

**Zárójelentés az NN109679 számú**

**„A Szegedi Tudományegyetemen kifejlesztett, az atmoszféra vízgőz- és teljes víztartamát mérő műszer alkalmazása közepes szintű cirrus felhők vizsgálatára repülőgépes mérési kampányokban és a műszer továbbfejlesztése”  
című OTKA projekt keretében végzett munkáról**

Dr. Bozóki Zoltán témavezető

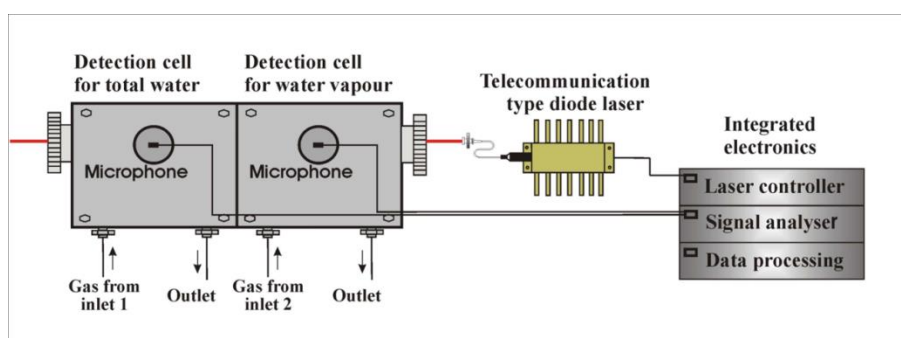
Szeged, 2017. szeptember 29.

## Tartalom

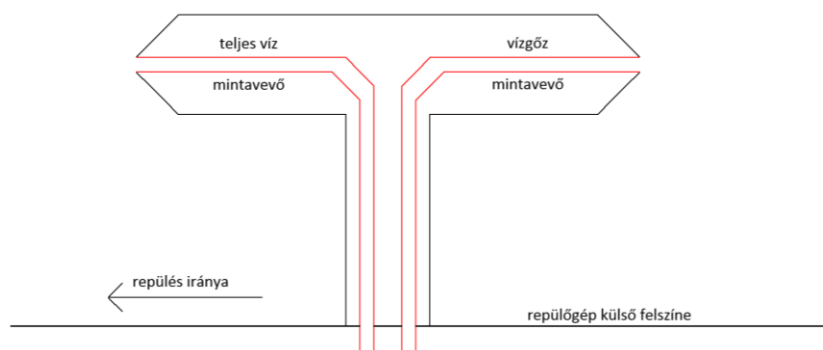
Bevezetés.....	3
1. A fotoakusztikus rendszer továbbfejlesztett változata .....	5
1.1. Újfajta hullámhossz-stabilizálási eljárás .....	5
1.2. Kalibrálási és jelkiértékelési módszer fejlesztése .....	7
1.3. Állandó nyomáson történő mérést biztosító gázkezelés kialakítása .....	8
1.4. További fejlesztések.....	9
2. Repülőgépes összehasonlító tesztek (Az AIRTOSS kampány) .....	10
3. Numerikus modellezések .....	13
3. Mikrometeorológiai mérések .....	14
Melléklet. A fotoakusztikus rendszer új adatgyűjtő és mérésvezérlő egységének részletes ismertetése.....	16

## Bevezetés

A légkörben található vízgőznek, illetve a felhőknek a globális energiamérlegben játszott szerepének fontossága közismert. Ennek megfelelően évtizedek óta komoly erőfeszítések történnek arra, hogy minél több repülőgépet felszereljenek legalábbis vízgőz, de optimális esetben kombinált vízgőz- és teljes víztartalom-mérő műszerekkel (lásd a különböző nemzetközi projekteket, mint pl. MOZAIC, CARIBIC, IAGOS). Ezen belül a CARIBIC projekt az, ahol egy, a Szegedi Tudományegyetemen kifejlesztett kétsatornás (1. ábra) fotoakusztikus műszer szolgál a vízgőz és a teljes víztartalom mérésére az alábbiak szerint. A repülőgépre telepített fotoakusztikus műszerbe a repülőgép külső testére szerelt speciális mintavevő-egységből (2. ábra) jut a két mérendő gázminta, méghozzá oly módon, hogy az egyik mérőkamrába (ami a levegő vízgőztartalmát méri) a levegőből csak a vízgőz jut, míg a másik mérőkamrába (ami a levegő teljes víztartalmát méri) a vízgőzön kívül bejutnak a levegőben található folyékony vagy szilárd fázisú ún. felhőcseppek is. (Megjegyzés: a mintavételezés úgy van kialakítva, hogy felhőcseppek teljes mértékben elpárolognak, mire a fotoakusztikus mérőkamrába jutnak, azaz vízgőzként jelennek meg a teljes víztartalmat mérő kamrában).

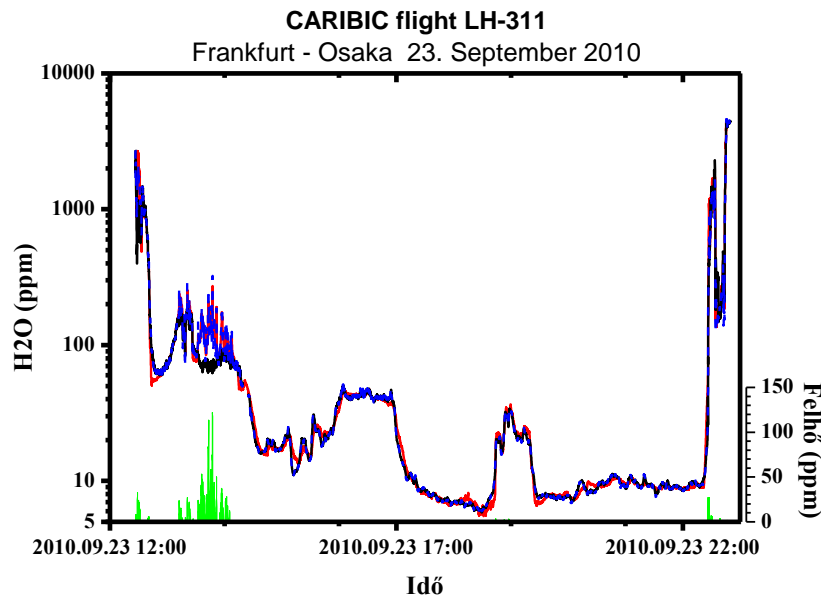


1. ábra. Kétsatornás, a légkör vízgőz és teljes víztartalmát mérő fotoakusztikus műszer sematikus ábrája.



2. ábra. Repülőgépes mintavevő vázlat. A repülési irányába néző mintavevővel a légkör teljes víz tartalmát, míg a hátrafelé nézővel csak a gázfázisú nedvességtartalmat lehet mintavételezni.

Ha a két mérőkamrában ugyanazt a vízgőz-koncentrációt mérjük, az azt jelenti, hogy az aktuálisan mintavételezett levegőtér fogatban nincsenek felhőcseppek. Azonban, ha a teljes víztartalmat mérő kamrában mért vízgőz-koncentráció meghaladja a másik kamrában mért vízgőz-koncentrációt, akkor a repülőgép felhőn halad keresztül és a teljes víztartalmat mérő kamrában mért vízgőz-koncentrációból levonva a vízgőzt mérő kamrában mért vízgőz-koncentrációt megkapjuk az ún. felhőcsepp-koncentrációt (3. ábra).



3. ábra. A CARIBIC projektben üzemelő repülőgépes vízgőzmérő rendszerünk jellemző mérési eredményei. Fekete folytonos vonal: a fotoakusztikus rendszer által mért vízgőz-koncentráció, kék szaggatott vonal: a fotoakusztikus rendszer által mért teljes víz (vígőz+folyadékcseppek+jégrészecskék) koncentráció, piros vonal: referencia műszer (tükrös harmatpontmérő) által mért teljes vízkoncentráció, zöld satírozott terület: a fotoakusztikus rendszer által mért koncentrációkból számolt felhő koncentráció.

Az OTKA projekt során megvalósítottuk a mérőműszer továbbfejlesztését, illetve laboratóriumi és teperi méréseket végeztünk a továbbfejlesztett műszerrel. Jelen összefoglaló zárójelentésben elsőként ismertetésre kerülnek az elvégzett rendszerfejlesztési lépések, majd ezután a repülőgépes illetve egyéb terepi mérések illetve a projekthez kapcsolódó modellezések eredményei. A mellékletben részletesebben ismertetem a fotoakusztikus berendezést projekt keretében kifejlesztett új vezérlőelektronikáját.

## **1. A fotoakusztikus rendszer továbbfejlesztett változata**

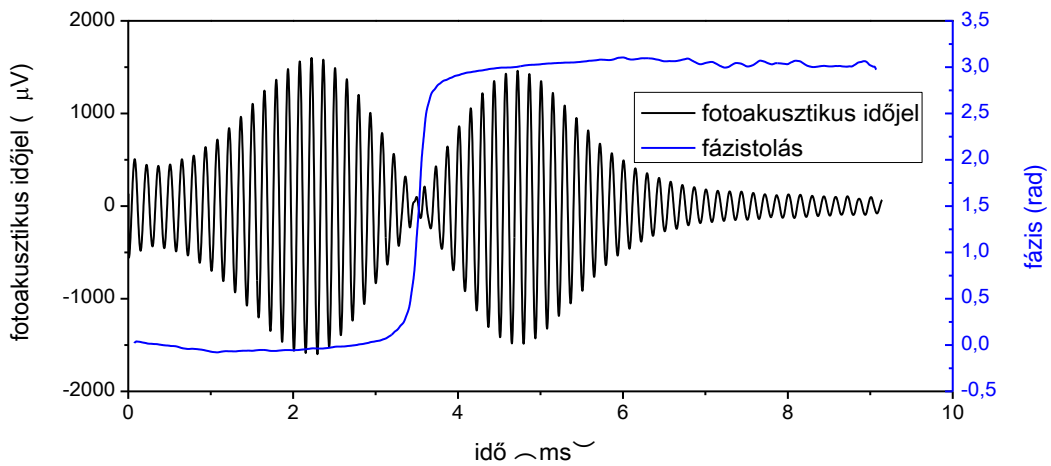
### **1.1. Újfajta hullámhossz-stabilizálási eljárás**

A kutatócsoportban korábban kifejlesztésre került egy ún. „chirp” eljárás, amely segítségével hangolható diódalézerek hullámhosszát gyorsan lehet beállítani a munkapontra. Az eljárás fejlesztésekor a pontosság mellett fontos szempont volt, hogy az alkalmazásához szükséges mérési idő rövid legyen. Egy ilyen eljárás alkalmazására három ok miatt van szükség:

- a DFB diódalézerek hullámhossza hőmérséklet kismértékű megváltozása esetén is jelentősen, a mérés pontosságát befolyásoló mértékben megváltozik,
- a DFB diódalézerek hullámhossza különböző öregedési effektusok következtében folytonosan változik,
- a lézervezérlő áramkörben lévő alkatrészek öregednek, amit virtuális lézer-hullámhossz- változásként lehet észrevenni.

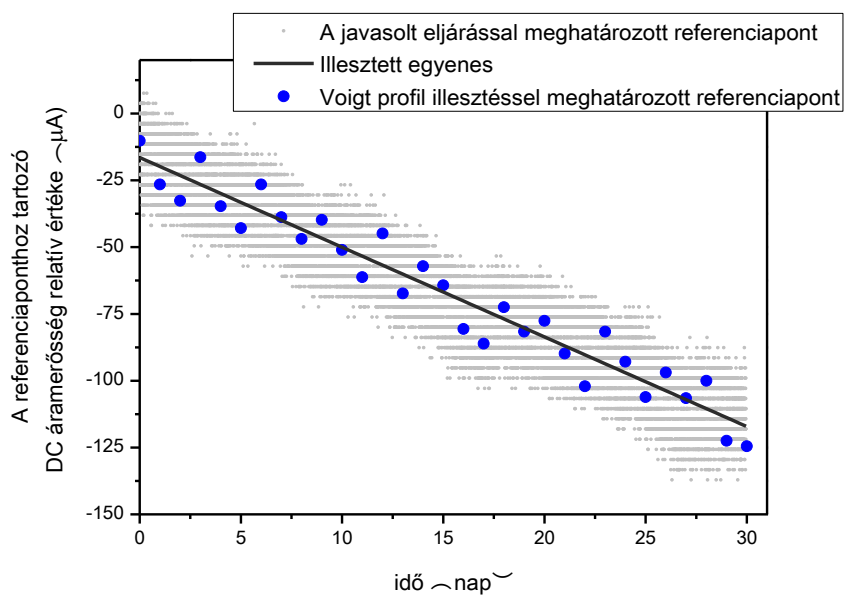
Ezt az eljárást fejlesztettük tovább és hoztunk létre egy nagyobb beállítási pontosságot biztosító eljárást az alábbiak szerint. Az eljárás során a lézerre adott áramerősség-hullámformát egy szinuszos moduláció és egy hozzá képest kis frekvenciájú háromszögjel összegeként állítjuk elő. A szinuszos moduláció a fotoakusztikus jelkeltéshez, míg a háromszögjel a lézer központi hullámhosszának hangolásához szükséges. A lézervezérlés paramétereit úgy kell beállítani, hogy a háromszögjel segítségével áthangoljuk a lézert a vízgőz (vagy egyéb, keskeny elnyelési vonallal rendelkező komponens) egy elnyelési vonalán. A mérés során a mikrofonnal mért jelet digitalizáljuk. A kapott fotoakusztikus időjelnek vesszük a háromszögjel felfutásához tartozó részét és referenciapont meghatározáshoz eltároljuk. Az így kapott fotoakusztikus időjel első ránézésre egy szinuszos hullámforma, amelynek a burkolóját egy hullámhossz-modulált spektrum adja. Ebben a hullámformában definiálunk, illetve keresünk referenciapontot.

Hullámhossz-moduláció mellett felvett fotoakusztikus spektrum alakja kis modulációs mélység esetén az elnyelési vonal deriváltjával lesz arányos. Az elnyelési vonal két oldalában a deriváltak előjele ellentétes, ami  $180^\circ$ -os fázisváltzásként jelenik meg lock-in technikát használva. A fázistoláshoz tartozó hullámhossz megegyezik az elnyelési vonal maximumhelyével. Ennek a fázistolásnak a gyors áthangolás esetén is meg kell jelennie a mérhető jelben. Ezt a megjelenést numerikus szimulációkkal igazoltuk, majd pedig kísérletileg igazoltuk, hogy a legnagyobb fázisváltás, mint referenciapont a korábban használnál pontosabb hullámhossz-beállítást tesz lehetővé (4. ábra).



4. ábra. Példa a mért fotoakusztikus időjelre és a belőle meghatározott fázistolási görbére.

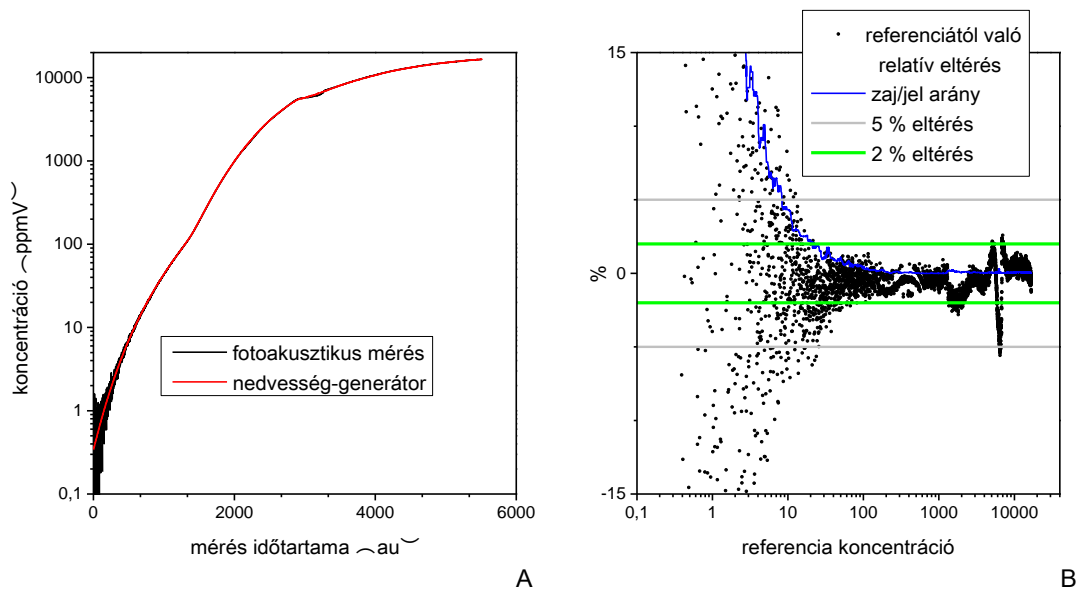
Az általunk kifejlesztett módszer nagy előnye a mérési idő gyorsasága (másodperc alatti hullámhosszkeresési-ideje), illetve a módszer hosszú távú stabilitása, amit az 5. ábra szemléltet.



5. ábra. A lézer referencia-hullámhosszhoz tartozó áramerősségének a változása. Látható, hogy a két módszerrel meghatározott referenciapont ugyanolyan sebességgel változik, de az általunk javasolt módszer mérési ideje nagyságrenddel rövidebb, mint a vonalillesztéses módszeré.

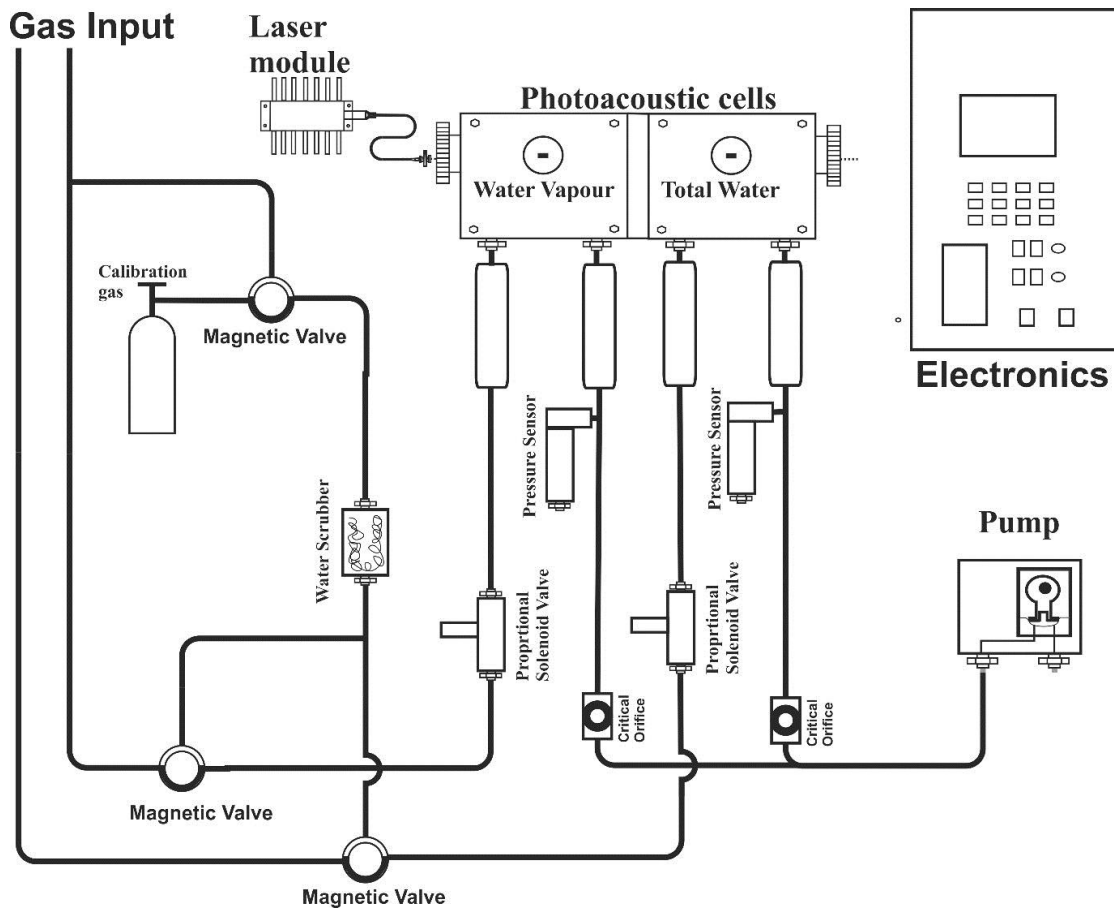
## 1.2. Kalibrálási és jelkiértékelési módszer fejlesztése

Kidolgoztunk egy új kalibrálási és jelkiértékelési eljárást, amely a nyomás-koncentráció-fotoakusztikus jel térben kifestülő kalibrációs felület kísérleti meghatározásán alapul az alábbiak szerint: különböző, de konstans nyomásokon kell meghatározni a koncentráció függvényében a fotoakusztikus jel nagyságát. A különböző nyomásokon kapott kalibrációs görbéket felhasználva a pillanatnyi nyomás és a fotoakusztikus jel nagyságából egy interpolációs eljárással határozható meg a koncentráció pontos értéke. Az eljárás alkalmazásával a fotoakusztikus mérőrendszerrel mért koncentrációk zajszint  $\pm 2\%$ -on belül megegyeznek a kalibrálás során alkalmazott referenciaműszer értékeivel 100-1000 mbar nyomás és 0,5-25000 ppmV koncentráció-tartományon belül. Korábban ezt a pontosságát a kalibrációnak változó nyomás mellett nem lehetett megvalósítani. Az adatok kiértékelése néhány milliszekundum időt vesz igénybe mérési pontonként, így valós idejű jelkiértékelésre is lehetőség van. A 6. ábrán látható a mérőrendszer pontossága az új kalibrációs eljárással.



6. ábra. Az új kalibrációs eljárás pontossága.

### 1.3. Állandó nyomáson történő mérést biztosító gázkezelés kialakítása



7. ábra. Állandó nyomáson történő méréseket biztosító gázkezelés kialakítása.

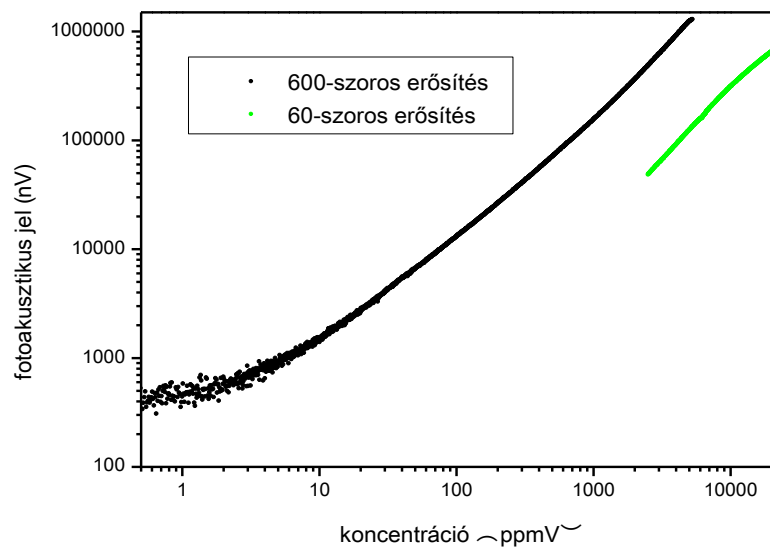
Mivel az előzőleg ismertetett továbbfejlesztett kiértékelési eljárás alkalmazásával is a számolási bizonytalanság meghaladta a mérés zajából származó bizonytalanságot, ezért átalakítottuk a gázkezelést oly módon, hogy a repülőgépes mérések során a mérőkamrában folyamatosan 200 mbar legyen a gáznyomás és így szükségtelessé vált a pontatlanságot okozó nyomásfüggő kalibrációs konstansok alkalmazása. Ily módon sikerült megvalósítani a célul kitűzött zajlimitált méréseket.



## 1.4. További fejlesztések

Az új mérőrendszerben nem a korábban használt 1371, hanem az 1392,5 nm hullámhosszú ( $3,67 \times 10^{-5} \text{ ppm}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ) elnyelési vonalat használjuk. Az elnyelési vonalak lényegileg azonos erősségűek, de az új elnyelési vonalmál nagyjából kétszeres teljesítményű lézerek is elérhetőek, amelyek használatával kb. kétszeres érzékenységgel lehet a méréseket végezni.

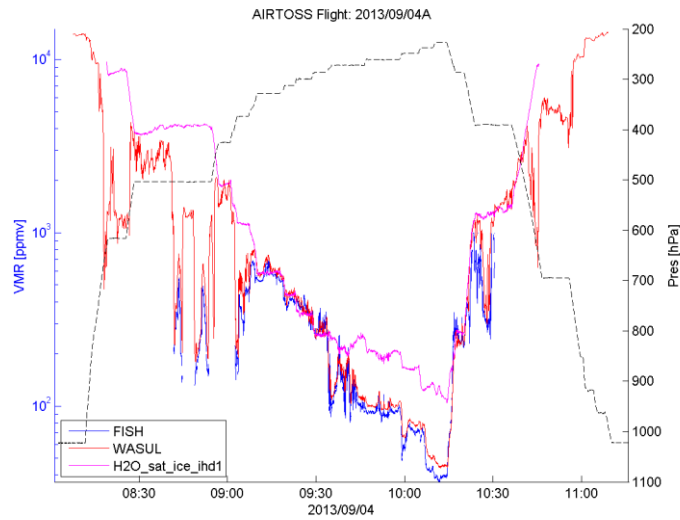
A mérési tartomány megnöveléséhez egy automatikus érzékenységváltási eljárást dolgoztunk ki (8. ábra).



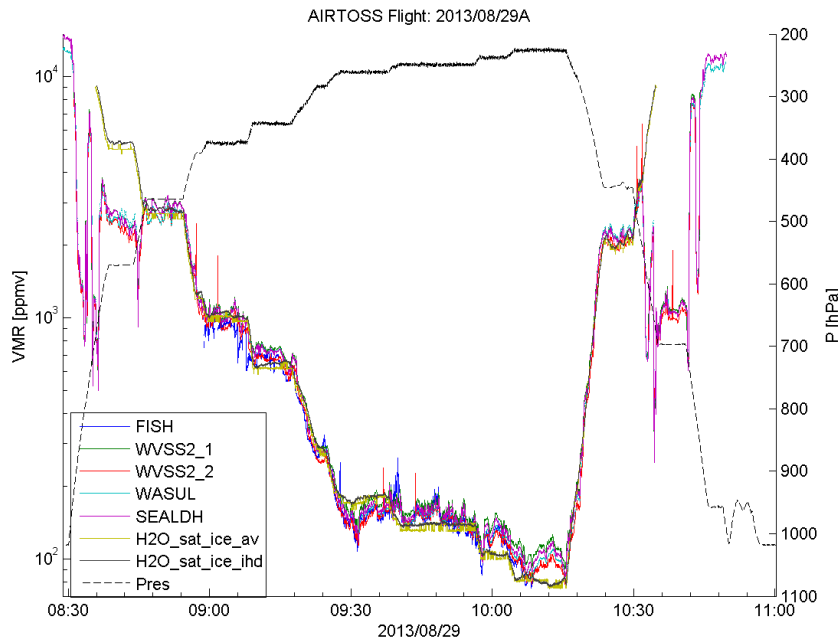
8. ábra. Kalibráció eredménye 200 mbar nyomáson két különböző érzékenység mellett.

## 2. Repülőgépes összehasonlító tesztek (Az AIRTOSS kampány)

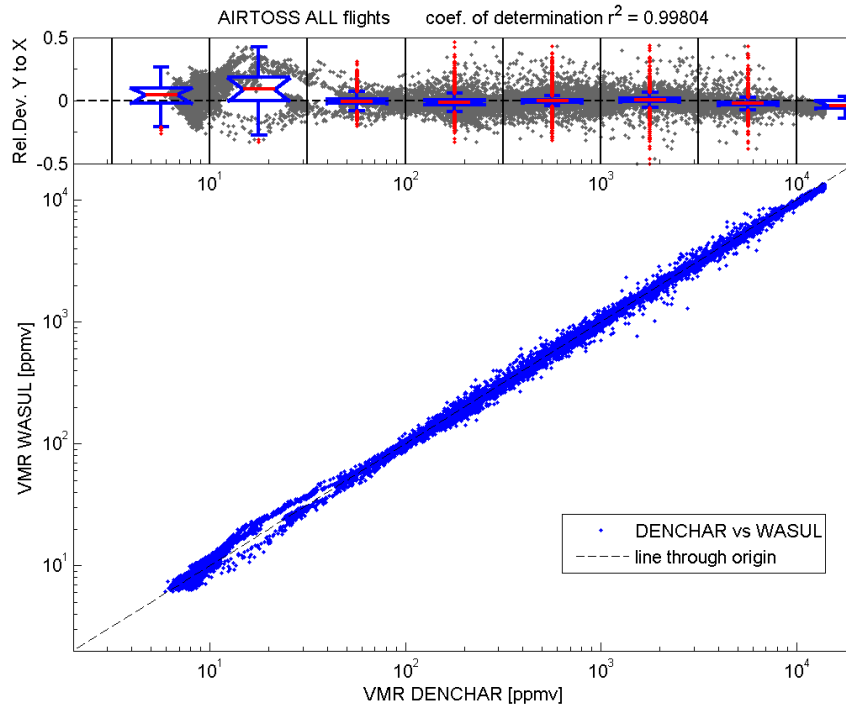
Az AIRTOSS-2 (AIRcraft TOWed Sensor Shuttle) kampányra 2013-ban került sor, ahol a mérőműszerünk egy LearJet típusú repülőgépre lett telepítve egyéb mérőműszerekkel együtt. A mérések központja a Jagel-i repülőtér (Németország) volt. A nyers mérési adatok a 9. és 10. míg a kiértékelt adatok a 11. és 12. ábrán láthatók.



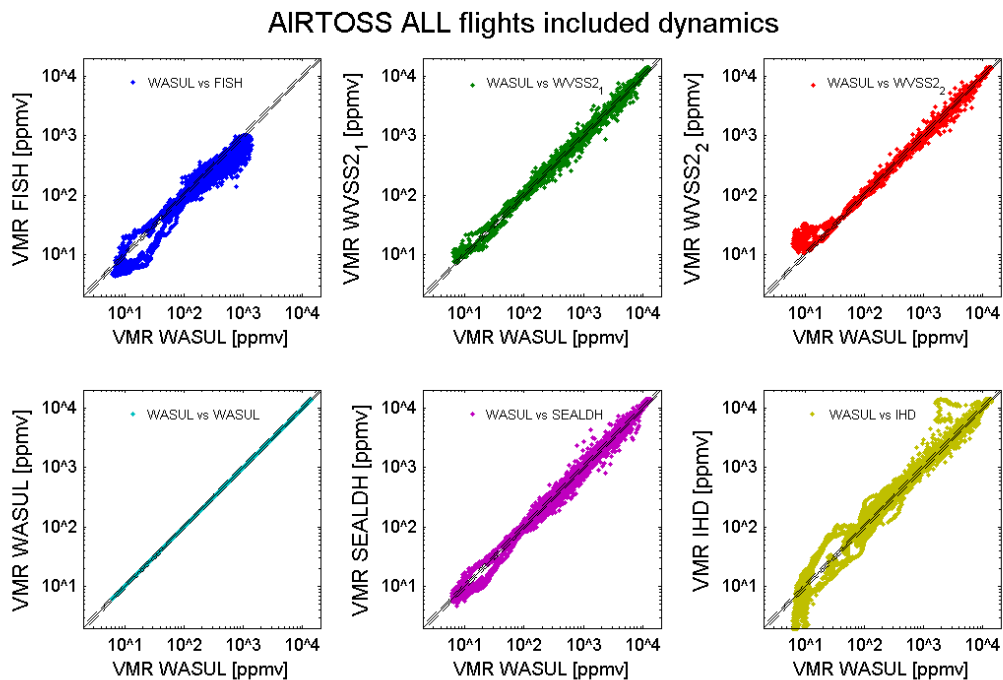
9. ábra. AIRTOSS2 mérési adatok.



10. ábra. AIRTOSS2 mérési adatok.



11. ábra. A fotoakusztikus (WaSul) műszer repülésközben mért eredményeinek összehasonlítása a repülési kampányban részt vevő többi műszer átlagolt mérési eredményeivel.



12. ábra. A fotoakusztikus (WaSul) műszer repülésközben mért eredményeinek összehasonlítása a repülési kampányban részt vevő többi műszer mérési eredményeivel.

Megjegyzések:

1. Az AIROTSS2 mérések során a fotoakusztikus műszerbe egy olyan mintavevőn keresztül jutott be a környezeti levegő, amelyről utólag kiderült, hogy nem volt teljesen tömített, azaz a repülőgép belsejéből bejutott a nagy nedvességtartalmú levegő.
2. Az AIRTOSS2 mérések után számos, jelen jelentés első fejezetében ismertetett fejlesztést hajtottunk végre a mérőrendszeren. Ezeknek a fejlesztéseknek a repülőgépes tesztelésére azonban nem volt lehetőségünk.

### 3. Numerikus modellezések

A Geresdi István által vezetett kutatás keretében a pécsi kollégákkal történt együttműködés során az általunk kifejlesztett numerikus modell segítségével vizsgálták a domborzatnak a felhő- és csapadékképződésre gyakorolt hatását. A modell az eddigieknél pontosabban írja le a hópelyhek és a jégdara részecskék olvadását. Az elért eredmények gyakorlati jelentősége is van, ugyanis a csapadék halmazállapotának (pl. ónos eső) pontos előrejelzése kiemelt fontosságú az operatív időjárás előrejelzésben. Az eredményeket radarral és repülőgéppel végzett mérésekkel hasonlították össze. Az összehasonlítást nagyban segítette az általuk kifejlesztett számítógépes program, amely segítségével - a felhők mikrofizikai jellemzői alapján - ki lehet számítani a radar által kibocsátott elektromágneses sugárzásnak a felhőkről történő visszaverődését. Az eredmények az Atmospheric Research c. újságban kerültek publikálásra.

Új numerikus modellt fejlesztettek ki a felhőzet és a felszín, valamint a légkör által kibocsátott infrásugárzás közötti kölcsönhatás tanulmányozására. Megvizsgálták, hogy az egyik leggyakoribb felhőtípus (stratocumulus felhő) mikrofizikai jellemzői (pl. aeroszolrészecskék koncentrációja) hogyan befolyásolják a kölcsönhatást. A mérési eredményekkel való összehasonlítás azt mutatja, hogy az általuk kifejlesztett, új sugárzási séma pontosabban írja le az infrásugárzás terjedést stratocumulus felhőben, mint a napjainkban is széles körben alkalmazott parametrizációs eljárás. Az eredmények az Atmospheric Research c. újságban kerültek publikálásra.

### 3. Mikrometeorológiai mérések

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén közel egy évtizede folynak napi rendszerességgel numerikus modellfuttatások a Kárpát-medence térségére 10 km-es rácsfelbontással. Jelenleg a WRF (Weather Research and Forecast) modell V3.2.1-es verziója fut, s szolgáltat naponta két alkalommal 48 illetve 96 órás előrejelzéseket. A modelladatokat oktatási, kutatási és K+F célokra szolgálják. Az OTKA támogatás hozzájárult a számítástechnikai háttér fejlesztéséhez, és a kvázi-operatív modellfuttatásokhoz. A modell-termékek között szerepelnek szél- és napenergia termelési prognózisok (Bán *et al.*, 2016; Gyöngyösi *et al.*, 2016), repülésmeteorológiai és határreteg előrejelzések (Bottyán *et al.*, 2015), illetve új fejlesztésként nedvességi karakterisztikák és kihullható víztartalom adatsorok és térképes mezők. Kísérleteket tettünk a szegedi magaslégkör-kutató állomás (12982) radiométer adataiból történő vízgőzprofilok meghatározására is (Dálya, 2015). E kutatáshoz kapcsolódott az egydimenziós határreteg modell fejlesztés, a nappali konvektív PHR (planetáris határreteg) szerkezetének modellezése (Bordás és Weidinger, 2015). E munka tovább folyik. Az 1D Határreteg modell fejlesztéséből készített PhD dolgozat (Bordás, 2015) 2016-ban került megvédésre ([doktori.hu/index.php?menuid=193&lang=HU&vid=16404](http://doktori.hu/index.php?menuid=193&lang=HU&vid=16404), Témavezető Weidinger T.). Az Újabb eredményeinket a 2017-es Meteorológiai Tudományos Napokon mutatjuk be a Magyar Tudomány Napja rendezvénysorozathoz kapcsolódóan (Gyöngyösi *et al.*, 2017).

Foglalkoztunk a WRF időjárás-előrejelzési modell és a CMAQ szennyezőanyag terjedési modell együttes futtatásával, ami a szennyezőanyag koncentráció mezők előrejelzésére szolgál, képet adva a nyomanyag koncentráció-mezők és profilok változásáról a troposzférában. A modellrendszer háromszoros beágyazással futtattuk Magyarországon térségére. Vizsgálatainkban a nitrogén-oxidok és az ózon-koncentráció változásaira koncentráltunk (Lázár és Weidinger, 2016 a,b). A Magyarországra vonatkozó modellfuttatások (nyomanyag-előrejelzések) eredményeiről konferencia-előadásokban és International Journal of Environment and Pollution, (*Q3 Pollution*) folyóiratban elfogadott cikkben számoltunk be (Lázár és Weidinger, 2017).

A nedvességmérő műszer teszteléséhez nagy pontosságú nedvességmérések szükségesek. Ezt szolgálta a széles hazai és nemzetközi együttműködéssel végzett szegedi határreteg mérési kampány 2013 késő őszi (2013. november 25-december 10) és 2015 nyarán (2015. június 26-szeptember 7). Eredményeinkről hazai és nemzetközi konferenciákon számoltunk be (Cuxart *et al.*, 2014, 2015, 2016; Istenes *et al.*, 2013; Simó *et al.*, 2014; Tatrai

*et al.*, 2014; *Weidinger*, 2014; *Weidinger et al.*, 2014a,b, *Wrenger et al.*, 2015), illetve egy Q1-es folóiratban publikáltunk (*Cuxart et al.*, 2016).

Befejeződött az FP7 ECLAIRE program keretében végzett felszíni energiaháztartási és ózon fluktuáció mérések feldolgozása. Kidolgozásra továbbfejlesztettük az eddy-kovarianciás mérőrendszer adatfeldolgozó programját, az ózon turbulens áramainak meghatározását. Elvégeztük az ózonülepedés felbontását a sztómákon keresztüli illetve nem sztómán keresztüli ülepedésre. Ehhez felhasználtuk a eddy-kovarianciás vízgőzáram méréseket, illetve SVAT modellt fejlesztettünk alacsony vegetációra. E módszertani és mérési alap kutatás hozzájárul a nedvességáram adatok feldolgozásához. Eredményeinket a *Boundary Layer Meteorology* (Q1) hasábjain publikáljuk (*Horváth et al.*, 2017 in press)

Fontos feladatnak tartjuk egyetemi hallgatók és PhD-s diákok, doktorjelöltek bevonását a kutatásba, ami szakdolgozatokban, diákköri dolgozatokban, konferencia előadásokban nyilvánul meg. A témakörben két TDK dolgozat (*Tordai*, 2016) ami részt vett az OFKD konferencián 2016-ban, illetve (*Tordai*, 2017) ami különdíjat nyert XXXIII. OTDK, Fizika, Földtudományok és Matematika Szekcióban) a valamint egy szakdolgozat (*Dálya*, 2015) és két diplomamunka készült. Itt a fő feladat az eddy-kovarianciás mérések (benne a nedvességáram) feldolgozása (*Salavec*, 2016), illetve a mikrometeorológiai mérőrendszerünk fejlesztése volt (*Tordai*, 2016, 2017), de foglalkoztunk a határreteg nedvességi viszonyainak távérzékelési eszközökkel történő meghatározásával is (*Tímár*, 2017)

A kutatási program támogatta az ELTE Meteorológus Diákkör évi konferenciáit (2013-2016) és a konferenciához kapcsolódó összefoglaló megjelentetését. Beszámoltunk a kutatási témáról az ELTE Meteorológus Diákkör Nyári Iskoláin (2012, 2014, 2016) és az ELTE Meteorológiai Tanszék alapításának 70. évfordulójához kapcsolódó rendezvényen. Szintén támogatta a program a most alakuló közép-európai tudományos együttműködés (Pannex) tervezését szolgáló kiadványt, ami az Egyetemi meteorológiai Füzetek hasábjain jelent meg, s a regionális levegőkörnyezeti együttműködés lehetőségeit foglalja össze, ami támaszkodik a jelen kutatás eredményeire is. (*Weidinger*, 2017).

A kutatási feladatokat más hazai és nemzetközi együttműködési programokhoz kapcsolódóan végeztük, ami a közös numerikus modellfejlesztésben, illetve a terepi mikrometeorológiai mérésekben, továbbá az adatfeldolgozási eljárások fejlesztésébe jelentett előnyöket. Ezek közül kiemeljük a 2017-ben indult Magyar- Horvát kétoldalú TÉT együttműködést (2017–2019, TÉT\_16-1-2016-0034) és a 2016–2020 közötti GINOP-2.3.2-15-2016-00007 VOLARE programot.

# **Melléklet. A fotoakusztikus rendszer új adatgyűjtő és mérésvezérlő egységének részletes ismertetése**

Megjegyzés: Az alábbi leírás Dr. Tátrai Dávid PhD dolgozatán alapul.

## **Célkitűzés**

Annak ellenére, hogy a korábban a fotoakusztikus mérőrendszereinkben alkalmazott elektronika alapvetően alkalmasnak bizonyult fotoakusztikus mérések elvégzésére, azonban részben korlátozottsága, részben elavultsága miatt korlátozó tényezővé vált újabb fejlesztésekhez, újabb mérési technikák, újabb ötletek kipróbálásához. Speciális programnyelvének köszönhetően nehézkesen lehet vele méréseket automatizálni, és elsősorban a repülőgépre telepíthető műszereknél jelentett jelentős hátrányt, hogy az elektronika mind méretben, mind pedig tömegben nagyobb, mint amit egy modern mérőrendszerrel elvárható lenne. A fenti okok miatt szükségessé vált egy új adatgyűjtő és mérésvezérlő rendszer kifejlesztése. A fejlesztések során az új rendszerrel kapcsolatos legfontosabb szempontok a következők voltak:

- legyen alkalmas fotoakusztikus mérések elvégzésére, legalább olyan pontosan, és legalább olyan rövid válaszidővel, mint az előző elektronikával lehetett,
- legyen autonóm működésre alkalmas,
- elterjedt programozási nyelven lehessen fejleszteni,
- a korábban kifejlesztett illetve új mérési rutinokat lehessen implementálni,
- méretben és tömegben legyen kisebb a korábban használt elektronikánál.

## **A kiválasztott platform**

Célszerű választásnak tűnt egy ipari szabvány szerinti általános célú vezérlőre alapozni az új mérőrendszert. A lehetséges fejlesztői platformok között a kiemelkedő modularitás, meglévő hardveres támogatás és a LabVIEW-beli fejleszthetőség miatt a National Instruments RIO platformját választottuk. A választott platform két részre osztható: SBRIO beágyazott rendszerek, valamint CRIO rendszerek. A két platform tagjainak alapvető felépítése megegyezik: tartalmaznak egy FPGA chipet, valamint egy determinisztikus feladatok futtatására alkalmas általános célú processzort. Az SBRIO platform tagjai számos integrált analóg/digitális be/kimenettel vannak ellátva valamint néhány típushoz NI C-sorozatú modulok (maximum három darab) kapcsolhatóak, melyek segítségével az eszköz

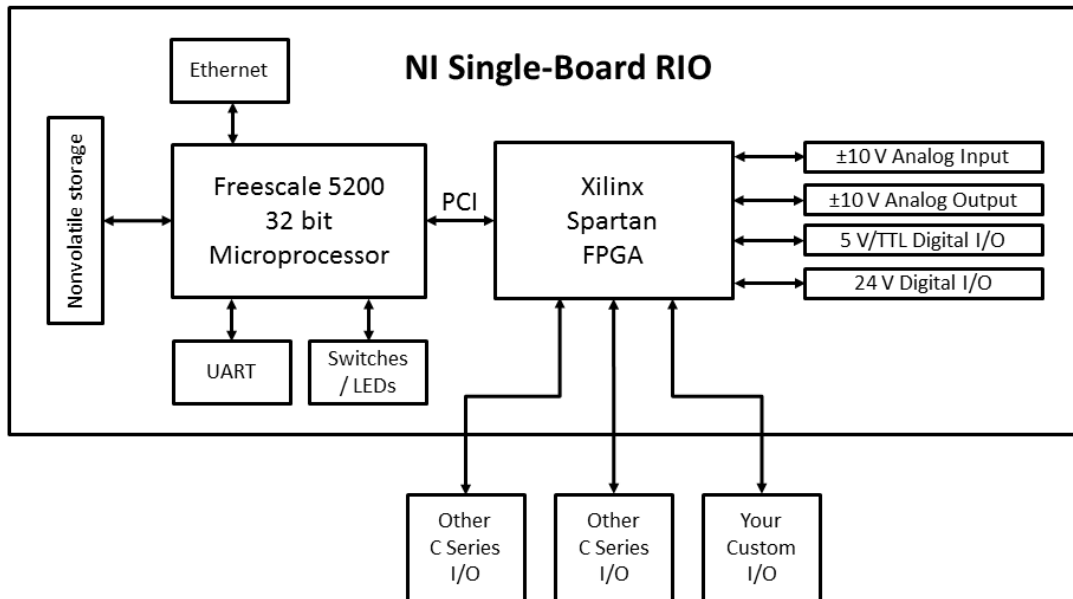


funkcionalitás bővíthető. A CRIO sorozat tagjai nem tartalmazzak integrált be/kimeneteket, csak NI C-sorozatú modulokkal (maximum 4-16 darab/vezérlő) lehet velük adatgyűjtést vagy jelgenerálást megvalósítani. Az SBRIO platform tagjaiban elhelyezett FPGA chippek és processzorok kisebb kapacitásúak, lassabbak. Ezekre alapozva egy maximum négy lézerből és négy fotoakusztikus kamrából álló mérőrendszert lehet elkészíteni. A CRIO sorozat nagy előnye, hogy több vezérlőből álló rendszereket is létre lehet hozni belőlük, így tetszőleges összetételű, bonyolultságú fotoakusztikus mérőrendszert lehet belőlük kialakítani. A két platform szoftveresen átjárható, azaz az egyikre megírt program a másikra könnyedén „portolható”, mindössze a kapacitásbeli különbségekre kell figyelmet fordítani.

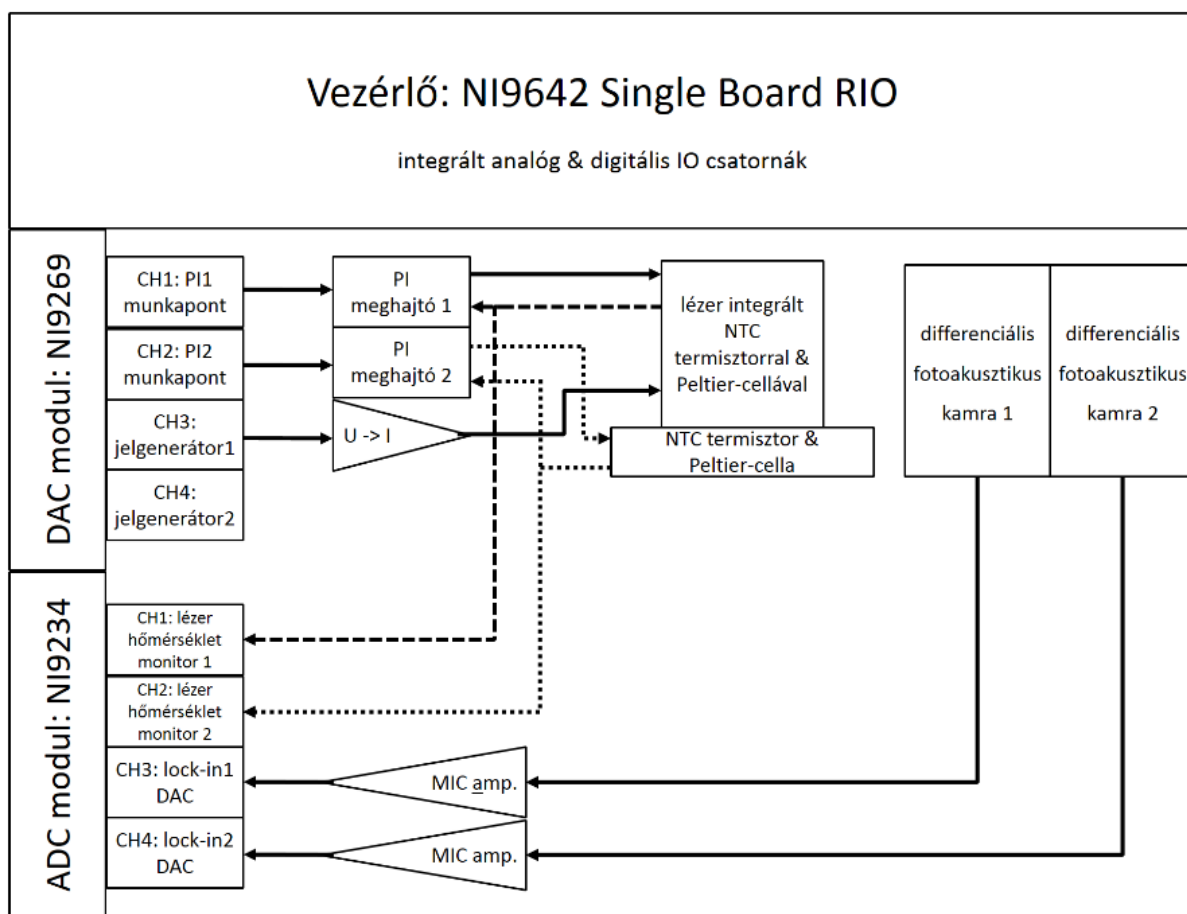
A repülőgépes vízgőzkoncentráció-mérő esetében egy lézerből és két kamrából álló rendszert kell vezérelnie az elektronikának, így a kisebb méretű és tömegű SBRIO platformot választottuk: egy SBRIO 9642XT vezérlőt, egy NI 9234 adatgyűjtővel és egy NI 9269 jelgenerátorral kiegészítve.

Az SBRIO 9642XT vezérlő az alábbi elemeket tartalmazza:

FPGA	Spartan-3, 2 millió kapu
CPU	PowerPC 400 Mhz
RAM	128 MB
tárhely	256 MB
operációs rendszer	VxWorks
3.3 V digitális IO csatornák	110
24 V digitális IO csatornák	32+32
±10 V, 16 bites analóg bemenet	32
±10 V, 16 bites analóg kimenet	4
ethernet port	1
RS232 port	1
C-sorozatú bővítőhely	3



M1. ábra: Az SBRIO 9642 beágyazott vezérlő felépítése



M2. ábra: Az új vezérlőelektronikára alapozott mérőrendszer vázlatos felépítése.

Az NI 9234-es adatgyűjtő egy 24 bites, négycsatornás,  $\pm 4,5$  V-os, csatornánként 110 dB izolált 51200 S/CH/s-es digitalizáló modul. Az egyes csatornák programozhatóak DC, AC, AC +2 mA IEPE csatolással. Az NI 9269-es jelgenerátor egy 16 bites négycsatornás,  $\pm 10$  V-os, csatornánként 250 Vrms izolált 100 kS/Ch/s digitál-analóg konverter.

A két bővítő modul a legnagyobb pontosságot igénylő feladatokhoz, mint lézer meghajtás, hőmérsékletstabilizálás, valamint mikrofonjel mérése használható, míg a vezérlőre integrált csatornák a kisebb precizitást igénylő feladatokhoz, mint nyomásmérők, PT1000 RTD-k jelének a mérésére, gázkezelés vezérlésére, kamra/csőfűtések szabályozására használhatóak. Az új rendszer felépítése a fontosabb funkciókkal az M2. ábrán található.

### **Saját fejlesztésű perifériák**

Egy, a gyakorlatban is alkalmazható fotoakusztikus mérőrendszerhez az alapvető funkciókon kívül biztosítani kell:

- megfelelően stabil tápellátásokat,
- hőmérséklet-szenzorok (PT1000 RTD) jelkondicionálását,
- fűtések PWM alapú teljesítmény-meghajtását,
- gázkezelés teljesítmény-fokozatainak meghajtását (mágneszelepek, szolenoid szelepek...)

### **Mikrofonerősítő**

A mikrofonerősítő egy AC csatolt INA 128 (Texas Instruments) instrumentális erősítő IC-n alapul. A két mikrofon jelét egy 500 Hz felüláteresztő RC szűrőn keresztül az erősítő bemenetére kapcsoltam. Az instrumentális erősítő IC kimenetét egy OPA 177 (Texas Instruments) műveleti erősítőn és egy felüláteresztő szűrőn (100 Hz) keresztül csatoltam vissza az INA 128 IC referencia bemenetére. Ez a kapcsolás lényegileg megegyezik az IC adatlapjában javasolt megoldással. Az erősítést 50-szeresre választottam. Ekkor a mikrofon saját zaja nagyjából egy nagyságrenddel nagyobb, mint az új vezérlőelektronikában implementált lock-in erősítőé. A mikrofonerősítőt egy önálló nyáklemezen készítettem el, amit akár a fotoakusztikus kamrára is lehet rögzíteni, hogy minél közelebb legyen a mikrofonokhoz.

### **Lézer hőmérséklet szabályzó**

A lézer hőmérséklet-stabilizálását a korábban bemutatott, M. Szakáll által kifejlesztett kétszeres sémával oldottam meg. Mind a lézerchip, mind pedig a lézer tokozása

hőmérsékletének stabilizálásához PI szabályozáson alapuló integrált Peltier-cella meghajtó modult választottam (Wavelength Electronics HTC1500-62). Ez egy olyan eszköz, amely egy ellenállás hőmérőre (PT100, PT1000, NTC, PTC) állandó (egy ellenállással beállítható nagyságú) áramerősséget kapcsol, és méri a hőmérőn eső feszültséget  $U_{Tmért}$ . Egy másik bemenetére akkora feszültséget kell kapcsolni ( $U_{Tset}$ ), amekkorának  $U_{Tmért}$ -nek kell lennie beállítandó hőmérséklet esetén. A modulra kell rákötni a meghajtandó Peltier-cellát is. A proporcionális erősítést egy ellenállással (0-100 k $\Omega$ ), az integrálási időt pedig egy kondenzátorral (0-10  $\mu$ F) lehet beállítani. A kapcsolásban az ellenállásként egy digitálisan, SPI kommunikációval vezérelhető potenciométert (MCP4162-104E/P (Microchip)) helyeztem el, hogy szükség esetén akár szoftveresen is változtatni lehessen az erősítés mértékét. Digitálisan vezérelhető kondenzátorok csak a pF tartományban érhetőek el, ezért az integrálási időt konstans 2 másodpercnek választottam. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy 1-5 s integrálási idővel a hőmérséklet-stabilizálás megfelelően működik.

A vezérlőmodul által kiadható maximális áramerősséget két lába közötti ellenállással lehet limitálni, rövidzárral pedig 0 A-ra levenni. A proporcionális erősítést és az integrálási időt csak akkor szabad állítani, amikor a modul nem ad ki a Peltier-cellára áramerősséget, így szükséges volt az áramlimitáló ellenállással párhuzamosan kapcsolva egy relét is elhelyezni. A relé alapállapotában zárva van, a hőmérséklet-stabilizálás csak akkor aktív, amikor a relét nyitjuk. Ezen felül a modul tápellátását egy DC szilárdtest-relével kapcsolom. Ezzel az elrendezéssel meghibásodás vagy rendellenes működés esetén ki lehet kapcsolni a hőmérséklet stabilizálást, hogy megvédjük a lézert az esetleges hőmérsékleti sokk okozta esetleges károsodástól.

Az elkészített kapcsolásban lehetőséget biztosítottam a digitális potenciométer helyett egy hagyományos potenciométer használatára, valamint az áramkorlátot nullára csökkentő relé manuális kapcsolására is. Mindkét elemnél egy-egy tolókapcsoló segítségével lehet váltani a kétféle üzemmód között. A manuális üzemmód opció azért előnyös, mert így más, SPI vezérlővel, vagy 24 V digitális kimenettel nem rendelkező vezérlőelektronikák esetén is lehetőség nyílik az áramkör használatára.

## **Lézer árammeghajtás**

A lézer árammeghajtásához kétféle kapcsolást teszteltem, melyek lényegileg azonos tulajdonságokkal bírnak: Az első egy integrált feszültség-áramerősség konverter melyet speciálisan diódalézer meghajtáshoz terveztek, a másik pedig egy egyszerű lineáris feszültségvezérelt áramgenerátor.

## **Integrált vezérlő**

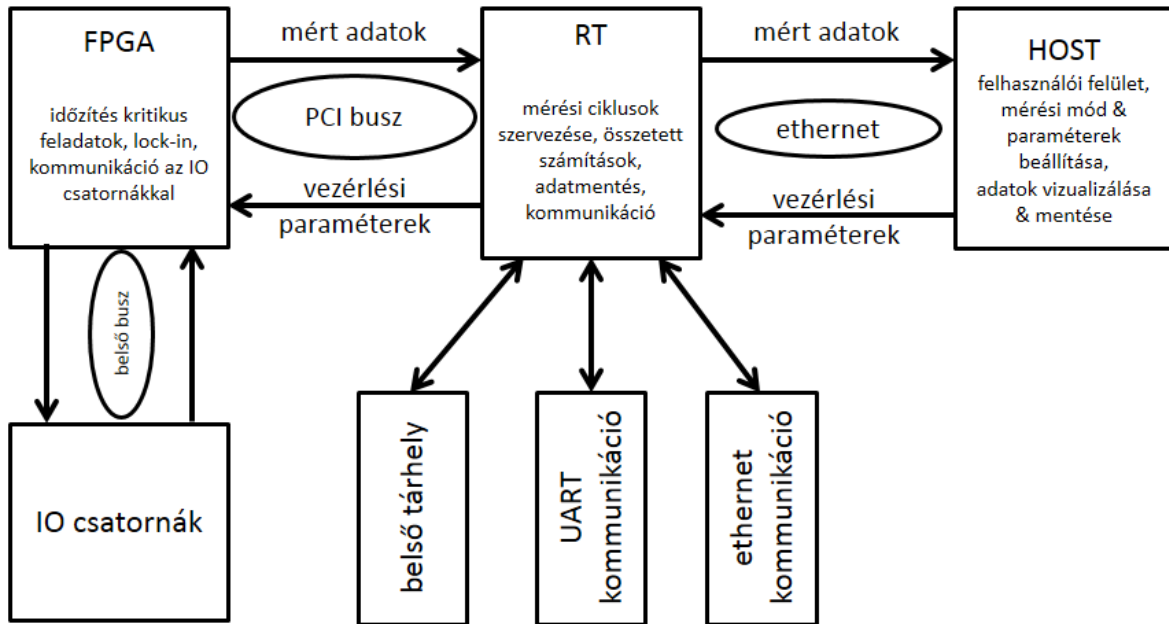
Az integrált vezérlő egy ATLS250MA103 típusú (Analog Technologies) feszültségvezérelt lézermeghajtó áramkör. A meghajtó [0; 2.5] V vezérlőjelet konvertál [0; 250] mA áramerősséggé. A kimenő áramerősséget egy ellenállás segítségével lehet korlátozni. A tesztek során az adatlapjában javasolt kapcsolási rajz alapján készítettem el az áramkört. A használt lézer legfeljebb 120 mA áramerősséggel hajtható meg, ezért az áramerősség-limitet  $118 \pm 1$  mA-re állítottam be.

## **Az új elektronika szoftvere**

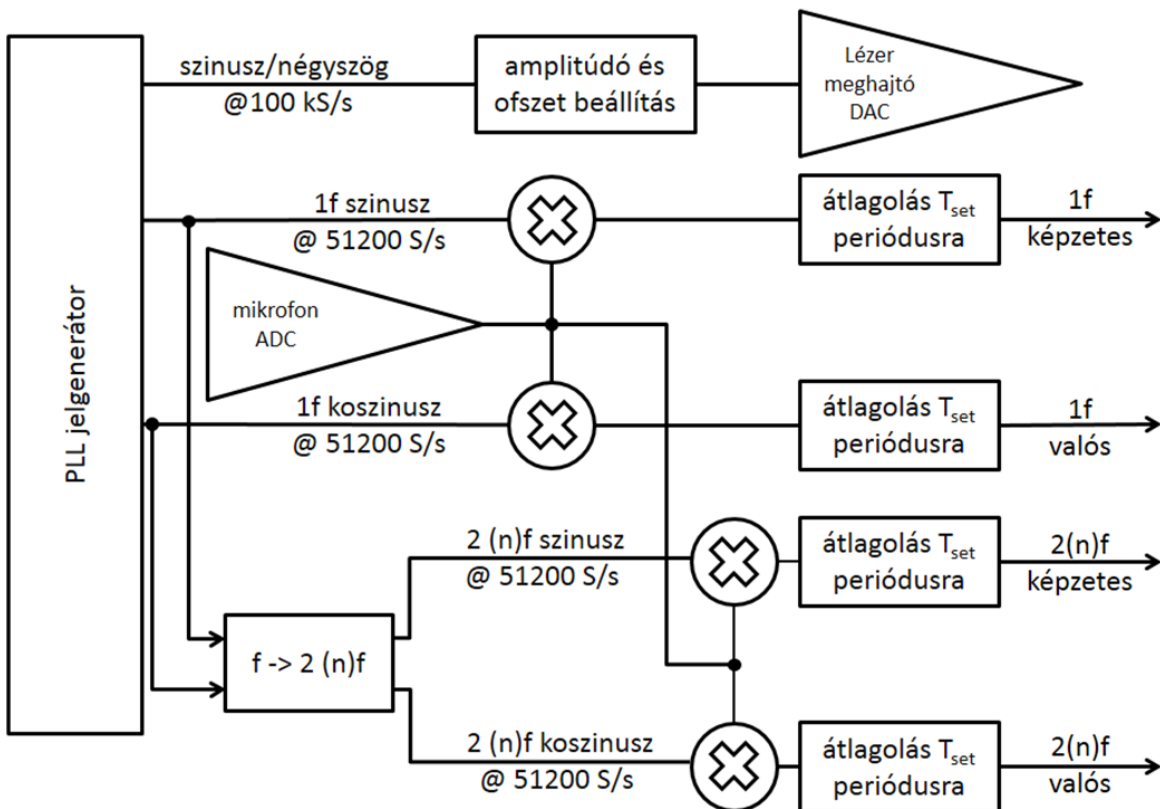
A vezérlőelektronikához elkészítettem egy szoftvercsomagot, amely három rétegből áll:

- FPGA program
- RealTime (RT) program
- Host program

Az FPGA program felelős az időzítés-kritikus feladatokért, valamint ez vezérli az összes analóg és digitális ki és bemenetet is. A működése során az RT programmal kommunikál, attól kapja a rendszer működtetéséhez szükséges paramétereket, valamint annak továbbítja az összes mért és részben feldolgozott adatot. Az RT program felelős a mérési ciklusok szervezéséért, a mért adatok feldolgozásáért mentéséért. Opcionálisan grafikus felhasználói felületet is lehet vele generáltatni, melyhez egy PC-ről ethernet kapcsolattal lehet hozzáférni. Működése során az FPGA programmal kommunikál a fent említett módon. A mért adatokat opcionálisan soros porti kommunikációval továbbítja egy központi adatgyűjtőbe. Laboratóriumi üzemeltetéshez használható a Host program, amely a fejlesztéshez használt PC-n futtatható, elsősorban grafikus felhasználói felületként, funkcionál, de ennek segítségével is megvalósítható a mért adatok mentése. Rendszerintegrációs feladatok ellátására is ez a program használható. A Host program semmilyen hatással sincs a rendszer működésére valamint a mérőrendszer rendeltetésszerű használata során – repülőgépre telepítve – a futtatásához szükséges PC hely, súly és elektromos fogyasztás igénye miatt kerülendő, így ennek felépítését a továbbiakban nem részletezem.



M3. Ábra. A különböző programrétegek, azok funkciói és az egymással való kommunikáció.



M4. ábra. Az Implementált 1f-2-f lock-in FPGA programjának sematikus vázlat.

## **Az új vezérlőelektronika tesztelése**

Az új mérőelektronikára alapozott mérőrendszer elkészítése előtt először azt teszteltem. Első lépésként a különböző analóg és digitális kimenetek működését teszteltem oszcilloszkóp illetve multiméter segítségével. Az egyes funkciók megfelelően működtek, a jelalakok, frekvenciák, jelszintek a beállítottak megfelelőek voltak.

### *Lock-in tesztelése*

#### *Dinamikus tartomány*

A lock-in tesztelésekor a jelgenerátor kimenetet közvetlenül kötöttem az ADC modul bemenetére és 1 s integrálási idő mellett mértem a jel- és zajszintet lépcsőzetesen változtatva a moduláció amplitúdóját, majd pedig a mérést megismételtem egy 10000-szeres feszültségosztó beiktatása mellett is, hogy a lock-in alsó detektálási küszöbét is meg tudjam határozni.

#### *Stabilitás*

A rendszer stabilitásának meghatározásához a jelgenerátort közvetlenül kötöttem az ADC modulra, stacionárius gerjesztés valamint 1 s integrálási idő mellett rögzítettem a mért jelet 20 napon keresztül.

### *Lézer hőmérséklet-stabilizálásának a tesztelése*

#### *Beállítás pontossága, reprodukálhatósága*

10-40 °C hőmérséklettartományon belül lépcsőzetesen változtattam a lézer beállítási hőmérsékletét, valamint mértem a vezérlő által kiadott hőmérséklet kimenetet is, valamint közvetlenül az NTC termisztoron eső feszültséget is.

#### *Válaszidő*

Beállítottam a lézer hőmérsékletét 15 °C-ra, majd 0,1-25 °C között különböző értékekkel megnöveltem a lézer hőmérsékletét, majd pedig visszaállítottam 15 °C-ra. A beállási időt mind a hőmérséklet növelése, mind pedig csökkentése során meghatároztam. Beállási időként a zajszinten belüli stabilizálódás értéket határoztam meg.

### *Stabilitás*

A lézer hőmérsékletét beállítottam konstans hőmérsékletre, majd a beállási idő letele után meghatároztam a hőmérséklet zaját, valamint 48 órán keresztül 1 s átlagolási idő mellett a hőmérséklet instabilitását is.

### *Fotoakusztikus spektroszkópai funkciók tesztelése*

A fotoakusztikus spektroszkópai funkciók teszteléséhez az új vezérlőelektronikára alapozva összeállítottam egy tesztrendszert, mely egy 40 °C hőmérsékleten stabilizált fotoakusztikus kamrából, egy 1392–1395 nm tartományon hangolható DFB diódalézerből (NEL NLK1E5E1AA, 26 mW) és gázkezelésből állt. Ez a rendszer lényegileg megegyezik a korábban bemutatott SZTE2 mérőrendszerrel, így a két rendszer számszerű összehasonlításra is lehetőség nyílt.

### *Spektrum mérések*

Amplitúdó- és hullámhossz-modulált spektrumokat vettem fel, az amplitúdó-moduláltat abszorpciós spektrum adatbázissal is összehasonlítottam. A mérések során a 2f üzemmódot is teszteltem, ennek a célja csak a funkció működésének az igazolása volt. Meghatároztam az optimális modulációs paramétereket is.

### *Kalibráció*

A rendszer érzékenységének meghatározásához a korábban bemutatott nedvesség-generátort használva kalibrációs méréseket végeztem két elnyelési vonalon, a lézer hangolási tartományában lévő legerősebben (1392,5 nm,  $3,7 \times 10^{-5}$  ppm  $\times$  m<sup>-1</sup>), valamint egy gyengébben (1392,8 nm,  $1,5 \times 10^{-6}$  ppm  $\times$  m<sup>-1</sup>) is. A második esetben a lézer teljesítményét is lecsökkentettem 5 mW-ra a maximális áramerősségének 25 mA-ra való csökkentésével. A csökkentett érzékenységű mérésre az alkalmazott nedvességgenerátor kis koncentrációkon való bizonytalanságának kiküszöbölése érdekében volt szükség.

### *Stabilitás tesztelése*

A rendszer stabilitásának meghatározásához kis áramlási sebességgel metánt vezettem a fotoakusztikus kamrába. A metánnak ezen a tartományon egy igen sok vonalból álló, lényegi karakterisztikával nem rendelkező gyenge elnyelése van, így 100% metán esetén is kis fotoakusztikus jelet lehet kelteni. A lézert 1393,3 nm körüli hullámhosszra állítottam be. Ezen a tartományon a vízgőznek igen kismértékű az elnyelése, így a csövek, illetve a



mérőkamra faláról történő, ppm tartományba eső vízgőz deszorpció nem befolyásolta a méréseket. 1 s integrálási idő mellett 1 órán keresztül rögzítettem a fotoakusztikus jelet.

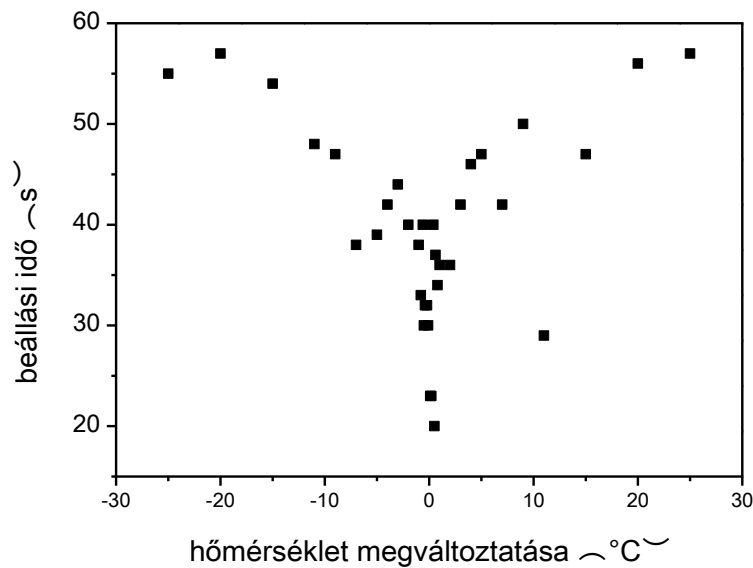
### *Mérési eredmények*

#### *A rendszer működése*

A rendszert definiáló FPGA program fordítási ideje nagyjából két órát vesz igénybe, de ezt elegendő csak egyszer elvégezni. Az FPGA chip erőforrásainak nagyjából 60%-át veszi igénybe a jelenlegi program. Mérések során az RT processzor átlagos terhelése 30-50% között változik, és sohasem nagyobb 70%-nál. Ezek a terhelésértékek azt mutatják, hogy a rendszerben még jelentős tartalék van új ötletek, mérési módok kipróbálására, tesztelésére.

#### *Lézer hőmérséklet-stabilizálása*

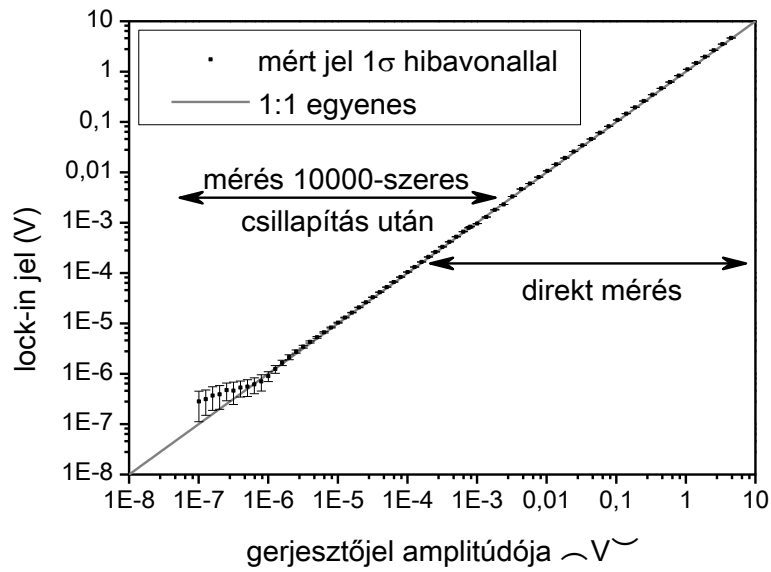
A lézer hőmérsékletstabilizálásához kiadott vezérlőfeszültségnek, valamint a lézerben lévő NTC hőmérőn eső feszültségnek meg kellene egyeznie, azonban lézerhőmérséklet- függő eltérés mérhető a két érték között, melynek a nagysága 0-0,2 °C között változik. Ez az eltérés zajszinten belül reprodukálható, így a mérőrendszerre jellemző konstansként lehet kezelni. Ennek megfelelően –elsősorban kényelmi okokból– a visszamért hőmérséklet-értékeket egy harmadfokú polinomot használva korrigálok, így a hőmérséklet stabilizálódása után 0,011 °C-nál kisebb az eltérés a célhőmérséklet és a mért hőmérséklet között. A fenti kalibráció után a mért hőmérséklet zaja 2 órás mérés során 0,21 m°C volt, ami 21 fm hullámhossz-bizonytalanságnak felel meg. Ebben az értékben azonban nem csak a hőmérséklet bizonytalansága van benne, hanem az alkalmazott vezérlő zaja, valamint a vezetékek által összeszedett zaj is. A 48 órás stabilitásvizsgálat során az átlagértékhez képest  $\pm 0,8$  m°C-nál nagyobb eltérést nem mértem, ami megfelel a PI vezérlő adatlapjában szereplő 0,8 m°C hosszútávú driftnek. Különböző hőmérsékletekről kiindulva a lézer hőmérséklete 15 °C munkapontra  $\pm 1$  m°C-on belül stabilizálódott. A hőmérséklet teljes stabilizálódásához szükséges idő 20 és 60 másodperc között változik a hőmérséklet változtatása mértékének függvényében (M5. ábra). Ez a stabilizálódási idő repülőgépes alkalmazások esetén teljesen megfelelő, azonban egyéb alkalmazásokhoz már lassú lehet. Ezért a jövőben meg kell vizsgálni a gyorsítás lehetőségeit. 1 °C-nál kisebb hőmérséklet változtatás esetén 2-7 másodperc alatt a hőmérséklet 10 m°C pontossággal eléri a célhőmérsékletet. Ezt az érték annyiból érdekes, hogy ez utóbbi hőmérséklet bizonytalanság a VT elektronikában beállítható legkisebb megkövetelt hullámhossz-bizonytalanság.



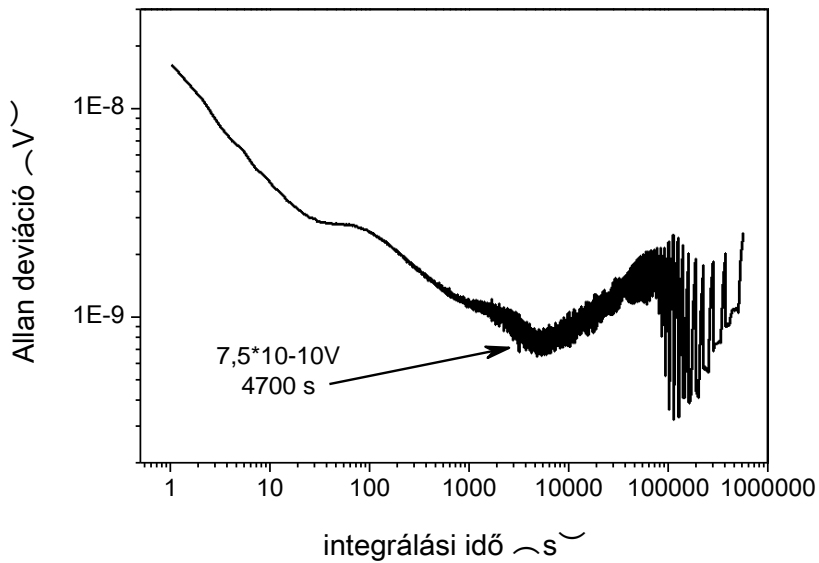
M5. ábra. A lézer hőmérsékletének zajszinten belüli stabilizálódásához szükséges idő a hőmérséklet-változtatás mértékének függvényében.

#### Lock-in erősítő

A Lock-in erősítő, – melyet nem csak fotoakusztikus mérések során lehet alkalmazni – karakterisztikája egészen 300 nV jelszintig zajszinten belül lineáris 1 s integrálási idő mellett. A felső detektálási küszöböt az ADC modul  $\pm 4,5$  V-os limitje jelenti. Ez 7,2 nagyságrend lineáris karakterisztikájú dinamikus tartományt jelent. A hosszú távú stabilitásteszt kiértékelése során meghatározott Allan deviáció értéke 4700 s, azaz optimális integrálási idő mellett 750 pV volt, ami 9,8 nagyságrendnyi dinamikus tartományt jelent. Érdekeség, hogy a 750 pV nagyjából 1/700-ad része az ADC modul felbontóképességének.



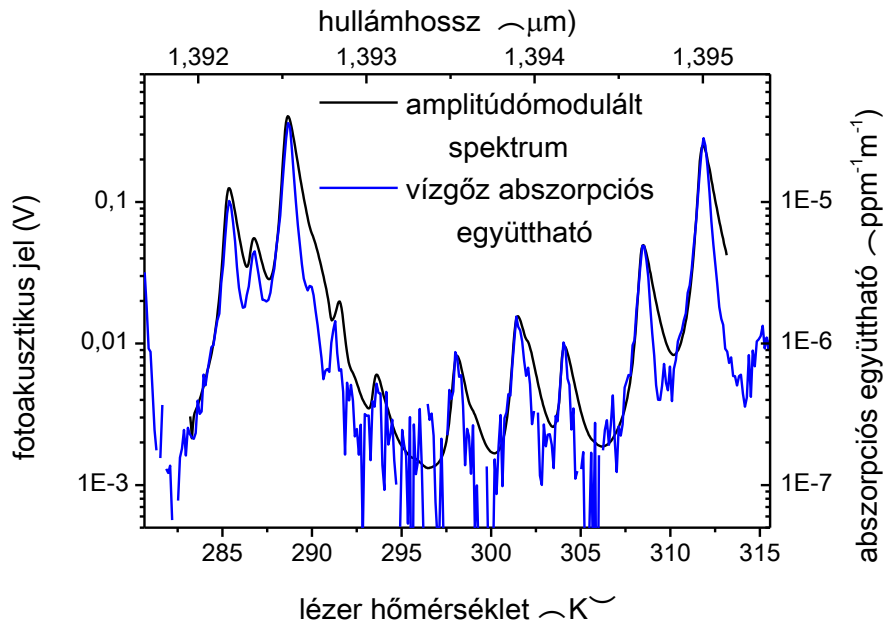
M6. ábra. Az implementált lock-in erősítő linearitása és dinamikus tartománya.



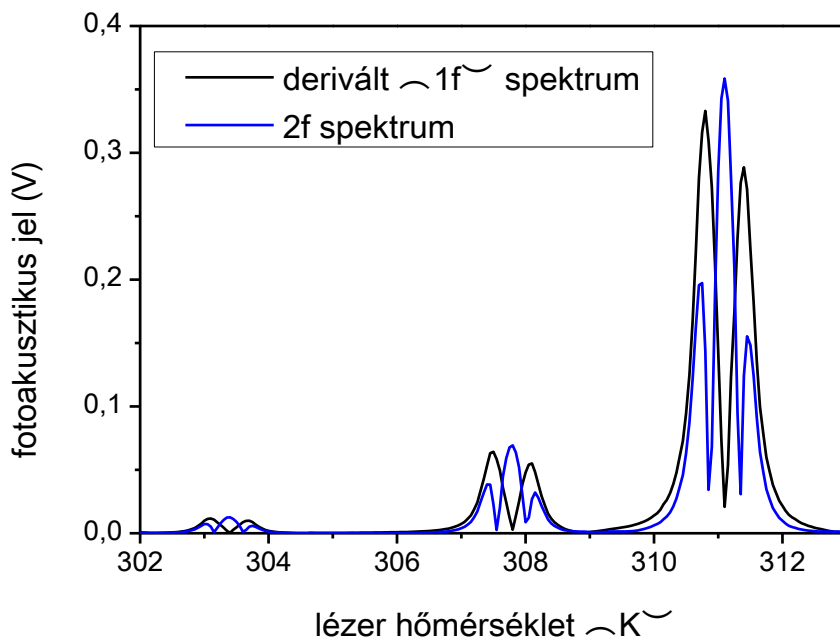
M7. ábra. Az implementált lock-in erősítő Allan deviációja az átlagolási idő függvényében.

Fotoakusztikus funkciók tesztelése

A mérőrendszerrel felvett amplitúdó-modulált spektrum jó egyezést mutat adatbázis-béli értékekkel (M8. ábra). Hullámhossz-moduláció esetén mind  $1f$ , mind  $2f$  detektálás esetében jellegre helyes spektrumokat kaptam (M9. ábra).



M8. ábra. Mért hullámhosszmodulált spektrum összehasonlítása a PNNL adatbázissal.

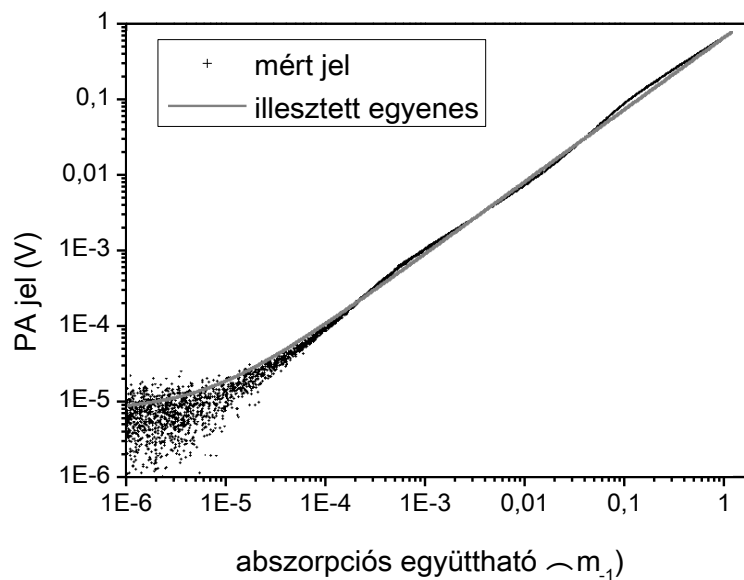


M9. ábra. Hullámhossz-moduláció esetén mért 1f és 2f spektrumok. A 2f spektrumot 50-nel megszoroztam a jobb láthatóságért.

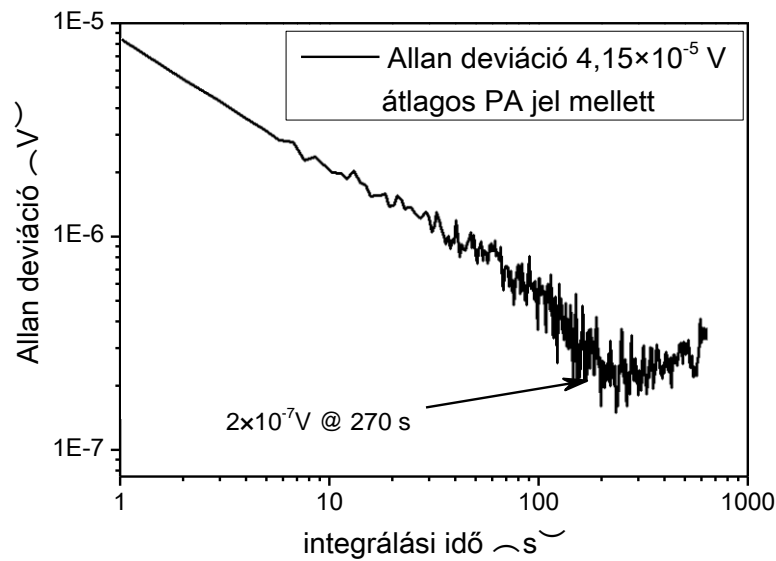
A kalibráció kiértékelése során a gyengébb elnyelési vonalon elvégzett mérést korigáltam a teljesítmények arányával és a M10. ábrán található kalibrációs görbét kaptam. A mért fotoakusztikus jel 4,5 nagyságrenden keresztül lineárisan növekszik az abszorpciós együtthatóval, a kalibrációs görbe meredeksége 0,64 V/m. A mért legnagyobb fotoakusztikus

jel mintegy egy nagyságrenddel kisebb, mint a lock-in felső detektálási korlátja, tehát a rendszer dinamikus tartománya legalább 5,5 nagyságrend 1 s integrálási idővel.

Amikor metánt vezettem a fotoakusztikus kamrába 41,5  $\mu\text{V}$  átlagos fotoakusztikus jel mellett 6,15  $\mu\text{V}$  zaja volt a mérésnek. A stabilitásteszt Allan deviáció (M11. ábra) kiértékeléséből azt az eredményt kaptam, hogy a rendszerhez tartozó optimális integrálási idő 270 s, amikor a rendszer zaja 200 nV. Felhasználva a korábban meghatározott érzékenység értéket azt kapjuk, hogy a rendszer által kimutatható legkisebb optikai abszorpció változás értéke ( $3\sigma/\text{érzékenység}$ )  $2,9 \times 10^{-5}$  illetve  $9,4 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$  1 illetve 270 s integrálási idők mellett. A lock-in erősítő felső detektálási küszöbéhez  $7 \text{ m}^{-1}$  abszorpciós együttható tartozik, tehát a rendszer dinamikus tartománya fotoakusztikus mérések során 5,8 illetve 7,5 nagyságrend 1 illetve 270 s integrálási idő mellett.



M10 ábra. Az elvégzett kalibráció eredménye. A rendszer érzékenysége  $0,64 \text{ Vm}^{-1}$ .



M11. ábra. A mért fotoakusztikus jel Allan deviációja az átlagolási idő függvényében.

## Összegzés

A kutatócsoportban korábban kifejlesztett és a fotoakusztikus spektroszkópiai mérőrendszerekben alkalmazott vezérlőelektronika egyre kevésbé felelt meg a tudomány, illetve a technika állásának, ami egyre inkább korlátozta a mérőrendszerek szélesebb körű alkalmazását. Ez igaz a repülőgépes vízgőzmérő esetében is, ahol a minél pontosabb rendszervezérlés mellett a kis méret és tömeg is alapvető fontosságú. Az alkalmazott vezérlőelektronika kiváltására egy ipari beágyazott vezérlőre (NI SBRIO 9264) alapozva, fotoakusztikus spektroszkópiai mérésekhez megterveztem és elkészítettem egy új kisméretű és tömegű mérésvezérlő és adatgyűjtő rendszer hardverét. A mérőrendszer részeként megterveztem és elkészítettem az összes szükséges perifériát, úgy, mint feszültségvezérelt lézermeghajtó áramkör, PI vezérlés alapú lézer hőmérséklet stabilizálás, differenciális mikrofonerősítő, valamint egyéb kiegészítő szenzorillesztő áramkörök. Az elvégzett tesztek során az összes áramkör kifogástalanul működött. A korábban használt mérésvezérlő elektronikához képest jelentős előrelépést sikerült elérni a lézer hőmérsékletének stabilitásában: 1 mK-ről 0,21 mK-re csökkent a hőmérséklet bizonytalansága valamint az érzékenység-váltás nélküli dinamikus tartományt 3,5-ről 5,8 nagyságrendre növeltem. Az új vezérlőelektronikára alapozva a mérőrendszer előreláthatóan 40%-kal kisebb méretben illetve 50-70%-kal kisebb tömegben készíthető el.

Megterveztem és LabVIEW fejlesztői környezetben elkészítettem az új mérésvezérlő és adatgyűjtő elektronika szoftverét, ami definiálja a rendszer működését beleértve az összes

analóg és digitális ki és bemenet vezérlését, a mikrofonok jeleinek a digitalizálását és lock-in eljárással való feldolgozását akár  $2(n)f$  technikával is. Az implementált lock-in erősítő PLL (phase locked loop) alapú jelgenerátoron és szintén PLL alapú demoduláción alapul. Két jelgenerátort (lézer árammeghajtás) és két bemenet (mikrofonerősítő) jelfeldolgozását valósítottam meg: bármelyik jelgenerátorhoz szimultán módon hozzá lehet rendelni bármelyik bemenetet akár  $1f$ , akár  $2f$  lock-in feldolgozáshoz. A programban jelentős változtatás nélkül ez kibővíthető több jelgenerátorra és bemenet feldolgozására is, akár magasabb rendű harmonikusokon is. A rendszer erőforrásainak alacsony kihasználtsága (60%) révén, szükség esetén új funkciók, mérési rutinok is implementálhatóak.