

Diplomamunka

**A spektrálisan bontott interferometrikus
szögdiszperzió-mérés pontosságának vizsgálata**

***Készítette: Görbe Mihály
V. évf. fizikus szakos hallgató***

Témavezetők: Dr. Kovács Attila, Dr. Osvay Károly

**Szegedi Tudományegyetem
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék**

Szeged, 2002. május

Tartalomjegyzék

1.	<i>Bevezetés</i>	3
2.	<i>Elméleti összefoglaló</i>	5
2.1.	A szögdiszperzió fogalma és hatása a lézerimpulzusra	5
2.2.	A szögdiszperzió forrásai fázismodulált lézerrendszerekben	6
2.3.	A szögdiszperzió-mérés módszerei	7
2.3.1.	A tükrözött nyalábú autokorrelátor	7
2.3.2.	A döntött impulzusfrontú egylövéses autokorrelátor	11
2.3.3.	A spektrálisan bontott tükrözött nyalábú interferométer	12
2.4.	A CCD-kamerák zajforrásai	17
2.5.	Az alkalmazott függvényillesztési eljárásokról	18
	A gradiens-módszer	19
3.	<i>Célkitűzések</i>	21
4.	<i>Új eredmények</i>	23
4.1.	Az interferogram-kiértékelő program elkészítése	23
4.1.1.	Eljárás cosinusfüggvény illesztésére	23
4.2.	Az interferogram-szimuláló program elkészítése	26
4.3.	A CCD-kamerák zajának meghatározása	26
4.4.	Szimulált interferogramok kiértékelése	29
4.5.	Mért interferogramok kiértékelése	39
5.	<i>Összefoglalás</i>	48
	<i>Felhasznált irodalom</i>	50

1. Bevezetés

Az utóbbi évtizedekben elterjedt nagyintenzitású lézerrendszerek kellően kompaktak és viszonylag olcsók ahhoz, hogy ma már ne legyen ritkaság az olyan laboratórium, ahol rutinszerűen állíthatók elő 10^{18}W/cm^2 fókuszált intenzitású lézerimpulzusok. A lézerrendszer elemeinek optimális beállítása mellett elméletileg elérhető csúcshintenzitást, mely közvetlenül az impulzus időbeli alakjától (főleg időbeli félértékszélességétől) és térbeli koncentrálhatóságától függ, akár felére vagy még kisebb részére ronthatja a rendszer nem tökéletes beállítása miatti maradék szögdiszperzió.

Szögdiszperzió megmaradásához vezethetnek többek között az alábbiak:

- A rácsos impulzuskompresszor rácspárja nem kellően párhuzamos (síkként is és rácsirányt tekintve is);
- A prizmás impulzuskompresszor prizmaínak törőélei (egyenesekként) vagy felületei (síkokként) nem kellően párhuzamosak, esetleg a törőszögek nem egyeznek;
- Egyéb optikai elemek gyártási hibái, pontatlan beállításuk.

A szögdiszperzió hatására az impulzus frontja megdől és — paramétereitől függő mértékben — időben is megnyúlik. Fókuszálás esetén azonban az időbeli megnyúlás jelentős mértékben tovább növekszik, mert a lencse fókuszpontján a döntött impulzusfront miatt egymáshoz képest késleltetett impulzusrészek haladnak át (egy 800nm központi hullámhosszú 10fs-os impulzust $2\mu\text{rad/nm}$ maradék szögdiszperzió 15fs időtartamúra nyújt), ráadásul az impulzust alkotó spektrális komponensek eltérő haladási iránya miatt a fókuszolt mérete is megnő, és ezzel az elérhető csúcshintenzitás csökken.

A lézerrendszerek, oszcillátorok minél pontosabb beállítását segítő diagnosztikai eszközök között tehát jó, ha van olyan, melynek segítségével a rendszer maradék szögdiszperzióját a kezelőszemélyzet valós időben nagy pontossággal nyomon követheti.

Három fő mérési módszer használatos erre a célra napjainkban:

- A tükrözött nyalábú autokorrelátor (inverted field autocorrelator, IFA) [1 és 2], mely abban különbözik más autokorrelátoroktól, hogy egyik karjában a bemenő és kimenő fénynyaláb jobb és bal oldala egymáshoz képest megcserélődik. Néhány $\mu\text{rad/nm}$ pontosságú többlövéses eljárást tesz lehetővé;
- A döntött impulzusfrontú egylövéses autokorrelátor (tilted pulse-front single-shot autocorrelator, TPF-SSAC) [3] szintén néhány $\mu\text{rad/nm}$ pontosságú, de már egylövéses. További előnye, hogy a szögdiszperzió és az impulzushossz egyidejű nyomon követésére alkalmas. Hátránya, hogy nemlineáris effektuson (második harmonikus generálás) alapul, ami miatt csak nagy intenzitások esetén használható;
- A spektrálisan bontott tükrözött nyalábú interferométer [4], melyet a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének munkatársai fejlesztettek ki. Pontossága néhány tized $\mu\text{rad/nm}$, egylövéses és lineáris.

A jelen dolgozat tárgya annak vizsgálata, hogy ez utóbbi mérési eljárás pontossága javítható-e a jeldetektálás ill. a kiértékelés tökéletesítése révén.

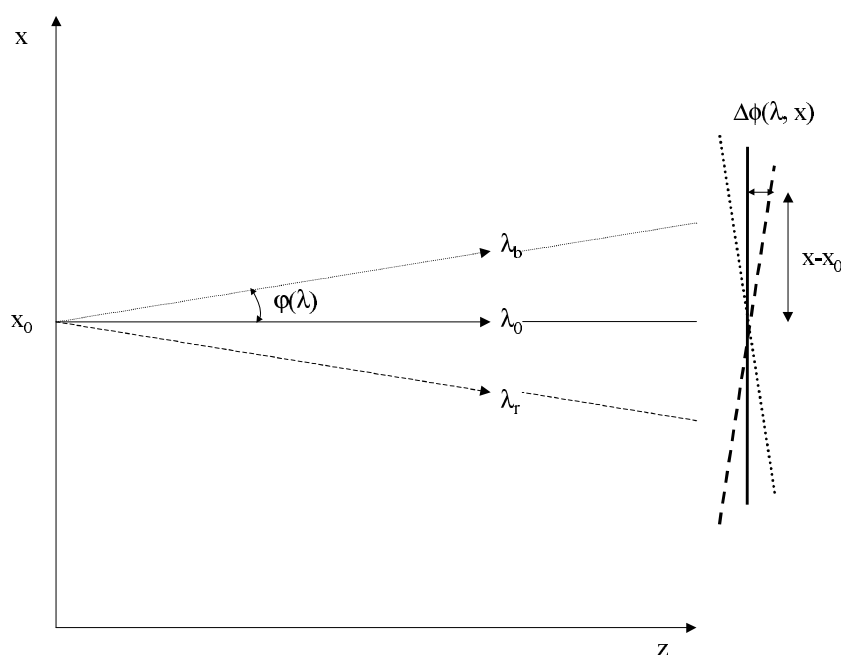
Az Elméleti összefoglalóban (2. fejezet) előbb áttekintem a fentebb említett szögdiszperzió mérésére kifejlesztett módszereket, majd a CCD-kamerák zajforrásait, és végül az interferogramok kiértékeléséhez szükséges függvényillesztési eljárásokat. A 3. fejezetben megfogalmazom a célkitűzéseket.

Az elért eredmények (4. fejezet) között először a számítógépes szimulációkat, majd azok eredményeit, a belőlük levont következtetéseket, végül az igazolásukra végzett kísérleteket ismertetem.

2. Elméleti összefoglaló

2.1. A szögdiszperzió fogalma és hatása a lézerimpulzusra

Tegyük fel, hogy egy adott xyz koordináta-rendszerben ultrarövid lézerimpulzus halad a z irányban, a fázisfrontokat közelítsük síkokkal.



1. ábra A szögdiszperzió az x koordinátától függő fázistoláshoz vezet

Az impulzus rendelkezék az xz síkban szögdiszperzióval, ami azt jelenti, hogy különböző hullámhosszú komponenseinek fázisfrontjai más-más irányban haladnak. Számszerű jellemzésére a következő mennyiséget használjuk:

$$C_a = \left(\frac{d\varphi(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda_0}, \quad (1)$$

ahol λ_0 a központi hullámhosszat, $\varphi(\lambda)$ a λ és a λ_0 hullámhosszúságú komponens haladási iránya által bezárt szöget jelöli (1. ábra). Ez értelmezhető úgy is, hogy a fázisfrontok hullámhossztól függő nagyságú és előjelű dőlést szenvednek az xy síkban. Ennélfogva hullámhossztól és helytől függő

$$\Delta\phi(\lambda, x) \approx \frac{2\pi}{\lambda} \phi(\lambda)(x - x_0) \quad (2)$$

fáziseltolódás keletkezik az egyes komponensek fázisfrontjai között a központi hullámhosszú összetevőhöz képest. A (2) egyenlet hullámhossz szerinti deriváltja adja a hullámcsomag x koordinátától függő fázismodulációját:

$$\left(\frac{d\phi(x)}{d\lambda} \right)_{\lambda_0} = \frac{2\pi}{\lambda_0} C_a (x - x_0). \quad (3)$$

amit körfrekvencia szerinti deriválttá alakítva megkapjuk az x koordinátától függő $\Delta\tau_g(x)$ csoportkésleltetést:

$$\Delta\tau_g(x) = \left(\frac{d\phi(x)}{d\omega} \right)_{\omega_0} = \frac{\lambda_0}{c} C_a (x - x_0). \quad (4)$$

Ebből az következik, hogy C_a szögdiszperzió az impulzusfrontban

$$\alpha_t (\approx \text{tg } \alpha_t) = \lambda_0 C_a \quad (5)$$

dölést okoz. Ez a szög lényegesen nagyobb, mint a fázisfrontok által bezárt szögek.

A teljes impulzusfront alakja kis impulzuskompresszor beállítási hibáknál megdöntött sík alakját veszi föl az impulzus terjedési irányához viszonyítva.

Ez a jelenség hagyományos eszközökkel közvetlenül nehezen mérhető. Az impulzusfront a λ_0 hullámhosszú komponens fázisfrontjához képest megdől, de időben jelentősen nem szélesedik ki. Fókuszálás esetén azonban, mivel különböző késleltetésű impulzusrészeket koncentrálnak egy helyre, jelentős megnyúlás tapasztalható.

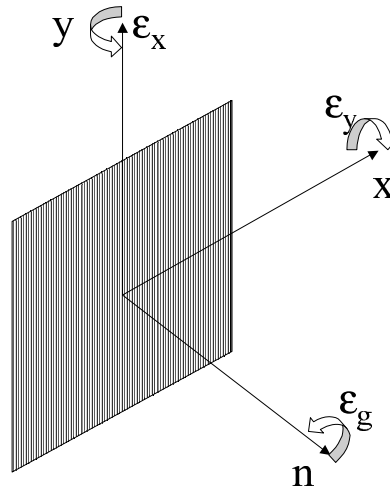
A fókuszált csúcsintenzitást csökkenti az is, hogy a fókuszolt a szögdiszperziótól függő mértékben megnő [1].

2.2. A szögdiszperzió forrásai fázismodulált lézerrendszerekben

A fázismodulált lézerrendszerekből kilépő impulzus tipikusan a következő hibákból kifolyólag rendelkezhet szögdiszperzióval:

- A rácsos impulzuskompresszor rácspárja nem teljesen párhuzamos, így az első rács által létrehozott szögdiszperziót a második nem küszöböli ki. Az egzakt

párhuzamosságtól eltérő beállításnak három szabadsági foka definiálható: ϵ_x , ϵ_y , ϵ_g (2. ábra). Ha ϵ_x nullától különbözik, a rendszerben x tengely menti, ha ϵ_y vagy ϵ_g , akkor y tengely menti szögdiszperzió marad. A rács helytelen beállításának hatásai részletesebben is megtalálhatók a szakirodalomban ([1, 5 és 6]);



2. ábra Az impulzuskompresszorbeli rácsok beállításának szabadsági fokai

- Egyéb optikai elemek (szűrők, kicsatolóablakok vagy magának a lézerekristálynak a) gyártási hibái, hibás beállításuk.

2.3. A szögdiszperzió-mérés módszerei

2.3.1. A tükrözött nyalábú autokorrelátor

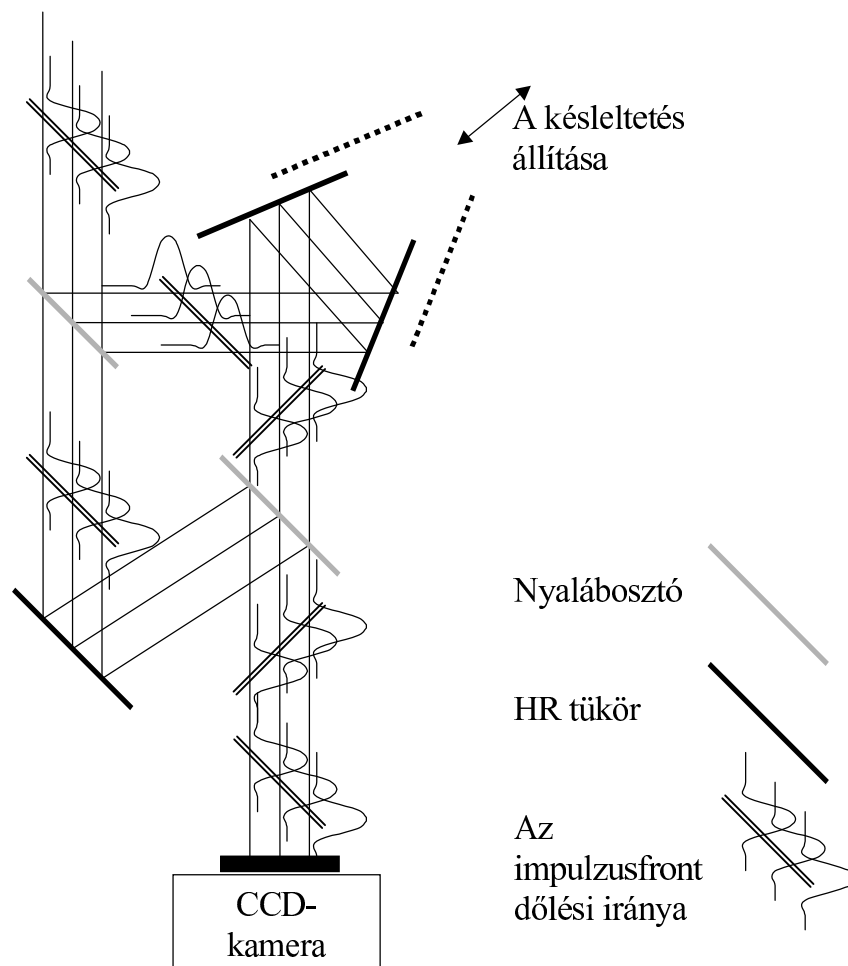
A szögdiszperzió által a 2.1 szakaszban leírt módon keltett impulzusfront-dőlés mérésén alapul a tükrözött nyalábú autokorrelátorok működése.

Ha egy interferometrikus autokorrelátorból [7] kilépő két impulzus jobb és bal oldala egymáshoz képest nincs felcserélve, akkor a két impulzus interferenciájából az impulzusfront dőlése nem határozható meg, mert a nyaláb minden pontján ugyanaz a késleltetés közöttük, így az impulzusok a nyaláb egész

keresztmetszetén ugyanannyira fedik egymást. Ha azonban az egyik nyaláb jobb és bal oldalát felcseréljük, akkor a késleltetés a nyaláb keresztmetszete mentén is változik, így interferenciára csak ott kerül sor, ahol a két impulzusfront kellő mértékben fedik egymást.

Az ilyen eszközök többféle változata között az tesz különbséget, hogy milyen interferométerből indultak ki a fejlesztők, és hogyan oldották meg az egyik karbeli nyaláb oldalainak felcserélését.

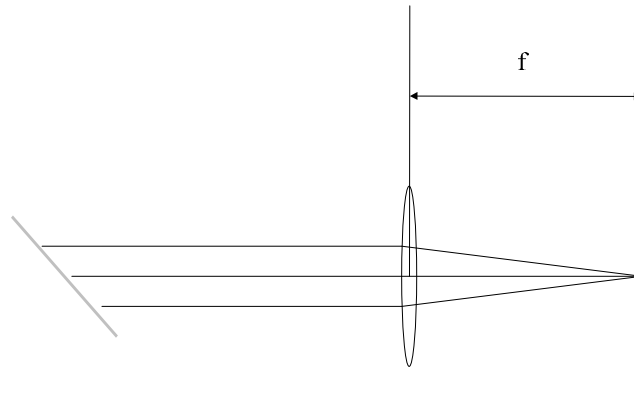
2.3.1.1. Módosított Mach-Zehnder elrendezésű tükrözött nyalábú autokorrelátor



3. ábra Módosított Mach-Zehnder elrendezésű tükrözött nyalábú autokorrelátor

G. Pretzler és munkatársai [1] két elrendezést is javasoltak a szögdiszperzió mérésére. Az egyikben egy Mach-Zehnder típusú interferométert bővítettek ki

úgy, hogy egyik karjába 45° -os szögtükört építettek (3. ábra). A másik elrendezés egy Michelson-interferométeren alapuló tükrözött nyalábú autokorrelátor, ahol a nyaláb oldalainak felcserélését 1:1 nagyítású távcsővel (4. ábra) illetve hármastükörrel oldották meg.



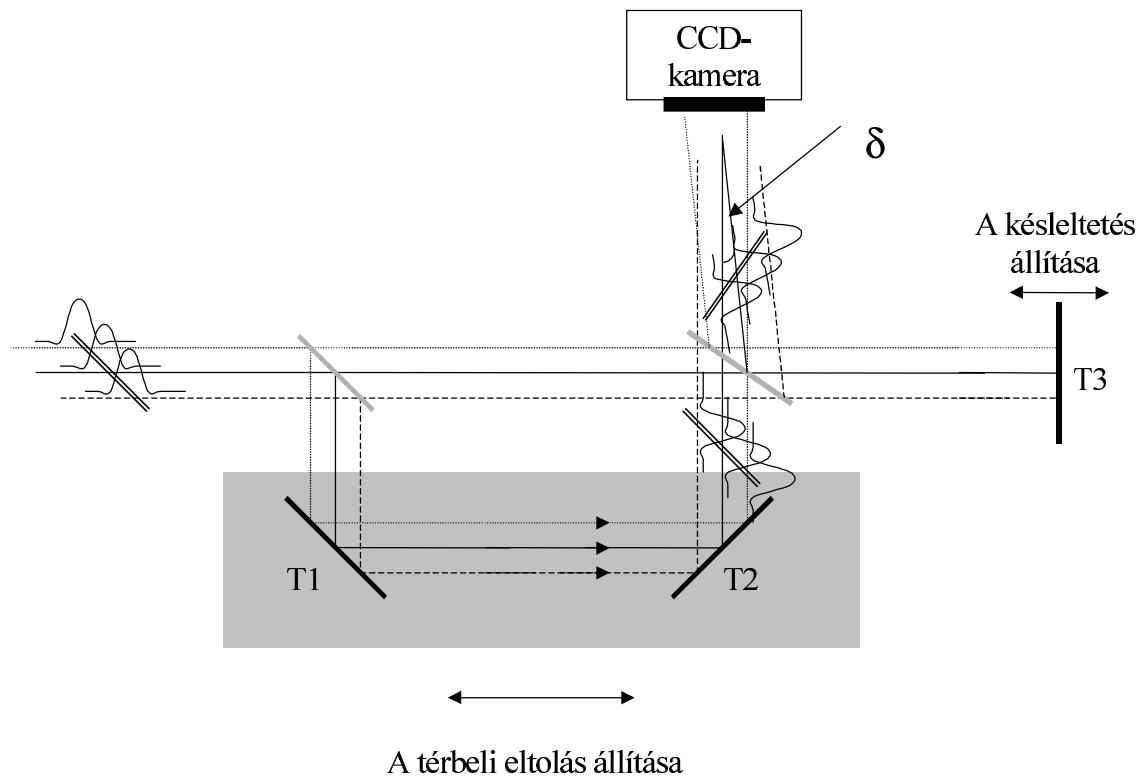
4. ábra Nyalábtükrözés lencsével a Michelson-interferométeren alapuló IFA egyik karjában

Az így végzett szögdiszperzió-mérés többlövéses, azaz a CCD-kamerával többféle késleltetéshez tartozó interferenciaképet kell rögzíteni és kiértékelni. A két impulzusfront metszetének helyét a láthatósági függvény $((I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min}))$ maximumaként értelmezik. 0 késleltetésnél ez középiűt van, változtatása esetén annál lassabban tolódik a szélek felé, minél nagyobb a szögdiszperzió.

A szögdiszperzió nagyságára lehet következtetni az interferenciakép szélességéből is, minél szélesebb, annál kisebb a szögdiszperzió.

2.3.1.2. Módosított Michelson elrendezésű tükrözött nyalábú autokorrelátor

Az interferenciacsíkok láthatósági görbéjének számítógépes meghatározása elkerülhető a Simon és munkatársai [2] által javasolt elrendezéssel (5. ábra).

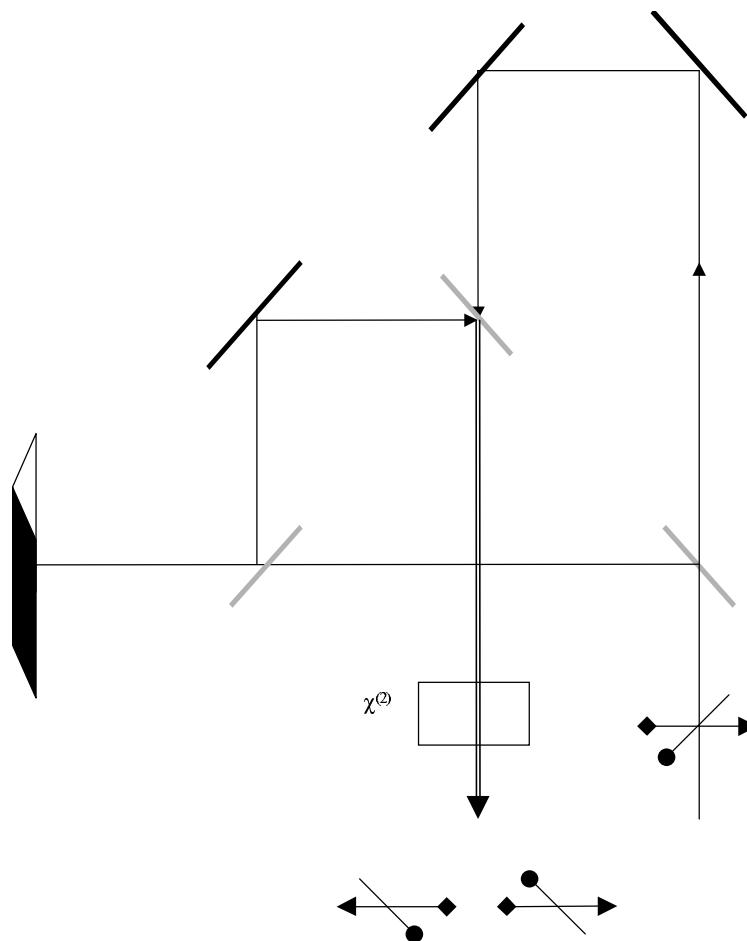


5. ábra Módosított Michelson elrendezésű tükrözött nyalábú autokorrelátor

A T1 és T2 tükörből álló együtt mozgó rendszer (gyakorlatilag a kar végére helyezett 90°-os szögtükör) még egy szabadsági fokot ad a rendszernek a Michelson-interferométerhez képest: mód nyílik a két nyaláb tengelyének egymáshoz képesti eltolására anélkül, hogy az alsó sugármenet optikai úthossza megváltozna. A T3 tükör feladata továbbra is a felső sugármenet úthosszának változtatása anélkül, hogy az egyesített nyalábok tengelye egymáshoz képest elmozdulna. Ez az elrendezés egyidejűleg felcseréli egymáshoz képest a két nyaláb jobb ill. bal oldalát, ennek célja ugyanaz, mint ami az előző módszernél volt: a két impulzusfront szöget zárjon be, és interferencia csak ott legyen látható az ernyőn, ahol a két impulzusfront metszi egymást. A kamera előtti nyalábosztó (nyalábegyesítő) nem pontosan 45°-os szöget zár be a vízszintessel, hogy az egyesült nyalábok kis δ szöget zárjanak be egymással.

Az impulzusfront alakjának letapogatása a következőképpen történik. Az alsó sugármenet vízszintes irányú eltolását a T1 és T2 tükör együtt mozgásával lépésenként változtatjuk, ez adja a mért értékpárok térbeli részét. Az időbeli részt úgy kapjuk meg, hogy megkeressük a T3 tükörrel azt a késleltetést, amelyre az interferenciacsíkok maximális láthatóságú metszete visszatér eredeti helyére. A kimért értékpárok írják le az impulzusfront alakját a keresztmetszet mentén.

2.3.2. A döntött impulzusfrontú egylövéses autokorrelátor



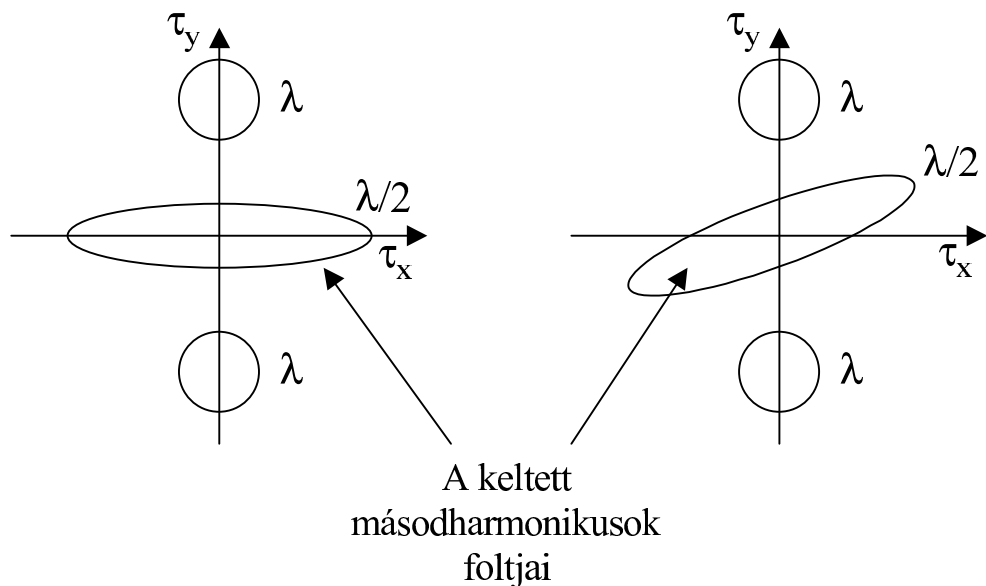
6. ábra A döntött impulzusfrontú egylövéses autokorrelátor

A Z. Sacks és munkatársai [3] által javasolt mérési elrendezést a 6. ábra mutatja. A kezdeti nyalábosztóból vízszintesen kiinduló nyalábot egyik síkban a kar végébe függőlegesen beépített 90°-os szögtükör fordítja meg, másikon pedig a karban lévő öt tükrön fellépő visszaverődések. $\chi^{(2)}$ jelöli a nemlineáris (második felharmonikus-generáló) kristályt. Mivel a keltett másodharmonikusokat

észleljük, ezért a mérendő impulzusnak nagy intenzitásúnak kell lennie, így a módszer nem alkalmas megnyújtott erősítetlen impulzusok mérésére.

A két impulzus a lapra merőleges irányban kis szöget zár be egymással, így a kristálynak az ábra síkjára merőleges felülete mentén változik köztük a késleltetés.

Ha függőleges irányban nincs szögdiszperziója a nyalábnak, akkor a másodharmonikus elliptikus foltjának tengelye merőleges a két résznyaláb foltját összekötő szakaszra, ha viszont van szögdiszperzió, akkor ettől eltérő irányban áll. A következő 7. ábra bemutatja, hogy milyen képet várhatunk a kristály mögött egy olyan impulzus esetében, mely mentes a szögdiszperziótól ill. amikor az impulzus 0-tól különböző szögdiszperzióval rendelkezik.



7. ábra Szögdiszperzióval nem rendelkező ill. rendelkező impulzus döntött impulzusfrontú autokorrelátorral készült képe. A másodharmonikus folt τ_x irányú kiterjedése jellemzi az impulzus hosszát, τ_y irányú dőlése (τ_x -szel bezárt szög) a szögdiszperziót

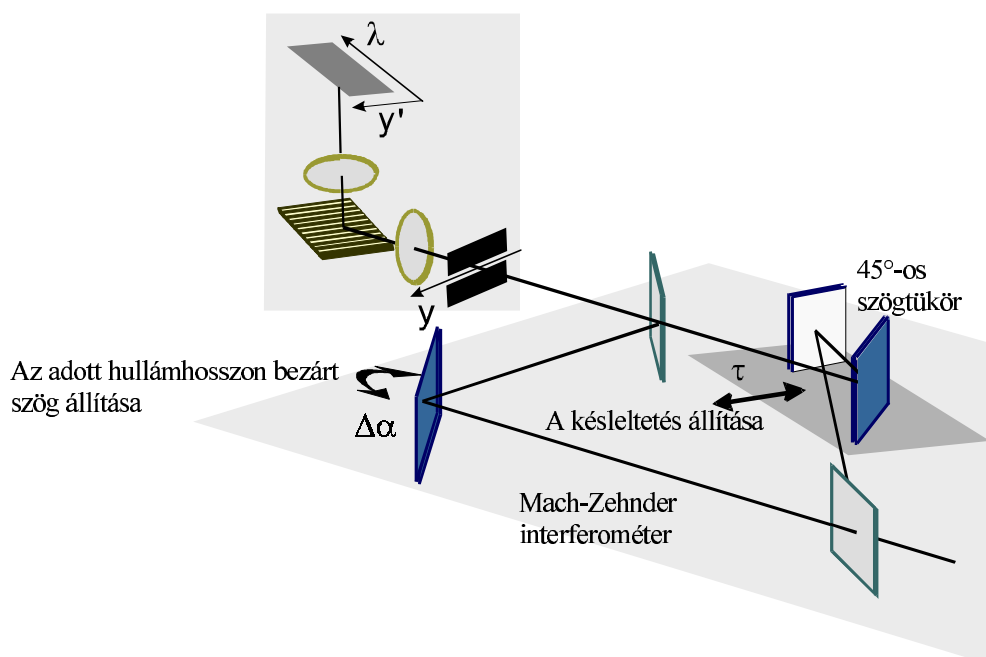
2.3.3. A spektrálisan bontott tükrözött nyalábú interferométer

2.3.3.1. A kísérleti elrendezés

Az eddig ismertetett tükrözött nyalábú autokorrelátorra épülő szögdiszperziómérési eljárásoktól abban különbözik a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének munkatársai által kifejlesztett [4] mérési

eljárás, hogy az interferométer kimenetén kialakuló intenzitáseloszlást egy spektrográffal felbontják. Így nem kell közvetett módon, az impulzusfront dőlési szögén keresztül mérni, hanem közvetlenül vizsgálható a szögdiszperzió.

Ez az eljárás egyszerre lineáris, mint [1] és [2], és egyelővéses, mint [3], pontossága pedig, az említett módszerek néhány $\mu\text{rad}/\text{nm}$ -es pontosságával szemben $0,2\mu\text{rad}/\text{nm}$.



8. ábra A spektrálisan bontott tükrözött nyalábú interferométer¹

Amint a 8. ábráról leolvasható, a mérendő impulzus egy nyalábosztón át lép be egy Mach-Zehnder-interferométerbe.

Ennek egyik karjában (referenciakar) egy alumíniumtükör irányítja a nyalábot a második nyalábosztóra (nyalábegyesítőre). A tükör elfordítható, és a beesési szögek széles tartományán konstans reflektivitású, ezzel szabályozható a két résznyaláb által (adott hullámhosszon) bezárt szög. Jobb reflektivitású dielektrikumtükrök használata esetén a túl nagy beesési szögeknél bekövetkező rezonanciajelenségek zavaró töredezettséget okoznának az interferenciacsíkokban.

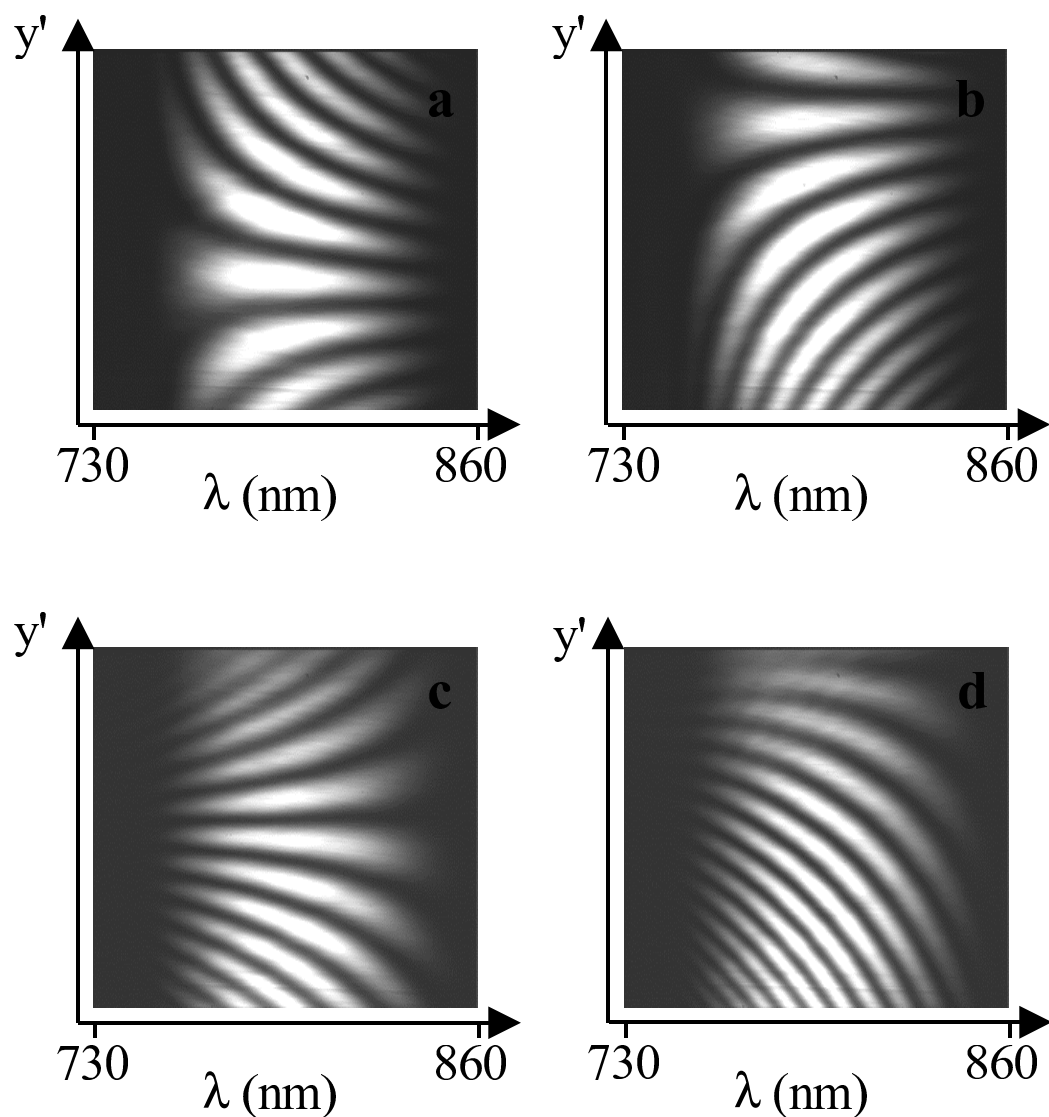
¹ Az ábra rendelkezésre bocsátásáért köszönet illeti készítőjét, Varjú Katalint.

A másik karban (tárgykar) egy 45° -os szögtükör felcseréli a nyaláb két oldalát, ezzel megfordítja a szögdiszperzió előjelét, így végül kétszeres szögeket ill. szögdiszperziót kapunk kiértékeléskor. A szögtükör a felezőegyenese mentén eltolható, ezzel lehet szabályozni a két impulzus közti késleltetést, anélkül, hogy a nyalábok iránya megváltozna.

Előnye ennek az elrendezésnek, hogy a vele végzett mérési eljárás működik erősen fázismodulált impulzusok esetében is, mert az impulzus fázismodulációjának hatása nem mutatkozik meg az interferenciaképek kiértékelésekor.

A két egyesült nyaláb egy vízszintes résen lép be a házi építésű spektrográfba. Itt bontja fel az elmosódott interferenciaképet egy 600mm^{-1} vonalsűrűségű rács „monokromatikus” interferenciaképek „egymásutánjára”. Az így keletkező mintázatot egy CCD-kamera (korábban EDC-1000-HR, $8\text{bit} \times 244\text{pixel} \times 753\text{pixel}$, újabban EDC-2000-N, $10\text{bit} \times 494\text{pixel} \times 652\text{pixel}$ felbontású, gyártó: Electrim Corp.) rögzíti.

A 9. ábrán példaként bemutatott képek 10ms expozíciós idővel készültek. A nyalábok által a központi hullámhosszon bezárt szög az a és a b képen $\varepsilon_0 = 0,84\text{mrad}$, a c és a d képen $\varepsilon_0 = -1,02\text{mrad}$. A nyalábok közti késleltetés jobb oldali (a és c) képeken 30fs-mal több mint a megfelelő bal oldali képen (b és d).



9. ábra Példák a spektrálisan bontott tükrözött nyalábú interferométerrel rögzített interferogramokra

2.3.3.2. A kiértékelés elvi alapjai

Tekintsünk két, $\underline{k}_1$ ill. $\underline{k}_2$ irányba haladó monokromatikus síkhullámot:

$$\begin{aligned} \underline{E}_1(\underline{r}) &= \underline{E}_{1,0} \cos(\underline{k}_1 \cdot \underline{r} + \varphi_1) \\ \underline{E}_2(\underline{r}) &= \underline{E}_{2,0} \cos(\underline{k}_2 \cdot \underline{r} + \varphi_2) \end{aligned} \quad (6)$$

Tegyük fel, hogy $\underline{k}_1$ és $\underline{k}_2$ kis $\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ szöget zár be egymással, és függőleges síkban interferálnak. A megfigyelést az y tengely mentén végezzük.

Erősítés akkor jön létre, ha az

$$(E_1 \cdot E_2)(r) \propto \cos[(\underline{k}_2 - \underline{k}_1) \underline{r} + (\varphi_2 - \varphi_1)] = \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \varepsilon \cdot y + \Delta\varphi\right] \quad (7)$$

interferenciatag maximális. A Λ csíkperiódust két egymás után következő maximumként definiáljuk, ami azt jelenti, hogy

$$\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \varepsilon \cdot (y + \Lambda) + \Delta\varphi\right] = \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \varepsilon \cdot y + \Delta\varphi\right], \quad (8)$$

így az

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (9)$$

összefüggéshez jutunk, tehát a spektrálisan bontott interferometria lehetővé teszi az $\varepsilon(\lambda)$ (fázisfrontok által bezárt szög a hullámhossz függvényében) függvény kiszámítását.

Látható, hogy a csíkok szélessége nem függ a fáziskülönbségtől. A fázismoduláció ugyan befolyásolja az interferenciacsíkok alakját, de periódusukat nem.

Ha a rendszerben nincs jelen szögdiszperzió, akkor két ε szög alatt találkozó szélessávú impulzus eredményeként létrejövő n -ed rendű interferenciacsík egyenlete az interferogramon:

$$y(\lambda) = \left(n - \frac{\Delta\varphi(\lambda)}{2\pi}\right) \frac{\lambda}{\varepsilon}. \quad (10)$$

Ez az egyenlet a növekvő hullámhosszal széttartó egyenessereget ír le.

Fontos tudni, hogy a szögek, ill. a szögdiszperzió előjele az 1. ill. 2. nyaláb megválasztásától függ, ha felcseréljük őket, az előjel az ellenkezőjére változik.

2.3.3.3. A kiértékelés menete

A spektrográffal rögzített interferenciakép minden függőleges metszete úgy kezelhető, mintha két monokromatikus nyaláb hozta volna létre:

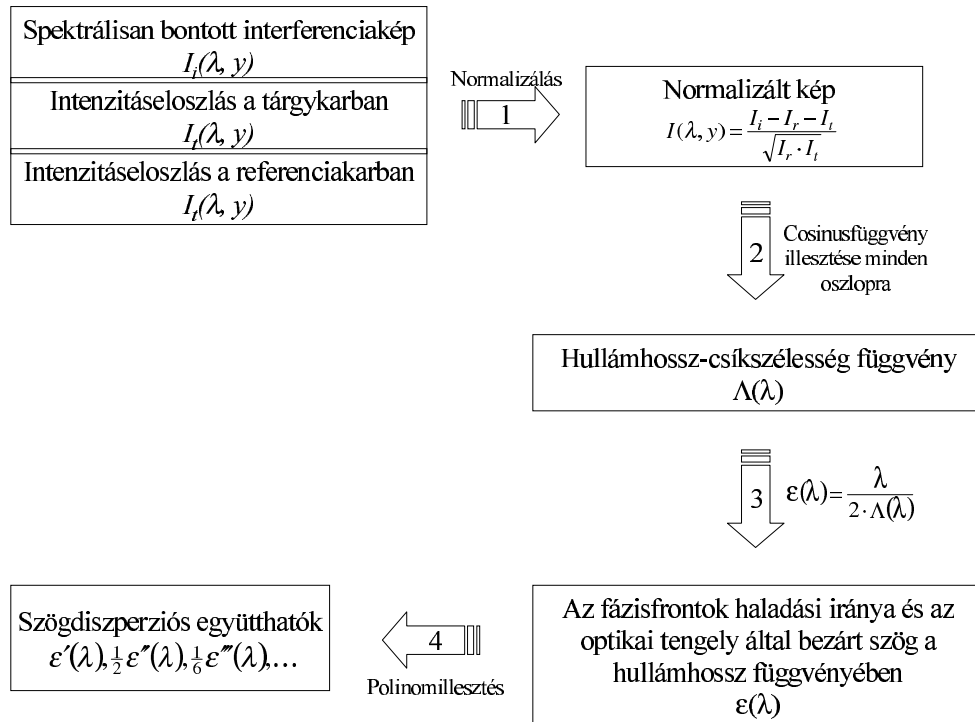
$$I(y) = I_1(y) + I_2(y) + 2\sqrt{I_1(y) \cdot I_2(y)} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda(\lambda)} y + (\varphi_2 - \varphi_1)\right) \quad (11)$$

Ha rendelkezésünkre állnak a referencia- ill. a tárgykarban mérhető $I_1(y)$ és $I_2(y)$ intenzitás-eloszlások, akkor elvégezhetjük a normalizálást:

$$\cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda(\lambda)}y + (\varphi_2 - \varphi_1)\right) = \frac{I(y) - I_1(y) - I_2(y)}{2\sqrt{I_1(y) \cdot I_2(y)}}. \quad (12)$$

Minden hullámhosszra elvégezve a normalizálást, majd a cosinusfüggvény illesztését, megkapjuk a $\Lambda(\lambda)$ (csíkperiódus a hullámhossz függvényében) függvényt. A $\lambda(2 \cdot \Lambda(\lambda))$ függvény adja meg a nyaláb komponensei haladási irányának optikai tengellyel bezárt szögét. Az erre történő polinomillesztésből kapott együtthatók arányosak rendre a középponti hullámhosszon bezárt szöggel, az elsőrendű, másodrendű stb szögdiszperziókkal.

Az interferogramok ilyen módon történő kiértékelésének becslött pontossága 0,2 μ rad/nm.



10. ábra A mérési eljárás blokk-sémája

2.4. A CCD-kamerák zajforrásai

A CCD-kamerák által szolgáltatott adatok, képek zajjal terheltek, amely többféle forrásból származik.

Ha a kamera látóterét teljesen homogén módon világítjuk ki, elviekben minden pixelből azonos értéket kellene kiolvasnunk. Hogy a kapott értékek mégis pixelről pixelre változnak, annak a következő okai vannak ([8]):

- A fotonzaj (photon shot noise) olyan ingadozásokat eredményez a kimeneten, ami az észlelendő jel négyzetgyökével arányos. Oka az elektronok diszkrét természete.
- Ideális körülmények között minden pixelnek ugyanakkora lenne a sötétárama, a valóságban azonban ez is fluktuál. Kivonva a sötétáram átlagát, a fluktuáció megmarad. Ezt a maradékot nevezzük állandó mintájú zajnak (fixed pattern noise, FPN). Ez a CCD-mátrix gyártási tökéletlenségeiből ered, az egyes pixelek nem azonos méretűek és szennyezettsgűek.
- A kimeneti kondenzátor feszültsége minden pixel töltésmennyiségének kiolvasása után kisül. A kisülés után maradó feszültség sem konstans, ezt kisülési zajnak (reset noise) nevezzük.
- Az erősítők további fehér és $1/f$ spektrumú zajt adnak az eredményhez.
- Az analóg—digitális átalakító további kvantálási hibát eredményez.
- A nemuniformitás (photoresponse nonuniformity, PRNU) szintén azzal van kapcsolatban, hogy nem egyformák a pixelek, a fentiekén kívül eltérés lehetséges a pixelek spektrális válaszfüggvényében és burkolatuk vastagságában is.

Az állandó mintájú zajt és a nemuniformitást különböző természetűk ellenére együvé szokták sorolni: mintazajoknak nevezik őket, mert több kép átlagolásával sem lehet őket csökkenteni. A CCD-mátrix minden eleme által szolgáltatott hiba átlaga egy csak rá jellemző értékhez (többnyire nem 0-hoz) tart, és ez a kamerára jellemző mintázatot ad.

2.5. Az alkalmazott függvényillesztési eljárásokról

Gyakori, hogy igen sok mérési adatot szeretnénk kevés paraméterrel leírni, hogy átláthatóvá tegyük az eredményeket, és megkönnyítsük a következtetések levonását. Ilyenkor függvényillesztést végzünk, aminek célja az, hogy olyan paramétereket találjunk egy adott modellfüggvényhez, melyekkel a

modellfüggvényt kiegészítve (abba behelyettesítve) a mért adatok eltérése a mérési pontokban kiszámított függvényértéktől (az illesztés hibája) minimális.

Szinte kivétel nélkül a legkisebb négyzetek elvét szokták használni a közelítés hibájának definiálására.

Legyenek adottak mérési adatok az $\underline{x}_i$ pontokban, tartozzanak hozzájuk rendre az y_i mért értékek (itt $\underline{x}_i$ többkomponensű is lehet), legyen továbbá adott egy $f(\underline{p}, \underline{x})$ modellfüggvény. Az illesztés célja olyan $\underline{p}$ paramétervektor meghatározása, melyre a

$$\sum_i |y_i - f(\underline{p}, \underline{x}_i)|^2 \quad (13)$$

négyzetes összeg minimális (az összegzés ugyanarra az indexhalmazra végzendő el, mint amelyen a mért értékek értelmezve vannak).

Az illesztések tehát szoros kapcsolatban vannak az optimalizálás témakörével.

Bizonyos fajta modellfüggvényekre — pl. polinomokra, vagy tetszőleges $\underline{p}$ -beli paraméterektől egyébként nem függő függvények $\underline{p}$ -beli elemekkel vett lineáris kombinációira — egzakt optimumot lehet találni (a példákban az optimumkeresés lineáris egyenletrendszer megoldására egyszerűsödik), vannak azonban olyan esetek, ahol csak globális optimumkeresési eszközökkel lehet boldogulni. Az így kapott — többnyire szuboptimális— megoldást tovább lehet finomítani lokális optimumkereséssel, mint amilyen például a gradiens algoritmus.

A gradiens-módszer

A gradiens-módszer lokális optimumkereső eljárás, mely abban az esetben használható, ha a célfüggvény a keresési tér koordinátái szerint parciálisan differenciálható. Lényege az, hogy ha adott a keresési tér egy kiindulási eleme, akkor onnan a legmeredekebb lejtő által meghatározott irányban elindulva igyekszik jobb célfüggvénnyel rendelkező megoldást találni. Minimalizálás esetén ez az irány az adott kiindulási pontban kiszámított gradiens -1-szerese, maximalizálás esetén +1-szerese.

Általában egy külső és egy belső iterációs részből áll. A külső iterációs részben az aktuális elemhez meghatározzuk a gradienst, majd az az által mutatott

irányban vonal menti optimumkeresést (belső iterációs rész) végzünk, végül az így megtalált optimumba helyezzük át az aktuális elemet, és újra kezdjük a külső iterációs részt. A belső iterációs rész, melyben a vonal menti optimumot keressük, intervallumosztásos (legegyszerűbb esetben intervallumfelezéses) módszerrel működik [9].

3. Célkitűzések

Az előző fejezetben bemutatott tükrözött nyalábú Mach-Zehnder-interferométerrel végzett spektrálisan bontott szögdiszperzió-mérés becsült pontossága a korábbi kísérletek alapján $0,2\mu\text{rad/nm}$. Jóllehet a korábbi módszerek pontosságához képest ez egy nagyságrendnyi javulás, felmerül a kérdés, hogy elérhető-e ennél is nagyobb pontosság az adatrögzítés ill. -feldolgozás tökéletesítése révén:

A következő szempontokat vettem figyelembe:

1. Jobb felbontású (nagyobb pixelszámú ill. több szürkeségi szint megkülönböztetésére képes) kamerát alkalmazva ill.
2. Kisebb zajú kamerát alkalmazva várhatóan jobb eredményt kapunk;
3. Az interferogram kiértékelhető spektrális tartományának kérdése: ha a szögdiszperzió kiszámításához túlságosan széles hullámhossz-tartományt veszünk figyelembe, akkor az interferogram szélein lévő rossz jel/zaj arány nagy illesztési hibához vezethet az egész tartományon. Ezzel szemben a túlságosan keskeny spektrális tartomány használata kevés adatpontra való illesztést tesz lehetővé és így növeli meg a hibát.
4. Lehetséges, hogy létezik a tárgy- ill. a referencianyaláb által a központi hullámhosszon bezárt szögnek — vagy ami ezzel arányos, de szemléletesebb mennyiség, az interferogramon látható csíkok számának — egy optimális értéke;
5. Lehetséges, hogy létezik a két impulzus közti késleltetésnek — vagy ami ezzel arányos, de szemléletesebb mennyiség, az interferogram csíkjainak a hullámhossztengellyel bezárt szöge — egy optimális értéke.

Feladatom az volt, hogy

- Készítsem el a megfelelő kiértékelő programot a tükrözött nyalábú Mach-Zehnder-interferométerrel rögzített interferogramok feldolgozására;

- Készítsek egy interferogram-szimuláló programot;
- Szimulált interferogramok sorozatát az általam írt kiértékelő programmal feldolgozva határozzam meg azokat a körülményeket (a fenti szempontok figyelembevételével), melyek a legnagyobb pontosságot biztosítják;
- Végezzek méréseket az interferométerrel, és az általam írt kiértékelő programmal kiértékelve a felvett interferogramokat, vizsgáljam meg a szimulációkból kapott eredmények helyességét.

4. Új eredmények

4.1. Az interferogram-kiértékelő program elkészítése

A kiértékelő programot, mely 10. ábra blokksémájának (1), (2) és (3) lépését valósítja meg, C++ nyelven készítettem el (a (4) lépésként elvégzendő polinomillesztést az *octave* elnevezésű, MATLAB-hoz hasonló numerikus matematikai csomaghoz írt programra bízta). A programozási nyelv megválasztásában a következő szempontok vezéreltek:

- Az elkészült program gyorsan fusson;
- Legyen hordozható, ne igényeljen különleges környezetet, programokat fordításhoz, futáshoz;
- Minimális módosítás árán legyen illeszthető az olyan mérőszoftverekhez, mint pl. a LabView.

A kiértékelő program elkészítése során a 10. ábra blokksémáját valósítottam meg. Ennek a (3) lépése az egyetlen, ami nem hajtható végre egyszerű és egzakt módon.

A cosinusfüggvény illesztésére többféle módszert is kipróbáltam, de végül az alább leírt módszert találtam legalkalmasabbnak.

4.1.1. Eljárás cosinusfüggvény illesztésére

A kiértékelés (3) lépésében az interferogram minden oszlopában rendelkezésünkre állnak a normált intenzitásfüggvénynek az y_1 - y_0 szélességű CCD-chip által mért adatai, azaz egy térbeli koordinátán értelmezett $I(y)$ függvény értékei egy $[y_0, y_1]$ intervallum egyenközű osztáspontjaiban. Erről tudjuk, hogy

$$I(y) \approx A \cos(ky + \varphi) + B \quad (14)$$

alakú cosinusfüggvénnyel közelíthető. Feladatom a k hullámszám, ill. a periódus meghatározása.

Erre a célra gyakran használnak diszkrét Fourier-transzformációt. Az ismeretlen periódust ilyenkor a amplitúdóspektrumban kapott csúcs térbeli frekvenciájának ill. hullámszámának megfelelő periódussal közelítik.

Az interferogramok kiértékeléséhez ez a módszer nagyon pontatlan, de rá alapozva egy alkalmasabb illesztési módszert dolgoztam ki.

A spektrumbeli csúcs élessége nagyban függ attól, hogy mennyire tér el a mérési adatok intervallumának $y_I - y_0$ hossza és $I(y)$ periódusának megfelelő egész számú többszöröse.

A csúcs élességének jellemzésére bevezettem a

$$\frac{|C_{j_{\max}-1}| + |C_{j_{\max}+1}|}{|C_{j_{\max}}|} \quad (15)$$

mennyiséget. Itt $C_{j_{\max}}$ az amplitúdóspektrumbeli maximum, $C_{j_{\max}-1}$ és $C_{j_{\max}+1}$ pedig a vele szomszédos értékek. Ez a szám annál kisebb, minél élesebb a csúcs és 0, ha $y_I - y_0$ éppen $I(y)$ periódusának egész számú többszöröse. Ha a (15) mennyiség reciprokát definiáltam volna élességként, akkor az utóbbi esetben ∞ -t kapnánk, ami a kiértékelő program futása során gondokat okozhat.

A spektrum eltolható K hullámszámmal, ha a transzformálandó adatok közt minden y_k -hoz tartozó I_k mért értéket

$$I_k e^{iKy_k} \text{-val}$$

helyettesítünk. Ez a jelenség szuperheterodin-elvként ismeretes [10].

Az ilyen eltolt spektrum élessége javul vagy romlik aszerint, hogy a mért adatok intervallumának $y_I - y_0$ hossza jobban vagy kevésbé jobban közelíti az $I(y)e^{iKy}$ függvény periódusának valamely egész számú többszörösét, mint az $I(y)$ -ét.

Ha tehát meghatározzuk a spektrumnak azt a K_0 eltolását, melyre a (15)-tel definiált élesség minimális, és az eltolt spektrum csúcsához tartozó k hullámszámot, akkor

$$\Lambda = \frac{2\pi}{k - K_0} \text{-ként}$$

megkapjuk a mért adatokhoz tartozó cosinusfüggvény periódusát.

Ezt az észrevételt használtam ki a cosinus illesztő algoritmusom megírásánál.

K_0 keresése során feltételezem, hogy a diszkrét Fourier-transzformációval kapott csúcshoz megfelelő periódus áll a legközelebb $I(y)$ periódusához a diszkrét spektrum összes vonalainak megfelelő periódusok közül, vagyis a csúshoz tartozó hullámszám a keresett periódusnak megfelelő hullámszámot legfeljebb $\frac{\pi}{y_1 - y_0}$ hibával közelíti.

Az cosinus-illesztő algoritmus vázlata ezek után a következő:

- Diszkrét Fourier-transzformációval meghatározom a mért adatsor amplitúdó- és fázisspektrumát. A (14) cosinusfüggvény A amplitúdóját az amplitúdóspektrumban található A' csúccsal, ϕ fázisát a csúcshoz megfelelő fázisspektrumbeli ϕ' fázissal, B konstans tagját pedig a 0 frekvenciához tartozó spektrumvonal B' értékével közelítem.
- Intervallumosztásos technikát [9] alkalmazva megkeresem a $\left[-\frac{\pi}{y_1 - y_0}, +\frac{\pi}{y_1 - y_0} \right]$ intervallumban a mért adatok amplitúdóspektrumának azt a K_0 eltolását, melyre a (15)-tel definiált élesség minimális. Ebben az amplitúdóspektrumban a csúcshoz megfelelő hullámszám legyen k' .
- A kapott $(A', k'-K_0, \phi', B')$ négyesből kiindulva gradiens-módszerrel pontosítom a cosinusfüggvény paramétereinek közelítését.

A fentiek alapján kiértékelés (1), (2) és (3) lépését elvégző programom működésének vázlata a következő:

- A parancssor feldolgozása; innen olvashatók be az interferogram geometriai méretei, a hullámhossz-kalibráció, a fájlnevek stb.;
- Az interferogram és a normalizáláshoz használt referencia- ill. tárgykar-képek betöltése szöveges adatállományokból;
- Az adattömbök transzponálása, ha szükséges;
- Az adattömbök zajos széleinek eltávolítása igény szerinti mértékben;
- Normalizálás;
- Minden sorra (hullámhosszra):
 - A gradiensmódszer kezdőértékeinek meghatározása a fent leírt módon;
 - A gradiensmódszer végrehajtása;

- A kapott eredményből az adott hullámhosszon bezárt szög kiírása az eredményfájlba.

4.2. Az interferogram-szimuláló program elkészítése

Az interferogramok szimulálására szolgáló programot szintén C++ nyelven készítettem el. Parancssori paraméterekkel van lehetőség arra, hogy a felhasználó megadja a CCD-chip és a pixeleinek méreteit, a digitalizáláshoz használt bitek számát (vagy 0-t, hogy nincs digitalizálás), a hullámhossz-kalibrációt, az impulzus időbeli félértékszélességét, központi hullámhosszát, a nyalábok közti késleltetést, az általuk a központi hullámhosszon bezárt szöget, az elsőrendű szögdiszperziót és a kamera zaját közelítő Gauss-eloszlású valószínűségi változó félértékszélességét. A szimulált interferogramok mindig kihasználják a kamera teljes digitalizálási tartományát (ha van digitalizálás), azaz a maximális erősítésnél elérik a legnagyobb szűrkeségi szintet.

A referenciaképen mért intenzitások kiszámításakor a nyalábot Gauss-osnak tételezem fel mind a frekvenciatartományban, mind térben. A frekvenciatartománybeli félértékszélességet az impulzus $\Delta\tau$ időbeli félértékszélességéből számítom ki $\Delta f = \frac{2 \ln 2}{\pi \cdot \Delta\tau}$ alapján. Az intenzitás a térbeli koordinátától úgy függ, hogy az interferogram közepén maximális, a szélén $1/e$ részére csökken.

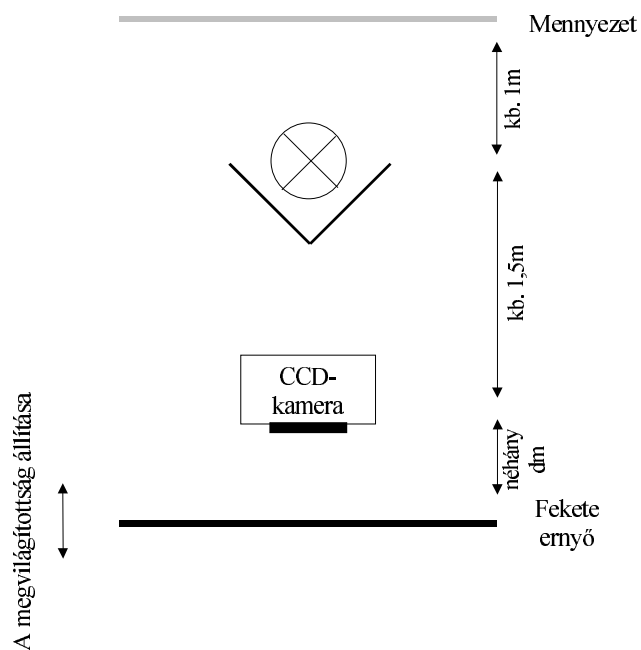
A tárgyképet a referenciaképpel azonos módon számítom ki.

A tárgy- és a referenciaképekből a (11) egyenlet alapján állítom elő az interferenciaképet (figyelembe véve a központi hullámhosszon bezárt szöget, a szögdiszperziót és az impulzusok közti késleltetést). Végül mindhárom képet (ahogy a valóságban is) külön-külön terhelem kvantálási hibával és Gauss-eloszlású zajjal, majd szöveges adatállományba mentem.

4.3. A CCD-kamerák zajának meghatározása

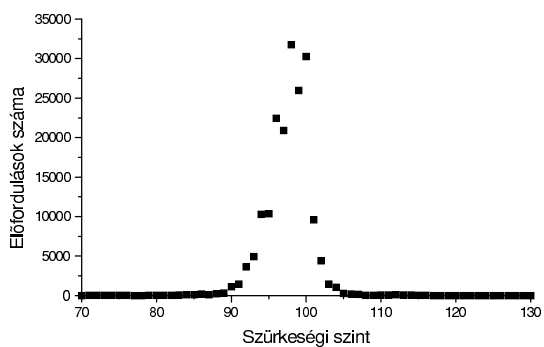
Abból a célból, hogy a szimulációk során reálisan modellezem az interferogramok rögzítésére használt két CCD-kamera zaját (egy régebbi, kisebb bit- és pixelszámú ill. egy újabb, nagyobb felbontású kamerát használtam:

EDC-1000-HR, 8bit $\times$ 244pixel(=6,58mm) $\times$ 753pixel(=8,67mm) ill. EDC-2000-N, 10bit $\times$ 494pixel(=3,67mm) $\times$ 652pixel(=4,84mm); gyártó: Electrim Corp.), a következő mérést végeztem: homogén megvilágítású felület képét vettem fel a kamerákkal különböző megvilágítottság és expozíciós idő mellett (11. ábra). A képek szürkeségi szintjeiből hisztogramokat készítve úgy találtam, hogy a zajt minden esetben jó közelítéssel a Gauss-eloszlás írja le.

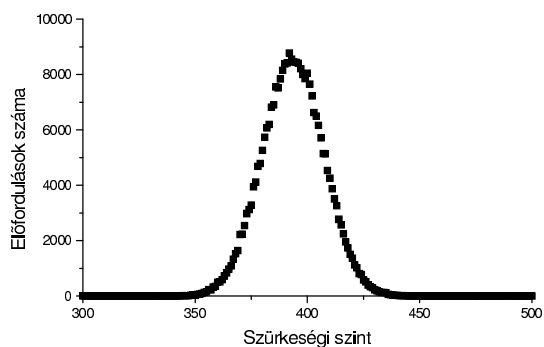


11. ábra Homogén megvilágítottságú felület előállítása

Az 12. ábra és a 13. ábra két tipikus hisztogramot ábrázol. A két kameránál kapott mérési eredményeket rendre az 1. táblázat és a 2. táblázat tartalmazza.



**12. ábra Példa az EDC-1000-HR típusú
(8 bites) CCD kamera hisztogramjára**



**13. ábra Példa az EDC-2000-N típusú
(10 bites) CCD kamera hisztogramjára**

	Expozíciós idő (ms)	10	50	100	500	1000
Átlagos megvilágítottság (szürkeségi szint)						
0		1,22	2,51	3,58	3,58	3,58
50		9,01	6,65	3,68	4,71	5,05
100		11,74	5,56	10,42	11,47	8,00
150		19,85	9,45	14,51	11,51	10,04
200		8,13	6,09	4,57	5,25	6,02

1. táblázat Az EDC-1000-HR típusú (8 bites) CCD kamera zajának félértékszélességei (szürkeségi szintben mérve)

Átlagos félértékszélesség: 7,45 szürkeségi szint,
a kamera digitalizálási tartományának 2,91%-a.

	Expozíciós idő (ms)	10	20	40	80
Átlagos megvilágítottság (szürkeségi szint)					
200		40,15	31,60	29,45	68,11
400		41,63	35,51	32,43	75,38
600		43,71	39,21	36,29	83,34
800		47,09	43,65	41,01	96,83

2. táblázat A EDC-2000-N típusú (10 bites) CCD kamera zajának félértékszélességei (szürkeségi szintben mérve)

Átlagos félértékszélesség: 49,09 szürkeségi szint,
a kamera digitalizálási tartományának 4,79%-a.

4.4. Szimulált interferogramok kiértékelése

Négy szimulációs mérésorozatot végeztem, melyek célja az volt, hogy a Célkitűzések fejezetben felsorolt szempontokat figyelembe véve, meghatározzam a tükrözött nyálábú Mach-Zehnder-interferométerrel végzett mérések optimális körülményeit (kvantálási szintek száma, az interferogramon a központi hullámhosszon látszó csíkok száma, a hullámhossztengellyel bezárt szögük, a

polinomillesztéshez figyelembe vett hullámhossztartomány), amelyeknél a mérési hiba minimális.

A vizsgálatot úgy végeztem el, hogy a 4.2-ben tárgyalt szimulációs programmal interferogramokat és hozzájuk tartozó referencia- ill. tárgykar-képeket állítottam elő, majd a kapott képeket a 4.1-ben leírt kiértékelő programmal feldolgoztam. A szimuláláshoz használt szögdiszperziót (csak lineáris szögdiszperziót vettem figyelembe) eközben széles skálán ($0,05\mu\text{rad}/\text{nm}$ -tól $50\mu\text{rad}/\text{nm}$ -ig) változtattam, akárcsak a felsorolt körülményeket.

Az eredményeket olyan grafikonokon mutatom be, melyek mindegyikének vízszintes tengelyén a szimulálásnál használt szögdiszperzió olvasható le, míg a függőleges tengelyen a kiértékelés során „mért” szögdiszperzió az elméleti értéktől való abszolút eltérése.

Szimulációimban mindig 15fs időbeli (tehát kb. 40nm hullámhosszbeli) félértékszélességű Gauss-os impulzusokat tételeztem fel 800nm központi hullámhossz mellett. Ennek oka az, hogy a következő alfejezetben ismertetett, az SzTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén elvégzett méréseket ilyen impulzusokat kibocsátó Ti:S lézer és egy tükrözött nyalábú Mach-Zehnder-interferométer segítségével hajtottam végre.

Az első méréssorozatban a kvantáláshoz használt bitek számát (1. szempont a Célkitűzések fejezetben; ahol nem használtam kvantálást, ott „ ∞ ”-nel jeleztem, hogy a pontosságot csak a gépi számaábrázolás korlátozza), a polinomillesztéshez használt hullámhossztartományt (3. szempont) és a középponti hullámhosszon megfigyelhető csíkok számát (4. szempont) változtattam. A digitalizálási hibán kívül más hibát nem vettem figyelembe, az EDC-1000-HR kamera méreteit használtam, a hullámhossz-kalibráció egyenlete: $\lambda_i = (-0,175i + 860)\text{nm}$. A hullámhossz mindig a CCD-chip hosszabb oldala mentén változott.

Az eredmények két táblázatban két csoportosításban láthatók. Az előbbieken közvetlenül hasonlíthatók össze a különböző csíkszám (14. ábra), az utóbbiakon pedig a különböző hullámhossztartomány használatával kapott hibák (15. ábra).

Az $5\mu\text{rad}/\text{nm}$ szimulált szögdiszperziónál elkövetett hiba következetesen kiugró nagyságú, ezt valószínűleg a kiértékelő algoritmus valamely fogyatéka okozza, ezért ezeket a hibákat nem vettem figyelembe.

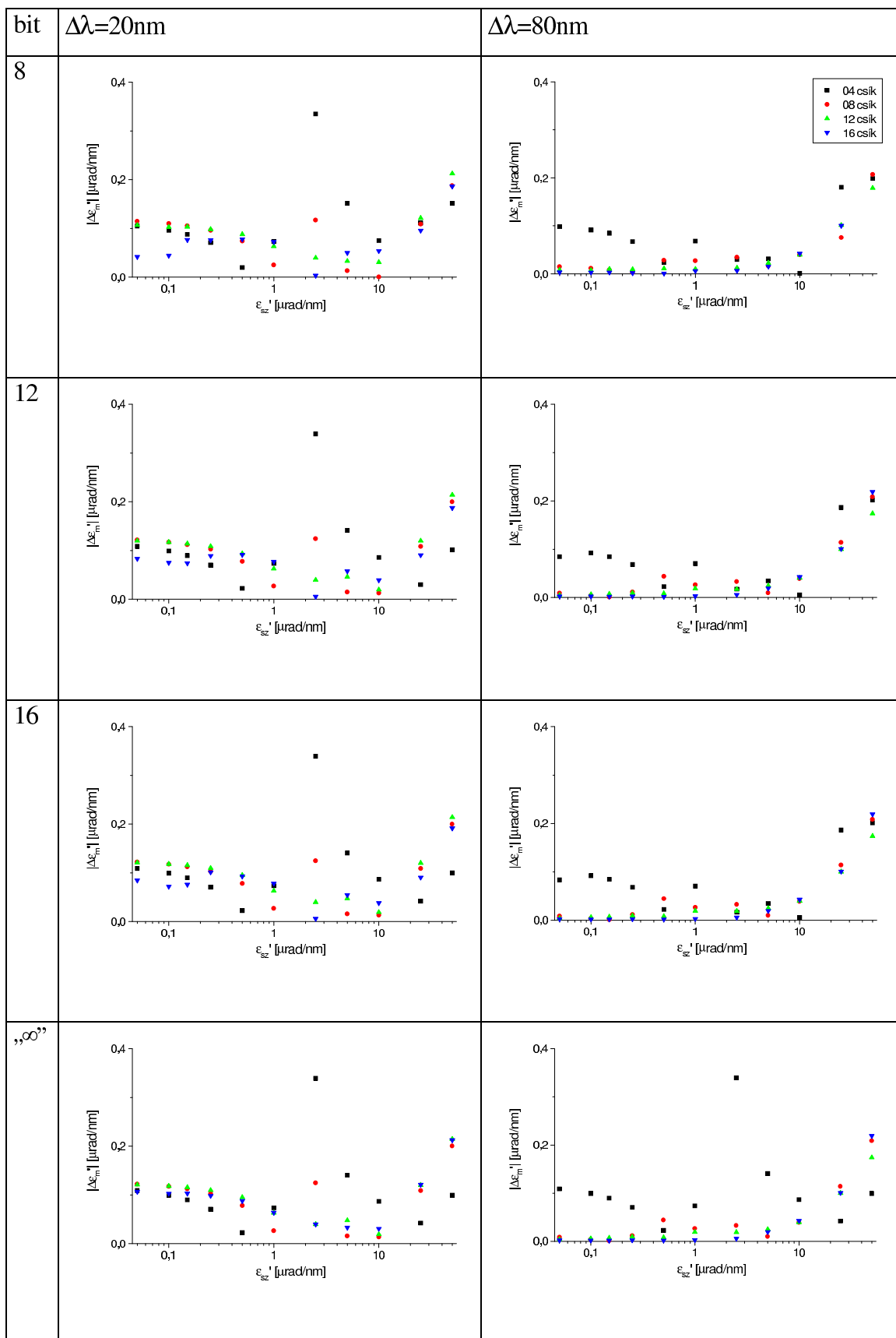
A grafikonokról leolvasható, hogy a kvantálási zajból származó mérési hiba $1\mu\text{rad/nm}$ szimulált szögdiszperzió alatt nem nő $0,045\mu\text{rad/nm}$ fölé, ha 40nm vagy annál szélesebb hullámhossztartományt veszünk figyelembe, és 8 vagy annál több csíkot állítunk be a központi hullámhosszon. Ha ezeket betartjuk, akkor viszont a további csíkszám- ill. hullámhossztartomány-növekedés esetén a hiba nem változik lényegesen.

Ha a szimulált szögdiszperziót tovább növeljük, a „mérési” hiba ugyan növekszik, de $50\mu\text{rad/nm}$ -ig nem éri el a $0,2\mu\text{rad/nm}$ -t.

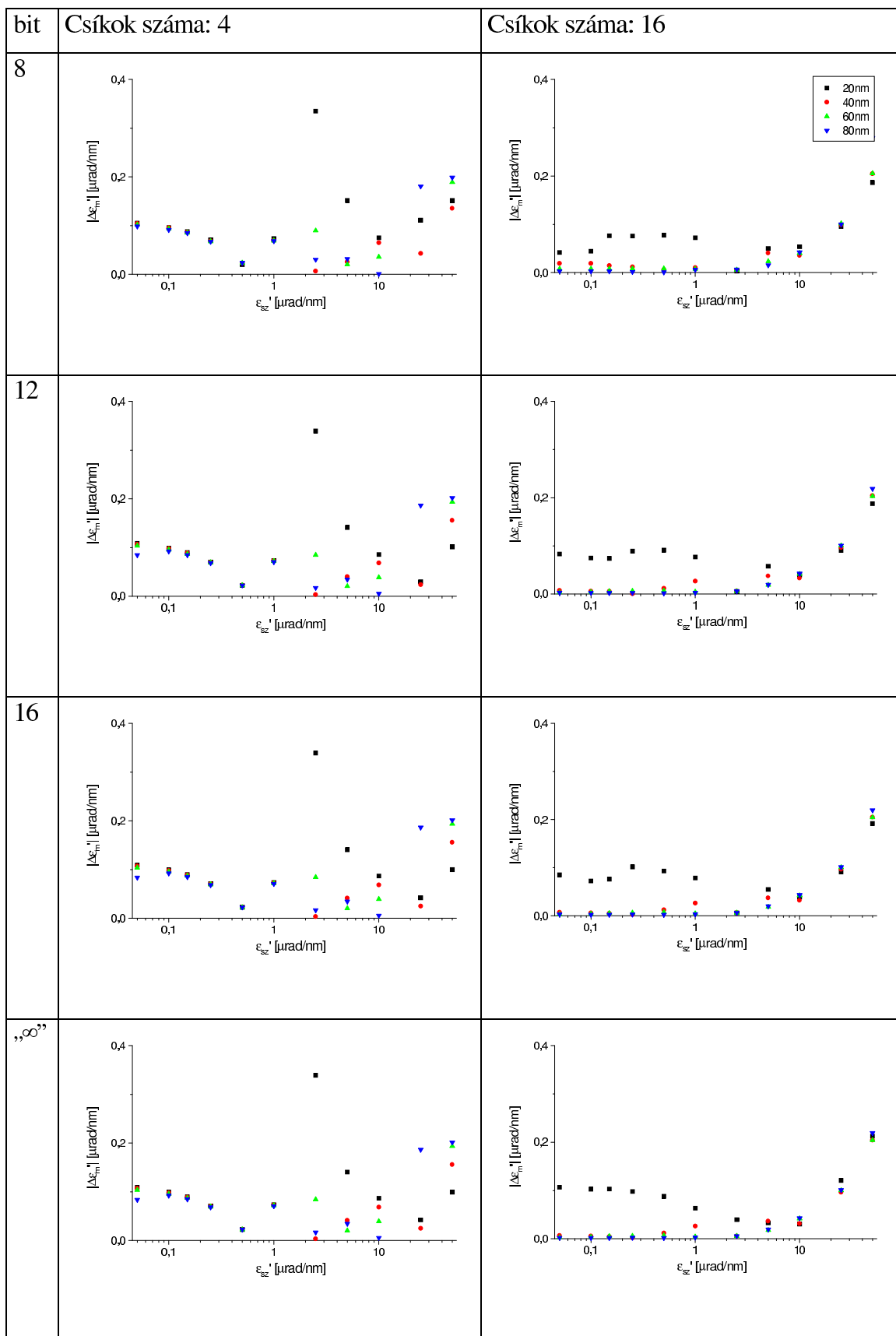
A táblázatok egyes sorait összehasonlítva azt láthatjuk, hogy különböző számú kvantálási szinttel ellátott szimulált kamerákat használva a kapott hibák nem különböznek lényegesen.

A második méréssorozatban az előbbi esethez képest még egy paramétert változtattam, az interferenciacsíkoknak a hullámhossztengellyel bezárt szögét (5. szempont a Célkitűzések fejezetben; a kamera méretei és hullámhossz-kalibrációja ugyanaz).

Az eredményeket a kvantáláshoz használt bitek száma szerint csoportosítottam, a 8 bittel végzett mérések a 16. ábrán, a 16 bittel végzettek a 17. ábrán láthatók.



14. ábra A szimulált szögdiszperzió-mérés abszolút hibája az elméleti érték függvényében, ha csak kvantálási hiba van jelen. A táblázatban jobbra haladva a figyelembe vett hullámhossztartomány, lefelé a kvantáláshoz használt bitek száma nő (a különböző szimbólumok különböző számú csíkot jelentenek az interferogramon)



15. ábra A szimulált szögdiszperzió-mérés abszolút hibája az elméleti érték függvényében, ha csak kvantálási hiba van jelen. A táblázatban jobbra haladva az interferenciacsíkok, lefelé a kvantáláshoz használt bitek száma nő (a különböző szimbólumok különböző hosszúságú figyelembe vett hullámhossztartományt jelentenek)

A kvantáláshoz használt bitek száma: 8		
Csík	$\Delta\lambda=20\text{nm}$	$\Delta\lambda=80\text{nm}$
4		
16		

16. ábra A csíkok dőlésszögének a szimulált szögdiszperzió-mérés abszolút hibájára gyakorolt hatása 8 bites kvantálás esetén. A táblázatban jobbra haladva a figyelembevett hullámhossztartomány, lefelé a központi hullámhosszon látszó interferenciacsíkok száma nő (a különböző szimbólumok különböző dőlésszöget jelentenek az interferogramon a csíkok és a hullámhossz-tengely között)

A kvantáláshoz használt bitek száma: 16		
Csík	$\Delta\lambda=20\text{nm}$	$\Delta\lambda=80\text{nm}$
4		
16		

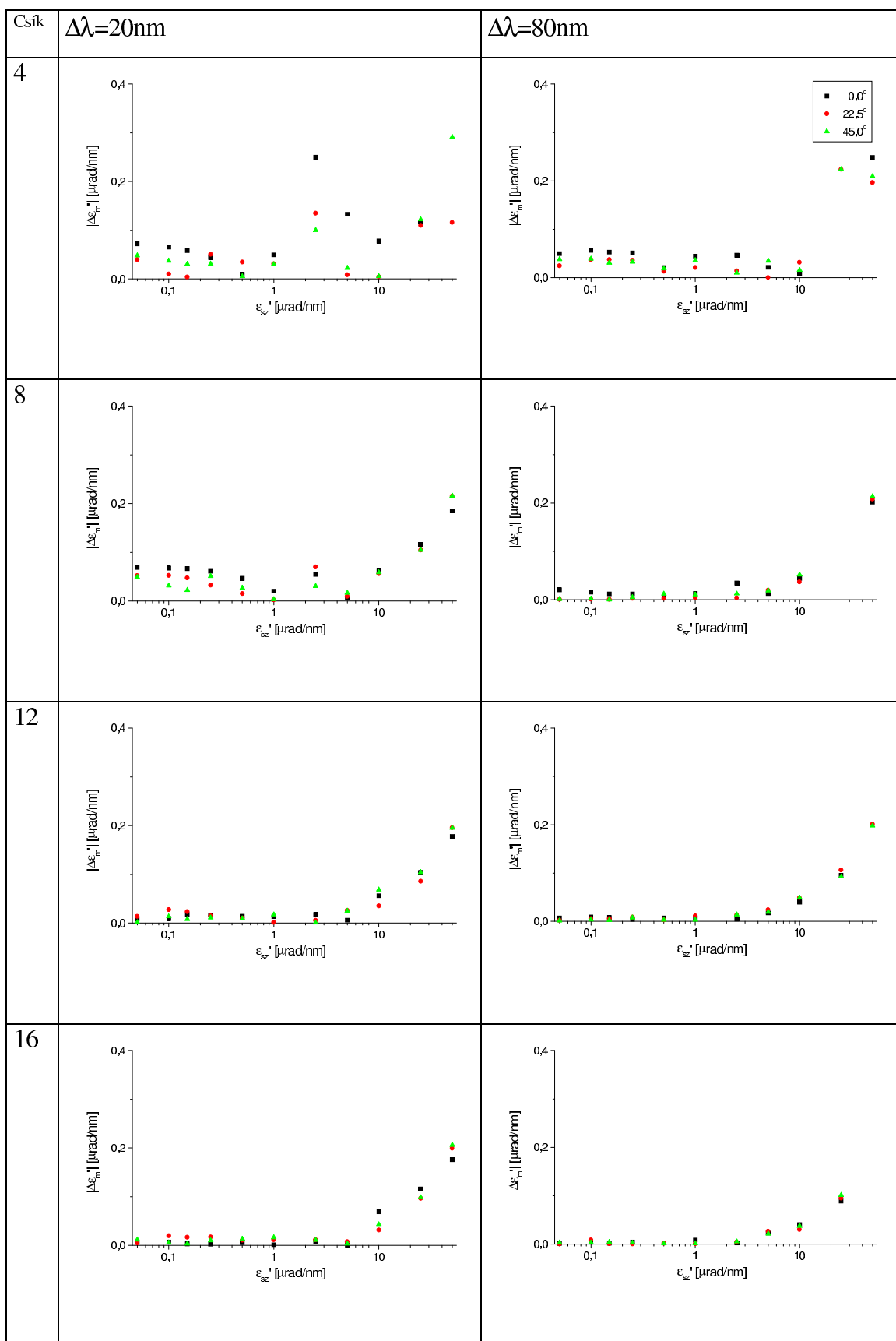
17. ábra A csíkok dőlésszögének a szimulált szögdiszperzió-mérés abszolút hibájára gyakorolt hatása 16 bites kvantálás esetén. A táblázatban jobbra haladva a figyelembevett hullámhossztartomány, lefelé a központi hullámhosszon látszó interferenciacsíkok száma nő (a különböző szimbólumok különböző dőlésszöget jelentenek az interferogramon a csíkok és a hullámhossz-tengely között)

Az eredmények most sem függenek jelentősen a digitalizáláshoz használt bitek számától. Nincs jelentősége annak sem, hogy a csíkok melyik irányban dőlnek (vagyis a dőlésszög előjelének).

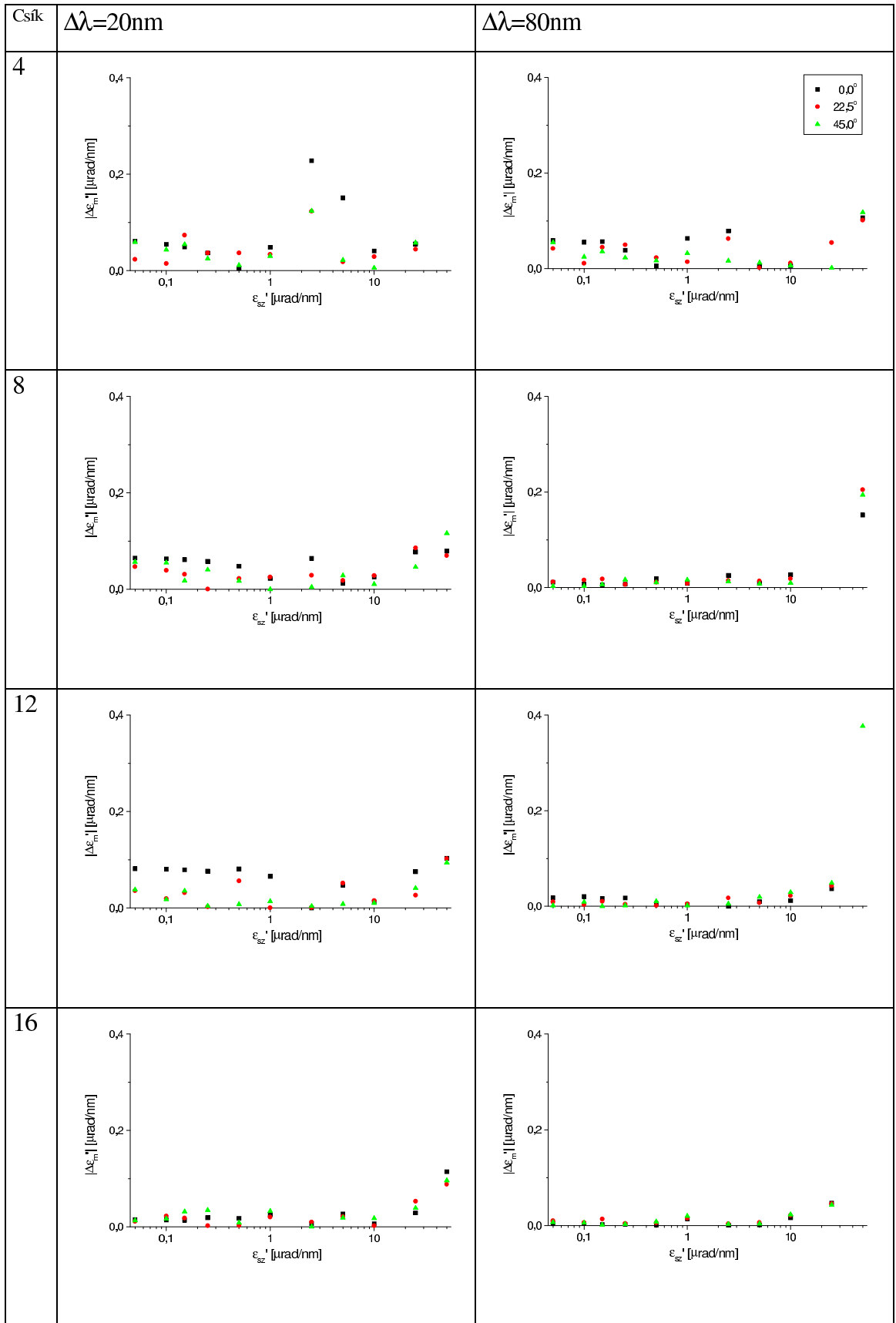
Fontos megjegyezni, hogy 10μrad/nm alatti szimulált szögdiszperziók esetében érdemes a csíkokat megdönteni, mert ilyenkor a hiba kis csíkszám és kis hullámhossztartomány esetén jelentősen (tipikusan a felére) csökken.

A harmadik és negyedik mérésorozatban a kvantáláshoz használt bitek száma állandó volt (a kétféle CCD-kamerának megfelelően rendre 8 és 10), de a 4.3-ban a zajokon elvégzett méréseknek megfelelően 8 ill. 50 kvantálási szint félértékszélességű Gauss-eloszlású zajt adtam minden képponthoz. A harmadik esetben (18. ábra) a kamera méretei és hullámhossz-kalibrációja ugyanaz, mint a

korábbiakban, a negyedikben (19. ábra) az EDC-2000-N méreteit használtam $\lambda_i=(-0,1994i+860)\text{nm}$ hullámhossz-kalibráció mellett.



18. ábra A szögdiszperzió-mérés hibája 8 bites kamerát kvantálási hibával és 8 szűrkeségi szint félértékszélességű Gauss-os zajjal szimulálva. Jobbra a figyelembe vett hullámhossztartomány, lefelé az interferenciacsíkok száma nő (a különböző szimbólumok különböző dőlésszöget jelentenek az interferogramon a csíkok és a hullámhossz-tengely között)



19. ábra A szögdiszperzió-mérés hibája 10 bites kamerát kvantálási hibával és 50 szűrkeségi szint félértékszélességű Gauss-os zajjal szimulálva. Jobbra a figyelembe vett hullámhossztartomány, lefelé az interferenciacsíkok száma nő (a különböző szimbólumok különböző dőlésszöget jelentenek az interferogramon a csíkok és a hullámhossz-tengely között)

Összevetve a 14. ábra 1. sorában (8 bites kamera Gauss-eloszlású zaj figyelembevétele nélkül) és a 18. ábrán (8 bites kamera Gauss-eloszlású zaj figyelembevételevel; 0°-os dőlésű interferenciacsíkok esetén) feltüntetett hibákat, nem látható jelentős változás az abszolút hibában.

A 8 bites és a 10 bites kamerával körülbelül ugyanaz a pontosság érhető el, a leglényegesebb különbség az, hogy míg az EDC-1000-HR esetén 20nm ill. 80nm polinomillesztési tartománynál rendre 8-ról 12 csíkra ill. 4-ről 8 csíkra való átállás hozza meg a legnagyobb javulást, addig ez az EDC-2000-N-nél a 12-ről a 16 csíkra ill. 8-ról 12 csíkra való átállásnál történik meg.

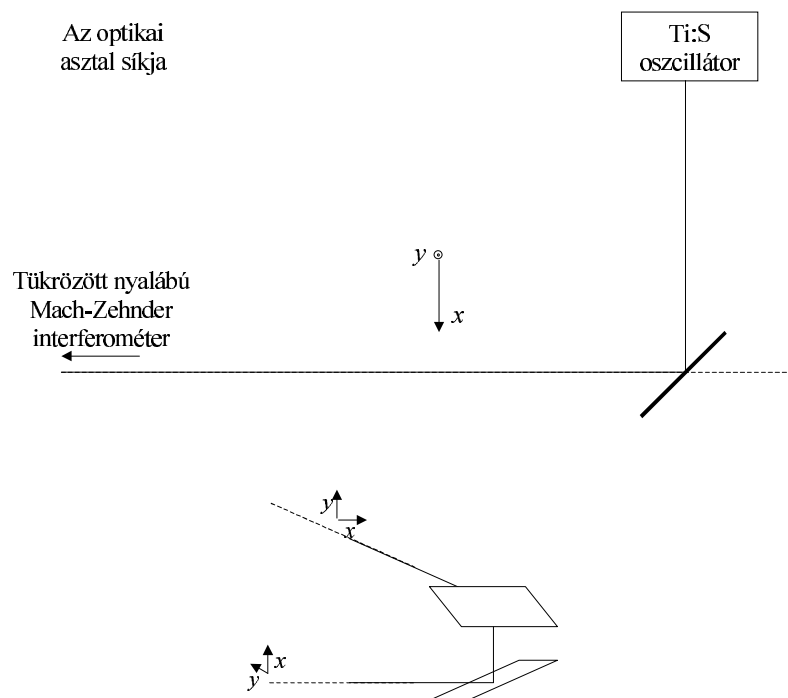
Eddigi megállapításaink most, a Gauss-eloszlású zajt bevezetve is állnak: az interferenciacsíkok megdöntése most is csökkenti az abszolút hibát, de az már nem egyértelmű, hogy 22,5°-kal vagy 45°-kal érdemesebb ezt elvégezni. A csíkok számának és a kiértékeléskor figyelembe vett hullámhossztartomány növelése szintén kisebb abszolút hibát eredményez.

4.5. Mért interferogramok kiértékelése

Az előző szakaszban levont következtetések helyességét ellenőrzendő, három méréssorozatot végeztem el a tükrözött nyalábú Mach-Zehnder-interferométerrel.

Az interferogramok rögzítésére minden esetben az EDC-2000-N CCD-kamerát használtam 40%-os erősítés és 52% bias mellett. A spektrális kalibráció egyenlete $\lambda_r = (0,11371i + 763,1)\text{nm}$ volt. Az adatok feldolgozására a 4.1-ben leírt kiértékelő programot használtam.

Az első két méréssorozatban a Ti:S oszcillátorból közvetlenül kicsatolt nyaláb szögdiszperzióját vizsgáltam a vízszintes (x) és a függőleges (y) tengely mentén (20. ábra). A nyalábot mindkét esetben szögdiszperzió-mentesnek vártam. A mérések alatt változtattam a központi hullámhosszon látható csíkok számát és a két nyaláb közti késleltetést. Az interferogramok felvételéhez használt expozíciós idő 6ms volt. Az x tengely menti mérések eredményeit a 21. ábra, az y tengely mentiekét a 22. ábra foglalja magába.



20. ábra Fent: az x, y irányok értelmezése a kísérleti elrendezésben. Lent: a nyaláb függőleges és vízszintes irányainak felcserélése

A táblázatok bal oldalán látható grafikonok a nyalábok által bezárt szög függvényében ábrázolják a mérési eredményeket, a különböző szimbólumokhoz különböző késleltetések tartoznak, melyeket a 45° -os szögtükör (l. 8. ábra) beállítására szolgáló mikrométercsavar állásával címkéztem (0-nak vettem ott, ahol a csíkok a hullámhossztengellyel párhuzamosan futottak). Jobboldalt a mért szögdiszperziót az időben mért késleltetés függvényében ábrázoltam, a különböző szimbólumok különböző nyalábok közötti szögekhez tartoznak, amit a központi hullámhosszon beállított csíkok számával címkéztem.

Megállapíthatjuk azt, hogy a csíkok számának növelése a mért eredmény szórását csökkenti, ami megerősíti az előző fejezetbeli a szimulációkból levont következtetéseket, de a szögdiszperzió-mérés eredményében határozott tendenciájú növekedést is okoz. A polinomillesztésre használt hullámhossztartomány — a szimulációkkal ellentétben — optimális szélessége van (60nm), ahol a legkisebb a mért adatok szórása.

A szimulációs vizsgálatok során a legtöbb beállított csík vezetett a legkisebb hibára. A legtöbb csíkhhoz most is a legkisebb szórás tartozik, de az eredmény az x tengely mentén végzett méréseknél — a várakozástól eltérően — nem 0.

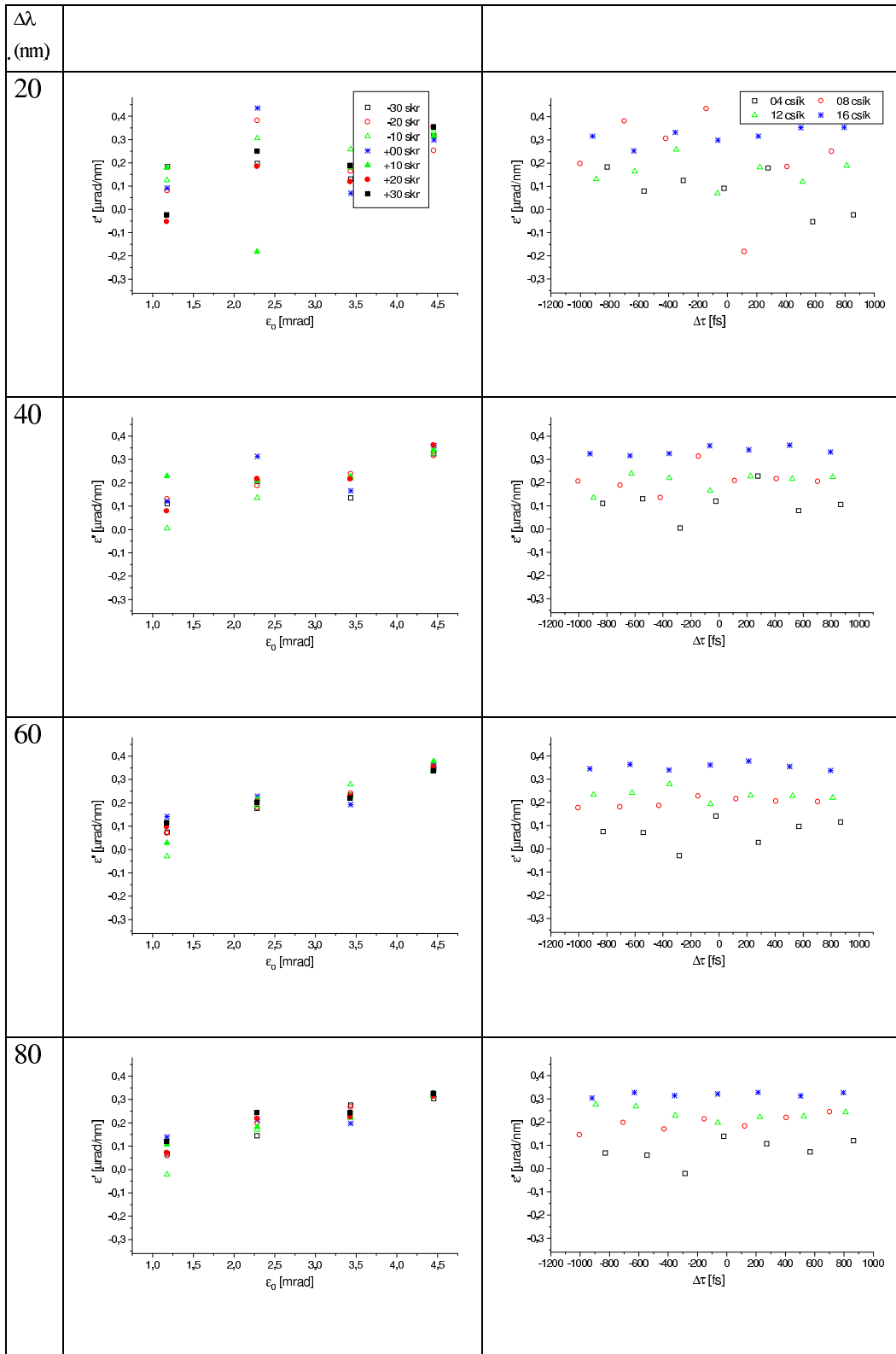
A várt 0 vagy 0-hoz közeli szögdiszperzió helyett a mért szögdiszperzió nemcsak nagyobb, mint a mérés hibahatára [4 és 11], hanem a csíkok számának növelésével egy adott értékhez konvergál. Ezen látszólagos ellentmondás feloldása céljából a kísérletben alkalmazott paraméterek (nyalábok közti késleltetés ill. központi hullámhosszon bezárt szög) felhasználásával elvégeztem a mérés szimulációját. Ezek kiértékeléséből a 23. ábrán látható eredményeket kaptam. Jól látszik, hogy

- a szimulációs kísérletek során a legtöbb beállított csík vezetett a legkisebb hibára, egyezésben a kísérlettel;
- a szimulált interferogramokból származó szögdiszperziók — a csíkok számának növekedésével — közelítenek a zérushoz;
- szórásuk kisebb, mint a mérések eredményeie.

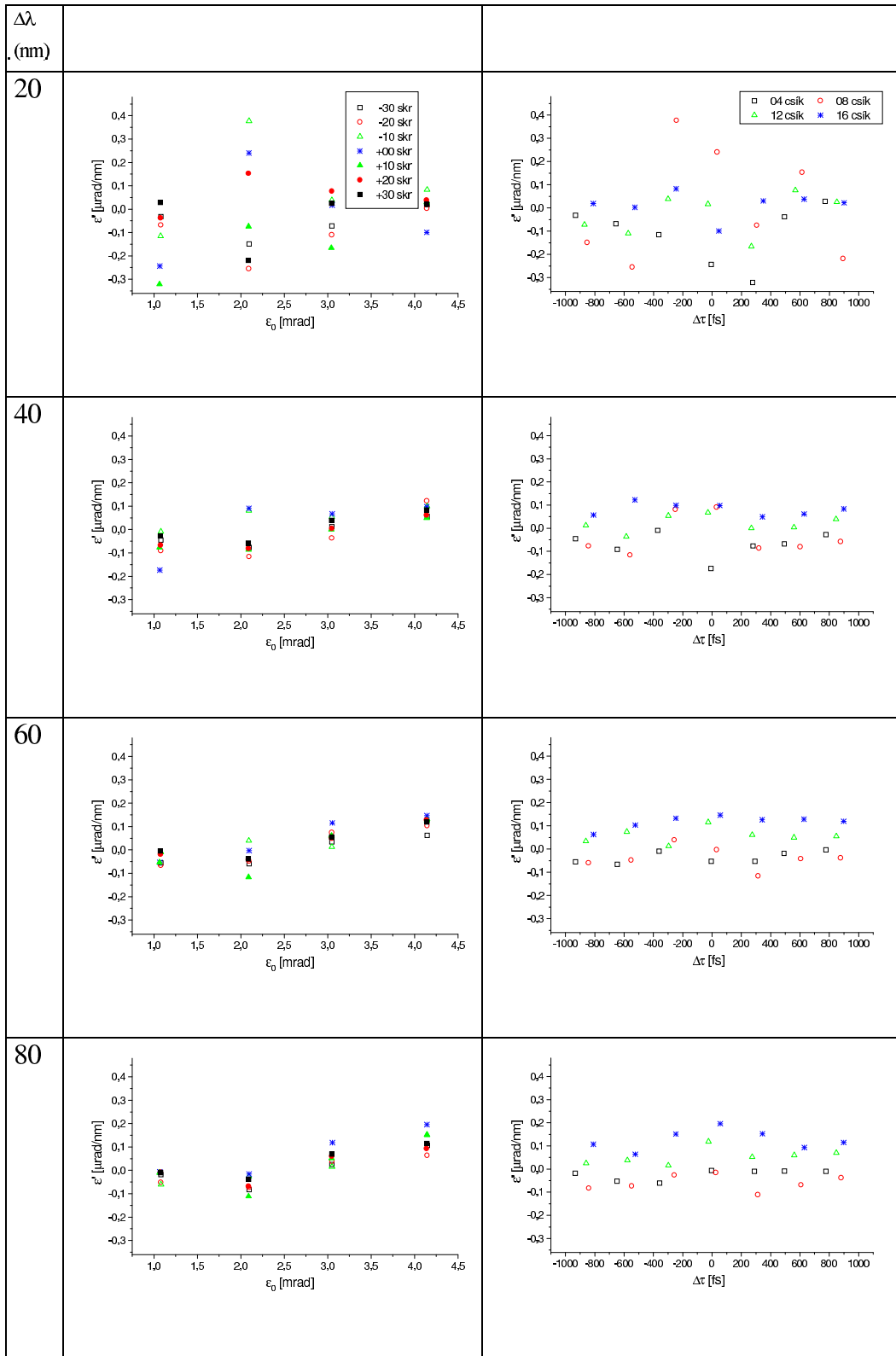
A mérések és a velük kapcsolatban elvégzett szimulációk eredményéből az x tengely mentén a hibahatárhoz közeli $0,2\mu\text{rad}/\text{nm}$, az y tengely mentén viszont $0,1\mu\text{rad}/\text{nm}$ -nél kisebb szögdiszperzióra lehet következtetni. Mindkét irányú szögdiszperzió valószínű magyarázata a Ti:S oszcillátor megépítésében keresendő: az x tengely menti (nagyobb) szögdiszperziót a Ti:S oszcillátor prizmaínak, míg az y tengely menti (kisebb) szögdiszperziót az oszcillátor két ékes lemezből álló kicsatoló tükrének beállítási pontatlansága okozza. Megjegyzendő, hogy a szögdiszperzró fent mért értékei mindkét irányban oly kicsinyek, hogy annak normál kísérleti körülmények között eddig nem észlelték hatását.

A kísérletek eredményeinek a szimulációkból levont következtetésektől való eltérése azzal magyarázható, hogy a mindvégig használt sík hullámfrontú közelítés nem elég pontos (tehát pl. Gauss-nyaláb közelítés még ennél is jobb eredményre vezethet) ill. hogy a CCD-kamera zaja által okozott mérési hiba mellett jelentősek más hibaforrások (pl. az optikai elemek szélén vagy porszemcséken való elhajlások, melyeket a szimulációnál nem vehettem figyelembe).

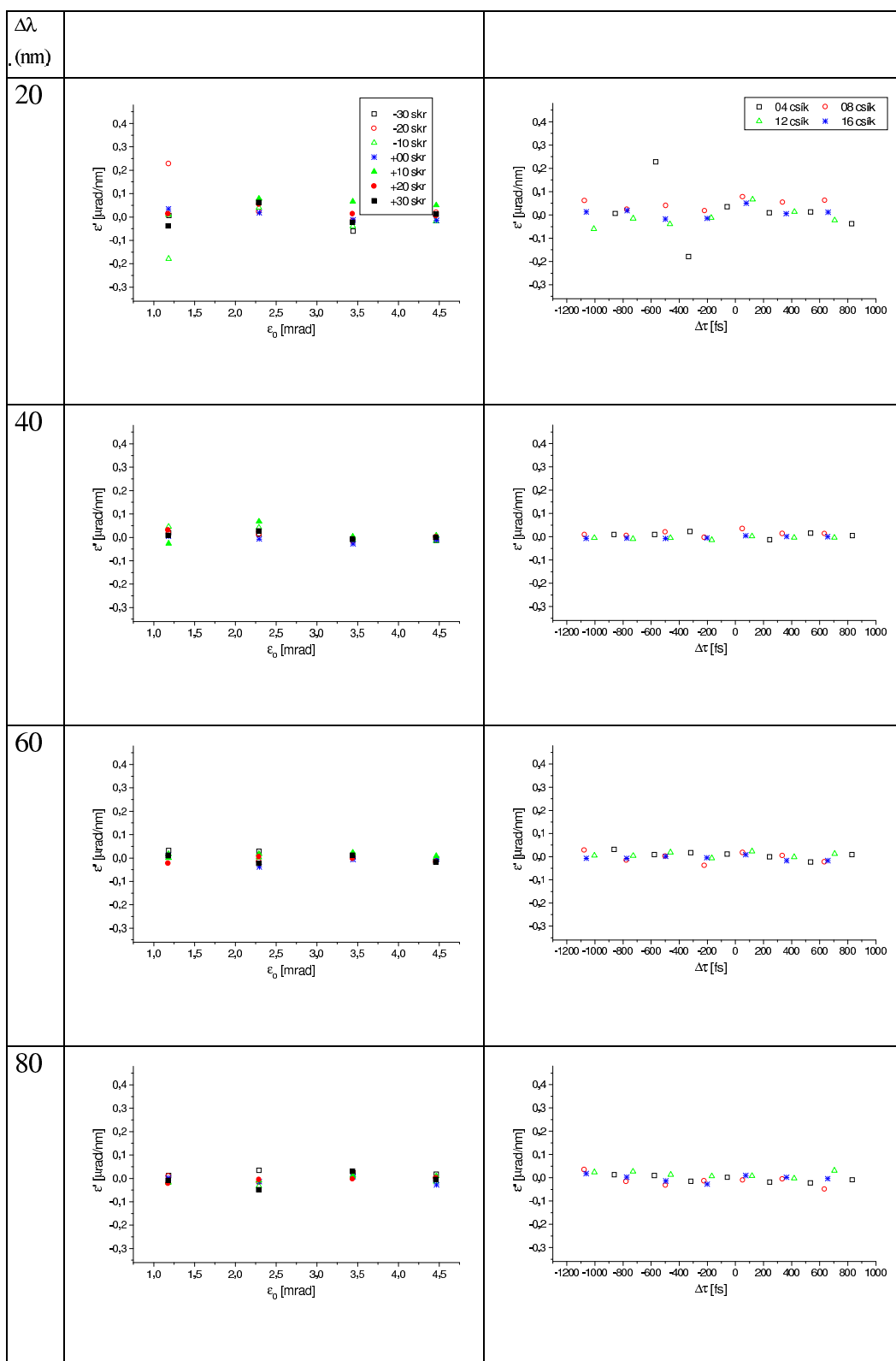
A kísérletek során tapasztalt optimális mérési hullámhossztartomány (60nm) felléptének egy valószínű oka lehet a magasabb rendű szögdiszperzió nem elhanyagolható mértéke.



21. ábra A Ti:S oszcillátor x tengely mentén mért szögdiszperziója a nyalábok által a központi hullámhosszon bezárt szög (baloldalt) és a köztük lévő késleltetés (jobbaldalt) függvényében. Lefelé haladva a polinomillesztésnél figyelembe vett hullámhossztartomány nő

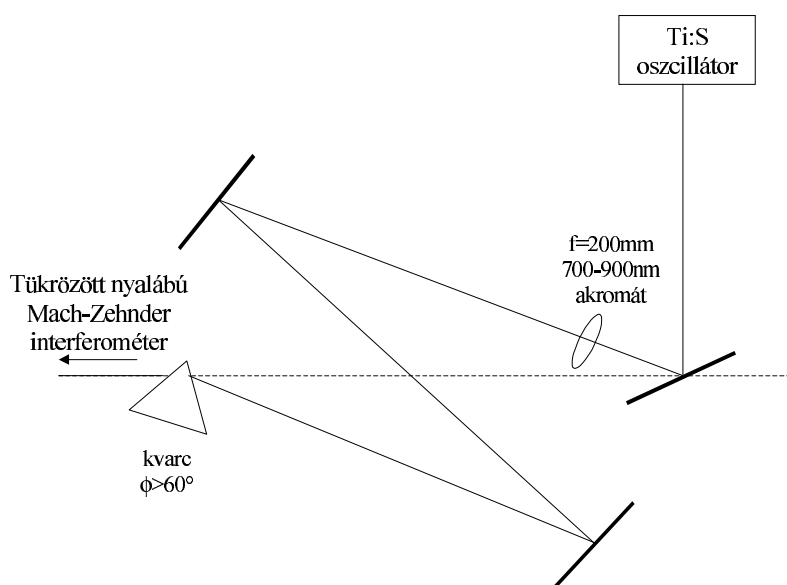


22. ábra A Ti:S oszcillátor y tengely mentén mért szögdiszperziója a nyálábok által a központi hullámhosszon bezárt szög (baloldalt) és a köztük lévő késleltetés (jobbaldalt) függvényében. Lefelé haladva a polinomillesztésnél figyelembe vett hullámhossztartomány nő



23. ábra A 21. ábrán bemutatott kísérleti eredményeknek megfelelő szimulációk eredményei

A harmadik esetben egy ismert szögdiszperziójú optikai elemmel végeztem mérést. A 24. ábra szerinti módon az oszcillátor és a tükrözött nyalábú Mach-Zehnder-interferométer közé egy $67,8^\circ$ törőszögű kvarcprizmát helyeztem. A 7ms expozíciós idővel készült interferogramok kiértékelésével kapott eredmények a 25. ábráról olvashatók le.

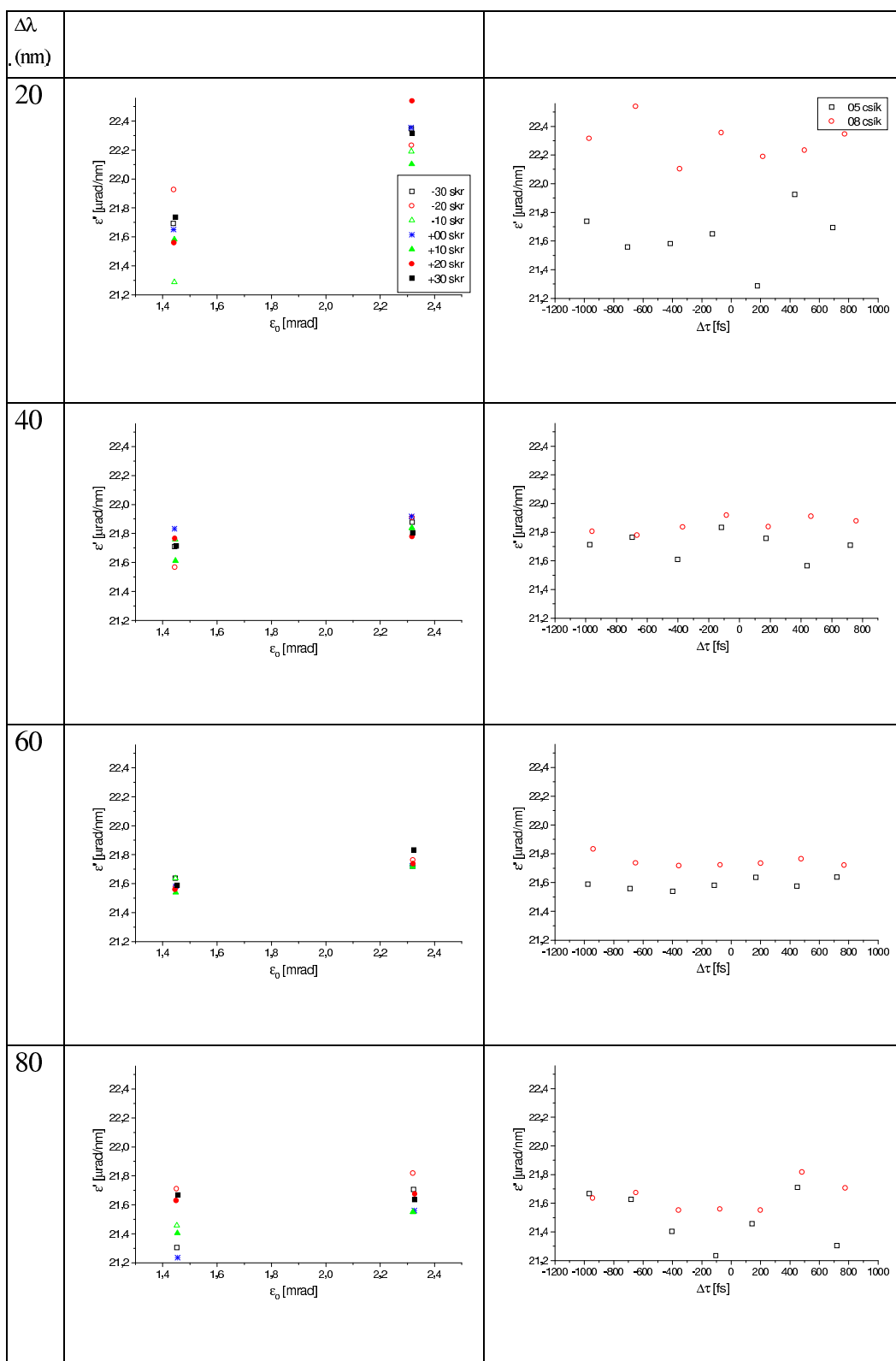


24. ábra Kvarcprizma beiktatása a Ti:S oszcillátor és a tükrözött nyalábú Mach-Zehnder-interferométer közé

A kvarcprizma esetében végzett mérések eredményeire is a korábbiakhoz hasonló állítások igazak, azaz a több csík beállítása kisebb szórást eredményez, és hatására a mért értékek a valós szögdiszperzióhoz tartanak, valamint létezik olyan optimális hullámhossztartomány, ahol a szórás minimális.

A mért szögdiszperzió $21,7 \pm 0,1 \mu\text{rad/nm}$, míg az elméleti úton kiszámított $21,6 \pm 0,3 \mu\text{rad/nm}$. A két érték közti eltérés oka valószínűleg az, hogy a lézeroszcillátorból kicsatolt nyaláb eleve szögdiszperzióval rendelkezett.

A mérési eredmények szórását 40nm ill. afölötti figyelembe vett hullámhossztartomány esetén jól közelíti a kvantálási hiba és a Gauss-eloszlású zaj által együtt okozott szimulált mérési hiba (l. 14. ábra grafikonjai, $20 \mu\text{rad/nm}$ szimulált szögdiszperziónál).



25. ábra A kvarcprizma mért szögdiszperziója a nyalábok által a központi hullámhosszon bezárt szög (baloldalt) és a köztük lévő késleltetés (jobbaldalt) függvényében. Lefelé haladva a polinomillesztésnél figyelembe vett hullámhossztartomány nő

5. Összefoglalás

Diplomamunka feladatomban az volt, hogy állapítsam meg, lehetséges-e a tükrözött nyalábú interferométer (2.3.3 alfejezet) mérési hibáját az adatrögzítés és -feldolgozás tökéletesítése révén csökkenteni.

Ennek során először elkészítettem egy saját cosinusfüggvény-illesztő eljárás alapján alapuló interferogram-kiértékelő valamint egy interferogram-szimuláló programot.

Következő lépésként az interferogramok felvételére használt CCD-kamerák zajának eloszlását határoztam meg, hogy a szimulációs vizsgálatok során azt jól tudjam modellezni. Arra jutottam, hogy a zaj Gauss-eloszlást követ.

A szimulált interferogramok kiértékeléséből a következő eredményeket kaptam:

- Csupán a kvantálási zaj figyelembevételkor, ha 8 vagy annál több interferenciacsíkot állítunk be a központi hullámhosszon, és 40nm vagy annál szélesebb hullámhossz-tartományt veszünk figyelembe a lineáris szögdiszperziós együttható kiszámításánál, akkor $1\mu\text{rad}/\text{nm}$ szimulált szögdiszperzió alatt a hiba nem éri el a $0,045\mu\text{rad}/\text{nm}$ -t, $50\mu\text{rad}/\text{nm}$ alatt pedig a $0,2\mu\text{rad}/\text{nm}$ -t.
- Az interferenciacsíkok 45° -kal való megdöntése jelentősen csökkenti az abszolút hibát.
- Ha az interferenciaképeket még a Gauss-eloszlású zajjal is megterheljük, az abszolút hiba gyakorlatilag nem változik, a fenti kvalitatív megállapításaink pedig továbbra is állnak: az interferenciacsíkok számának és a kiértékeléskor figyelembe vett hullámhossztartomány növelése, a csíkok megdöntése csökkenti az abszolút hibát.
- A kvantáláshoz használt bitek száma egyik esetben sem befolyásolja jelentősen az abszolút hibát. Mindezekből az szűrhető le, hogy 256-nál több kvantálási szinttel rendelkező CCD-kamera alkalmazása — a

várákozással ellentétben — nem növeli a szögdiszperzió-mérés pontosságát.

A mért interferogramok kiértékeléséből a következő eredményeket kaptam:

- Ha a mérési hibához képest nagy a mérendő szögdiszperzió, mint például egy kvarcprizmán átbocsátott nyaláb esetében (kb. $20\mu\text{rad/nm}$), a mérési eredmények hibája jól egyezik a szimuláció esetén kapott abszolút hibával.
- Ha kicsi a szögdiszperzió, mint például egy Ti:zafír lézeroszcillátorból közvetlenül kicsatolt nyaláb esetén, a szimulált kvantálási és Gauss-eloszlású zaj által okozott hiba jóval kisebb, mint a mért adatok hibája. Ez azt jelenti, hogy CCD-kamera által a mérőrendszerbe vitt hiba modellezése önmagában nem elég arra, hogy az összes zajt, köztük pl. az optikai elemek szélén vagy a szennyeződéseken bekövetkező fényelhajlások hatását közelítsük vele.
- Egy adott nyalábon elvégzett több mérés esetén a mért szögdiszperzió az interferenciaképen látható csíkok számának emelésével határozott növekedést mutat (amellett, hogy ilyenkor a mért értékek szórása csökken). Emögött az sejthető, hogy a mindvégig használt sík hullámfrontú közelítés nem elég pontos, helyette a továbbiakban a Gauss-nyalábok viselkedését jobban követő közelítést kell alkalmazni.
- A kapott adatok szórása egy adott nyaláb esetében akkor a legkisebb, ha a kiértékeléshez egy optimális (60nm) szélességű hullámhossztartományt veszünk figyelembe. Erre az általam szimulációs kísérletekkel nem vizsgált nemlineáris szögdiszperzió jelenléte lehet a magyarázat.

Felhasznált irodalom

1. G. Pretzler, A. Kasper, K. J. Witte, Appl. Phys. **B70**, 1 (2000)
2. P. Simon, H. Gerhardt, S. Szatmári, Opt. Quant. Electr. **23**, 73 (1991)
3. Z. Sacks, G. Mourou, R. Danielus, Opt. Lett. **26**, 462 (2001)
4. K. Varjú, A. P. Kovács, G. Kurdi, K. Osvay: High precision measurement of angular dispersion in a CPA laser, Appl. Phys. **B**, megjelenés alatt
5. K. Osvay, I. N. Ross, Opt Comm. **105**, 271 (1994)
6. C. Fiorini, C. Sauteret, C. Rouyer, N. Blanchot, S. Seznec, A. Migus, IEEE J. Quant. Electron. **QE-30**, 1662 (1994)
7. D. J. Bradley, G. H. C. New, Proc. IEEE **62**, 313-345 (1974)
8. Horst, Gerald C.: CCD Arrays Cameras and Displays, SPIE Optical Engineering Press (1996)
9. Móricz Ferenc: Numerikus módszerek az algebrában és analízisben, Polygon Szeged (1997)
10. Hesselmann, Norbert: Digitális jelfeldolgozás, Műszaki K. Bp. (1985)
11. K. Varjú, M. Görbe, A. P. Kovács, G. Kurdi, K. Osvay
Ultrafast Processes in Spectroscopy 2001, Florence, Italy, paper P34

Köszönetnyilvánítás

Ezúton mondok köszönetet témavezetőimnek, Dr. Kovács Attilának és Dr. Osvay Károlynak dolgozatom megírása és a TeWaTi laborban végzett munkám közben nyújtott kitartó segítségükért, végtelen türelmükért.