

PHD-ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Légkörkutatósi célú fotoakusztikus spektroszkópián alapuló kétcsatornás vízgőz mérő rendszer fejlesztése

Szerző:

Tátrai Dávid

Témavezetők:

Prof. Dr. Szabó Gábor

egyetemi tanár

Dr. Bozóki Zoltán

tudományos tanácsadó

Fizika Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem,

Természettudományi és Informatikai Kar

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

2015

Szeged

1 Bevezetés

A légköri vízgőz- és teljes víz (azaz vízgőz plusz felhő- eső- és jégcseppek) koncentráció mérés alapvető fontossággal bír a klímakutatásban, hiszen a légköri vízgőz és a felhők az üvegházhatás kb. 75%-áért felelősek. Ugyanakkor a mérést nehezíti, hogy a légkör nedvességtartalma jelentős tartományban változik: talajszinten (azaz 1 bar nyomáson) a trópusokon akár 40000 ppmV, míg a troposzféra tetején illetve a sztratosféra alsóbb rétegeiben, azaz 10-12 km-es tengerszint feletti magasságban és 200 mbar körüli nyomáson 1,5 ppmV vízgőz-koncentráció is előfordulhat. Ráadásul a vízgőz koncentrációja mind térben, mind időben általában jelentős inhomogenitásokat mutat; gondoljunk például a gyorsan változó időjárásra. A nagy tér- és időfelbontást megkövetelő atmoszférikus vízgőzmérések egyik lehetséges platformja a menetrend szerint közlekedő repülőgépek, hiszen manapság a repülőgép útvonalak sűrűn behálózzák a Földet. Az ilyen vizsgálatokhoz hozták létre 20 évvel ezelőtt a MOZAIC projektet, melyben kapacitív szenzorok segítségével, utasszállító repülőgépekkel monitorozzák a légkör vízgőz koncentrációját. A közelmúltban indult a hasonló célú IAGOS projekt, amelynek keretein belül a MOZAIC-hoz hasonlóan jelenleg a vízgőz koncentrációját mérik (számos egyéb légköri komponens mellett), de a tervek között szerepel a teljes víztartalom mérése is. Jelenleg a CARIBIC projekt keretein belül végeznek rendszeres vízgőz-koncentráció és teljes víztartalom-mérést, még hozzá a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszéken

működő Fotoakusztikus Kutatócsoport által fejlesztett műszerrel, melynek fejlesztésében magam is tevékenyen részt vettem.

Egy repülőgépre telepíthető vízgőz és teljes víztartalom mérő műszerrel szemben alapvető elvárás, hogy:

- A műszer nagyfokú precizitással (0,3 ppmV + 1% relatív) és pontossággal (lehetőleg legalább $\pm 5\%$ relatív) rendelkezzen a repülés alatt előforduló nyomások és koncentrációk mellett. A vízgőz és a teljes víztartalom párhuzamos mérése egyetlen műszerrel legyen kivitelezve, hiszen így a két mennyiség közötti kismértékű eltérés is pontosan mérhető, szemben azzal az esettel, amikor a két mennyiséget két különböző műszer méri.
- Legyen minél kisebb a műszer válaszideje, mivel csak így biztosítható a repülőgép nagy utazási sebessége mellett a kellő térbeli felbontás.
- A műszer mérete és tömege legyen minél kisebb, minimalizálva a mérés által jelentett többletköltséget a repülőgép üzemanyag-fogyasztásában.
- A műszer folyamatosan és felügyelet nélkül, azaz teljesen automatizáltan, autonóm módon működjön.
- Legyen ellenálló rázkódásokkal, környezeti zajokkal szemben.
- A kalibrálás, karbantartás iránti igény fél évnél gyakrabban ne vetődjön fel.

- A műszer rendelkezésre-állási ideje legyen gyakorlatilag folyamatos, ami félévenkénti, maximálisan 1 napos kalibrálási, karbantartási időt feltételezve évi 363 nap, azaz 99.45%.
- A műszer egy későbbi, teljesen kifejlesztett változatának meg kell majd felelnie az igen szigorú repülőgép-ipari biztonsági előírásoknak is.

A kutatócsoportban korábban kifejlesztett és a PA spektroszkópiai mérőrendszerekben alkalmazott vezérlőelektronika egyre kevésbé felelt meg a tudomány, illetve a technika állásának, ami egyre inkább korlátozta a mérőrendszerek szélesebb körű alkalmazását. Ez fokozottan igaz a repülőgépes vízgőzmérő esetében, ahol a minél pontosabb rendszervezérlés mellett a kis méret és tömeg is alapvető fontosságú. A Szegeden kifejlesztett műszer a fenti követelményeknek csak részben felelt meg, ugyanakkor előnyös tulajdonságai kiváló alapot biztosítottak az általam elvégzett továbbfejlesztéshez.

Doktori munkám kezdetén kapcsolódtam be a Fotoakusztikus Kutatócsoport munkájába, feladatomban első lépésben a korábbi rendszer hiányosságainak feltérképezése, majd azokra megoldások kidolgozása, megvalósítása volt. Végül igazolnom kellett, hogy az általam kidolgozott megoldások valóban előrelépést jelentettek a rendszer korábbi változatához képest.

2 Célkitűzés és a kutatás menete

Doktori munkám során célul tűztem ki a Szegedi Tudományegyetemen kifejlesztett, repülőgépre telepíthető kétcsatornás PA nedvességmérő- műszer megbízhatóságának, pontosságának javítását a teljes működési tartományában (100-1000 mbar, 1-40000 ppmV), a műszer alkalmassá tételét az önálló működésre, valamint a műszer méretének és tömegének jelentős mértékű csökkentését.

Ennek keretein belül:

Új eljárást dolgoztam ki a műszerben alkalmazott diódalézer hullámhosszának precíz és pontos beállítására.

Kidolgoztam egy új, a rendszer pontosságát alapvetően meghatározó kalibrálási és jelkiértékelési eljárást, melynek segítségével a kalibrálás során alkalmazott referenciaműszerhez képest 2%-os pontosság érhető el bármely, működési tartományon belüli koncentráció és nyomás esetén.

Elkészítettem egy új mérőrendszert, amely alkalmazásával mind laboratóriumi, mind független összehasonlító tesztek során igazoltam a műszer pontosságát, megbízhatóságát, azaz a korábbi fejlesztéseim eredményeinek gyakorlati alkalmazhatóságát.

A mérőrendszer tömegének és méretének csökkentéséhez elkészítettem egy új, jelentős mértékben méret- és súlycsökkentett mérésvezérlő és adatgyűjtő rendszert.

3 Új tudományos eredmények

T1: DFB diódalézerek hullámhosszának munkapontra való beállítása pontosságának növelése:

A kutatócsoport által korábban kidolgozott – elosztott visszacsatolású diódalézerek hullámhosszának beállítására szolgáló – eljárást új, fázistolási görbe inflexiós pontjának meghatározásán alapuló jelkiértékelési algoritmus kifejlesztésével sikerült hozzávetőlegesen egy nagyságrenddel pontosabbá tennem. Kísérletileg igazoltam, hogy az eljárás alkalmazásával a hullámhossz beállítás bizonytalansága (1σ) 50 fm értékre csökkenthető (ami 4×10^{-8} relatív hullámhossz-bizonytalanságnak felel meg). Továbbá módszert dolgoztam ki, amelynek segítségével az eljárás által meghatározott hullámhossz-referencia értékeket megfelelő módon korrigálni lehet, amennyiben a légköri nyomás megváltozik. Megállapítottam, hogy hozzávetőlegesen 10 mbar nyomásváltozás okoz akkora eltérést, amelynél a korrekciós módszert már alkalmazni szükséges. Megjegyzendő, hogy a kidolgozott új eljárás precizitása révén alkalmas az elnyelési vonalak ütközési eltolódásának a vizsgálatára is.

T2: Kalibrációs és jelkiértékelési eljárás fejlesztése kétcsatornás fotoakusztikus vízgőz-koncentráció- mérő rendszerhez:

Kidolgoztam egy új kalibrálási és jelkiértékelési eljárást, amely a nyomás-koncentráció-PA jel térben kifestülő kalibrációs felület kísérleti meghatározásán alapul az alábbiak szerint: különböző, de konstans nyomásokon kell meghatározni a koncentráció függvényében a PA jel nagyságát. A különböző nyomásokon kapott kalibrációs görbéket felhasználva a pillanatnyi nyomás és a PA jel nagyságából egy interpolációs eljárással lehet meghatározni a koncentráció pontos értékét. A bemutatott eljárás alkalmazásával, a PA 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, szemben a korábban alkalmazott eljárással, amelynek pontossága ugyanilyen körülmények között (a nyomástól és a koncentrációtól függően) akár egy nagyságrenddel is rosszabb volt. Korábban, a méréseknek ezt a pontosságát a változó nyomás mellett nem lehetett megvalósítani. További előnye az új eljárásnak, hogy az adatok kiértékelése néhány milliszekundum időt vesz igénybe mérési pontonként, így valós idejű jelkiértékelésre is lehetőség van.

T3: 4. Új mérőrendszer elkészítése, pontosságának, megbízhatóságának igazolása mind laboratóriumi, mind pedig repülőgépes összehasonlító mérések során:

Megterveztem és elkészítettem egy új kétcsatornás vízgőz-koncentráció- mérő- rendszert, melyben implementáltam az 1. és 2. tézispontokban bemutatott eljárásokat. A mérőrendszert független összehasonlító mérések során teszteltem mind laboratóriumi, mind repülőgépes mérések során. Mindkét esetben a széles mérési tartomány miatt két műszert kellett referenciaként használnom, egyet alacsony, egyet pedig magas koncentrációk esetén. Az új mérőrendszer az összes mérés során megbízhatóan, a referencia-műszerekhez képest tipikusan 5%-on belüli eltéréssel működött a teljes vizsgált nyomás és koncentráció tartományon. A mérőrendszer fejlesztése során hasonló pontosságot korábban nem sikerült elérni

T4: Mérésvezérlő és adatgyűjtő rendszer hardverének tervezése és elkészítése fotoakusztikus spektroszkópai mérésekhez:

A repülőgépes alkalmazások kiterjesztéséhez elengedhetetlenné vált a rendszer lényeges továbbfejlesztése. Ezért az alkalmazott vezérlőelektronika kiváltására egy ipari beágyazott vezérlőre (NI SBRIO 9264) alapozva, PA spektroszkópai mérésekhez megterveztem és elkészítettem egy új kisméretű és tömegű mérésvezérlő és adatgyűjtő rendszer hardverét. A mérőrendszer részeként megterveztem és elkészítettem az összes szükséges perifériát, azaz a feszültségvezérelt lézermeghajtó áramkört, a PI vezérlés alapú lézer hőmérséklet stabilizálást, differenciális mikrofonerősítőt, valamint egyéb kiegészítő szenzorillesztő áramköröket. Az elvégzett tesztek során az összes áramkör kifogástalanul működött. A korábban használt mérésvezérlő elektronikához képest jelentős előrelépést sikerült elérnem a lézer hőmérsékletének stabilitásában: 1 m°C-ról 0,21 m°C-ra 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.

T5: Mérésvezérlő és adatgyűjtő rendszer szoftverének tervezése és elkészítése fotoakusztikus spektroszkópai mérésekhez:

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.

4 A tézisekhez kapcsolódó publikációk:

T1:

D. Tátrai, Z. Bozóki and G. Szabó

Method for wavelength locking of tunable diode lasers
based on photoacoustic spectroscopy

Optical Engineering 59 096104.

doi: 10.1117/1.OE.52.9.096104

IF: 0.958

Z. Bozóki, **D. Tátrai**, G. Szabó:

Eljárás és összeállítás hullámhossz-hangolható fényforrás
hullámhosszának stabilizálására abszorpciós spektroszkópiai
jeldetektálás alapján

Magyar szabadalom

Bejelentve: 2011.12.23.

Elfogadva: 2015.05.27.

Lajstromszám: 230073

T2, T3:

D. Tátrai, Z. Bozóki, H. Smit, C. Rolf, N. Spelten, M. Krämer,
A. Filges, C. Gerbig, G. Gulyás, and G. Szabó

Dual-channel photoacoustic hygrometer for airborne
measurements: background, calibration, laboratory and in-
flight intercomparison tests

Atmos. Meas. Tech., 8, 1–10, 2015

doi:10.5194/amt-8-1-2015

IF: 3.206 (2013)

T4, T5:

D.Tatrai, Z. Bozoki, G. Gulyas, G. Szabo

Embedded system based data acquisition and control
system for photoacoustic spectroscopic applications

Measurement, Volume 63, March 2015, Pages 259-268

doi:10.1016/j.measurement.2014.12.028

IF: 1.526 (2013)

5 Egyéb publikációk

5.1 Cikk

2015

Christian Rolf, Jessica Meyer, Cornelius Schiller, Susanne Rohs, Nicole Spelten, Armin Afchine, Martin Zöger, Nikolay Sitnikov, Troy D. Thornberry, Andrew W. Rollins, Zoltan Bozóki, **David Tátrai**, Volker Ebert, Benjamin Kühnreich, Peter Mackrodt, Ottmar Möhler, Harald Saathoff, Karen H. Rosenlof, Martina Krämer

Two decades of water vapor measurements with the FISH fluorescence hygrometer: a review

Atmospheric Chemistry and Physics Discussion 15, 7735-7782, 2015

doi:10.5194/acpd-15-7735-2015

2013

Z. Gyori, V. Havasi, D. Madarász, **D. Tátrai**, T. Brigancz, G. Szabó, Z. Kónya, A. Kukovecz

Luminescence properties of Ho³⁺ co-doped SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺ long-persistent phosphors synthesized with a solid-state method

Journal of Molecular Structure, Volume 1044, 24 July 2013, Pages 87-93

doi:10.1016/j.molstruc.2012.11.008

IF: 1.643

2010

Z. Győri, **D. Tátrai**, F. Sarlós G. Szabó, Á. Kukovecz, Z. Kónya, I. Kiricsi
Laser-induced Fluorescence Measurements On CdSe Quantum Dots
Processing and Application of Ceramics 4 [1] (2010) 33–38

5.2 Konferencia előadások:

2015

Atmospheric Ice Nucleation Workshop, Wien, Austria, 11, April

D. Tátrai, N. Bors, E. Zs. Jasz, G. Gulyas, Z. Bozoki, G. Szabo
Two channel airborne hygrometer system for cloud
water/ice content determination

Repüléstudományi konferencia, Szolnok, Hungary; 9, April

D. Tátrai, N. Bors, G. Gulyas, Z. Bozoki, G. Szabo
Kétcsatornás vízgőz-koncentráció-mérő rendszer
repülőgépes alkalmazásokhoz
/Two channel hygrometer system for airborne
measurements/

2014

UAV Workshop, Szolnok, Hungary; 21, November

Weidinger Tamás, Bottyán Zolt, Gyöngyösi András Zénó, Istenes Zoltán, Szabó Zoltán, Balczó Márton, Varga, Árpád, Bíróné Kircsi Andrea, Horváth Gyula, **Tátrai Dávid**, Bozóki Zoltán, Józsa János, Kiss Melinda, Bordás Árpád, Wantuch Ferenc, Gemma Simó Diego, Joan Cuxart Rodamilans, Burkhart Wrenger

A pilótánélküli repülőeszközök szerepe a határréteg kutatásban – nemzetközi mérési expedíció Szegeden
/Role of UAV-s in boundary layer research – international measurement campaign at Szeged/

Research Aircraft Operations Conference; London, UK, 5 November

Zoltan Bozoki, **David Tatrai**, Gabor Szabo

Dual channel hygrometer for atmospheric research

NIDays 2014 Budapest; Budapest, Hungary; 4, November

Tátrai Dávid

Fotoakusztikus spektroszkópiai mérőrendszer fejlesztése ipari-környezetvédelmi mérésekhez

MOZAIC-IGOS Scientific symposium on atmospheric composition observation by commercial aircraft; Toulouse, France; 12-15 May

David Tatrai, Zoltan Bozoki, Andreas Zahn, Herman Smit, Gabor Szabo

Development of an airborne dual-channel hygrometer based on photoacoustic spectroscopy

ISARRA 2014; Odense, Denmark; 27, May

J. Cuxart, T. Weidinger, Burkhard Wrenger, M.A. Jimenez, G. Simo, D. Gomila, H. Warmers, A. Z. Gyongyosi, Z. Istenes, Z. Bottyan, **D. Tatrai**, M. Kiss, J. Josza
Joint Surface Budget Station, Tethered Balloon and RPAS
Campaign SEABREEZE13 and PABLS13

2013

CPPTA 2013; Warsaw, Poland; 25-27 September

D. Tatrai, Z. Bozóki, G. Gulyas, A. Varga, G. Szabó
Photoacoustic spectroscopy based dual channel hygrometer
for airborne applications

Avionics Europe; Munich, Germany; 21-22 March

Zoltán Bozoki, **David Tatrai**, Gabor Szabo
The Importance and Technology for Measuring Atmospheric
Humidity in Airborne Applications

2008

European Congress on Molecular Spectroscopy

Z. Győri, **D. Tatrai**, F. Sarlós G. Szabó, Á. Kukovecz, Z. Kónya,
I. Kiricsi
Laser-induced Fluorescence Measurements On CdSe
Quantum Dots

5.3 Poszterek:

2015

EGU 2015 Wien, Austria, 12-17, April

David Tatrai, Gabor Gulyas, Zoltan Bozoki, Gabor Szabo

Dual channel airborne hygrometer for climate research

EGU 2015 Wien, Austria, 12-17, April

Two decades of water vapor measurements with the FISH fluorescence hygrometer: A review

Christian Rolf, Jessica Meyer, Cornelius Schiller, Susanne Rohs, Nicole Spelten, Armin Afchine, Martin Zöger, Nikolay Sitnikov, Troy D. Thornberry, Andrew W. Rollins, Zoltan Bozóki, **David Tatrai**, Volker Ebert, Benjamin Kühnreich, Peter Mackrodt, Ottmar Möhler, Harald Saathoff, Karen H. Rosenlof, and Martina Krämer

EGU 2015 Wien, Austria, 12-17, April

David Tatrai, Gabor Gulyas, Ervin Jasz, Noemi Bors, Zoltan Bozoki, Gabor Szabo

Technical aspects of the development of a dual channel airborne hygrometer

Repüléstudományi Konferencia, Szolnok , Hungary, 9, April

Tamás Weidinger, Cuxart, A. Z. Gyongyosi, B. Wrenger, Z. Istenes, Z. Bottyan, G. Simó, **D. Tatrai**, A. Jericevic, B. Matjacic, M. Kiss, and J. Jozsa

An experimental and numerical study of the ABL structure in the Pannonian plain

2014

Kvantumelektronika 2014; Budapest, Hungary; 29, November

A. Drozdy, Á. Börzsönyi, B. Kiss, M. Gstalter, N. Khodakovskiy,
D. Tátrai, K. Osvay, M.P.Kalashnikov

Cross-correlator for 532 nm picosecond pulses based on optical parametric amplification

Kvantumelektronika 2014; Budapest, Hungary; 29, November

Tátrai Dávid, Gulyás Gábor, Bozóki Zoltán, Szabó Gábor
Fotoakusztikus spektroszkópiai vízgőz-koncentráció- mérő-
rendszer repülőgépes légkörkutatáshoz
/Photoacoustic spectroscopic water vapor concentration
and total water measuring system for airborne atmosphere
research/

MMC 2014; Brdo, Slovenia; 15-18, September

D. Smorgon, N. Boese, V. Ebert and the **AquaVIT 2-B team**
Inter-comparison of airborne hygrometers and their
laboratory-reference – The AquaVit2-B campaign –

21st Symposium on Boundary Layers and Turbulence; Leeds, United Kingdom; 9 June

Tamás Weidinger, Cuxart, A. Z. Gyongyosi, B. Wrenger, Z. Istenes, Z. Bottyan, G. Simó, **D. Tátrai**, A. Jericevic, B. Matjacic, M. Kiss, and J. Jozsa
An experimental and numerical study of the ABL structure in the Pannonian plain (PABLS13)

MOZAIC-IAGOS Scientific symposium on atmospheric composition observation by commercial aircraft; Toulouse France; 12-15 May 2014

Christian Rolf, Martina Kraemer, Andreas Petzold, Nicole Spelten, Susanne Rohs, Patrick Neis, Rolf Maser, Bernhard Bucholz, Volker Ebert, **David Tatrai**, Zoltan Bozoki, Fanny Finger, and Marcus Klingebiel

Development and Evaluation of Novel and Compact Hygrometer for Airborne Research (DENCHAR): In-Flight Performance During AIRTOSS-I/II Research Aircraft Campaigns

EGU 2014; Wien, Austria; 1. May

David Tatrai, Daniella Nikov, Ervin Zsolt Jász, Zoltán Bozóki, Gábor Szabó, Tamás Weidinger, Zénó András Gyöngyösi, Melinda Kiss, János Józsa, Gemma Simó Diego, Joan Cuxart Rodamilans, Burkhardt Wrenger, and Zsolt Bottyán

Study of surface energy budget and test of a newly developed fast photoacoustic spectroscopy based hygrometer in field campaign Szeged (Hungary)

EGU 2014; Wien, Austria; 28 April

Denis Smorgon, Norbert Boese, Volker Ebert and the

AQUAVIT2-B Team

Airborne hygrometer calibration inter-comparison against a metrological water vapour standard

EGU 2014; Wien, Austria; 28 April

Herman G.J. Smit, Christian Rolf, Martina Kraemer, Andreas Petzold, Nicole Spelten, Susanne Rohs, Patrick Neis, Rolf Maser, Bernhard Bucholz, Volker Ebert, **David** Tatrai, Zoltan Bozoki, Fanny Finger, and Marcus Klingebiel
Development and Evaluation of Novel and Compact Hygrometer for Airborne Research (DENCHAR): In-Flight Performance During AIRTOSS-I/II Research Aircraft Campaigns

2013

Tempmeko 2013; Madeira, Portugal; October

D. Smorgon, O. Ott, N. Boese, V. Ebert and the **AQUAVIT2 B team**
Intercomparison of airborne hygrometers and their calibration reference against a traceable water vapor standard

EGU 2013; Wien, Austria; 9. April

Tibor Ajtai, Noémi Utry, Ágnes Filep, **Dávid Tátrai**, Zoltán Bozóki, and Gábor Szabó
Spectral characterisation of mineralogical components of dust, HULIS and winter time aerosol using multi-wavelength photoacoustic spectrometer. A laboratory and a field study

EGU 2013; Wien, Austria; 8. April


Zoltán Bozóki, **Dávid Tátrai**, Gábor Gulyás, Attila Varga, and Gábor Szabó
The Importance and Technology for Measuring Atmospheric Humidity in Airborne Applications

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Tátrai Dávid „*Légkörkutatósi célú fotoakusztikus spektroszkópián alapuló kétcsatornás vizsgálómérő rendszer fejlesztése*” című doktori értekezésének 1., 2., 3. 4. 5. tézispontjaiban szereplő, az alábbi cikkekben és szabadalomban közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

- Tátrai, D., Z. Bozóki, and G. Szabó, *Method for wavelength locking of tunable diode lasers based on photoacoustic spectroscopy*. Optical Engineering, 2013. **52**(9): p. 096104-096104, DOI: 10.1117/1.OE.52.9.096104 [T1]
- Bozóki, Z., D. Tátrai, and G. Szabó, *Eljárás és összeállítás hullámhossz-hangolható fényforrás hullámhosszának stabilizálására abszorpciós spektroszkópiai jeldetektálás alapján*. 2015. magyar szabadalom: 230073 [T1]
- Tátrai, D., Z. Bozóki, H. Smit, C. Rolf, N. Spelten, M. Krämer, A. Filges, C. Gerbig, G. Gulyás, and G. Szabó, *Dual-channel photoacoustic hygrometer for airborne measurements: background, calibration, laboratory and in-flight intercomparison tests*. Atmospheric Measurement Techniques, 2015. **8**(1): p. 33-42, DOI: 10.5194/amt-8-33-2015 [T2, T3]
- Tátrai, D., Z. Bozoki, G. Gulyas, and G. Szabo, *Embedded system based data acquisition and control system for photoacoustic spectroscopic applications*. Measurement, 2015. **63**: p. 259-268, DOI: 10.1016/j.measurement.2014.12.028 [T4, T5]

Szeged, 2015. június 15.



Prof. Dr. Szabó Gábor

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Tátrai Dávid „*Légkörkutatósi célú fotoakusztikus spektroszkópián alapuló kétcsatornás vizsgálómérő rendszer fejlesztése*” című doktori értekezésének 1., 2., 3. 4. 5. tézispontjaiban szereplő, az alábbi cikkekben és szabadalomban közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

- Tátrai, D., Z. Bozóki, and G. Szabó, *Method for wavelength locking of tunable diode lasers based on photoacoustic spectroscopy*. Optical Engineering, 2013. **52**(9): p. 096104-096104, DOI: 10.1117/1.OE.52.9.096104 [T1]
- Bozóki, Z., D. Tátrai, and G. Szabó, *Eljárás és összeállítás hullámhossz-hangolható fényforrás hullámhosszának stabilizálására abszorpciós spektroszkópiai jeldetektálás alapján*. 2015. magyar szabadalom: 230073 [T1]
- Tátrai, D., Z. Bozóki, H. Smit, C. Rolf, N. Spelten, M. Krämer, A. Filges, C. Gerbig, G. Gulyás, and G. Szabó, *Dual-channel photoacoustic hygrometer for airborne measurements: background, calibration, laboratory and in-flight intercomparison tests*. Atmospheric Measurement Techniques, 2015. **8**(1): p. 33-42, DOI: 10.5194/amt-8-33-2015 [T2, T3]
- Tátrai, D., Z. Bozoki, G. Gulyas, and G. Szabo, *Embedded system based data acquisition and control system for photoacoustic spectroscopic applications*. Measurement, 2015. **63**: p. 259-268, DOI: 10.1016/j.measurement.2014.12.028 [T4, T5]

Szeged, 2015. június 15.


.....
Dr. Bozóki Zoltán

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom arról, hogy Tátrai Dávid „*Légkörkutatósi célú fotoakusztikus spektroszkópián alapuló kétsatornás vízgőzmérő rendszer fejlesztése*” című doktori értekezésének 2., 3. 4. 5. tézispontjaiban szereplő, az alábbi cikkekben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

- Tátrai, D., Z. Bozóki, H. Smit, C. Rolf, N. Spelten, M. Krämer, A. Filges, C. Gerbig, G. Gulyás, and G. Szabó, *Dual-channel photoacoustic hygrometer for airborne measurements: background, calibration, laboratory and in-flight intercomparison tests*. Atmospheric Measurement Techniques, 2015. **8**(1): p. 33-42, DOI: 10.5194/amt-8-33-2015 [T2, T3]
- Tátrai, D., Z. Bozoki, G. Gulyás, and G. Szabo, *Embedded system based data acquisition and control system for photoacoustic spectroscopic applications*. Measurement, 2015. **63**: p. 259-268, DOI: 10.1016/j.measurement.2014.12.028 [T4, T5]

Szeged, 2015. június 15.



Gulyás Gábor