

Rövid impulzusok vizsgálata autokorrelátorral

Készítette: Lenk Sándor, Maák Pál

1. Mérés célja:

Az autokorrelátor pozicionálásának, spektrométer és fénymérő rutinszerű használatának elsajátítása. Autokorrelátoros mérések végrehajtása és egyéb, a gyakorlat végrehajtásához szükséges technikák alkalmazása. Autokorreláció számítása numerikus számítógépes program segítségével. Végezetül cél az eredmények kritikus értékelése.

2. Mérőeszközök

- *PolarOnyx femtoszekundumos szállézer* – max. 100 fs impulzushosszúságú lézer, teljesítmény 5-20 mW
- *Ti:zafír femtoszekundumos lézer* – max. 100 fs impulzushosszúságú lézer, 100 – 1000 mW
- *Tükrök* – értelemszerűen 90° vagy 45°-ra optimalizált dielektrikum tükrök
- *Kicsatoló üveglap* – Síkpárhuzamos (kicsit ékes, 0.5-2°) üveglapok réteg nélkül
- *Spektrométer* – felbontása 0.1-1.5 nm, hullámhossztartománya a lézerhez illeszkedik, pl. Avantes AvaSpec 2048 vagy Ocean Optics USB 4000 típus
- *Teljesítménymérő* – a lézer teljesítményének mérésére alkalmas, legalább 1000 dinamikával, pl. Coherent Fieldmax II TO típus Optikai látható (VIS) mérőfejjel
- *Autokorrelátor* – pl. APE MINI típus
- *Fénycsökkentő* – neutrális a látható/NIR tartományra
- *Infravörös kamera*
- *Védőszemüvegek*

3. Lézerbiztonsági figyelmeztetés

A mérés során fokozottan ügyeljünk a lézerbiztonsági előírások betartására. A használt lézerek ugyanis tipikusan a 760-800 nm hullámhossztartományban sugároznak, és itt a szem érzékenysége már nagyon csekély. Így az az érzetünk támad, hogy nagyon alacsony teljesítményekkel dolgozunk. Ez azonban nem így van! Hasonlítsuk csak össze a mért lézerteljesítményeket egy a laborban gyakran alkalmazott He-Ne lézer teljesítményével! Ráadásul ebben a mérésben ultrarövid impulzusokkal dolgozunk, vagyis ezek a lézerek nagyon magas csúcsintenzitással működnek!

4. Elméleti bevezető

Bármely természettudományi területen fontos a gyorsan lejátszódó folyamatok vizsgálata. Napjainkban olyan lézerimpulzusok állnak a kísérletezők rendelkezésére, melyek csak néhány optikai ciklus hosszúságúak. Sőt, ilyen lézerekkel, még ezeknél a nagyon rövid lézerimpulzusoknál is rövidebb impulzusok kelthetően [1].

Ezen nagyon rövid lézerimpulzusok (un. ultrarövid impulzusok) mérésénél alapvető probléma, hogy a mérés alapját szolgáló fizikai effektusnak rövidebbnek kellene lennie az ultrarövid impulzusnál. Az ultrarövid impulzusok hagyományos detektoros technikákkal emiatt nem mérhetők meg, azaz egy gyors detektor és oszcilloszkóp kombinációjával az 1. ábrán látható mérési eredményt nyerjük, amelyben az impulzusok félértékszélessége legalább

1 ns. Ez pedig a detektor vagy az oszcilloszkóp közül a nagyobb időállandójának az időállandója, és nem az impulzus tényleges hosszúsága, amely 1 ps-nál is rövidebb lehet.



1. ábra

1 GHz sávszélességű fotodetektorral és 2 GHz sávszélességű oszcilloszkóppal mért móduscsatolt ultrarövid lézerimpulzus-sorozat

Ilyen rövid impulzusokat csak rövidebb időállandójú mérőeszközzel lehetne mintavételezni az időtartománybeli direkt méréshez, amelyek azonban nem nagyon állnak rendelkezésre. A nagyon rövid impulzusok időbeli mérésére az elterjedt módszer az, hogy az impulzust önmagával korreláltatjuk, majd az eredményből becsüljük az impulzus hosszát. Így, az un. optikai autokorrelátor készülék segítségével, akár nagy, akár kis ismétlődési frekvenciájú pikoszekundumos és femtoszekundumos impulzusokat is mérhetünk.

Az ilyen ultrarövid impulzusok mérésénél azonban fontos figyelembe venni azt, hogy az impulzus az anyagon történő áthaladáskor (így levegőben történő terjedéskor) diszperziót szenved, aminek következtében az impulzus hossza változik, tipikusan megnövekszik. Amennyiben cél a lehető legrövidebb impulzus elérése és mérése, úgy vagy a legrövidebb impulzus kialakulásának helyén kell mérni, vagy e hely és a mérés helye közötti úton elszorított diszperziót kompenzálni szükséges. Ennek tanulmányozása azonban e hallgatói mérésnek nem feladata. A diszperzióval és a kompenzálásával kapcsolatos ismeretek elmélyítésére például az [2] publikáció alkalmas.

4.1. Móduscsatolás

Ultrarövid impulzusokat un. móduscsatolással hozhatunk létre. A móduscsatoláshoz olyan lézerezonátorra és erősítő közegre van szükség, amelyben egyszerre nagyszámú longitudinális módus alakulhat ki. A móduscsatolás során a longitudinális módusok fázisát szinkronizáljuk, azaz a különböző hullámhosszak (módusok) fáziskülönbsége nulla („egyszerre indítjuk” őket). Egyszerűen belátható matematikailag, hogy ha a különböző frekvenciájú szinuszos hullámokat rögzített fázissal összeadjuk, akkor impulzusok alakulnak ki.

A nagyszámú longitudinális módus azt is jelenti, hogy a lézer egy spektrálisan széles tartományban sugároz. A spektrális szélességből pedig egy elvi becslést tehetünk arra

vonatkozólag, hogy a módusok tökéletesen szinkronizációja esetében milyen rövid lehet az impulzus. Az így meghatározott elméleti impulzushosszt transzformáció limitált impulzusedőnek nevezzük.

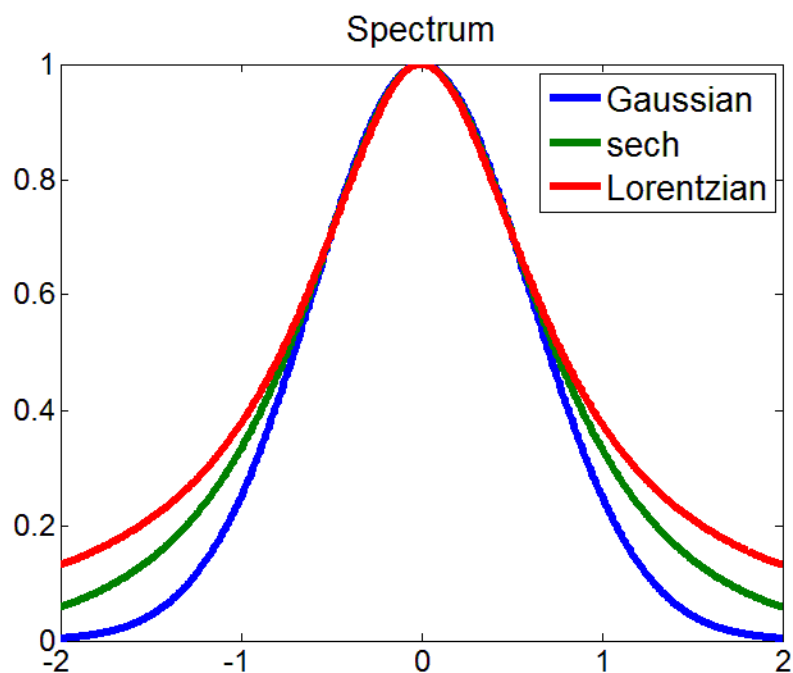
A transzformáció limitált impulzusedő azonban függ a spektrumra illetve az impulzusra vonatkozó feltételezésünktől. (A gyakorlatban általában nem tudjuk azt, hogy az adott impulzus pontosan milyen függvénnyel írható le.)

Az 1. táblázat a sávszélesség és az impulzushossz minimuma közti elméleti összefüggést mutatja különböző jelalakok esetében. Ezen jelalakok nagyon hasonlóak, ahogy az a 2. ábrán is látható. (Az ábra nem feltétlenül a legjobban illeszkedő jelalakokat mutatja be, valószínűleg még ennél is jobb egyezés is elérhető.) Ezen egyes jelalakok autokorrelációja is nagyon hasonlóan adódik, így az autokorrelátoros mérésből általában nem lehet megmondani, hogy pontosan melyik jelalakkal is van dolgunk.

Impulzus és a sávszélesség alakja	Idő-sávszélesség szorzat ($\Delta t \cdot \Delta f$)
Gauss	0.441
Szekáns	0.315
Lorentz	0.142

1. táblázat

Az idő-sávszélesség szorzat minimuma különböző jelalakok esetében



2. ábra

Különböző (Gauss, szekáns², illetve lorentz) jelalakok relative spektruma

4.2. Autokorreláció mérés elve

Az autokorrelációs függvény definíciója a következő:

$$ACF(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot x(t + \tau) \quad (1)$$

Az $x(t)$ mennyiség optikai autokorrelátor esetében elvileg a térerősség vagy az intenzitás lehet.

Ha a térerősség autokorrelációját számítjuk, úgy a spektrum Fourier transzformáltját kapjuk. Ez a mennyiség a Fourier transzformációs spektroszkópia alapja.

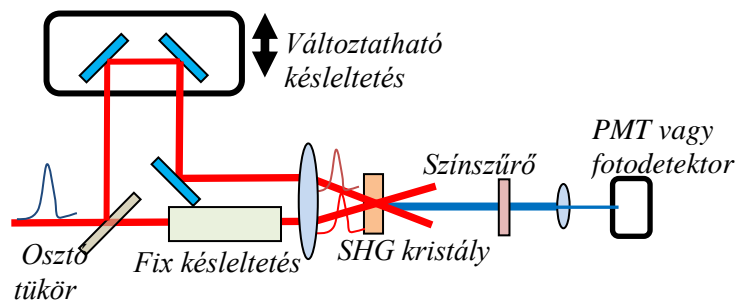
A lézerek impulzushosszának becslését az intenzitás autokorrelációja alapján, egy Michelson interferométer segítségével végezzük. A mérendő impulzust egy nyalábosztó kocka segítségével kettéosztjuk és a két ág között változtatható úthossz különbséget hozunk létre. Az úthossz különbség késleltetést okoz az egyik ágban, a másik ághoz képest, amely úthossz különbséget az időben változtatjuk. Az egyesített nyaláb azt követően egy nemlineáris (pl. KDP, BBO) kristályra jut, amelyben keletkező másodharmonikus fényt egy fotodetektorra vezetjük. Detektorként gyakran fotoelektronsokszorozót (PMT-t) használunk.

A nemlineáris kristályban történő másodharmonikus keltés megkívánja azt, hogy a két nyaláb megfelelő polarizációban azonos folttra legyen mind térben, mind időben fókuszálva. Ezen túl a nemlineáris kristálynak olyan szögben kell állnia, ami biztosítja a megfelelő fázisillesztést. Ehhez általában a nemlineáris kristály forgatása szükséges.

A készülék egy mérés eredményét több impulzus méréséből kapja, amelyek esetében a késleltetést egy automatikával változtatja.

Az autokorrelációs mérési elvvel kapcsolatban további információk pl. a [3] publikációból nyerhetők.

Az autokorrelátor készülék felépítését a 3. ábra mutatja. Ezt az elrendezést valósítja meg a használt APE MINI autokorrelátor.



3. ábra

Az autokorrelátor felépítése

4.3. Autokorrelációs függvény és az impulzus

Egy autokorrelációs függvényhez több hasonló jellegű függvényt illeszthetünk. A mérés során kapott számsorozatból nem lehet közvetlenül az eredeti függvényt megmondani. Emiatt a méréseink során feltételezéseket kell tennünk arra vonatkozólag, hogy az eredeti impulzus milyen függvénnyel írható le. A leggyakrabban gauss, szekáns² illetve lorentz függvény alakokkal számolnak.

Amennyiben például Gauss-eloszlást feltételezünk, és az autokorrelációs függvényt kiszámítjuk, úgy az autokorrelációs függvény szintén Gauss-eloszlást mutat. Az autokorrelációs függvény félértékszélessége nagyobb az eredeti Gauss-függvényénél, ahogy azt a 4. ábra szemlélteti.

A félértékszélességek közötti arányszám pedig számolás után a következőnek adódik:

$$1.41 \cdot \Delta t_{pulse}^{FWHM} = \Delta t_{ac}^{FWHM} \quad (2)$$

Hasonlóan szekáns² függvényalaknál a félértékszélességek közötti átváltás:

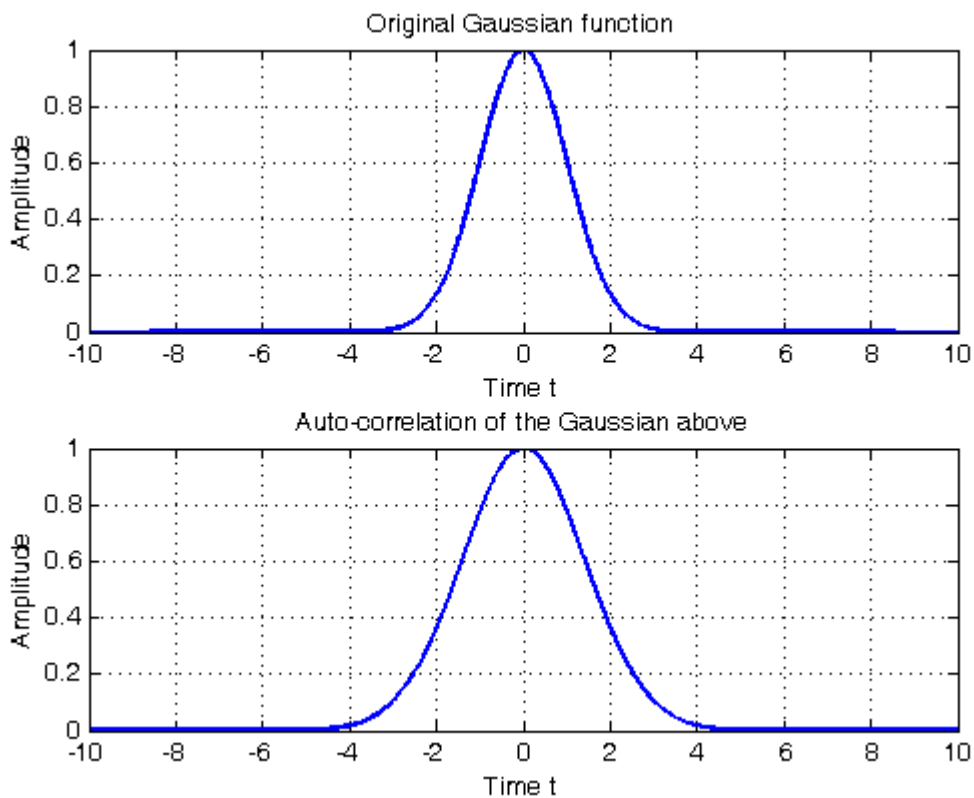
$$1.54 \cdot \Delta t_{pulse}^{FWHM} = \Delta t_{ac}^{FWHM} \quad (3)$$

Ennek megfelelően az autokorrelátorral történő mérésnél először a mérési eredményekre egy feltételezett függvényalakot illesztünk, amiből meghatározzuk az autokorrelációs függvény

félértékszélességet. A kapott félértékszélességből az adott függvény alakra jellemző arányszám segítségével becsüljük az impulzus hosszát.

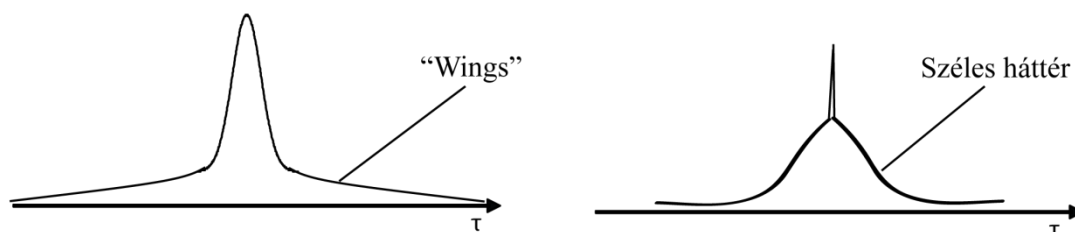
Az autokorrelációs technika nagy hátránya, hogy a rövid impulzushosszaknál gyakran előforduló komplex intenzitás alakok autokorrelációja is gauss (illetve szekáns², lorentz)-szerű mérési eredményekre vezet. Emiatt nem szabad automatikusan elfogadni a mérőeszköz által megállapított félértékszélességet, hanem tanulmányozni kell az autokorrelációs mérés eredményét. Mellékipulzusok, illetve komplex intenzitás alak gyanúját keltheti, ha az autokorrelátoros mérési eredményben koherencia csúcs mellett úgynevezett „wings”-et vagy széles háttérrel tapasztalunk (lásd 5. ábra). Ilyen esetben az autokorrelátoros mérési eredmény nem fogadható el.

Komplex impulzus alakok mérésére az autokorrelációs technika nem alkalmas. Ebben az esetben, frekvenciában bontott optikai kapuzásos technikát (FROG-ot) kell használni [4].



4. ábra

(A) Eredeti Gauss-függvény, és ennek az autokorrelációs függvénye (B)



5. ábra

Autokorrelátoros mérési eredmények, amelyekben a főmaximum mellett (A) „wings” illetve (B) széles háttér tapasztalható

5. Mérési feladatok

1. feladat: Ellenőrizzük egy gyors detektor segítségével, hogy az impulzushossz rövidebb annál, mint ami a rendelkezésre álló gyors detektorral mérhető.
2. feladat: A femtoszekundumos lézer beüzemelése. Ha a lézer hangolható (pl. Ti:zafír lézer), akkor a kívánt működési hullámhossz kiválasztása spektrométer segítségével. Ehhez kommunikáció indítása a spektrométer és a PC között, esetleg a lézer (pl. szállézer alkalmazása esetén) és a PC között. **Meghatározandó a lézer fényteljesítménye és a spektrum alakja.** A spektrum és a fényteljesítménymérő elé fénycsökkenő alkalmazása, amennyiben szükséges.
3. feladat: A spektrum alapján **határozzuk meg a transzformáció limitált impulzusidőt** több impulzusalak (Gauss, illetve szekáns²) feltételezés esetén.
4. feladat: Az autokorrelátor érzékenységének definíciója alapján határozzuk meg a maximális teljesítményszintet a bemeneten és határozzuk meg az esetleges teljesítmény-csökkentés módját (kicsatoló üveglapok ill. reflexiók száma, nagyon indokolt esetben fénycsökkentő, szűrő). **Az autokorrelátor beállítása és a közvetlen a lézerből származó és lehetőség szerint semmilyen anyagon át nem haladó impulzus hosszának megmérése.** Határozzuk meg az impulzushosszt különböző impulzusalak feltételezések mellett. **Egyrészt közvetlenül a mérésből** leolvastva több impulzusalak feltételezése esetén, másrészt legalább az egyik impulzusalak feltételezése esetén **valamilyen számítógépes program** (pl. MATLAB) **segítségével.** Hasonlítsa össze a kapott értékeket a transzformáció limitált impulzusidővel.
5. feladat: Amennyiben a beállítás nem optimális, úgy a teljesítmény és spektrum alapján beállítani a móduscsatolt impulzusüzemű módot és optimalizálni a végtükrök-prizmák mozgatásával (amennyiben a lézer ezt lehetővé teszi, pl. Ti:uzafír lézer) vagy a gerjesztő áramok változtatásával (pl. szállézer alkalmazása esetén). **Feladat a spektrum alak mérése, a transzformáció limitált időtartam meghatározása, illetve az impulzus hossz mérése autokorrelátor segítségével (lásd 2-4. feladat).**
6. feladat: Vegyük a számított impulzushosszat, képezzük az autokorrelációját egy számítógépes program (pl. MATLAB) segítségével. Ilyen módon ellenőrizzük le azt, hogy egy konkrét numerikus-számításnál a kapott félértékszélesség megfelel az elmélet alapján vártnak. Azaz a (2) vagy a (3) egyenletben szereplő konstansok helyesek.
7. feladat: Végezzük el az 1-6 feladatokat a másik femtoszekundumos lézer esetében is.

6. Hivatkozások

- [1] K. Varjú, *Attoszekundumos impulzusok*, Fizikai szemle 2008/3, 87-92, 2008.
[2] I. Walmsley, L. Waxer, and C. Dorrer, *The role of dispersion in ultrafast optics*, Review of scientific instruments Vol 72, Number 1, 2001.

[3] W. Demtröder, *Laser Spectroscopy, Chapter 6.2.2. Optical Correlator for Measuring Ultrashort Pulses* Vol. 2. ISBN 978-3-540-74952-3, Springer, 2008.

[4] R. Trebino, *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses*, ISBN: 978-1-4613-5432-1, Springer, 2000.