehetőség a hullámfronthiba mérésére. Az első Shack-Hartmann szenzor elrendezése a 4. ábrán látható. A fenti módon meghatározott hullámfrontból egyrészt kiszámolható az OTF, másrészt adaptív optikai elemek segítségével működés közben is lehetővé teszi a képalkotási hibák korrigálását.



4. ábra. Az első Shack-Hartmann szenzor optikai sémája.

A hullámfrontok hibáinak jellemzése

A torzult (aberrációkkal terhelt) hullámfrontok kvantitatív minősítését a gyakorlatban statisztikai módszerekkel és speciális polinomokkal végzik. A hullámfront alakját jellemző mérőszámokat (hibákat) egy referencia-felülethez képest adják meg, ld. 5. ábra, ami az ideális hullámfrontot reprezentálja. A referencia-felület (ideális hullámfront) lehet gömb vagy sík, melynek meghatározásakor általában a valódi, aberrált hullámfrontra legjobban illeszkedő (best-fit) alakot választják. Könnyen belátható, hogy az aberráció mértéke függ még a fénynyaláb átmérőjétől (D) is. Bármilyen mérőszámot használunk tehát a hullámfront jellemzésére, annak megállapítása mellett szükség van a referencia-felület görbületi sugarának (R), dőlésszögének (α , β), a nyalábot átbocsátó nyílás (apertúra) átmérőjének (D), valamint a vizsgálati hullámhossznak (λ vákuumban) a megadására is.



5. ábra. Torzult hullámfront alakjának viszonyítása egy referencia-felülethez.

A hullámfront-aberráció mérőszáma az optikai úthosszkülönbség (Optical Path Difference, *OPD*), amely (némileg leegyszerűsítve a számolást) az alábbi képlettel kapható meg:

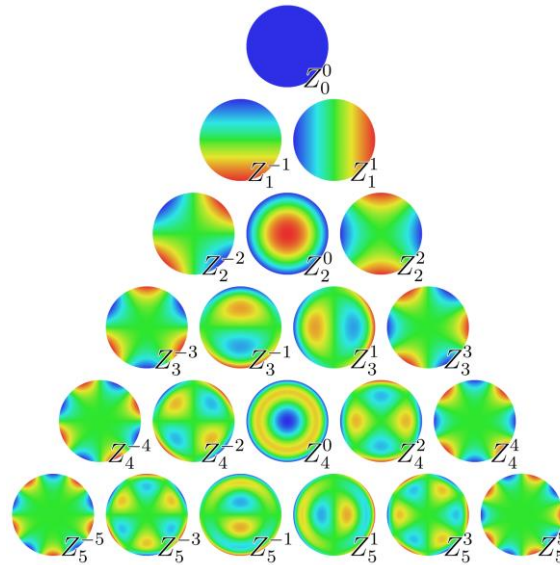
$$OPD(x, y) = n \cdot \Delta z(x, y) \quad (1)$$

Az *OPD* akkor pozitív, ha egy adott (x, y) pontban nagyobb a z -koordinátája mint a referenciafelületnek (a z -irány általában a fényterjedést jelenti), ideális (aberráció-mentes esetben) pedig $OPD = 0$. Miután jól definiált hullámfrontjai általában (de nem mindig, ld. pl. csillagfény) csak monokromatikus fényforrásoknak vannak, az *OPD* mérőszáma rendszerint az adott sugárzás hullámhossza (λ), vagy néha a mikrométer (μm). Amennyiben az aberráció kismértékű, elegendő a második momentumával jellemezni, azaz a négyzetes középértékkel (root-mean-square – RMS):

$$RMS\ OPD = \sqrt{\frac{1}{W} \sum_{i=1}^n w_i \cdot OPD_i^2} \quad ; \quad W = \sum_{i=1}^n w_i \quad , \quad (2)$$

ahol i végigfut a hullámfront összes megmért (x, y) pontján, w pedig ezen pontokban mérhető fényintenzitásnak megfelelő súlyozó tényező (homogén nyalábnál konstans az értéke). Az *RMS OPD* addig használható a hullámfront minősítésére, amíg értéke kicsi, jellemzően kisebb mint $0,14\lambda$. $RMS\ OPD < 0,07\lambda$ alatt azt mondjuk, hogy a nyaláb diffrakciókorlátozott, azaz a hullámfront hibáinak már nincs érzékelhető hatása a fényterjedésre, azt teljes mértékben a nyaláb szélét meghatározó apertúrán fellépő diffrakció határozza meg.

Amennyiben $RMS\ OPD > 0,14\lambda$, akkor már figyelembe kell venni a hullámfront alakját is, amit egy speciális sorfejtéssel valósítanak meg: a hullámfrontot mint háromdimenziós felületet ún. Zernike-polinom formájában sorba fejtik (ld. 6. ábra), és az egyes aberrációkat a polinom-együtthatókkal jellemzik. A módszer bonyolultsága miatt ennek tárgyalásától itt eltekintünk.

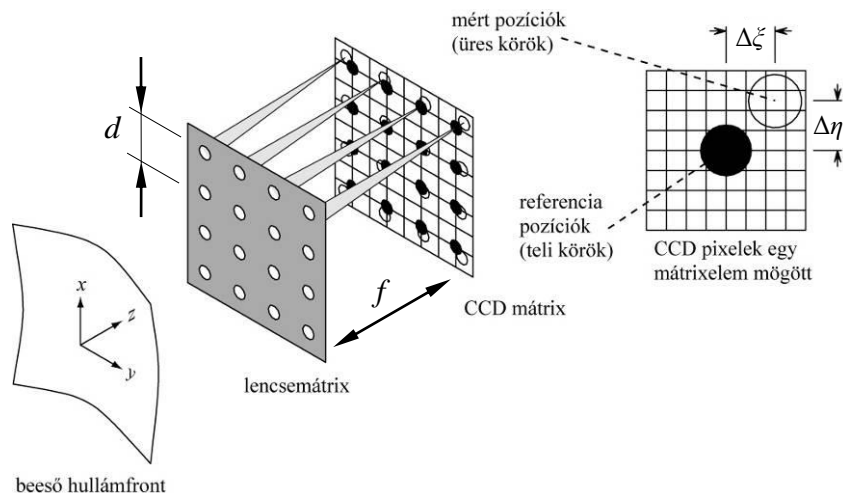


6. ábra. A Zernike-polinom első 21 rendje (wikipedia). Z_{00} felel meg az eltolásnak, Z_{11} a dőlésnek, Z_{02} a defókusznak, Z_{22} az asztigmatizmusnak, Z_{13} a kómának, Z_{04} a szférikus aberrációnak stb.

Az 5. ábrán látható x - y sík a mérés kivitelezésének helye. Ide kell tennünk műszerünket, ami a továbbiakban egy Shack-Hartmann hullámfrontszenzor lesz.

A Shack-Hartmann hullámfrontszenzor működési elve

A Shack-Hartmann hullámfrontszenzor működése a 7. ábrán követhető. (A fény a z -tengely irányában terjed.) A szenzor mikrolencséből álló mátrixot tartalmaz (32×40 db), melynek fókusz síkjában pixelezett CCD (vagy CMOS) képérzékelő helyezkedik el. Mivel a lencsék mérete nagyon kicsi (esetünkben $d = 153 \mu\text{m}$) a fókusz távolságukhoz képest ($f = 5,0 \text{ mm}$) a lencsék paraxiális tartományban működnek. Ennek köszönhetően nem okoznak további hullámfronttorzulást (azaz aberrációt), mélységelességük igen nagy (vagyis nem érzékenyek a hullámfront lokális görbületére), valamint fókuszoltjuk ideális diffrakciókorlátozott Airy-folt. Ez a fókuszolt akkor esik a mikrolencsék optikai tengelyére, ha a lencsét érő hullámfront pont merőleges a tengelyre. A hullámfront lokális dőlésszöge eltolja a lencsék fókuszoltját ebből a középhelyzetből, a kapott elmozdulásokból pedig a hullámfront meredeksége kiszámolható.



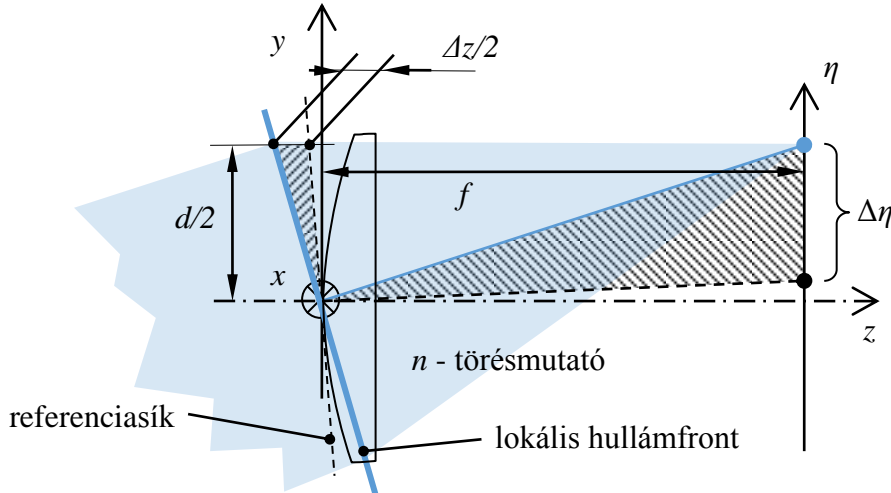
7. ábra. A Shack-Hartmann szenzor működési elve.

A hullámfrontszenzor a hullámfrontdőlést úgy határozza meg, hogy minden egyes lencsére megméri a fókuszfolt aktuális pozícióját ($\Delta\xi$, $\Delta\eta$) egy kvázi tökéletes referencia-hullámfronttal (általában síkhullám) felvett fókuszfolt-pozíciókhoz képest (ξ_0 , η_0). Az általunk alkalmazott szenzor gyárilag kalibrált ilyen módon, azaz a hullámfrontméréshez nem szükséges referencianyalábot is mérni; úgy tekinthetjük, mintha a referencia-felületünk a szenzor síkjába eső hullámfront lenne (ez az ún. abszolút fázismérés).

A hullámfrontdőlés mérésekből előáll a hullámfront 2D deriváltja (gradiens-térkép), amiből integrálással megkapjuk a valódi hullámfrontot (hullámfront-rekonstrukció). Ennek menete a következő. Első lépésben súlypontkereséssel meghatározzuk a fókuszfoltok helyzetét. A 8. ábra koordináta-rendszerében x , y jelöli a laterális koordinátákat a mikrolencsék síkjában, míg ξ , η a lencsék fókuszsíkjában. Az intenzitás-eloszlás középpontja (súlypont) tehát:

$$\Delta\xi = \frac{\sum_{i,j} I(\xi_i, \eta_j) \cdot \xi_i}{\sum_{i,j} I(\xi_i, \eta_j)} - \xi_0 \quad \text{és} \quad \Delta\eta = \frac{\sum_{i,j} I(\xi_i, \eta_j) \cdot \eta_j}{\sum_{i,j} I(\xi_i, \eta_j)} - \eta_0, \quad (2)$$

ahol i, j végigfut az egy lencse alatt elhelyezkedő képdetektor-pixelesen.



8. ábra. A hullámfront-meredekség értelmezése egy mikrolencse esetén.

Ezután a hullámfront meredeksége hasonló háromszögek alapján megkapható (ld. sraffozott területek a 8. ábrán):

$$\frac{\Delta OPD_x(x, y)/n}{d} = \frac{\Delta\xi}{f} \quad \text{és} \quad \frac{\Delta OPD_y(x, y)/n}{d} = \frac{\Delta\eta}{f} \quad (3)$$

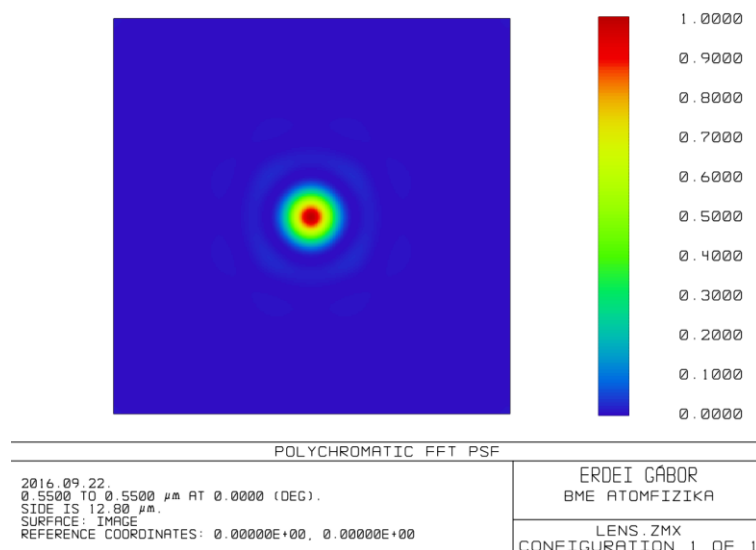
Végül a hullámfront rekonstrukciója a legegyszerűbb esetben az elemi (zóna) meredekségek lineáris integrálásával történik. Ha a beeső hullámfront „A” pontját választjuk referenciának ($OPD = 0$), akkor a hullámfront tetszőleges „B” pontjában az OPD értéke:

$$OPD(x, y) = \int_A^B \text{grad}(OPD) \, dr \approx \sum_{p,q} [\Delta OPD_x(x, y)_{p,q} + \Delta OPD_y(x, y)_{p,q}] = n \cdot \frac{d}{f} \sum_{p,q} [\Delta\xi_{p,q} + \Delta\eta_{p,q}], \quad (4)$$

ahol \mathbf{r} helyvektort jelöl, p és q végigfut az összes mikrolencsén, az integrálás (szummázás) pedig A és B közötti tetszőleges görbén történik. Valójában a szenzor ennél bonyolultabb (iterációs) algoritmust használ, ugyanis a fenti eljárás némileg zajos eredményt ad. A másik (választható) megközelítés, hogy nem zónánkénti rekonstrukciót végzünk, hanem az adatokra közvetlenül Zernike-polinomot illeszt a kiértékelő program.

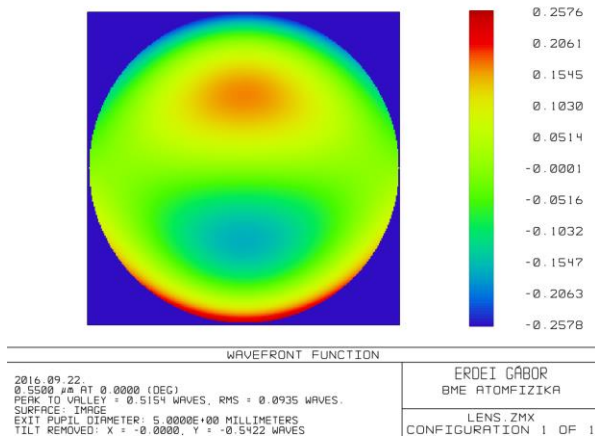
A hullámfront és a fénydiffrakció kapcsolata

Az Optika tárgyban láttuk, hogy egy apertúrán (nyíláson) áthaladó koherens, λ hullámhosszúságú fénynyaláb terjedése általában jól leírható a skalár diffrakció segítségével. Ezen elmélet alapján a terjedést meghatározó legfontosabb tényezők az apertúra formája/mérete, és a rajta áthaladó hullámfront alakja. Például egy távcső főtükéréről visszaverődő hullámfront és a tükör mérete együttesen megszabják a fényeloszlást a fókusz síkban, vagyis magának a vizsgált csillagnak a képét. Pontforrások (mint amilyenek a csillagok) és kör alakú apertúra (azaz távcső esetén tükör) esetén az ideális, diffrakciókorlátos mintázat az ún. Airy-folt (9. ábra).

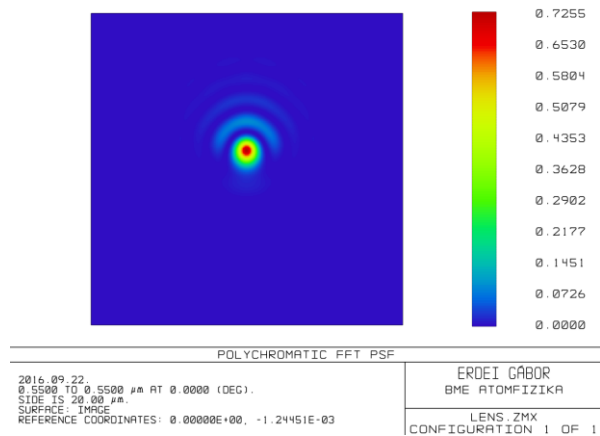


9. ábra. Ideális, aberrációmentes gömbi hullámfront diffrakciós foltja kör alakú apertúra esetén (Airy-folt) a fókusz síkban (azaz a referenciafelület középpontján áthaladó képsíkon.)

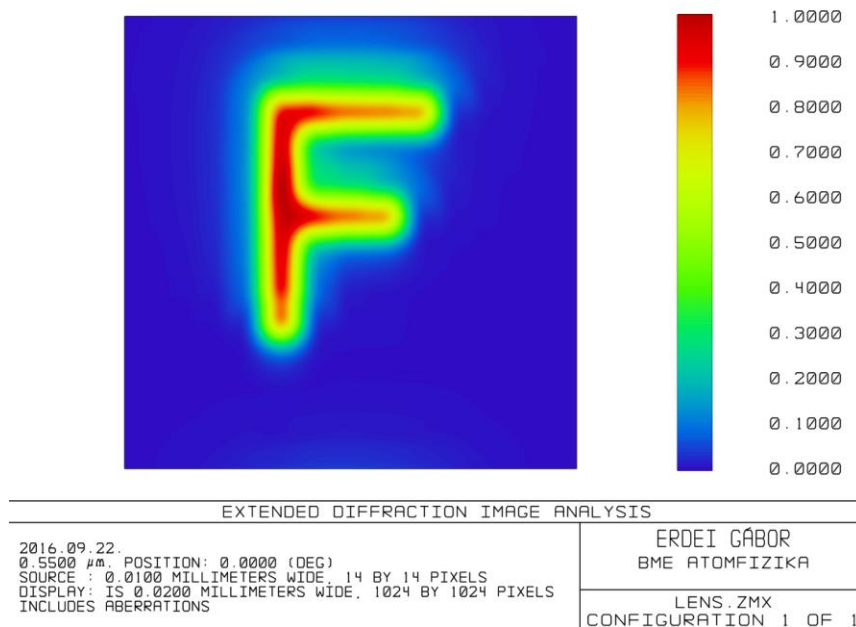
Amennyiben a hullámfront aberrációkkal terhelt (pl. távcső esetén légköri zavarok vagy a főtükör alakhibájának köszönhetően) a fókuszfolt elmosódik, romlik a képalkotás minősége. Optikából azt is láttuk, hogy ha a hullámfront-aberrációt (OPD) egy adott sugarú referenciafelülethez képest adjuk meg (ld. 5. ábra), akkor a referenciafelület középpontján áthaladó képsíkon kialakuló fókuszfolt képét (Point Spread Function – PSF) a hullámfront-aberráción végzett 2D Fourier-transzformációval kaphatjuk meg (ld. 10-11. ábra, ahol a hullámfrontot ún. kóma aberráció terheli). Más szóval: míg a fókuszfoltra közvetlenül hatnak a leképezőrendszer hibái, az OPD -ben ezek közvetlenül látszódnak, emiatt sokkal célravezetőbb az OPD tanulmányozása a rendszer hibáinak felderítése/korrigálása végett, mint a fókuszfolt vizsgálata. Mivel a Fourier-transzformáció számítógéppel könnyen elvégezhető feladat (Fast Fourier Transform – FFT), ezért a hullámfront-mérő szoftverek ezt általában ki is számolják, és analitikai célokra képesek megjeleníteni. A 12. ábra azt mutatja, hogy kóma aberrációval terhelt hullámfront esetén milyen eltorzult képet kapnánk egy F-betűről (szimuláció).



10. ábra. Kóma aberrációt tartalmazó hullámfront (pl. ha egy lencse laterálisan elmozdult egy leképező rendszer optikai tengelyéhez képest).



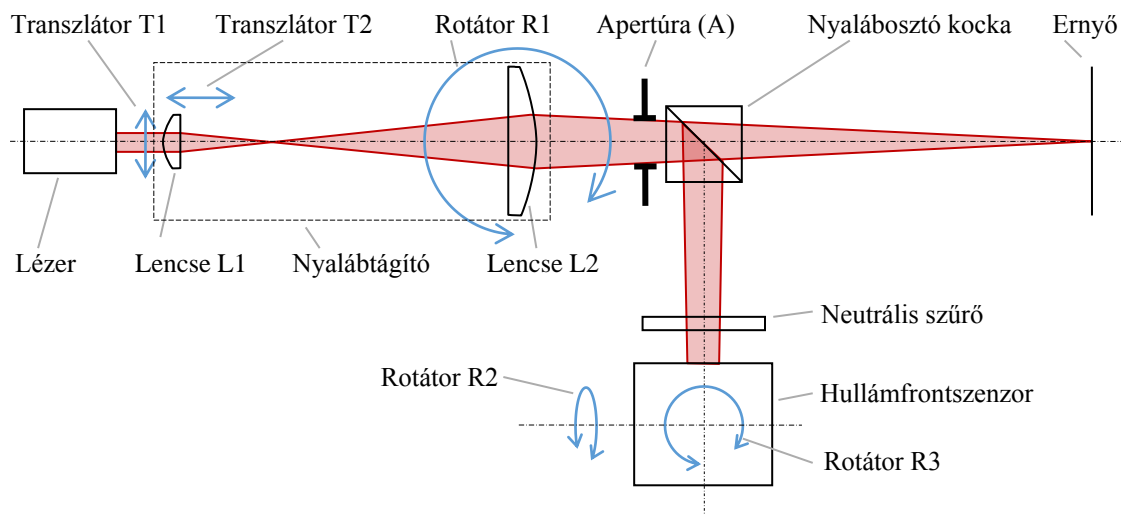
11. ábra. Kómás hullámfront diffrakciós foltja a fókusz síkban (PSF).



12. ábra. Kóma aberráció esetén a leképezés szellemkép-szerű lesz.

A mérési elrendezés

A hullámfrontszenzoros mérés elrendezése a 13. ábrán látható. A He-Ne lézer ($\lambda = 632,8$ nm) nyalábját után alkalmazott Kepler-távcső nyalábtágítóként funkcionál annak érdekében, hogy homogén módon tudjuk kivilágítani a szenzor felületét. A T1, T2 transzlátorokkal és R1 rotátorral különböző egyszerű aberrációk szimulálhatók. Mivel esetünkben a kalibrált szenzor referencia-felülete maga a szenzorsík, a következők tekinthetők aberrációnak, azaz hullámfront hibának: dőlés (T1), defókusz (T2), asztigmatizmus (R1). A nyalábosztó kocka azért szükséges, hogy a beállított aberrációk fókuszfoltra gyakorolt hatását nyomon tudjuk követni az ernyőn (praktikusan a labor falán). A neutrális szűrő a lézer fényét gyengíti le annyira, hogy a szenzort ne vigyük telítésbe. A szűrő nélkül ne világítsunk a mérőműszerbe! Az R2, R3 rotátorok pedig azért szükségesek, hogy a hullámfrontszenzort (ezzel együtt a referencia-felületet) a fénynyalábra merőlegesen tudjuk állítani.



13. ábra. A mérési elrendezés vázlata.

Mérési feladatok

1. Szoftver használatának megismerése

A mérésvezető útmutatása alapján vizsgálja meg a szoftver felhasználói felületének felépítését, funkcióit. Az alábbi mérési feladatokhoz készítsen képernyőmásolatokat a kapott hullámfrontokról, vagy a kimentett .txt adatokat ábrázolja matematikai programmal.

2. Ideális síkhullám beállítása

A T1, T2 transzlátorok és az R2, R3 rotátorok segítségével állítson be amennyire csak lehet sík hullámfrontot az eszközön. Próbálja elérni a diffrakciókorlátos állapotot ($\text{RMS OPD} < 0,07\lambda$). A durva iránybeállításhoz használja az eszköz célzás funkcióját.

3. Dőlés beállítása, mérése, ellenőrzése, méréstartomány/pontosság meghatározása

A T1 transzlátor segítségével állítson be kis mértékben ferde hullámfrontot. A kb. 2 m-re lévő falon kb. 10 mm legyen a folt elmozdulása (ΔZ). Jegyezze fel a T1 elmozdulását (Δy), a szoftver által kiszámolt dőlésszöget ($\Delta\alpha$). Az L2 lencse és a fal távolságából (l) és a folt elmozdulásából határozza meg a dőlésszöget és vesse össze a program által mért értékkel. A vizsgálatot összesen 3-szor végezze el a véletlen hiba becsléséhez.

4. Lencse (L2) fókusz távolságának megmérése dőlés alapján

Határozza meg a szoftver alapján mért szögből a lencse fókusz távolságát (f_{L2}) az alábbi paraxiális képlet alapján:

$$\tan(\Delta\alpha) = \frac{\Delta y}{f_{L2}}. \quad (5)$$

5. Defókuszt beállítása, hullámfrontgörbület megmérése

T2 segítségével állítson be defókuszt pozitív és negatív irányban is. Milyen változást tapasztal a hullámfront képén? Milyen mértékű defókuszt (T2) kell ahhoz, hogy az ideális síkhullám helyzetéből az RMS OPD $0,14\lambda$ fölé emelkedjen? Fókuszálja a falra a nyalábot, és vesse össze a fal távolságát (l) a szoftver által mért hullámfront rádiusszal. A vizsgálatot összesen 3-szor végezze el a véletlen hiba becsléséhez. Mekkora pontossággal tudták a fókuszálást

megismételni? Miért lehet ilyen nagy a hiba? Az egyik beállítás esetén jegyezzék föl a hullámfront *PV* (peak-to-valley) értékét, és az alábbi paraxiális képlet (a kör parabolikus közelítése) alapján határozzák meg a hullámfront görbületi sugarát (*R*):

$$PV \cdot \lambda = \frac{a^2}{2R}. \quad (6)$$

A képletben szereplő „*a*” a szenzor félátlója. Ha a *PV* eleve mikrométerben van megadva, nem szükséges a λ -val való szorzás.

6. Hullámfrontmérés kisebb apertúrával

A fenti beállítás esetén jegyezzék föl az *RMS OPD* értékét majd tegyenek egy kisebb (*A*) apertúrát a nyálábra. Mi látható a szenzoron? Hogyan változott az aberráció?

7. PSF vizsgálata ideális és defókuszált esetben

A falra fókuszált esetben, kis apertúra esetén jelenítse meg a fókuszfoltot a szoftverrel (PSF). Ezután állítson be szoftveresen +1000 mm defókuszot és vesse össze a kapott képet a valósággal (azaz egy papírlapot helyezzen 1000 mm-re a faltól, és azon szemlélje a képet.)

8. Asztigmatikus hullámfront beállítása, fókuszfoltok vizsgálata, távolságuk meghatározása

A fenti beállítás esetén az L2 lencsét forgassa el 10°-al. A kapott hullámfront asztigmatikus lesz, mivel vízszintes irányban közelebb kerül a fókuszfolt a mérőműszerhez, függőleges irányban pedig kb. a falon marad. Az asztigmatikus hullámfront tehát x- és y-irányban eltérő görbületi sugarú. Hogy néz ki a fókuszfolt a falon? (T2 transzlátorral lehet kicsit élesíteni rajta.) Hol van a vízszintesen fókuszált fókuszfolt, és milyen alakú? A szoftverrel defókusz alkalmazásával jelenítse meg ezeket a foltokat (PSF).

Ellenőrző kérdések

Vázolja a Shack-Hartmann hullámfrontszenzor működését ábrával és rövid magyarázattal.

Mik az előnyei a hullámfrontszenzoros mérésnek az interferometrikus módszerekkel szemben?

Lehet-e olyan hullámfrontot mérni hullámfrontszenzorral, amelyben fázisugrás (lépcső) van? Válaszát indokolja!

Hogyan definiáljuk a hullámfront aberráció mérőszámát (*OPD*) és ezt statisztikailag mivel jellemezzük?

Mi a szerepe a referencia-felületnek hullámfrontméréskor?