



Tátrai Dávid¹ – Bors Noémi² – Gulyás Gábor³ – Bozóki Zoltán⁴ – Szabó Gábor⁵

KÉTCSATORNÁS VÍZGŐZ-KONCENTRÁCIÓ- MÉRŐ RENDSZER REPÜLŐGÉPES ALKALMAZÁSOKHOZ⁶

A klímakutatásban, a meteorológiában nagyon fontos a légkör nedvességtartalma tér és időbeli eloszlásának, ennek változásának az ismerete. Ehhez in-situ méréseket kell végezni, amelyek egy lehetséges platformját a különböző, akár kutató, akár menetrend szerint közlekedő repülőgépek adják. Ezen mérési feladatok elvégzéséhez fejlesztettünk ki egy olyan kétcsatornás mérőrendszert, amellyel nem csak a levegő vízgőz tartalmát, hanem az esetlegesen jelen lévő felhők víz és/vagy jégtartalmát is nagy pontossággal meg lehet határozni a talajfelszíntől akár 15 km-es repülési magasságig. A műszer pontosságát számos laboratóriumi és repülőgépes vak összehasonlító mérés során igazoltuk. Az elmúlt időszakban a fejlesztések legfőbb iránya a műszer méretének és tömegének a csökkentése volt a pontosság és a válaszidő feláldozása nélkül. A műszer jelenlegi formájában egy 19"-es, 29 cm mély és 3U magasságú szabványos műszerdobozban kapott helyet 7,5 kg teljes tömeg mellett. A műszert, néhány, a megbízhatóságát igazoló mérési eredményt, valamint a legfrissebb fejlesztések eredményeit mutatjuk be.

TWO CHANNEL HYGROMETER SYSTEM FOR AIRBORNE APPLICATIONS

Knowing the space and time distribution of atmospheric moisture has an essential importance in the field of climate research and meteorology. For this purpose in-situ measurements are must – they can be based on research or scheduled aircrafts. For such measurements a two channel hygrometer system has been developed that can accurately measure not only the humidity of the atmosphere but the ice or liquid water content of the present clouds up to even 15 km flight level. The accuracy of the system has been proven through several blind laboratory and in-flight comparisons. Recently the developments were focused on the size and weight reduction without scarifying the accuracy or response time. Now the system can be placed in a 19"3U rack with 29 cm depth with 7.5 kg weight. The measurement system, some measurement results that prove its reliability and the latest developments are introduced.

BEVEZETÉS

A Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén, az MTA-SZTE Fotoakusztikus kutatócsoporttal és a Hilase Kft.-vel együttműködve két évtizede folynak fotoakusztikus spektroszkópiával kapcsolatos kutatások, a kutatási eredményekre alapozva pedig különböző mérőműszerek fejlesztése[1-8]. A kifejlesztett műszereket a földgáziparban, klinikai kutatásokban illetve környezetvédelmi-klímakutatási projektekből lehet elsősorban alkalmazni.

1 tudományos segédmunkatárs, Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék,

tudományos segédmunkatárs, MTA-SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport, tatraid@titan.physx.u-szeged.hu

2 hallgató, Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, borsnoemi11@gmail.com

3 Head of New Application Development, Hilase Kft., gabor.gulyas@hilase.hu

4 tudományos tanácsadó, Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék,
tudományos tanácsadó, MTA-SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport, zbozoki@physx.u-szeged.hu

5 egyetemi tanár, Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék,
kutatócsoport vezető, MTA-SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport, gszabo@physx.u-szeged.hu

6 Lektorálta: Dr. Ludányi Lajos, főiskolai tanár, NKE, ludanyi.lajos@gmail.com

Napjaink egyik legfontosabb kérdése a globális felmelegedés, hogy valahogyan megállítható vagy visszafordítható-e a folyamat. A klímaváltozást közvetlenül a növekvő üvegházhatás, az üvegházhatást okozó gázok koncentrációjának növekedése okozza. Ebben a folyamatban a legfontosabb légköri összetevő –halmazállapotától függetlenül– a víz. A levegőben lévő víz mennyiségét az emberiség közvetlenül nem, vagy csak alig tudja befolyásolni, azt elsősorban az óceánok párolgása határozza meg. Érdekes tény, hogy a modern repülőgépek klímára gyakorolt hatásában nagyobb szerepet játszik a széndioxid kibocsájtásuknál a vízgőz-kibocsájtásuk következtében esetlegesen kialakuló kondenzcsíkok [9-11]. A légkörben lévő víz mennyiségének tér és időbeli eloszlása dinamikusan változik. Talajszint közelében a vízgőz-koncentráció elérheti a 30–40000 ppm-et is, míg 10–20 km magasságban 200–100 mbar nyomás mellett 1 ppm-nél kisebb koncentrációk is előfordulhatnak. Akár klímakutatáshoz, akár meteorológiai előrejelzésekhez ezeknek az eloszlásoknak minél pontosabb ismerete, előrejelzése az egyik cél.

A légköri folyamatok modellezésének jelenleg a legnagyobb problémája, hogy a légkörről szerzett ismereteink nem kielégítőek, számos folyamat dinamikája még ismeretlen. A légkört leíró modelleket mérési eredményeken keresztül lehet validálni, tökéletesíteni. A légköri mérések történhetnek akár távoli érzékeléssel (műhold, sodar, radar...) vagy in-situ (meteorológiai ballon, repülőgép). Az egyes mérési technikák egymásnak kiegészítői lehetnek, de a távoli érzékeléssel begyűjtött adatokat in-situ mérési eredményekkel lehet csak validálni. A kutató-repülőgépes mérések nagy előnye, hogy lényegileg tetszőleges pálya mentén lehet méréseket végezni, szükség esetén többször is vizsgálva egy adott levegőtömeget, hátránya viszont, hogy igen költséges. Éppen ezért csak jól meghatározott tudományos cél érdekében alkalmazzák. Az 1980-as években felmerült a gondolat, hogy menetrend-szerint közlekedő utasszállító járatokra lehetne mérőműszereket telepíteni, hogy azok normál üzemmodjukban minimális pluszköltség mellett végezzenek légköri méréseket. Ha kellően sok repülőgépre telepítünk műszereket, akkor azok egy globális légkör-monitorozó hálózatot tudnának alkotni. Az első jelentősebb ilyen hálózat az 1994-ben indult MOZAIC⁷ [12] volt. keretein belül ózon- és vízgőz-koncentrációt mértek mintegy 60 repülőgéppel. 2002-ben indult a CARIBIC⁸ [13] project, amely keretein belül egy repülőgép belsejében havonta négy interkontinentális repülésre elhelyeznek egy különböző műszerekből álló, összesen mintegy másfél tonna tömegű konténert. Jelenleg ez a legszélesebb-körű légkör összetétel monitorozó rendszer. Jelenleg indul az IAGOS⁹ projekt, amelyben számos repülőgépre telepítenek különböző mérőműszer csomagokat. Mindegyik repülőgépen lesz egy alap csomag és egy kiegészítő. Az alap csomag közös, míg a kiegészítőből többféle is készült/készül. Ma már mind a MOZAIC, mind a CARIBIC project az IAGOS projekt részét képezi.

A repülőgépekre telepíthető műszereknek számos követelménynek meg kell felelniük a természetesen adódó igen szigorú biztonsági előírások mellett: hosszú távon megbízhatóan, automatizáltan kell működniük, kis méretűnek és könnyűnek kell lenniük, ellen kell állniuk a le- és felszállások, valamint a légköri örvények okozta rázkódásnak, különböző hőmérséklet és nyomásviszonyok mellett kell, hogy képesek legyenek pontosan működni, valamint a megfelelő térbeli feloldás eléréséhez rövid válaszidejűnek is kell lenniük. Vízgőz-koncentráció- mérés

⁷ Measurements of OZone, water vapour, carbon monoxide and nitrogen oxides by in-service Airbus airCraft

⁸ In-service Aircraft for a GlobalObserving System

⁹ Civil Aircraft for the Regular Investigation of the atmosphere Based on an Instrument Container



esetén a műszernek ráadásul igen jelentős dinamikus tartománnyal kell rendelkeznie, tízed ppm pontossággal kell, hogy képesek legyenek mérni 2–3 ppm koncentrációt, valamint extrém esetben akár 40000 ppm sem szabad, hogy károsítsa a műszert.

Az általunk fejlesztett és jelenleg bemutatott mérőrendszer –WaSUL-Hygro– jelenlegi formájában a fenti követelményeknek nem csak, hogy megfelel, hanem két csatornán is lehet vele méréseket végezni: megfelelő mintavevők alkalmazása esetén alkalmas meghatározni nem csak a vízgőz koncentrációt, hanem a jelen lévő felhők esőcsepp/jégkristály tartalmát is. A műszerünk egy korai változata 2005 óta része a CARIBIC projekt műszerparkjának, valamint a tervek szerint az IAGOS projekt egyik kiegészítő csomagja is tartalmazni fogja.

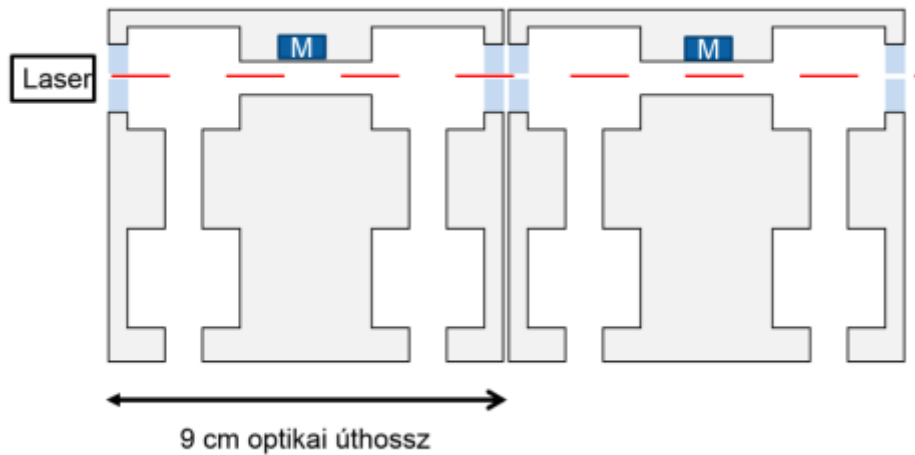
WASUL-HYGRO

Fotoakusztikus spektroszkópia

A kifejlesztett műszer a lézeres abszorpciós eljárások közül a fotoakusztikus spektroszkópián[14-17] alapul. Ha egy gázmintát megvilágítunk egy olyan modulált fényforrással, amelynek a fényét az el tudja nyelni, akkor a mintában periodikus hőmérséklet-ingadozás jön létre. A periodikus hőmérséklet-ingadozás hővezetés és hődiffúzió útján akusztikus hullámokat kelt. A keletkezett akusztikus hullámok egy kellően érzékeny mikrofonnal detektálhatóak. A keltett akusztikus hullámok intenzitása általában igen kicsiny, ezért azt általában egy megfelelő kialakítású akusztikus rezonátorban erősítik, és egy, a rezonátorba integrált mikrofonnal detektálják. Az akusztikus rezonátort egy fotoakusztikus kamrában[18-22] szokás kialakítani, amely feladatai közé tartozik a külső zajok kiszűrése, valamint a vizsgálandó gáz külvilágtól való izolálása is. 1. ábra A keltett hang intenzitása arányos a fényforrás P teljesítményével, a mikrofon M érzékenységgel, a gázra jellemző α moláris abszorpciós együtthatóval, az elnyelő gáz c koncentrációjával és a mérőkamrára jellemző C kamrakonstanssal.

$$PA = MCP\alpha c \quad (1)$$

A mikrofon jeléből erősítés után általában lock-in technikával határozzák meg a fotoakusztikus jel nagyságát. A keltett fotoakusztikus jel frekvenciája megegyezik a moduláció frekvenciájával, ezért a keltett akusztikus hullámok megfelelő erősítéséhez a fényforrás modulációs frekvenciáját az akusztikus rezonátor egyik rezonanciafrekvenciájával megegyezőre kell beállítani. Modern analitikai spektroszkópiában általában diódalézereket használnak fényforrásként, azok közül is a kis sávzélességű hangolhatókat. Mi ezek közül elosztott visszacsatolásút használunk.



1. ábra fotoakusztikus kamrák felépítése. M jelöli az integrált mikrofonokat.

WaSul-Hygro felépítése

A mérőrendszer három fő komponensből és kiegészítő gázkezelésből áll: vezérlőelektronika, mérőkamrák, diódalézer.

Vezérlőelektronika

A mérőrendszer alapjául egy ipari számítógép szolgál, ami korábban egy DSP alapú célhardver volt, melyet a Videoton Zrt. fejlesztett a kutatócsoport számára. A bemutatott összehasonlító méréseket e vezérlőelektronikára alapozott rendszerünkkel végeztük el. Az elmúlt időszakban kifejlesztettünk egy új vezérlőelektronikát[6], amely amellet, hogy méretben és tömegben is jelentősen kisebb, alkalmazhatósági és rendszerintegrációs szempontból is lényegesen fejlettebb. Ezen új vezérlőelektronikára alapozott rendszerünkkel még nem készültek összehasonlító mérések sem laboratóriumban, sem repülőgépre telepítve, a későbbiekben mindössze a segítségével megvalósított új fejlesztéseket fogjuk kiemelni.

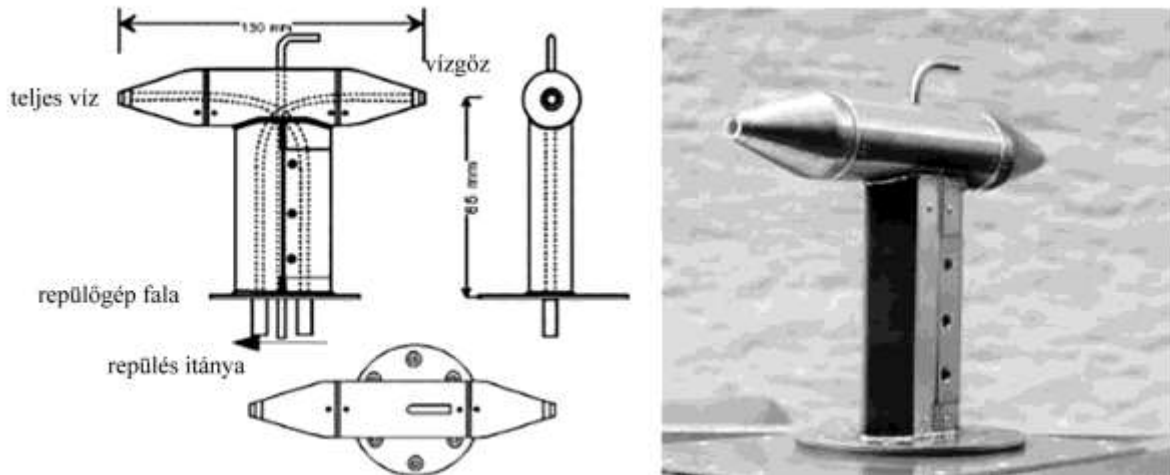
A két vezérlőelektronikában hardveresen és szoftveresen implementált legfontosabb funkciók:

- diódalézer hangolás;
- diódalézer modulálás;
- mikrofon jelének erősítése;
- lock-in erősítő alapú jelfeldolgozás;
- gázkezelés vezérlése.

Fotoakusztikus kamrák

Egy általunk használt fotoakusztikus kamrában az optikai úthossz mindössze 8–10 cm, így bennük a lézernyaláb intenzitásának csökkenése még nagy koncentrációk esetén is igen kis mértékű, a kamra optikai ablakán kilépő maradék nyalábot egy második, esetlegesen harmadik-negyedik mérőkamrába is be lehet vezetni. A további mérőkamrák felhasználhatóak arra, hogy ugyanazt a gázmintát több csatornán is analizáljuk egyszerre és átlagolással növeljük a mérés pontosságát, vagy pedig, hogy különböző gázáramokat analizáljunk egyszerre. A műszerünkben két mérőkamrát helyeztünk el, az egyiket egy gázfázisú mintavevőhöz pl.: repülőgépen oldalra vagy visszafelé néző cső, a másikat egy teljes levegő mintavevőhöz, pl. egy előre néző

csőhöz fűtött csövekkel csatlakoztatjuk. Az utóbbi mintavevő begyűjti az útjába kerülő eső-cseppeket, jégkristályokat, melyek részben már a mintavevőben, a torlónyomás miatti adiabatikus összenyomódás következtében, részben pedig a fűtött csövekben elpárolognak. Az első mérőkamrában vízgőz koncentrációt, a másodikban teljes-víz- tartalmat lehet meghatározni. 2. ábra. A két kamrában mért koncentrációk különbsége adja a jelen lévő felhők cseppfolyós vagy szilárd fázisú víztartalmát.



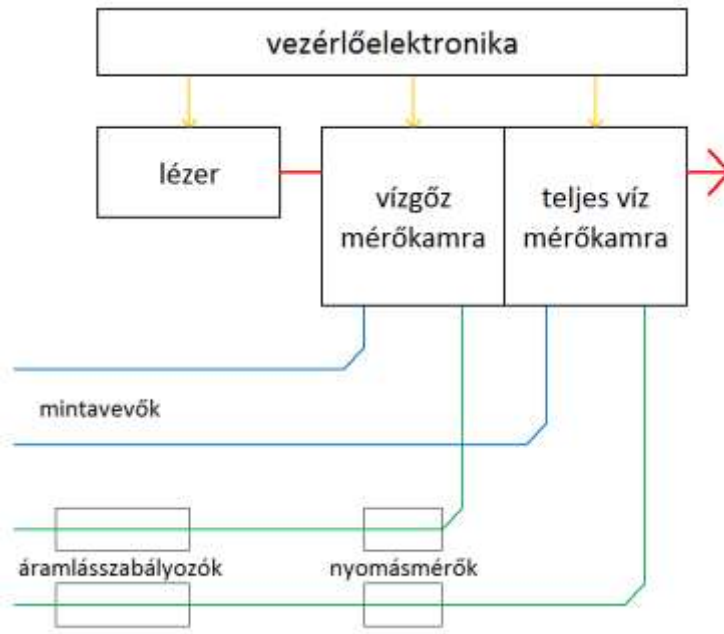
2. ábra mintavevő felépítése és fényképe [23]

Lézer

Fényforrásként egy 1392 nm hullámhossz körül hangolható 20 mW teljesítményű NEL NLK15GAAA típusú elosztott visszacsatolású diódalézert alkalmazunk. A lézer hangolási tartományában a vízgőznek számos elnyelési vonala van, az optimális érzékenység eléréséhez a lézert a legerősebbre (1392,6 nm) hangoljuk, és ott moduláljuk.

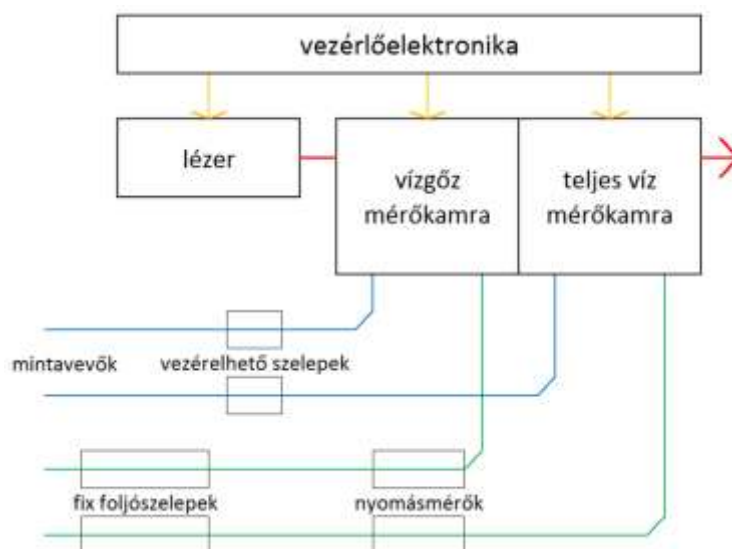
Gázkezelés

A gázkezelés tervezésekor a legfontosabb szempont az állandó, 0,5 slpm körüli áramlási sebesség biztosítása. Ekkor az áramlásból adódó sűrűlési zajok elhanyagolható mértékűek, viszont a mérőkamra átöblítése kellően gyors a megfelelő válaszüidő biztosításához. A későbbiekben ismertetett méréseknél a gázkezelés nagyon egyszerű volt, az áramlást egy vákuumpumpa segítségével biztosítottuk, annak egyenletességét pedig tömegáramlás-szabályozókkal. Ekkor a mérőkamrákban a nyomás lényegileg megegyezik a repülőgépen kívüli légnyomással. 3. ábra. A különböző spektroszkópiai eljárások az egyes anyagok elnyelési vonalainak nyomásfüggő alakváltozása következtében érzékenyek a nyomásváltozásra, ezért ez az elrendezés csak gondos, összetett kalibráció után összetett jelkiértékelés mellett használható csak.



3. ábra Wasul-Hygro sematikus rajza: sárga nyilak jelölik az elektromos kommunikációt, piros a lézernyalábot, kék vonalak a mintavevőket, zöldek pedig a gázkivezetéseket. A bemutatott mérési eredményeket ezen felépítésű rendszerrel értük el.

Ezen nehézségek leküzdésére az új vezérlőelektronikára alapozva elkészítettük a műszernek egy olyan változatát is, amelyben a nyomást állandó 150 mbar értéken lehet tartani, amelyet szükség esetén tovább lehet csökkenteni. A műszer ezen változatában az áramlást szintén egy vákuumpumpa biztosítja, annak állandóságát mérőkamránként egy-egy fix fojtószelep segítségével biztosítjuk. A nyomás stabilizálásához gázáramonként egy proporcionális szolenoid szeleppel – egy feszültséggel szabályozható túszeleppel (Aalborg PSV1S-VA) PI, proporcionális – integrális vezérléssel oldottuk meg. 4. ábra.



4. ábra: Wasul-Hygro új változatának a sematikus rajza. A 3. ábrán látható elrendezéshez képest a legfontosabb eltérést a vezérelhető szelepek jelentik, melyek segítségével biztosítunk állandó nyomást a mérések során.

Az elvégzett mérések, fejlesztések

Laboratóriumi összehasonlító mérések

A mérőrendszert a Jülichi Kutatóközpont¹⁰ ESF¹¹ légkör-szimulációs kamrájánál vak összehasonlító mérések során teszteltük az 1–15000 ppm koncentráció és 180–1000 mbar nyomástartományon. A mérőkamra referenciaműszerei: egy egyedi Lyman- α lumineszcencia elvű [24] mérőrendszer, valamint egy tükrös harmatpontmérő (General Eastern, D1311R). A referenciaműszerek a szimulációs kamra belsejében vannak elhelyezve, míg a WaSUL-Hygro egy fűtött csövön keresztül mintavételezte a levegőt; a két mérőkamra saját mintavevő csövei egy T-csatlakozóval közösítve voltak. A mintavevő cső vége a referenciaműszerekhez közel volt elhelyezve. Részben a nem nulla távolság, részben pedig a szimulációs kamra dinamikus tulajdonságai miatt nem kvázistatikus körülmények esetén – a kamrában fellépő térbeli inhomogenitások következtében – jelentős eltérések is tapasztalhatóak a referenciaműszerek körüli és a mintavételezett levegő vízgőz-koncentrációja között. Ezért a számszerűsített összehasonlításból ezeket a periódusokat kihagytuk, viszont a vonatkozó ábrákon bemutattuk. Az összehasonlítás során meghatároztuk a referenciaadatok és az általunk mért értékek közötti keresztkorrelációt is.

Repülőgépes összehasonlító mérések

A műszerünkkel részt vettünk egy repülőgépes vízgőz-koncentráció mérő műszerek tesztelésére, összehasonlítására szervezett mérési kampányban. A mérések bázisa Hohn, Németország volt, ahonnan kiindulva részben Németország, részben az Északi tenger és Skandinávia légtérben végeztünk méréseket nagyjából 12 km repülési magasságig. A repülőgép egy Learjet 36A típus volt a GFD GmbH. által üzemeltetve. A kampány során lehetőségünk nyílt összehasonlítani a műszerünket a nemzetközi szinten elismert FISH [25] műszerrel, valamint az IAGOS projekt üvegházhatású gáz csomagjában lévő műszerrel IAGOS-GHG is.

Logisztikai okokból a műszerünk két mintavevő csöve közösítés után egy hátrafelé néző, a FISH műszer egy előre néző, míg az IAGOS-GHG műszer egy fűtött Rosemount-TAT mintavevőre lett csatlakoztatva, utóbbi egy speciális kialakítású előre néző mintavevő, amellyel gázfázist, azaz vízgőz-tartalmat lehet mintavételezni. A mérések során a központi adatgyűjtő számítógép több alkalommal is lefagyott, néhány perces adatvesztést okozva, valamint felhők jelenlétében a FISH műszer az eltérő mintavevőből adódóan más értékeket mért. A részben a fent említett okok, részben pedig a műszerek eltérő válaszideje miatt gyorsan változó nyomás és vízgőz-koncentráció esetén az egyes műszerek szignifikáns eltérést mutathattak. A fentiek eredményeként a FISH műszerrel 0–350 ppm, az IAGOS-GHG rendszerrel pedig 50–12000 ppm tartományon tudtuk összehasonlítani a műszerünket. Az IAGOS-GHG rendszerrel mért adatok megbízhatósága 50 ppm alatt kérdéses, míg a FISH rendszerrel 350 ppm-nél magasabb koncentrációk esetén nem tudtunk statisztikailag szignifikáns mennyiségű adatot gyűjteni. Az adatok elemzése hasonlóan történt, mint a laboratóriumi összehasonlító mérések esetén.

¹⁰ Forschungszentrum Jülich, Jülich, Németország

¹¹ Environmental Simulation Facility

Új fejlesztések

A jelenlegi fejlesztések elsődleges célja, hogy a mérőrendszert kisebb, könnyebb, egyszerűbben kalibrálható, stabilabb változatban készítsük el, úgy, hogy az alkalmazásával elvégezhető mérések pontossága, precizitása is javuljon. Ennek érdekében egyrészt elkészítettünk egy új vezérlőelektronikát a rendszerhez, konstans nyomáson való üzemmódot fejlesztettünk, valamint új mérőkamrákkal is végeztünk kísérleteket.

Nyomásstabilizálás

A spektroszkópiában jól ismert tény, hogy a különböző molekulákra jellemző elnyelési vonalaknak mind a szélessége, mind az alakja, mind pedig a központi hullámhossza változik a nyomás függvényében. Ez igen komoly kihívást jelent egy repülőgépes alkalmazásra tervezett műszer esetén, hiszen benne a nyomás az alkalmazás természeténél fogva jelentős mértékben változik. Ezt a problémát egy összetett kalibrálási és jelkiértékelési eljárással sikerült kezelnünk. Részben a kalibrálási folyamat felgyorsítása, részben a jelkiértékelés egyszerűsítése érdekében úgy döntöttünk, hogy műszert a jövőben konstans, 150 mbar nyomáson fogjuk üzemeltetni. Ettől a lépéstől a rendszer stabilitásának a javulását is várjuk. Ehhez a 4. ábrán látható elrendezést állítottuk össze. A megfelelő működés eléréséhez meghatároztuk a vezérléshez szükséges PI paramétereket, teszteltük a nyomás stabilitását különböző külső nyomások esetén.

Új mérőkamrák

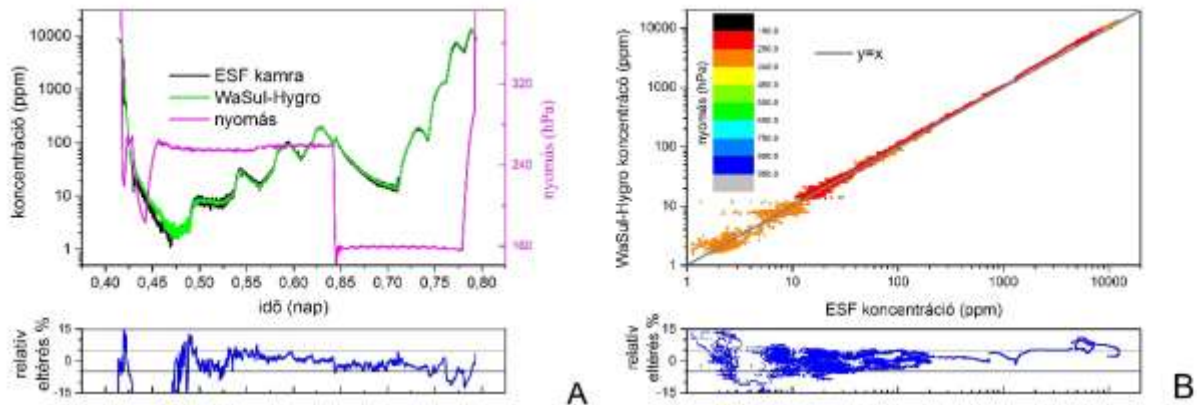
A mérőrendszerben elhelyezett mérőkamrákkal szemben támasztott egyik legfontosabb követelmény, hogy vízgőzre vonatkoztatott abszorpciójuk minimális mértékű legyen, valamint a kamra belső faláról gyors legyen a deszorpció, hogy kellő válaszidővel lehessen mérni. A különböző rozsdamentes acélok deszorpciós tulajdonságai megfelelőek, viszont nagy sűrűségük miatt jelentősen növelik a műszer tömegét. Célszerű lenne a mérőkamrákat alumíniumból elkészíteni, azonban a deszorpciós tulajdonságai lényegesen kedvezőtlenebbek, mint a rozsdamentes acélé. Ezért különböző hőmérsékleteken megvizsgáltuk bevonatolt alumínium mérőkamrák válaszidejét, hogy mikor lesz összemérhető a rozsdamentes acélével.

Mérési, fejlesztési eredmények

Laboratóriumi összehasonlító mérések

Az ESF kamránál elvégzett mérések során a fotoakusztikus rendszer két mérőcsatornája zajszinten illetve 0,5%-on belül megegyező értékeket mért. Egy reprezentatív mérés eredménye az 5. ábrán látható. Az ábra B részén az általunk mért értékeket ábrázoltuk a referenciaadatok függvényében. Az ábrának mind az A, mind a B részén ábrázoltuk a relatív eltéréseket is.

Az ábra B részén 5000 és 7000 ppm tartományon látható jelentősebb, 5%-ot meghaladó eltérés a két műszer között, azonban ebben az időszakban az ESF kamra nem kvázi-statikusságban volt, ezért ezt a szakaszt kihagytuk a számszerűsített összehasonlításból. A mérés további szakaszában 5%-on vagy zajszinten belül megegyeztek a mért értékek. Az összehasonlításra vonatkozó további számszerűsített értékek az 1. táblázatban találhatóak meg.



5. ábra WaSul.Hygro összehasonlítása az ESF kamrával

referenciaműszer	relatív eltéréshez tartozó koncentráció-tartomány (ppm)			Pearson korreláció	meredekség
	zajszenben belül	2%	5%		
ESF kamra	<150	200–750	15–12000	0,99948	1,015
IAGOS-GHG	<300	1500–4000	100–4000	0,99986	1,047
FISH	<20	NA	NA	0,9965	0,86

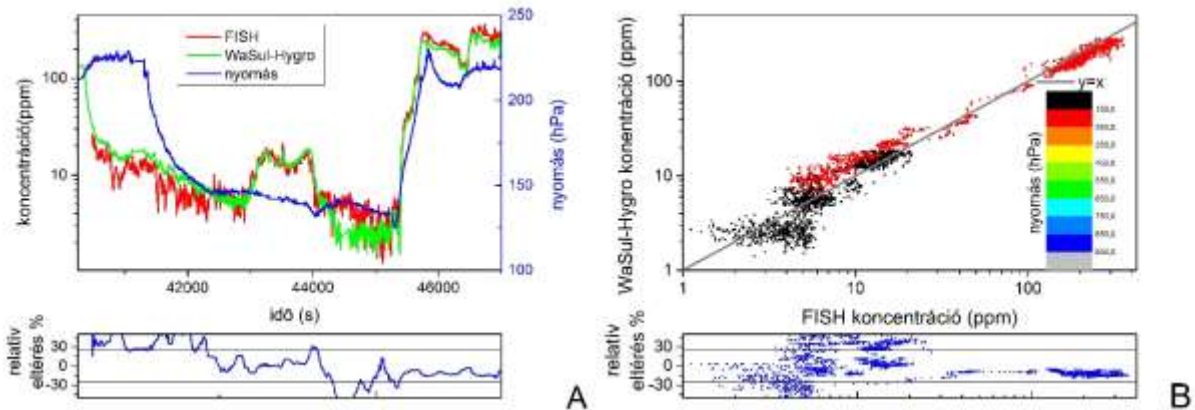
1. táblázat Wasul Hygro összehasonlítása a referenciaként használt műszerekkel laboratóriumi és repülőgépes összehasonlító mérések során. Az IAGOS-GHG műszerrel való összehasonlítás során 4000 ppm feletti koncentrációk esetén nem sikerült statisztikailag szignifikáns mennyiségű adatot gyűjteni, így a 2 illetve 5 %-os egyezéshez tartozó felső koncentráció határ vélhetően magasabb a táblázatban megadottnál.

Repülőgépes összehasonlító mérések

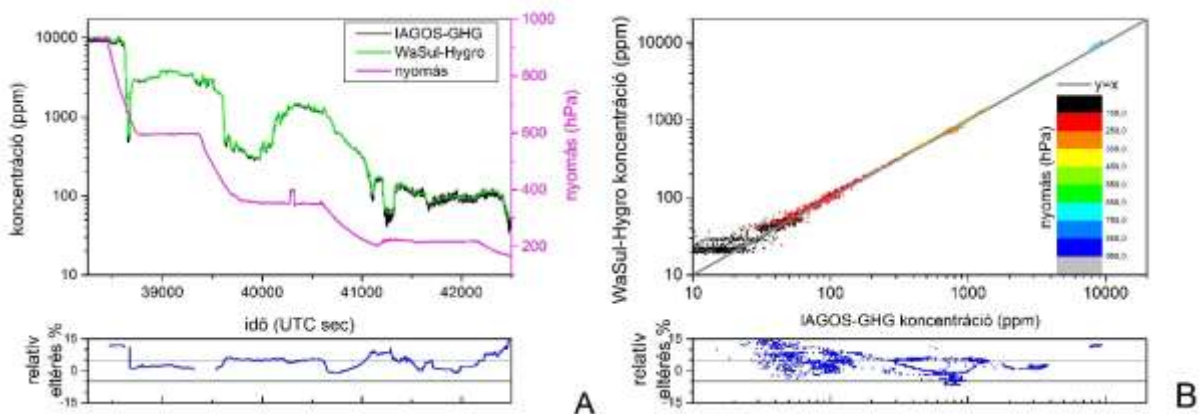
A repülőgépes összehasonlító mérések során a műszer két csatornája közötti eltérés lényegileg megegyezett a laboratóriumi mérések során kapottakkal. A FISH és az IAGOS-GHG műszerrel való összehasonlító ábrák az ESF kamránál készült mérés analógiájára készültek el 6–7. ábrák.

A FISH műszertől való eltérésünk átlagosan nagyjából 15%, míg az IAGOS-GHG műszertől mindössze 4%, a FISH és az IAGOS-GHG műszerek közötti eltérés pedig nagyjából 20%, ami nehezen értelmezhető, mivel a két műszert ugyanahhoz a referenciaműszerhez kalibrálták a mérési kampány során. A keresztkorreláció a FISH és a mi műszerünk között 0,9965 volt, ami azt bizonyítja, hogy ugyanazokat a változásokat mérte mindkét műszer. A mérési adatok elemzése, értelmezése során az eltérés legvalószínűbb okaként a FISH műszer eltérő mintavevőjét jelöltük meg, azonban az eltérés tényleges oka teljes bizonyossággal nem azonosítható.

A két műszerrel való összehasonlításra vonatkozó további számszerűsített értékek az 1. táblázatban találhatóak meg.



6. ábra WaSul.Hygro összehasonlítása a FISH műszerrel



7. ábra WaSul.Hygro összehasonlítása az ESF kamrával

Új fejlesztések

Nyomásstabilizálás

A nyomáscsökkentő szelep vezérléséhez szükséges paramétereket egységgrás gerjesztésre adott válaszból Ziegler-Nichols eljárással határoztuk meg. A meghatározott paraméterekkel 0,15–0,25 mbar ingadozással lehet a nyomást stabilan tartani, ami a megcélzott 150 mbar esetén 0,1% körüli bizonytalanságot jelent. Ez a bizonytalanság spektroszkópiai szempontból elhanyagolható mértékű. Ugyanakkor a nyomásstabilizálás alkalmazását tényleges mérések során még nem teszteltük.

Új mérőkamrák

Új, alumínium mérőkamrákat készítettünk, melyek geometriájukban megegyeztek a korábbi rozsdamentes acélból készültekkel. Ezekben olyan, kereskedelemben kapható bevonatokat próbáltunk ki, amelyek hidrofób réteget képeztek a kamra belső felületén, hogy csökkentsük a vízgőz abszorpció mértékét. A legjelentősebb eredményt elektrokémiai úton felvitt nikkel bevonattal sikerült elérni, ekkor 45–50 °C hőmérsékleten az alumínium és a rozsdamentes mérőkamrákat nem lehetett egymástól megkülönböztetni. 100 °C hőmérsékleten pedig az alumínium kamrák válaszfalát lényegileg nem befolyásolta az abszorpció és a deszorpció. Ekkor két stabil



koncentráció közötti váltáshoz és beálláshoz kevesebb, mint 2 s-ra volt szükség. Az új kamrákkal pusztán a kisebb sűrűségük révén mintegy 2,5 kg-mal, arányaiban pedig 20%-kal sikerült csökkenteni a mérőrendszer tömegét.

Összefoglalás

Kifejlesztettünk egy kétcsatornás vízgőz-koncentráció- mérő rendszert, mely segítségével repülőgépes méréseket lehet elvégezni a légkör vízgőz koncentrációjának valamint a jelenlévő felhők cseppfolyós és/vagy szilárd fázisú víztartalmának a meghatározására. A műszer mind laboratóriumi, mind repülőgépes összehasonlító mérések során bizonyította alkalmazhatóságát, pontosságát. A legújabb fejlesztésekkel sikerült a műszer kalibrációját, jelkiértékelési eljárását jelentős mértékben egyszerűsíteni konstans nyomáson való üzemeltetéssel. Új vezérlőelektronika és új mérőkamrák alkalmazásával pedig jelentős mértékben tudtuk csökkenteni mind a méretét, mind a tömegét a műszernek, ami az üzemeltetési költségek csökkenése révén igen fontos a jövőbeli alkalmazások szempontjából.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutatási eredményeket Az Európai Unió EUFAR FP7 227159 projektje támogatta. A kutatásokat az OTKA NN 109679 projektje támogatta. A kutatásokat az Európai Unió IGAS FP7 312311 projektje támogatta.

Köszönettel tartozunk továbbá Herman G. J. Smitnek¹², Martina Kraemernek¹³ és Christoph Gerbignek¹⁴, a laboratóriumi és repülőgépes összehasonlító méréseknél nyújtott segítségükért, valamint az általuk mért, referenciaként használt adatokért.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Ajtai, T., et al., A novel multi-wavelength photoacoustic spectrometer for the measurement of the UV–vis–NIR spectral absorption coefficient of atmospheric aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 2010. 41(11): p. 1020-1029.
- [2] Bozóki, Z., A. Pogány, and G. Szabó, Photoacoustic Instruments for Practical Applications: Present, Potentials, and Future Challenges. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2011. 46(1): p. 1-37.
- [3] Filus, Z., et al., Carrier gas flow arrangement based photoacoustic detection method for measuring gas permeability of polymer membranes. *Polymer Testing*, 2013. 32(6): p. 1099-1104.
- [4] Hanyecz, V., et al., Instrument for benzene and toluene emission measurements of glycol regenerators. *Measurement Science and Technology*, 2013. 24(11): p. 115901.
- [5] Huszár, H., et al., Combination of a photoacoustic detector with a diffusion sampler for the measurement of water vapor concentration in ethylene glycols for the natural gas industry. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006. 119(2): p. 600-607.
- [6] Tatrai, D., et al., Embedded system based data acquisition and control system for photoacoustic spectroscopic applications. *Measurement*, 2015. 63: p. 259-268.
- [7] Utry, N., et al., Correlations between absorption Angström exponent (AAE) of wintertime ambient urban aerosol and its physical and chemical properties. *Atmospheric Environment*, 2014. 91(0): p. 52-59.

¹² Forschungszentrum Jülich, Institute for Energy and Climate Research Troposphere (IEK-8), Jülich, Németország

¹³ Forschungszentrum Jülich, Institute for Energy and Climate Research Stratosphere (IEK-7), Jülich, Németország

¹⁴ Max Planck Institute for Biogeochemistry, Department of Biogeochemical Systems, Jena, Németország



-
- [8] Varga, A., et al., Photoacoustic system for on-line process monitoring of hydrogen sulfide (H₂S) concentration in natural gas streams. *Applied Physics B*, 2006. 85(2-3): p. 315-321.
- [9] Burkhardt, U., B. Kärcher, and U. Schumann, Global Modeling of the Contrail and Contrail Cirrus Climate Impact. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010. 91(4): p. 479-484.
- [10] Grewe, V., et al., Reduction of the air traffic's contribution to climate change: A REACT4C case study. *Atmospheric Environment*, 2014. 94: p. 616-625.
- [11] Jeßberger, P., et al., Aircraft type influence on contrail properties. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013. 13(23): p. 11965-11984.
- [12] Marengo, A., et al., Measurement of ozone and water vapor by Airbus in-service aircraft: The MOZAIC airborne program, an overview. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998. 103(D19): p. 25631-25642.
- [13] Brenninkmeijer, C.A.M., et al., Civil Aircraft for the regular investigation of the atmosphere based on an instrumented container: The new CARIBIC system. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007. 7(18): p. 4953-4976.
- [14] Bell, A.G., On the production and reproduction of sound by light. *American Journal of Science*, 1880. 20(118): p. 305-324.
- [15] Castleden, S.L., G.F. Kirkbright, and D.E.M. Spillane, Wavelength modulation in photoacoustic spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 1981. 53(14): p. 2228-2231.
- [16] McDonald, F.A. and G.C. Wetsel, Generalized theory of the photoacoustic effect. *Journal of Applied Physics*, 1978. 49(4): p. 2313-2322.
- [17] Rosencwaig, A., Photo-acoustic spectroscopy of solids. *Review of Scientific Instruments*, 1977. 48(9): p. 1133-1137.
- [18] Marquezini, M.V., et al., Open photoacoustic cell spectroscopy. *Measurement Science and Technology*, 1991. 2(4): p. 396.
- [19] Mattiello, M., et al., Novel Helmholtz-based photoacoustic sensor for trace gas detection at ppm level using GaInAsSb/GaAlAsSb DFB lasers. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2006. 63(5): p. 952-8.
- [20] McQueen, D.H., A simplified open photoacoustic cell and its applications. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1983. 16(8): p. 738.
- [21] Miklós, A., P. Hess, and Z. Bozóki, Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology. *Review of Scientific Instruments*, 2001. 72(4): p. 1937-1955.
- [22] Silva, M.D.d., I.N. Bandeira, and L.C.M. Miranda, Open-cell photoacoustic radiation detector. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1987. 20(12): p. 1476.
- [23] Enviscope Gmbh.; Available from: <http://www.enviscope.com/>.
- [24] Kley, D. and E.J. Stone, Measurement of water vapor in the stratosphere by photodissociation with Ly α (1216 Å) light. *Review of Scientific Instruments*, 1978. 49(6): p. 691-697.
- [25] Zöger, M., et al., Fast in situ stratospheric hygrometers: A new family of balloon-borne and airborne Lyman α photofragment fluorescence hygrometers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999. 104(D1): p. 1807-1816.