

# PRECÍZIÓS SEBESSÉGMÉRÉS LÉZERINTERFEROMETRIKUS MÓDSZERREL

Béres Miklós<sup>1</sup>, Majár János<sup>2</sup>, Rónai László<sup>3</sup> és Paripás Béla<sup>4</sup>

<sup>1</sup>mérnök-tanár, Miskolci Egyetem, Fizikai Intézet

<sup>2</sup>adjunktus, Miskolci Egyetem, Fizikai Intézet

<sup>3</sup>mérnök-tanár, Miskolci Egyetem, Szerszámgépezési és Mechatronikai Intézet

<sup>4</sup>egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Fizikai Intézet

3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, <sup>4</sup>e-mail: [fizpari@uni-miskolc.hu](mailto:fizpari@uni-miskolc.hu)

## Összefoglalás

A méréseket egyrészt a modernizált Michelson-típusú lézerinterferometrikus mozgásanalizátorunkkal (LIMA) végeztük, amely elsődlegesen elmozdulást mér. Az interferométer mérőági sarokprizmájának mozgását egyidejűleg egy LDV (Laser Doppler Vibrometer) eszközzel is tanulmányoztuk, amely viszont elsődlegesen sebességet mér a Doppler-effektus alapján. A sarokprizma rezgéseinek szimultán analízise lehetővé tette a két módszer összehasonlítását, a felhasználási lehetőségeik felmérését is.

**Kulcsszavak:** lézer, interferometria, Doppler, vibrométer

## Abstract

The measurements were done in one hand by our modernized Michelson type laser interferometric motion analyzer (LIMA) which measures primarily the displacement. The motion of the corner cube reflector of the measuring arm of the LIMA was simultaneously studied by an LDV (Laser Doppler Vibrometer) device, which primarily measures the velocity on the basis of the Doppler effect. The simultaneous analysis of the vibrations of corner cube reflector made possible the comparison of these two methods, and moreover the survey of the possibilities of their applications.

**Keywords:** laser, interferometry, Doppler, vibrometer

## 1. Bevezetés

A Miskolci Egyetem Fizikai Intézete és a Wigner Fizikai Kutatóközpont több mint két évtizede kifejlesztett egy precíziós lézer interferometrikus elmozdulásmérőt (LIMA) [1, 2]. 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 analízátor vezérlése és a mért adatok elemzése fejlesztésre szorult. Ezen munkákból TDK dolgozatok is születtek [3][4]. 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 [5] valósultak meg, a Wigner Fizikai Kutatóközpont támogatásával.

A másik interferometrikus elven működő mozgásanalizátorunk egy LDV (Laser Doppler Vibrometer) készülék, amely Polytech PDV-100 típusú [6]. 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.

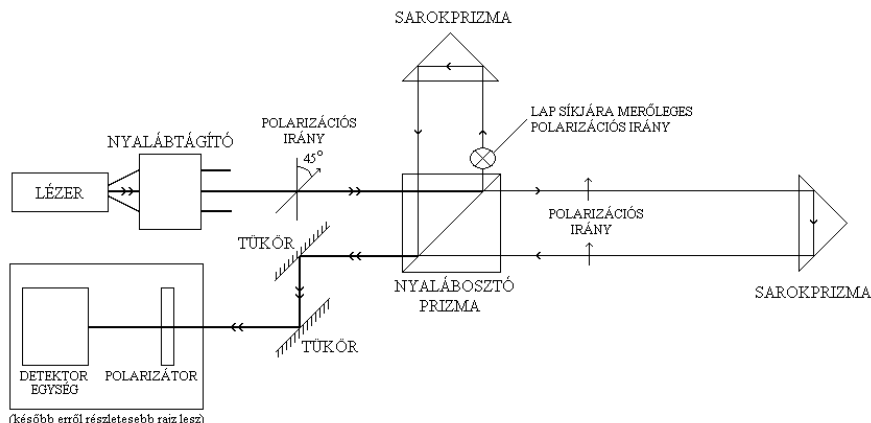
## 2. Interferometrikus mérőrendszerek

### 2.1. A lézerinterferometrikus elmozdulásmérő (LIMA)

A készülék lényegében egy Michelson-interferométer, amelyben a polarizáció felhasználásával a pontosságot kétszeresére növeltük és a mozgás irányát is mérhetővé tettük. A megnövelt pontosság  $\lambda/8$ . Az irodalomban számos ilyen megoldás található [7].

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 (az ábrán fent), a másik a mozgatható mérő sarokprizmából (az ábrán jobbra) 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]. Ennek az útkülönbségnek természetesen a lézer koherencia hossz tartományán (ami néhány méter lehet) belül kell lennie.

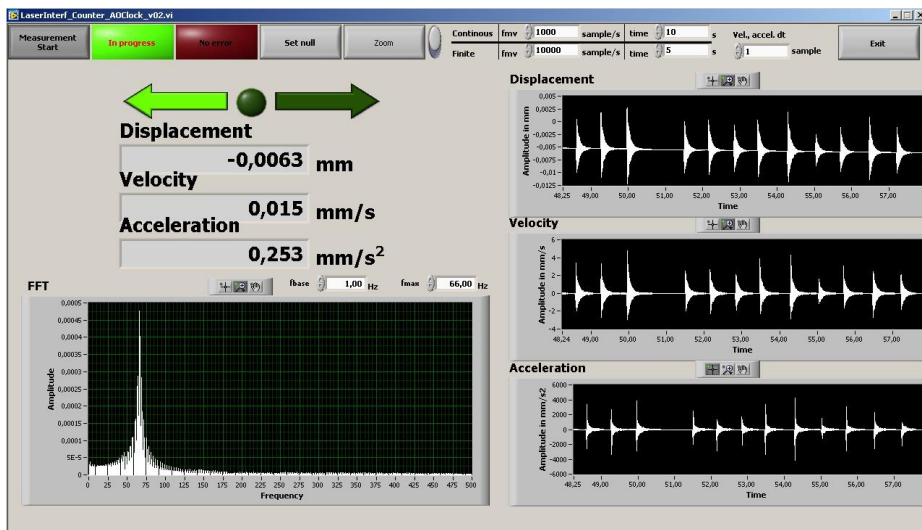
Az egyesített nyalábot tükrök segítségével vezetjük a detektor egységbe. Ott a lézernyalábot osztóprizmák segítségével három részre bontjuk. Ezeket - megfelelő



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

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  $90^\circ$ -os fázisban van. A detektorrendszer tehát összességében  $90^\circ$ -onként (negyed periódusonként) érzékel maximumot (vagy minimumot). A jelen eszközben a mérés ezek detektálására van alapozva, tehát az elérhető pontosság fény úthossz változás tekintetében  $\lambda/4$ . Ez pedig  $\lambda/8$  mérőági sarokprizma elmozdulásnak felel meg (mivel a fény oda is és vissza is megy). A három detektor jelsorrendje megadja a mérőkar mozgásirányát is.

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  $15\text{ cm/s}$  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  $100\text{ MHz}$  sebességgel tudnak számlálni, amelyet a számítógép akár  $1\text{ MHz}$  gyakorisággal is ki tud olvasni, tehát a kártya adatkezelési és adattovábbítási sebessége a fotodetektorainkhoz bőven elegendő.



2. ábra. A mérőprogram folyamatos mérési üzemmódja

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 ütögetésével állíthatunk elő. Ezek

tanulmányozását segíti a beépített gyors Fourier-analizátor (FFT), amely mutatja a kialakult rezgések frekvencia spektrumát.

## 2.2. 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 sebességfüggvényére lehet következtetni a visszavert lézertény frekvenciája segítségével a Doppler-effektus alapján [8]. Az LDV kimenete általában egy folyamatos analóg feszültség jel, ami egyenesen arányos a vizsgálandó sebesség lézertény 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. Ugyanekkor 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 vizsgált mozgó tárgy először „érzékeli” a hullámot (mozgó megfigyelő), majd „kibocsátja” (mozgó forrás). A végeredmény közeledő visszaverő tárgy esetén:

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

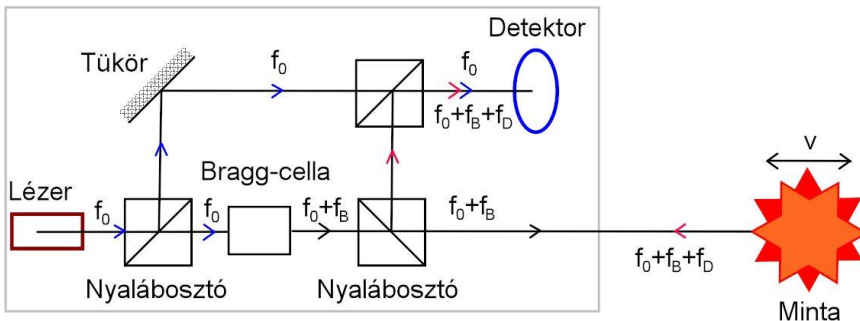
(Távolodó visszaverő tárgy esetén az előjelek ellentétesek.) Megjegyezzük, hogy ha a vákuumban terjedő fényt tekintjük, akkor a közeghez képesti mozgás értelmetlen, tekintve, hogy a relativitáselmélet szerint csak a relatív mozgás értelmezhető. Ez azonban nem befolyásolja a (2) képlet alkalmazhatóságát.

A vibrométer általában egy két lézertény interferométer, ami méri a frekvencia (vagy fázis) különbséget egy belső referencia nyaláb és a mérőtény között. A leggyakoribb típusú lézer egy LDV-ben a hélium-neon (He-Ne) lézer, de alkalmaznak lézerdiódákat, szálvezeteket és Nd:YAG lézereket is. A mérőtény a céltárgyra irányul és az arról szóródott fényt összegyűjtjük és interferáltatjuk a referencia sugárral a fotodetektoron (ami jellemzően fotodióda). A megfelelő frekvencia viszonyok eléréséhez a kereskedelmi vibrométerek esetén [9] tipikusan 20-40 MHz eltolás (esetünkben 20 MHz) szükséges a két lézertény között. Ezt egy Bragg-cella, más néven akusztó-optikai modulátor segítségével érik el. A 3. ábrán látható a vibrométer vázlatos felépítése. A lézertényből érkező ( $f_0$  frekvenciá-

jú) lézersugarat az első nyalábosztó osztja szét az ún. referencia- és mérősugárra. A mérősugár áthalad a Bragg-cellán, amely  $f_b$  frekvenciatolást ad hozzá, ez a lézersugár van a céltárgyra irányítva. A tárgy mozgása pedig hozzáad egy  $f_d$  Doppler-eltolást:

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

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



3. ábra. A vibrométer vázlatos felépítése

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 optikája 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 találkozó két hullám frekvencia különbsége is megjelenik ( $f_b + f_d$ ), mely érték a 10 MHz-es tartományba esik. Ez olyan intenzitás hullámozás, amelyet a fotodetektor már tud érzékelni (az eredeti  $10^{14}$  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 He-Ne lézert tartalmazó Polytec PDV-100 (Portable Digital Vibrometer) típusú vibrométer.

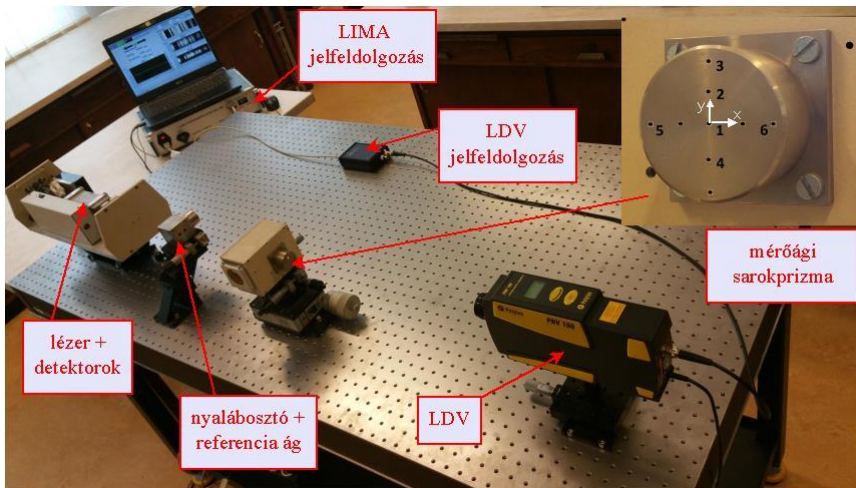
### 3. Mérési eredmények

Az előző fejezetekben bemutattuk, hogy a LIMA a mérőági sarokprizma mozgását (annak lézernyaláb irányú komponensét) képes analizálni. Az LDV viszont nem igényel (a mérendő ponthoz rögzített) sarokprizmát, bár egy oda ragasztott fényvisszaverő fólia pötty nagyban segíti a mérést. A LIMA finoman „megkocantott” mérőági sarokprizmájának rezgéseit tehát mindkét eszköz képes analizálni. Legegyszerűbben úgy, hogy a két eszköz két lézere a sarokprizma két ellentétes oldalát „világítja” meg. Így a műszerek a mozgásnak ugyanazon egyenes irányába eső vetületét mérik, de ellentétes irányból. Vagyis ha a sarokprizma a LIMA lézertől távolodik, az LDV lézéréhez éppen közeledik. Megjegyzendő, hogy a két

műszer esetében a sebességek mégis egyező előjelűeknek adódnak, mert a LIMA a távolodást tekinti pozitív elmozdulásnak, míg az LDV-nél a közeledés a pozitív sebességű.

A korábbi összehasonlító méréseinket [2, 3] a Fizikai Intézet lézerynterferometriai laboratóriumának régi „rezgésmentes” asztalán végeztük, azon az asztalon, amelyen a lézerynterferometrikus mozgásanalizátor eleve össze volt állítva. Az időzjel azért indokolt, mert az asztal főleg a padló rezgéseitől védte az analizátort, az asztal különböző pontjain rögzített analizátor egységek (lézer, osztóprizma, mérőprizma) rezgéseit viszont kölcsönösen továbbította. A helyzetet az is rontotta, hogy az LDV berendezést egy, az asztaltól független állványon (tripodon) tudtuk csak elhelyezni. Mindezek együttesen összetett, nehezen analizálható, a két eszközön kissé eltérő rezgéseképeket eredményeztek, megbízhatatlanná téve a hitelesítést is.

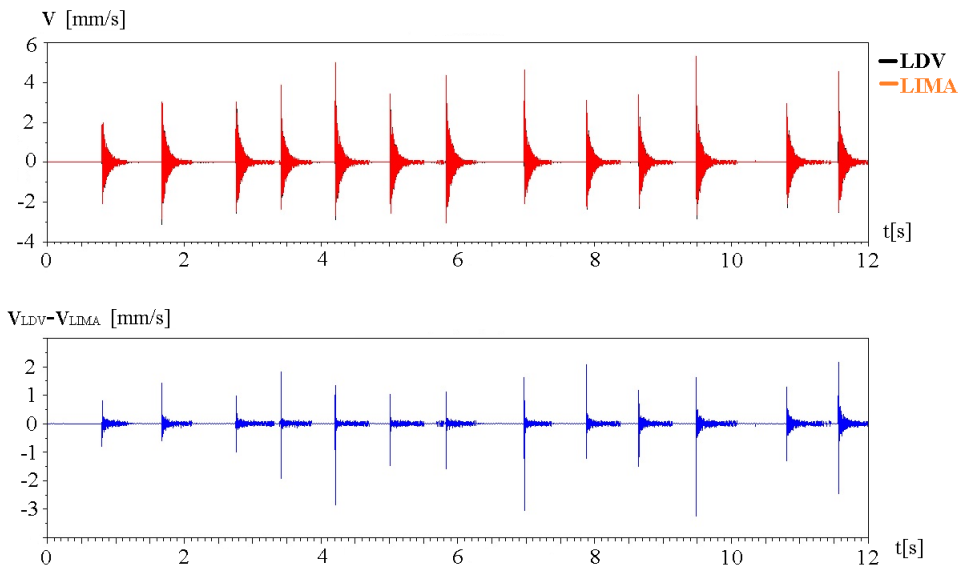
Az elmúlt hónapokban sikerült hozzájutnunk egy rezgésmentes Nexus Breadboard, 900 x 1800 x 110 mm asztallaphoz, amelyet egy saját gyártmányú asztalkereten ill. légrúgókon helyeztünk el. Az így kialakított rezgésmentes asztal, amellet, hogy a környezet rezgéseinek amplitúdóját könnyedén a lézerynterferometrikus mozgás analizátorunk mérési határa (0,1  $\mu\text{m}$ ) alá csökkenti, hatékonyan szeparálja az asztal különböző pontjain rögzített egységeket is. Tehát pl. a finoman „megkocantott” mérőági sarokprizma rezgése ezen az asztalon nem terjednek át pl. a nyalábosztó prizma. Az újonnan beszerzett egységekkel sikerült megoldani az LDV asztalra rögzítését is. A jelen cikkben bemutatott méréseket már ezen az asztalon végeztük (4. ábra).



4. ábra. A műszerek elhelyezése

Ahogy a korábbi fejezetekben is utaltunk rá, a LIMA elsődlegesen elmozdulást, az LDV sebességet mér. A kapott grafikonok, tehát közvetlenül nem hasonlíthatók össze, pl. az elmozdulás adatokból a sebességet származtatnunk kell. Ezt a LabView program a grafikus felületen beállítható gyakorisággal megteszi (az előző időintervallumban mért elmozdulást osztja az intervallum hosszával). A jelen mérésekben általában az 1200 Hz ( $T=833,33 \mu\text{s}$ ) gyakoriságot állítottuk be, mert az 1200 sample/s (és ennek többszörösei) az LDV-n is

választható(k). Ahhoz, hogy a két sebesség grafikont összehasonlítsuk, a két grafikon időskáláját is össze kell hangolni. Mivel mindkét mérőprogram ugyanazon a gépen fut, a két időskála faktora elvben megegyezik, tehát az időkülönbségeknek is pontosan egyeznie kellene. Ez azonban még sincs így, egy 10 s-os mérési intervallumban az LDV sebesség grafikon a LIMA-éhoz képest kb. 1 ms-ot (egy-két csatornát) eltolódik. Ennek az okára nem jöttünk rá, eleinte kiküszöbölendő hibának tekintettük, később azonban még segítette is a munkánkat. Segítette ugyanis a skálák kezdőértékeinek az összeillesztését. Erre azért volt szükség, mert a kétfajta mérés  $\mu$ s pontosságú egyszerre indítását nem tudtuk megoldani. A két sebesség grafikon durva (értsd: kb. 0,5 ms pontosságú) kezdőpont illesztése „kézműves” módon megtehető, mert a mérőági sarokprizma „megkoppantása” határozott módon indítja a rezgéseket. A legjobb egyezés (esetleg a legjobb két egyezés) vizuálisan megkereshető, ekkor a pontatlanságunk tehát legfeljebb  $T/2$  ( $\approx 0,5$  ms).



**5. ábra.** Egy „koppantás” sorozatot követő csillapodó rezgések sebesség adatai: felül: LDV (fekete) és LIMA (piros) sebességadatok együtt, alul: ezek különbsége

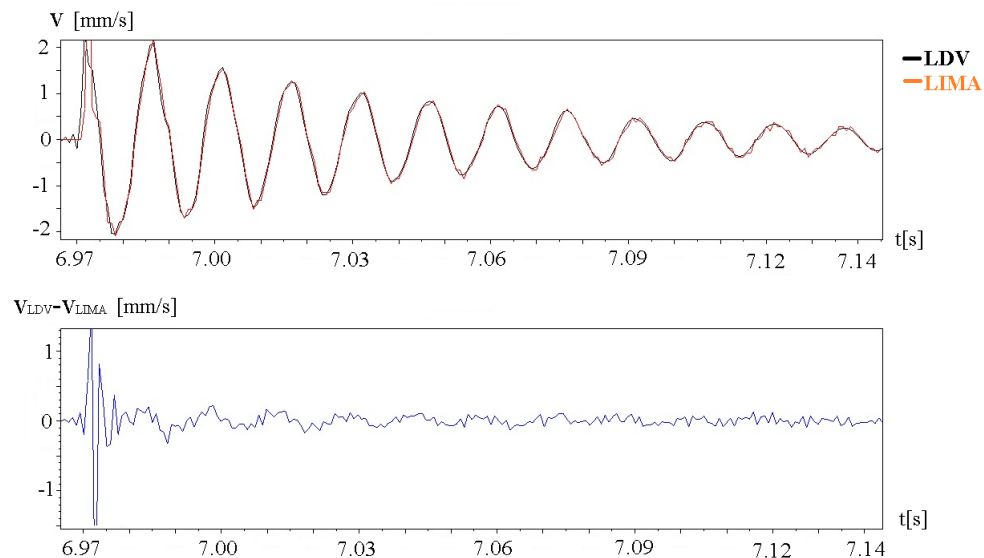
A pontosság további növelését az időskálák  $10^{-4}$  relatív eltérése segíti, mert emiatt biztosan lesz olyan „koppantás” is, ahol az illeszkedés már egy nagyságrenddel pontosabb. Ez a „koppantás” lesz az összehasonlító vizsgálataink tárgya. A legjobb egyezés megtalálását a két módon mért sebességértékek eltéréseinek időgrafikonja is segítette.

Az 5. ábra egy 12 másodperces „koppantás” sorozat eredményét, az egyes koppantásokat követő csillapodó rezgéseket mutatja az összeillesztett időskálán. Az ábra felső részén az LDV (fekete) és LIMA (piros) sebességadatok együtt vannak ábrázolva. (Az LDV adatok korrigáltak, lásd később.) A két adatsor teljesen elfedi egymást, a különbségeket ebben a nagyításban nem igazán lehet érzékelni.

Eppen ezért kiszámoltuk a különbségeket is, ezeket az ábra alsó részén mutatjuk. Azokból jól látható az, hogy a legnagyobb eltérések mindig a koppantást követő első rez-

gésnél vannak. Továbbá az is, hogy ezt követően a különbségek már kisebbek, de kb. állandó amplitúdójúak, egészen addig, amíg a rezgések teljesen el nem halnak. Különösen igaz ez a 4. ill. 7. másodperc környéki koppantások után, ahol nyilvánvalóan a legjobb az időskálák egyezése. Ezekben a tartományokban az eltérések (függetlenül tehát a rezgés amplitúdójától és kivéve az első rezgést) stabilan a  $-0,1$  és  $+0,1$  mm/s közötti sávba esnek. Ennek a határozott maximumnak az okát könnyen megérthetjük. Ugyanis a LIMA mérési pontossága (ahogy korábban már utaltunk rá)  $\lambda/8 \approx 0,08 \mu\text{m}$ , egy-egy időablak hossza pedig  $1/1200$  s. A kettő hányadosaként  $96 \mu\text{m/s} \approx 0,1$  mm/s adódik, ez tehát a LIMA sebességmérési pontossága (a véletlen hiba az alkalmazott mérőprogram és mintavételi gyakoriság mellett). Ez a sebességmérési pontosság a mintavételi gyakoriság csökkentésével javítható lenne, de akkor a berendezés egyre kevésbé érzékelné a gyorsabb rezgéskomponenseket.

A 6,97 s-nál történt (egyébként nyolcadik) koppantás utáni néhány rezgést a 6. ábrán kinagyítva is megfigyelhetjük. A második periódustól kezdve egy 67,8 Hz-es csillapított rezgést mér mind a két eszköz, szinte tökéletes egyezésben. A lényeges különbség az első félperiódusban van. Ott az LDV határozottabban mér egy kb. 260 Hz-es gyorsan lecsengő komponenst, mint a LIMA. Minden bizonnyal azért, mert a lassú rezgés a sarokprizma egészének a rezgése, a gyors rezgés viszont a prizma elemeinek egymáshoz viszonyított rezgése. Az LDV lézérének fénye hátul és egy ponton verődik vissza, míg a LIMA-é elől és három ponton (a prizma három oldalán egymás után). Tehát a LIMA a gyors rezgéseket valamelyest kiátlagolja.

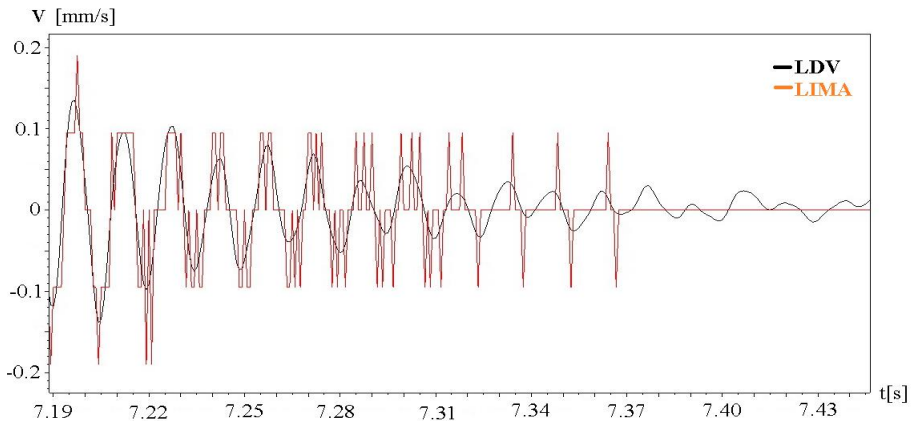


**6. ábra.** A 8. koppantás utáni első néhány rezgés kinagyítva. (Adatok, mint az előző ábrán.)

Tanulságos a rezgések lecsengésének a megfigyelése is. A 7. ábra lényegében a 6. ábra folytatása (néhány periódus kihagyásával, finomabb sebességskálán). Látható, hogy az LDV végig szépen követi a rezgéseket, amelyek a vége felé már nem tisztán szinuszosak, több rezgés összegeként állnak elő. A LIMA esetében azonban a sebesség már nagyon „szőrössé” válik, lényegében csak három sebességtérték fordul elő: a nulla és a  $\pm 96 \mu\text{m/s}$ ,



attól függően, hogy az előző időablakban érkezett-e jel és az milyen előjelű elmozduláshoz tartozott (lásd fentebb). Az amplitúdó csökkenésével a nullától különböző értékek egyre ritkábbak lesznek, végül teljesen eltűnnek. A korábban leírtak szerint a LIMA az 50 nm-nél kisebb amplitúdójú rezgéseket még nem látja. Ehhez a mérési határhoz 67,8 Hz esetén ( $v=A\omega$ ) 20  $\mu\text{m/s}$  sebesség mérési határ tartozik, ezt az ábra is megerősíti.

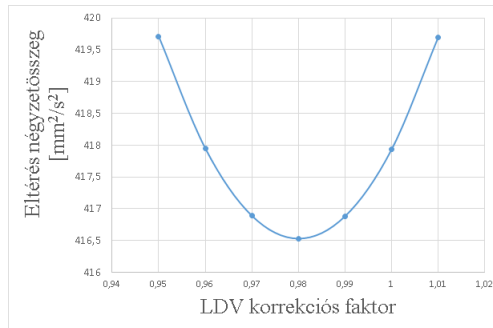


7. ábra. A 8. koppantás utáni rezgések megszűnése. (Adatok, mint a 6. ábra felső részén.)

A fentiek alapján egyértelműen állítható, hogy a LIMA a jelenlegi mérőprogrammal a 0,1 mm/s alatti sebességű mozgások tanulmányozására kevésbé alkalmas, mint az LDV. Ez azért van, mert a LIMA ugyan igen pontosan méri az elmozdulást ( $\lambda/4$  egységben), de a pillanatnyi sebességet (és gyorsulást) ebből pontatlanul származtatja, mert az időablakok nincsenek a jelek beérkezéséhez szinkronizálva. Ezért ez a származtatási módszer (amit a fejezet elején már leírtunk) mindenképpen fejlesztendő. Hangsúlyozzuk, hogy a LIMA „pontatlansága” csak a pillanatnyi sebesség értékeire vonatkozik, a hosszabb időtartamokra vonatkozó átlagsebességekre nem. Azok nagyon pontosak, mert nagy pontosságú adatokból számítjuk.

Az összemérések kiemelt célja volt annak eldöntése, hogy a két módszer ugyanazokat a mérési eredményeket szolgáltatja-e, van-e lehetőség a pontatlanabb skálájúnak gondolt LDV hitelesítésének pontosítására. A 6. ábra azt sugallja, hogy az illeszkedés és ezáltal a hitelesítés is kifogástalan. Ez nagyjából így is van, de a 6. ábra azért tartalmaz egy korrekciós faktort. Az LDV sebességadatokat 0,98-cal kellett beszorozni, hogy az egyezés a legjobb legyen (azaz az eltérések négyzetösszege minimális legyen). Ezt a 8. ábrán mutatjuk be.

Jelenti-e ez azt, hogy az LDV módszer (a LIMA-hoz képest) 2%-ot téved, és az LDV *Scaling factor*-t a gyári 5mm/s/V-ról 4,9mm/s/V-ra kell átállítani? A válasz egyértelműen **nem**. Nézzük meg ugyanis, hogy függ-e a korrekció eredménye attól, hogy az LDV lézersugara a sarokprizma hátlapját melyik ponton éri el! A mérési pontokat a 4. ábra jobb felső részén kinagyított prizma hátlapján már bejelöltük, az 5-7. ábrákon bemutatott grafikonokat az 1. mérési pontról (a hátlap közepéről) visszaverődő lézersugárral mértük. A többi mérési pont esetén kapott, hasonló módon megkapott szorzófaktorokat az 1. táblázatban foglaltuk össze.



8. ábra. Az optimális LDV korrekciós faktor meghatározása

1. táblázat. A sarokprizmán lévő mérőpontokhoz tartozó LDV korrekciós faktorok

Mérőhely sorszáma	Koordinátái [mm]	Korrekciós faktor	LDV többlet [%]
1	(0;0)	0,98	2,0
2	(0;7)	0,91	9,9
3	(0;14)	0,86	16,3
4	(0;-7)	1,05	-4,8
5	(-14;0)	1,00	0
6	(14;0)	1,00	0

A táblázat adatai szerint a prizma középvonalán függőlegesen felfelé haladva mm-ként kb. 1%-kal változik a korrekciós faktor. (A sarokprizma teteje jobban kileng, ezért fent jobban kell csökkenteni az LDV adatokat, hogy a LIMA-val egyezést kapjunk.) Vízszintesen (szintén a középvonalon) haladva sokkal kisebb korrekciók szükségesek, a prizma két széle kb. 2%-kal nagyobb amplitúdóval rezeg, mint a közepe. Ez arra utal, hogy az alkalmazott „koccsantás” olyan rezgést hoz létre, aminek van egy kis torziós komponense is.

A LIMA lézersugara a prizma másik oldalán, annak vízszintes középsíkjában lép be- és ki, egymástól 15 mm távolságban. A prizma reflektáló pontjainak a mozgása tehát a középső (1.), ill. a két szélső (5-6.) átlaga körüli lehet, amelyhez 0,99-es korrekciós faktor tartozhat. Azaz a két berendezés által mért sebesség adatok kb. 1%-kal térnek el, ha a prizma középvonala (7;0) és (-7;0) koordinátájú pontjait tekintjük. Ugyanakkor kb. 1mm-nek gondoljuk a lézersugár foltjának beállítási pontosságát a prizma hátlapján, ami – a fentebb leírtak szerint – kb. 1% korrekciós faktor hibára vezet. Azaz végeredményben az adatok eltérése nem nagyobb, mint a becsült mérési hibánk. **Tehát az LDV skálafaktora 1-2% hibahatáron belül pontos.** Ezt a (meglehetősen kicsi) mérési hibát főleg az okozhatja, hogy a LIMA az egész sarokprizma átlagolt rezgéseit méri, az LDV pedig csupán egy pontjátét.

#### 4. Következtetések

Az elvégzett mérések alapján elmondhatjuk, hogy mind a LIMA, mind az LDV megfelelő körülmények és beállítások mellett kiválóan működik. A modernizált adatgyűjtő rendszer jól illeszkedik a régi opto-mechanikai egységhez.

Az új légrúgós rezgésmentes asztal használata lényegesen növelte a mérések pontosságát. Ismételten bebizonyosodott, hogy lézeryinterferenciás méréseket csak megfelelő minő-

ségű rezgésmentes asztalon szabad végezni, máskülönben a precíziós részelemeknek a környezettől ill. egymástól átvett rezgéseit meghamisítják a méréseket.

Azt találtuk, hogy az LDV alkalmasabb a pillanatnyi sebességek meghatározására, mint az elsődlegesen elmozdulást mérő LIMA. Különösen igaz ez azokra a rezgésekre, ahol a sebesség 0,1 mm/s alatt marad. A LIMA mérőprogramjának fejlesztése, jobb pillanatnyi sebesség- és gyorsulás számítási módszer kidolgozása mindenképpen indokolt.

A mérések igazolták, hogy a finoman „megkocantott” mérőági sarokprizma különböző pontjai eltérően rezegnek. Ezek az eltérések nagyobbak, mint a LIMA és az LDV által (középpállásban) szolgáltatott adatok különbségei. Méréseink alapján állíthatjuk, hogy a LIMA és az LDV hibahatáron belül egyformán méri a sebességet (fentebb említett korlátokkal). Ezt a hibahatárt 1-2%-ra becsüljük. Ennek a (kis) hibának oka sem a műszereken belül keresendő, hanem abban, hogy a teljesen eltérő elveken működő műszerek nem pontosan ugyanazt a rezgést „látják”.

## 5. Köszönetnyilvánítás

A kutató munka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Mechatronikai és Logisztikai Kiválósági Központ keretében valósult meg.

## 6. Felhasznált irodalom

- [1] Citrovsky, A.: *LI-03 típusú szubmikronos lézerinterferométer kezelési és karbantartási könyv*, Budapest, 1998.
- [2] Jani, P., Czitrovsky, A., Szótér, L., Tajnafoi, J., Barna, B., Molnár, L.: *A laser interferometric motion analyser system and some of its applications*, Publications of the University of Miskolc, Series D-Natural Sciences Physics 1, p. 17. (1999)
- [3] Illavszky, V.: *Rezgések precíziós összehasonlító vizsgálata lézerinterferometrikus mozgásanalizátorokkal*, ME-TDK, 2015.
- [4] Rónai, L.: *Lézerinterferométer mérő egységének korszerűsítése, rezgések precíziós vizsgálata*, ME-TDK, 2015.
- [5] Béres, M., Paripás, B., Majár, J., Bodolai, T., Rónai, L., Illavszky, V.: *Rezgések precíziós összehasonlító vizsgálata lézerinterferometrikus mozgásanalizátorokkal*, Multiscience – XXX. microCAD Int. Multidiscipl. Sci. Conf., C3: Natural Sciences, ISBN 978-963-358-113-1, University of Miskolc (C3/4), 2016.
- [6] Polytec GmbH: *PDV-100 Portable Digital Vibrometer Datasheet*, 2012.
- [7] Hussain, B., Muhammad, T., Rehan, M., Aman, H., Aslam, M., Ikram, M., Raja, M., Y., A.: *Fast Processing of Optical Fringe Movement in Displacement Sensors Without Using an ADC*, Photonic Sensors, 2013. Vol. 3, No. 3: pp.241–245., DOI: 10.1007/s13320-013-0088-5
- [8] Ripper, G.,P., Garcia, G., A., Dias, R., S., Zindeluk, M.: *Primary calibration of single-point laser Doppler vibrometers (LDV)*, INTER-NOISE CONGRESS, Rio de Janeiro, 2005.
- [9] Mark, Cs.: *Fundamentals of Light Sources and Lasers*, John Wiley & Sons, 2004