

REZGÉSEK PRECÍZIÓS ÖSSZEHAISONLÍTÓ VIZSGÁLATA LÉZERINTERFEROMETRIKUS MOZGÁSANALIZÁTOROKKAL

COMPARATIVE STUDY OF TWO LASER INTERFEROMETRIC METHODS FOR THE STUDY OF VIBRATIONS

Béres Miklós¹, Paripás Béla², Majár János³, Bodolai Tamás⁴, Rónai László⁵, Illavszky Vanda⁶,

¹ mérnök-tanár, ² PhD, egyetemi tanár, ^{3,4} PhD, adjunktus, ⁵ tanszéki mérnök, ⁶ MSc hallgató

^{1,2,3} Miskolci Egyetem, Fizikai Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros

⁴ Miskolci Egyetem, Villamosmérnöki Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros

⁵ Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros

ABSTRACT

The measurements were done by our modernized Michelson type laser interferometric displacement measuring device (LIMA) and an LDV (Laser Doppler Vibrometer) device, which measures the velocity on the basis of the Doppler effect. We simultaneously measured the vibrations of the corner cube reflector of the measuring arm of the LIMA. On the basis of these double measurements we compared these two methods for the study of vibrations.

BEVEZETÉS

A Miskolci Egyetem Fizikai Intézete és a Wigner Fizikai Kutatóközpont több mint két évtizede kifejlesztett egy precíziós lézer interferometrikus elmozdulásmérőt (LIMA) [1]. Jelenleg demonstrációs célokat szolgál, de cél, hogy gyakorlati feladatok elvégzésére (pl. ipari berendezések hitelesítése) is alkalmassá váljon. Mivel a konstrukció viszonylag régi volt, a technikai részét a mai kor követelményeinek megfelelően kellett átalakítani. Az eszköz egyes működő egységei megmaradtak - mint pl. a lézer, optika, detektorok stb., de az analizátor vezérlése és a mért adatok elemzése fejlesztésre szorult. Ezen munkákból TDK dolgozatok is születtek [2][3]. Az eszköz működési elvéből következően – melyet a későbbiekben részletezünk – hitelesítés nélkül is pontosan méri az elmozdulást, és a mikronos felbontású adatokból pontosan számítható a pont sebessége (megfelelő szoftveres háttér mellett). Az elvégzett fejlesztések és tesztek a Fizikai Intézetben [4] valósultak meg, a Wigner Fizikai Kutatóközpont támogatásával.

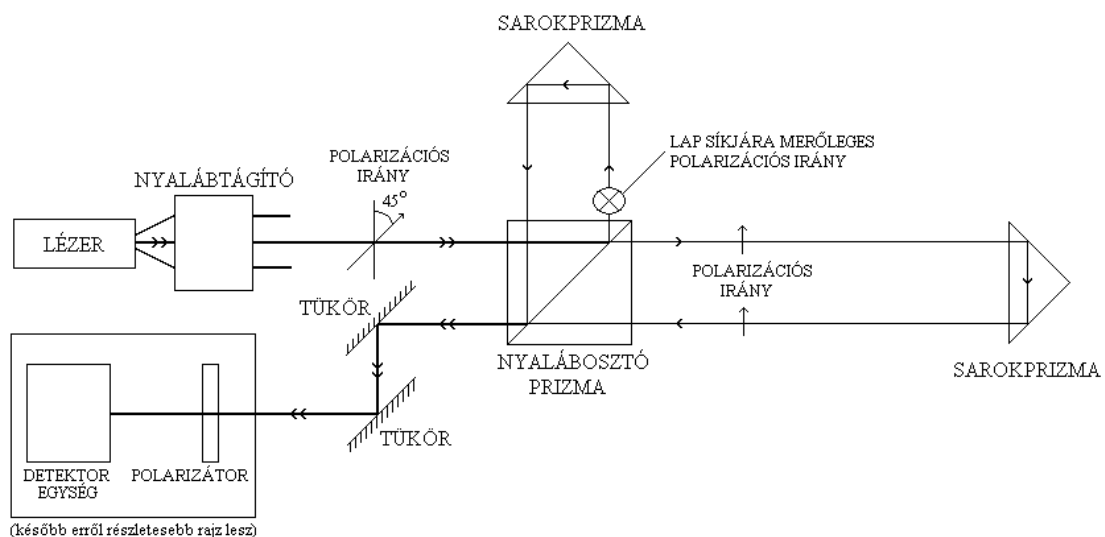
A másik interferometrikus elven működő mozgásanalizátorunk egy LDV (Laser Doppler Vibrometer) készülék, amely Polytech PDV-100 típusú [5]. Ez a készülék elsődlegesen sebességet mér, a működési elvét tekintve tehát alapvetően különbözik az általunk fejlesztett elmozdulás mérőétől. A két különböző elven működő precíziós készülékekkel történő szimultán mérés, a mérési eredmények egybevetése, a különbségek elemzése mindenképpen izgalmas mérnöki feladat. Ezt az összemérést tekinthetjük a pontatlanabbnak gondolt LDV eszköz hitelesítésének is.

INTERFEROMETRIKUS MÉRŐRENDSZEREK

A lézerinterferometrikus elmozdulásmérő (LIMA)

A készülék lényegében egy Michelson-interferométer, amelyben a polarizáció felhasználásával a pontosságot megnöveltük és a mozgás irányát is mérhetővé tettük. A megnövelt pontosság $\lambda/8$.

Az interferométer opto-mechanikai rajzát az 1. ábra mutatja. Az interferométer „lelke” egy hőmérséklet stabilizált, egymódusú He-Ne lézer (UNIPHASE-1007). A módusának a frekvenciája $4,7375 \cdot 10^{14}$ Hz, amely vákuumban 632,82 nm, normál levegőben 632,64 nm hullámhossznak felel meg. A nyalábtágítóval formált lézernyalábot a polarizációs osztóprizma két kb. egyforma intenzitású, egymásra merőleges nyalábra bontja, amelyeknek a polarizációja is merőleges egymásra. Az egyik nyaláb a referencia sarokprizmából, a másik a mozgatható mérő sarokprizmából fog visszaverődni. A nyalábok abban a polarizációs osztóprizmában találkoznak újra, ahol előzőleg szétváltak. A két nyaláb fázisviszonyát a két ág úthossz különbsége fogja meghatározni [1]. Természetesen ennek az útkülönbségnek a lézer koherencia hossz-tartományán (ami néhány méter lehet) belül kell lennie.



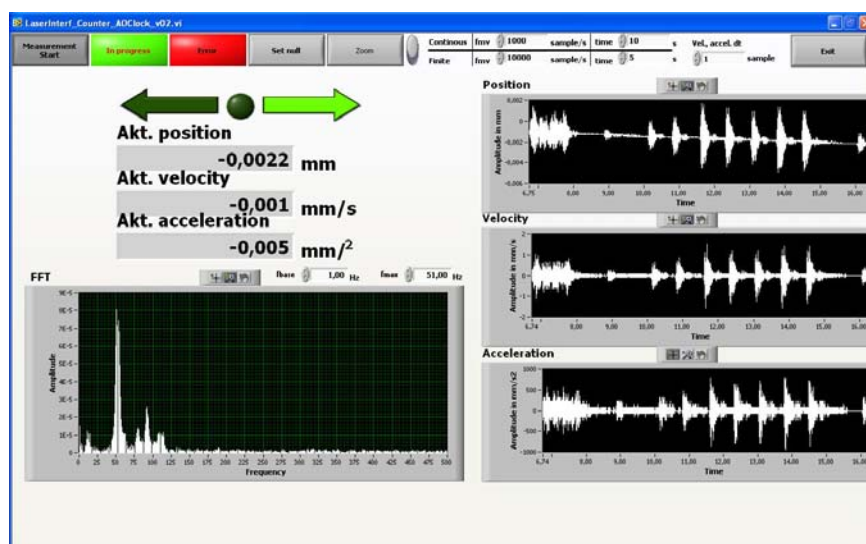
1. ábra: Az intézeti interferométer (LIMA) opto-mechanikai vázlata

Az egyesített nyalábot tükrök segítségével vezetjük a detektor egységbe. Ott a lézernyalábot osztóprizmák segítségével három részre bontjuk. Ezeket - megfelelő fázistolások (0 , $\lambda/2$, $\lambda/4$) kialakítása után, megfelelő orientációja polarizátorok mögött - három egymástól független fotodióda (BPx61) érzékeli. Ezen fotodiódák jelei közül az A és B jelek egymáshoz képest ellenfázisban-, míg az A és C 90° -os fázisban van. A három jelből kiértékelhető, hogy a mérőkar melyik irányba mozog. A detektor által megengedett maximális kihúzási sebesség értéke 15cm/s.

A mérőrendszerhez kapcsolódik egy mérőkártya és egy a méréshez megírt LabView program. A detektor egységből a jelek a központi egységbe kerülnek. Ehhez szükséges volt a megfelelő mérőkártya, mely tudja kezelni a három detektor jeleit (melyek elvileg 15 cm/s mérőági mozgást tudnak lekövetni, ami másodpercenként 3 millió impulzust jelent) és emellett meg tudja határozni a detektorok jelsorrendjét is. A

National Instruments NI USB-6341 OEM típusú mérőkártya a számítógéphez (laptop) USB porton keresztül csatlakozik. A kártyán a NI-STC3 időzítő és szinkronizáló technológia koordinálja az analóg, digitális és számláló alrendszerek működését, független időzítőket biztosítva az azonos kártyán lévő analóg és digitális I/O alrendszerek részére. Számunkra rendkívül fontos a négy továbbfejlesztett, 32 bites számláló, amelyeket használhatunk frekvenciamérésre, impulzusszélesség mérésre és encoder műveletekhez is. Ez utóbbi szükséges a detektorok jelsorrendje, azaz a mozgásirány meghatározásához. A számlálók elvben 100 MHz sebességgel tudnak számlálni, amelyet a számítógép akár 1 MHz gyakorisággal is ki tud olvasni, tehát a kártya adatkezelési és adattovábbítási sebessége a fotodetektorainkhoz bőven elegendő.

A mérőprogram végzi a mérési adatok numerikus és grafikus megjelenítését is (2. ábra). Ezzel a rendszerrel különféle mozgások tanulmányozhatók, melyeket pl. csavarmikrométerrel, a rezgésmentes acélasztal finom nyomkodásával és ütogetésével különböző mozgásokat, rezgéseket állíthatunk elő. Ezek tanulmányozását segíti a beépített gyors Fourier-analizátor (FFT), amely mutatja a kialakult rezgések frekvencia spektrumát.



2. ábra: A mérőprogram folyamatos mérési üzemmódja [6]

Az LDV(Laser Doppler Vibrometer)

Az LDV (Laser Doppler Vibrometer) egy érintkezésmentes mérésre alkalmas berendezés, mellyel különböző tárgyak rezgéseit vizsgálhatjuk. Az LDV berendezésből kijövő lézersugarat a vizsgálni kívánt objektum egy felületére kell fókuszálni, s e felület rezgésének sebességi amplitúdójára és frekvenciájára következtetni lehet a visszavert lézervfény frekvenciája segítségével a Doppler-effektus alapján. Az LDV kimenete általában egy folyamatos analóg feszültség jel, ami egyenesen arányos a vizsgálandó sebesség lézersugár irányú komponensével. Az LDV rendszereknek előnye más hasonló mérőberendezésekkel szemben (mint pl. gyorsulásmérők), hogy könnyen vizsgálhatók vele nehezen hozzáférhető területek, vagy túl kicsi, vagy túl meleg felületek, melyekre nem tudunk egyéb fizikai energiaátvivő egységet helyezni. Ugyanakkor hátránya, hogy csak pontbeli mérést tesz lehetővé.

Nevéből is adódik, hogy a mérési elv alapja a Doppler-effektus. Lényege, hogy ha a hullámforrás és a megfigyelő egymáshoz képest mozog, akkor a megfigyelő a hullám

frekvenciáját és hullámhosszát a kibocsátott hullámétól eltérőnek fogja érzékelni. Ez az effektus, mely felfedezőjéről a Doppler-effektus nevet kapta, igen sok műszaki alkalmazásnak (mint a sebességmérés) képezi alapját.

Az akusztikai Doppler effektusnál a közeghez képest a megfigyelő és a hullámforrás is mozoghat v_m , illetve v_f sebességgel. Mindkét mozgás arra vezet, hogy a megfigyelő az eredeti f_0 frekvenciától eltérő f frekvenciát érzékel. Ezeket közösen a

$$f = f_0 \frac{c \pm v_m}{c \mp v_f} \quad (1)$$

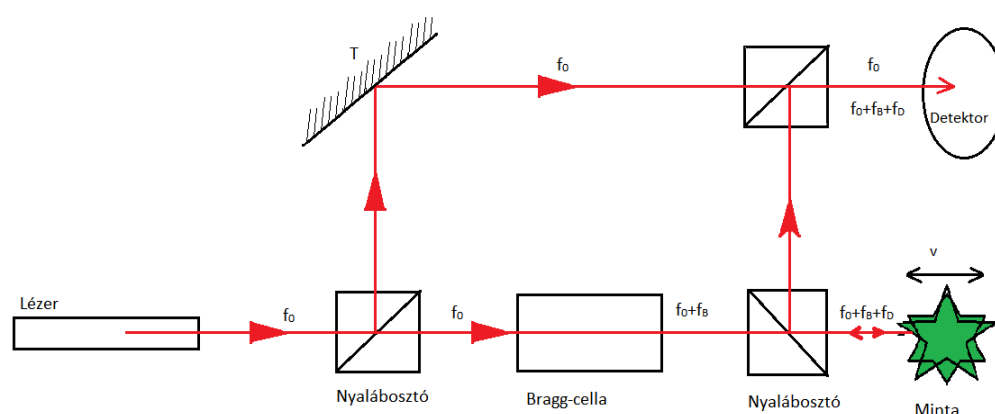
képletbe foglalhatjuk, ahol c a hullám fázissebessége az adott közegben, a felső előjelek a közeledésre az alsók pedig a távolodásra vonatkoznak.

Ha v sebességgel mozgó tárgyról visszaverődő hullámot detektálunk az álló hullámforrás mellett, akkor mindkét típusú mozgással számolni kell. Ugyanis a mozgó tárgy először detektálja a hullámot (mozgó megfigyelő), majd kibocsátja (mozgó forrás). A végeredmény közeledő visszaverő tárgy esetén:

$$f = f_0 \frac{c + v}{c - v} \quad (2)$$

(Távolodó visszaverő tárgy esetén az előjelek ellentétesek.) Megjegyezzük, hogy ha a vákuumban terjedő fényt tekintjük, akkor a közeghez képesti mozgás értelmetlen, tekintve, hogy a relativitáselmélet szerint csak a relatív mozgás értelmezhető. Ez azonban nem befolyásolja a képlet alkalmazhatóságát.

A vibrométer általában egy két lézersugaras interferométer, ami méri a frekvencia (vagy fázis) különbséget egy belső referencia nyaláb és a mérősugár között. A leggyakoribb típusú lézer egy LDV-ben a hélium-neon (He-Ne) lézer, de alkalmaznak lézerdiodákat, szálézereket és Nd:YAG lézereket is. A mérősugár a céltárgyra irányul és az arról szóródott fényt összegyűjtjük és interferáltatjuk a referencia sugárral a fotodetektoron (ami jellemzően fotodióda). A kereskedelmi vibrométerek esetén tipikusan 20-40 MHz eltolás (esetünkben 20 MHz) van a két lézersugár között, amit egy Bragg-cella, más néven akusztó-optikai modulátor generál. A 3. ábrán látható a vibrométer vázlatos felépítése. A lézerből érkező (f_0 frekvenciájú) lézersugarat az első nyalábosztó osztja szét az ún. referencia és mérősugárra.



3. ábra: A vibrométer vázlatos felépítése

A mérősugár áthalad a Bragg-cellán, amely f_d frekvenciatolást ad hozzá, ez a lézersugár van a céltárgyra irányítva. A tárgy mozgása pedig hozzáad egy ún. Doppler-eltolást a sugárhoz:

$$f = f_0 \frac{c+v}{c-v} \cong f_0 \left(1 + 2\frac{v}{c}\right) = f_0 + f_d \quad (3)$$

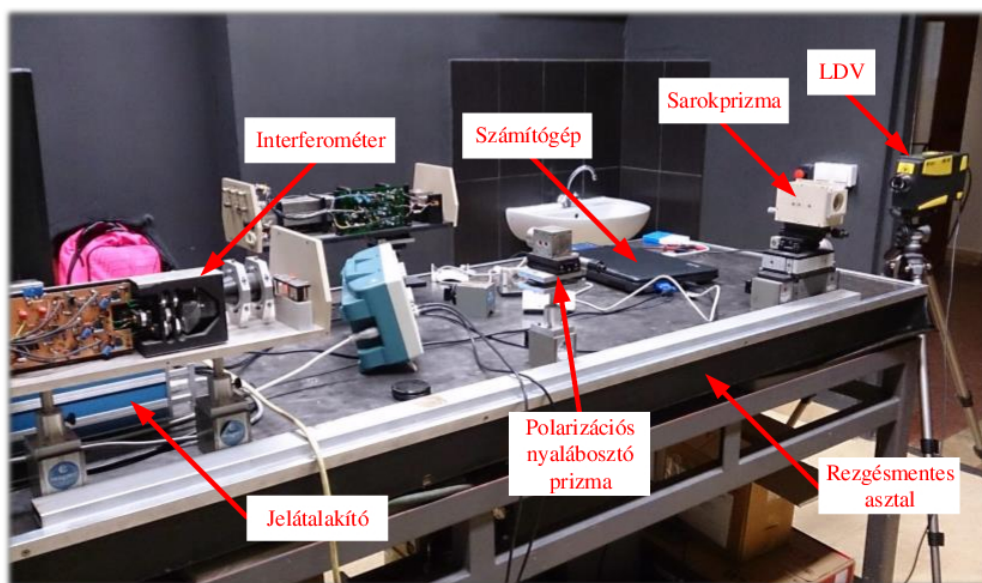
Tehát

$$f_d = 2f_0 \frac{v}{c} = 2\frac{v}{\lambda}. \quad (4)$$

Mindez természetesen csak akkor igaz, ha nincs „koszinuszos” hiba, azaz ha a lézersugár és a sebességvektor párhuzamos. A fény a céltárgyról minden irányba visszaverődik, de a fény egy részét összegyűjti az LDV és a nyalábosztón keresztül a fotodetektorra tükrözi. Ennek a fénynek a frekvenciája egyenlő $f_0 + f_b + f_d$ -vel. Ez a szórt fény interferál a referencia nyalábbal a fotodetektoron. A találkozók két hullám frekvencia különbsége is megjelenik ($f_b + f_d$), mely érték a 10 MHz-es tartományba esik. Ez olyan intenzitás hullámzás, amelyet a fotodetektor már tud érzékelni. (Az eredeti $\triangleright 10^{14}$ Hz-es változást nem tudja követni.) A fotodetektor kimenete egy standard frekvencia-modulált (FM) jel, a Bragg-cellával mint vivőfrekvenciával és a Doppler-eltolással mint modulációs frekvenciával. Ebből a jelből demodulációval a céltárgy sebességének időfüggése meghatározható. Az általunk alkalmazott LDV berendezés egy Polytec PDV-100 (Portable Digital Vibrometer) típusú vibrométer.

MÉRÉSI ERDMÉNYEK

A méréseket a Fizikai Intézet lézerinterferometriai laboratóriumának „rezgésmentes” asztalán végeztük. A lézerinterferometrikus mozgásanalizátor eleve ezen az asztalon van összeállítva. Az LDV berendezés a mérőági sarokprizma másik oldalán egy az asztaltól független állványon (tripodon) helyeztük ideiglenesen el.

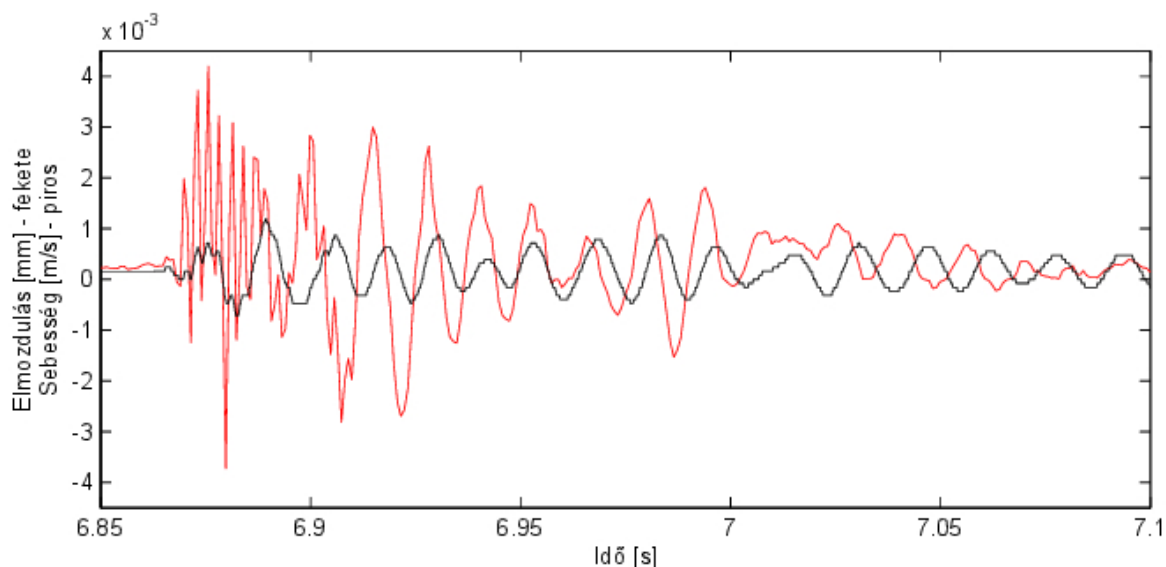


4. ábra: A műszerek elhelyezése

A két berendezés a sarokprizma két ellentétes oldalát „világítja” meg, így ugyanolyan irányú mozgásokat vizsgálnak (de a mozgás ellenfázisú). Ezt az összeállítást a 4. ábra mutatja. Az első mérési sorozatokban [2] a rezgéseket az asztal ütögetésével hoztuk létre, tehát lényegében a „rezgésmentes” asztal rezgéseit mértük. (Ez nem ellentmondás, mert a rezgésmentesség itt csak a külső rezgésektől való elszigeteltséget jelenti.) A második mérési sorozatban [3] a mérő sarokprizmákat tartalmazó állvány kapta a rezgést okozó impulzusokat. Egy szivacsos anyaggal megakadályoztuk, hogy a rezgésmentes asztal és a ráhelyezett egységek a tárgyasztaltól rezgéseket vegyenek át. Ezzel elvben jobban garantálható, hogy mindkét műszer ugyanazt a rezgést lássa, különösen akkor, amikor az LDV is a rezgésmentes asztalon van.

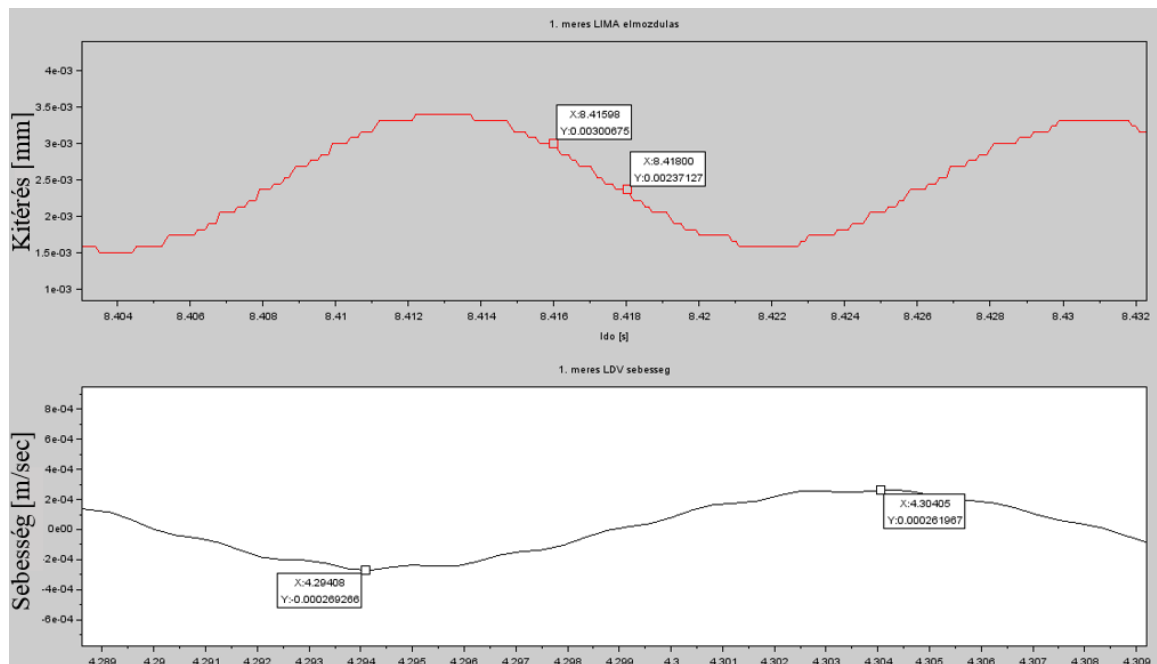
Ahogy a korábbi fejezetekben is utaltunk rá, a LIMA elsődlegesen elmozdulást, az LDV sebességet mér. A kapott grafikonok, tehát közvetlenül nem hasonlíthatók össze, az elmozdulás adatokból a sebességet származtatnunk kell. (A LabView program származtatja ugyan a sebesség adatokat is, azonban azokat a jelen mérésekben még nem használtuk.)

Az igen sok összehasonlító mérés közül itt csak néhányat mutatunk be. Az 5. ábra egy véletlenszerűen kiválasztott rezgést mutat be még az első mérési sorozatból. A külön műszerekkel felvett elmozdulás-idő ill. sebesség-idő grafikonok kezdő időpontjait „kézműves” módon illesztettük. A két görbe egymásnak való megfelelése egyértelmű (a legmeredekebb elmozdulás göbeszakaszhoz tartozik a legnagyobb sebesség), de kicsi eltolódások a lefutás során azért vannak. Az természetes, hogy a nagyobb frekvenciájú komponensben nagyobb sebességek vannak.



5. ábra: Egy véletlenszerűen kiválasztott rezgést lefutása

Hogy számszerű adatokhoz is jussunk egy másik rezgés során kapott grafikon párt erősen kinagyítottunk (6. ábra). Ez egy véletlenszerűen kiválasztott rezgést (az adott sorozat utolsóelőtti koppintását követő 10. hullámhegy és hullámvölgy) mutat be. A közöttük levő lefutás legmeredekebb részét bejelöltük, itt tehát a sebesség maximális.



6. ábra A LIMA és az LDV összehasonlító mérésének egy részlete

Ez a sebesség az alábbiak szerint számítható ki:

$$\Delta x = 8,41800 \text{ sec} - 8,41598 \text{ sec} = 0,00202 \text{ sec}, \quad (3)$$

$$\Delta y = 3,00675 \text{ } \mu\text{m} - 2,37127 \text{ } \mu\text{m} = 0,63548 \text{ } \mu\text{m}, \quad (4)$$

ahol Δx az időintervallumot adja meg, míg Δy az elmozdulásnak a differenciája. A számított sebesség érték:

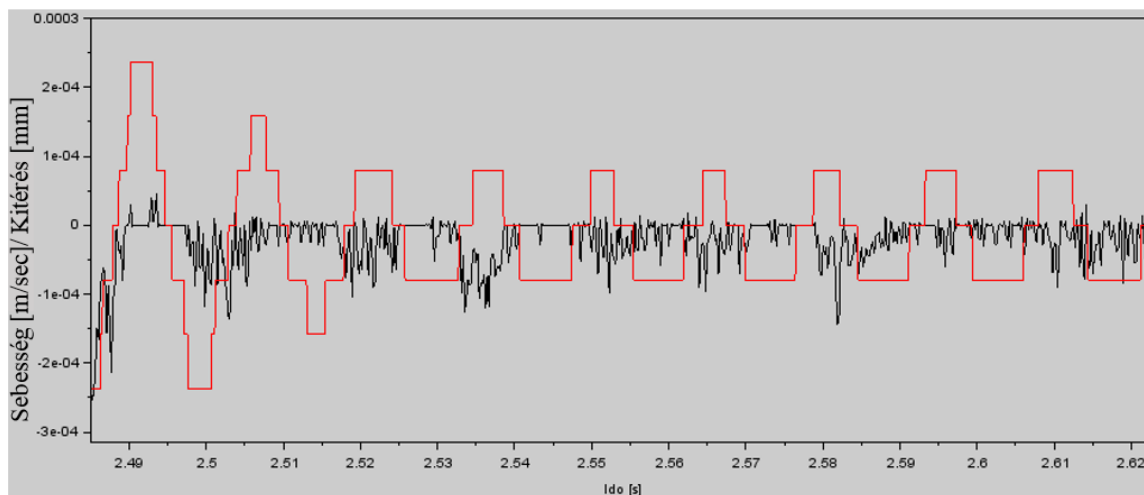
$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{0,63548 \text{ } \mu\text{m}}{0,00202 \text{ sec}} = 0,31459 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}. \quad (5)$$

Az LDV által mért értékeket tartalmazó grafikon ugyanezen része által kapott maximális sebesség nagyságok átlaga ugyanakkor:

$$\bar{v} = \frac{0,261967 \frac{\text{mm}}{\text{sec}} + 0,269266 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}}{2} = 0,2656 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}, \quad (6)$$

tehát a kapott eredmények alapján a LIMA közel 18,4%-kal nagyobb értékeket mért. A másik három mérésben, a levezetések teljessége nélkül az eltérés százalékos értékei: 6,3%, 24,23% és 13,8%. A négy mérés átlaga 15,7%-ra adódott. Ennek alapján az LDV *Scaling factor*-ra 5mm/s/V-ról **5,78mm/s/V**-ra emelendő.

Érdekességgként bemutatjuk a két műszer viselkedését nagyon kicsi amplitúdók esetében, amikor a rezgések szinte már teljesen lecsengtek (7.ábra).



7.ábra: Kis amplitúdók esetén az LDV (fekete) és a LIMA (piros)

Mint látható a 7. ábrán a lecsengő rezgést az intézeti interferométer szépen mutatja, míg a vibrométer feltehetően már nem tudta lekövetni a rezgést ilyen kis amplitúdók esetén.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az elvégzett mérések alapján elmondhatjuk, hogy mind a LIMA, mind az LDV megfelelő körülmények és beállítások mellett pontos elmozdulásokat és sebességeket ad. A modernizált adatgyűjtő rendszer jól illeszkedik a régi optomechanikai egységhez. A frekvencia spektrumbeli kiértékelés és összevetés ugyanakkor további vizsgálatok elvégzését teszi szükségessé. Továbbá fejlesztésre szorul az intézeti elmozdulásmérő jelfeldolgozó algoritmus, hogy a sebesség meghatározásánál alakhűbb képet nyerjünk.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] CITROVSZKY, A.: LI-03 típusú szubmikronos lézerinterferométer kezelési és karbantartási könyv, Budapest 1998
- [2] ILLAVSZKY, V.: Rezgések precíziós összehasonlító vizsgálata lézerinterferometrikus mozgásanalizátorokkal, ME– TDK, 2015
- [3] RÓNAI, L.: Lézerinterferométer mérő egységének korszerűsítése, rezgések precíziós vizsgálata, ME–TDK, 2015
- [4] PARIPÁS B., KOVÁCS E., BODOLAI T., TINTA T., RÓNAI L.: Szub-mikronos lézerinterferometrikus mozgásanalizátorok felújítása és fejlesztése a Miskolci Egyetemen, Beszámoló, 2015
- [5] Polytec GmbH: PDV-100 Portable Digital Vibrometer Datasheet, 2012
- [6] MARK, Cs.: Fundamentals of Light Sources and Lasers, John Wiley & Sons, 2004