

ПРИМЕНА ТЕРМОВИЗИЈЕ ЗА ДЕТЕКЦИЈУ ШТЕТНИХ ГАСОВА

Љубиша Томић, Технички опитни центар, 11000 Београд, В. Стене 445, Е-маил: laser_ljt@yubc.net

Садржај – Метода ИЦ термографије пружа могућност за образовање слике у реалном времену цурења гасова употребљавајући ИЦ камеру коришћењем спољнег топлотног зрачења позадине. Амонијак, етилен и метан могу бити откривени у спектралном опсегу 7-13 μm . Термално образовање слике извршено коришћењем оптичког филтра и гас-корелационих ћелија упоређивањем са апсорпционим опсегом гаса може да открије присуство гаса.

1 УВОД

Амонијак (NH_3) је једињење азота и водоника. На собној температури је у гасовитом стању, гас је безбојан, љутог и непријатног мириса који изазива сузе. Отрован је и нагриза кожу. Етилен C_2H_4 је гас без боје мириса и укуса. Најчешће је саставни део осветљења. Гас је лако запаљив, па се боца са етиленом мора држати у посебној просторији. Метан CH_4 гас без боје и мириса, има га у вулканским гасовима и рудницима каменог угља, настаје сувом дестилацијом каменог угља и у другим органским супстанцијама (ако се помеша са ваздухом или кисеоником па запали, настаје страшна експлозија), барски гас. Из тог разлога је потребно благовремено открити њихово истицање у околни ваздух.

Образовање слике штетних гасова у реалном времену има широку примену са аспекта заштите животне средине и екологије. [1,2] Инспекција цурења хемијских инсталација, петрохемијских постројења, резервоара на пољопривредним добрима-фармама, или цевовода има економски, еколошки и сигурносни аспект заштите и очувања животне средине. Овом техником се лако може открити положај акцидента на цистерни за гас или резервоар на возној композицији. Обухваћена цистерна за гас акцидентом се разматра са аспекта јавне безбедности. У затвореним радним просторијама могу се надгледати гасни токови, улази око ваздушних отвора и излази-испусних цеви, екстракционих отвора или локалних вентилационих јединица обично за оптимизацију конструкције и подешавање инсталације. Зрачења геофизичких порекла (вулкани, геотермичка постројења или рудници) као природно избијање или испаравање гасова стаклене баште, у пољопривреди и мочварама су такође интересантни за оцену.

Апсорпције молекула које су од интереса за ову технику дешавају се у видљивом или ИЦ делу спектра, па се анализом карактеристике спектра у тим областима могу извући корисни закључци. Вибрационо ротациони спектри у основној ИЦ области, 3700 cm^{-1} до 500 cm^{-1} , су нарочито подесни за:

- осетљиву детекцију мањих количина гасова.

За образовање слике у реалном времену, интересантан је пасивни систем који користи зрачење позадине.

У раду [3] је по први пут практично демонстрирано пасивно образовање слике са идентификацијом гаса користећи осетљиве ИЦ камере комбиноване са оптичким филтром и техникама гасне ћелијске корелације. Метод се заснива на истовременом мулти-

спектралном образовању слике и компјутерском процесирању података. Изведена је практична провера снимања цистерне на којој цури гас. Почетни радови из ове области су обухватили употребу топлотних прекривача или ИЦ озрачивача за повећање природног нивоа зрачења. Сканирање ласерски озраченог гаса се користи за детекцију на блиским растојањима. Недавно је демонстрирано селективно образовање слике гаса помоћу гас корелационе спектрометрије за аутоматску идентификацију гаса, коришћењем ИЦ зрачења околине.

Својство технике гасне корелације је у потпуном разликовању спектралних фреквенција специфичних апсорпција гасова и транспарентних површина, која је добијена упоређивањем директног снимка и снимка кроз једну гасну оптички дебелу апсорпциону ћелију. У неким радовима аутори су проширили принципе образовања слике помоћу технике стимулисаног мулти спектралног снимања, специјално дизајнираним разделним огледалом Cassegrainian телескопом. Овај телескоп дозвољава да четри геометријски сличне али спектрално филтриране слике буду истовремено снимљене у 4 квадранта 2D детектора. Користе се две слике, једна директна слика и једна која је филтрирана кроз гасну ћелију. Гасни токови у затвореној радној средини постали су видљиви, коришћењем ИЦ камере AGEMA 900 LW, са објективом 20° , а тренутно видно поље је $1,5\text{ mrad}$, која има границу осетљивости па захтева слабо загревање позадине у сцени помоћу ИЦ осветљивача и опремљен је са рефлектором од 1000 W. Ова ограничења се превазилазе коришћењем осетљивијег AGEMA THV900 LW система и моћнијом техником процесирања слике, тако да је термичко зрачење спољне средине позадине једино зрачење у реалном времену при снимању 15 кадрова у секунди. Особина технике гасне корелације је да дозвољава раздвајање гасова чији се спектри преклапају (нпр. амонијак и етилен). Одговарајући прозор ИЦ таласних дужина где се гасови интереса за нас апсорбују се помоћу филтра пропусника опсега, али потпуно филтрирање високе резолуције се изводи помоћу оптички дебелог корелационог гаса.

2 ТЕОРИЈСКА АНАЛИЗА МЕТОДА

Велику апсорпциону моћ, емисивну имају у области ИЦ дела спектра угљоводоници. Апсорпција зрачења код гасова зависи од дебљине слоја l , парцијалног притиска p , види се Beer-Lambert-овог закона,

$$\alpha(\lambda) = 1 - e^{-k(\lambda) \cdot p \cdot l} \quad (1)$$

где је: $k(\lambda)$ – константа апсорпције на таласној дужини. Види се да са порастом дебљине слоја гаса $l \rightarrow \infty$ апсорпција $\alpha(\lambda) \rightarrow 1$. Како је према Kirchhoff-овом закону $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$, то значи да емисивност гасова расте с порастом производа $p \cdot l$. Емисиона способност гаса се може одредити експерименталним мерењем зависности $\varepsilon_G = f(p \cdot l)$ или применом емпиријске формуле.

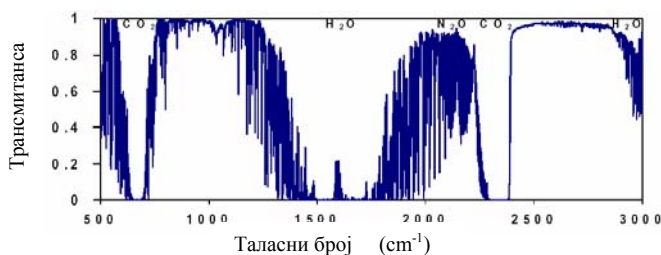
$$L = c \cdot T^n = c_1 \left(\frac{T}{100} \right)^n \quad (2)$$

где је: где је c константа која зависи само од износа p експонент $n \approx 3$, а L је радијанса гаса у $[W/m^2]$. У стандардној атмосфери (не загађеној штетним гасовима) проценат метана CH_4 је $2 \times 10^{-4} \%$.

У даљем разматрању практичне примене ове методе [1-3] на реалне гасове, посматраће се примена термовизијске камере на праћење вештачки изазваног цурења гасова познатих брзина истицања. Температура ваздуха, и влажност су били унапред познати параметри. Слика 5. приказује кадар узет из филма који даје квалитативан пример истицања амонијака и његову концентрацију.

3 СПЕКТРАЛНА РАЗМАТРАЊА МЕТОДЕ

У овом раду су дата спектална разматрања укључујући методу процене концентрације гаса \times дужина, и опис могуће експерименталне поставке за спољна мерења гасова. Употребом специфичне технике даљинске детекције, могу се детектовати и квантификовати двоатомски гасови са хомогеним језгром. То је могуће захваљујући њиховим спекталним особинама у ИЦ опсегу таласних дужина $\lambda=3-13 \mu m$. Оптимизација опсега таласних дужина код пасивне детекције штетних гасова применом термовизије мора узети у обзир неколико фактора: трансмисију атмосфере (т.ј. апсорпција воде H_2O и угљен диоксида CO_2), флуks зрачења позадине и укупну апсорпциону моћ линија осцилатора молекула гаса који нас интересује.



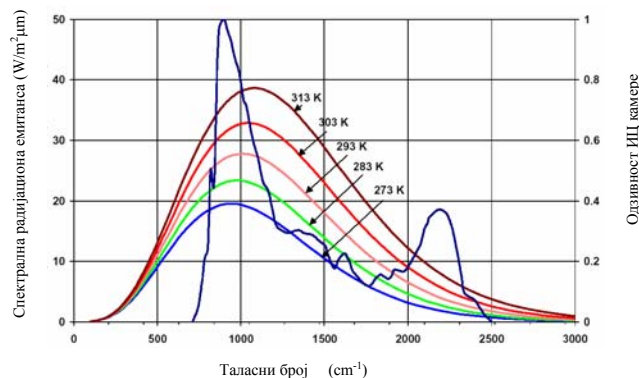
Слика 1. Трансмитаанса атмосфере (прозирност) кроз 300 m градског ваздуха [6]

На Сл. 1. је пориказана типична трансмисија атмосфере у ИЦ области, а на Сл. 2. спекталне радијансе за пет грејача-црних тела са нормалним температурама позадине у опсегу од 273 K до 313 K. Као што се може видети вода и угљен диоксид блоирају апсорпцију у делу спектра, или ограничавају ефективни мерни опсег инструмента. Опсег таласних дужина 3-13 μm садржи више воде него опсег таласних дужина 3-4 μm , али је зрачење позадине више 30 пута на стандардној температури од 300 K на земљи. Апсорпциона моћ је знатно виша за многе гасове у опсегу 8-13 μm . Иако присуство воде у атмосфери смета у опсегу таласних дужина 7,14-8,33 μm ($1400-1200 cm^{-1}$) ова област много утиче на сигнале, па је могуће искористити ову област за мерење метана, гас корелационом техником. Таласни број $k=1/\lambda$ (m^{-1}) представља просторну поновљивост електромагнетског таласа, број таласа по јединици дужине. Просторна перјода таласа λ је позната као таласна дужина.

Пасивне технике користе природно топлотно зрачење позадине за детекцију гасова која је посебно погодна око

$1000 cm^{-1}$ где је максимална спектална радијанса за све температуре и велику транспарентност атмосфере. Гасови који апсорбују ИЦ зрачење у овом атмосферском прозору утичу на равнотежу зрачења сунце-земља, што утиче на температуру на земљи. Термовизијске камере које раде у атмосферском прозору око $1000 cm^{-1}$, су по дефиницији врло подесне за визуализацију ефеката стаклене баште градијента концентрације гаса у стакленој башти. Варијације термалног зрачења позадине, коефицијента рефлексије или емисивности се компензују употребом технике гасне корелације од тачке до тачке на слици. Када се узму у обзир ова спектална разматрања одабере се рецимо ИЦ камера AGEMA THV900 LW, која има температурну разлику еквивалентну шуму NEΔT од 80 mK. На Сл.2. је приказан релативни спектални одзив, ове термовизијске камере која има максимум на $900 cm^{-1}$ ($11 \mu m$) са спекталном радијационом емитансом пет радијатора који представљају црно тело.

Извршене су компјутерске симулације засноване на конволуцији у спекталном опсегу таласних дужина система термовизијске камере који садржи детектор, оптику објектива камере, филтере и гас-корелационе хелије.



Слика 2. Спектална радијанса за пет грејача црног тела (лева оса) и нормализована крива спекталне одзивности ИЦ камере (десна оса)

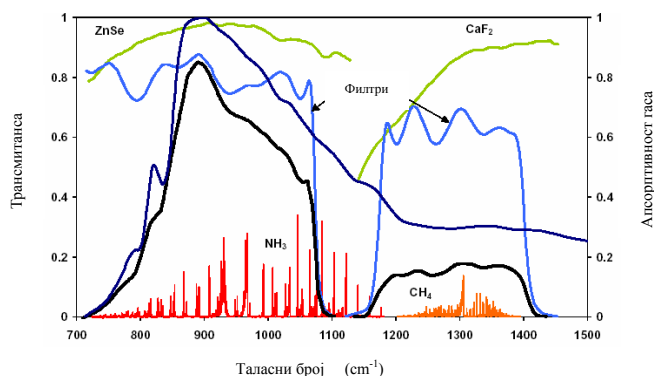
Симулација је омогућила карактеризацију оптичког трансмисионог система осим Cassegrain телескопа за кога се сматра да не утиче значајније на спектални одзив. Било је могуће профилисање и одређивање различитих типова филтара. Да би се постигла оптимална осетљивост треба избалансирати употребу уских филтера пропусника опсега, оптимизираних на јаким спекталним особинама, да дају висок одзив контраста, са укупном трансмисијом фотона у систему. Да би се постигао добар однос сигнал/шум, статички шум у детектору захтева да фотонски флуks буде изнад одређеног нивоа. С тога филтер пропусник опсега зрачи више него краткоталасни или дуготаласни пропусни филтри. Мењањем опсега таласне дужине и њене ширине, максимизирањем односа између укупне апсорпције гаса који нас интересује и укупне оптичке трансмисије система, може бити одабран оптимални профил филтра.

Као резултат ове симулације филтер који се показао бољи за детекцију амонијака и етилена у област таласних дужина 8-13 μm је дуготаласни пропусни филтер (граница таласних дужина на 9,2 μm) са трансмисијом 80%, док је за детекцију метана бољи широкоталасни

пропусни филтер (тачке на пола снаге су на $7.5\mu\text{m}$ и $8.5\mu\text{m}$) са трансмисијом од 60%.

Неколико материјала који имају прозоре трансмисије у опсегу од $2\text{--}13\mu\text{m}$ се користи за израду гасно-корелационих ћелија. ZnSe се бира за мерења гаса са апсорпцијом око $10\mu\text{m}$, и CaF_2 за узорке гаса са апсорпцијом око $8\mu\text{m}$, видети слику 3. На површине материјала ZnSe за дате прозоре су нанете антирефлексионе превлаке да би се смањили губици рефлексије услед великог индекса преламања што даје вредност трансмисије више од 90% са максимумом од 99% на $10.6\mu\text{m}$.

На сл. 3. приказане су трансмитансе дискутованих елемената заједно са конволуцијом укупног одзива (крива 2), спектри амонијака и метана за концентрације од $200\text{ ppm} \times \text{m}$, у јединицама апсорптивности гаса, црвене и наранџасте линије, респективно.



Слика 3. Нормализовани спектрални одзив ИЦ камере (крива 1) у конволуцији са трансмитансом два различита прозора материјала гасне ћелије и профила оптичких филтера из чега се добијају две области (крива 2). Апсорптивност оба гаса је приказана за концентрацију $200\text{ ppm} \times \text{m}$

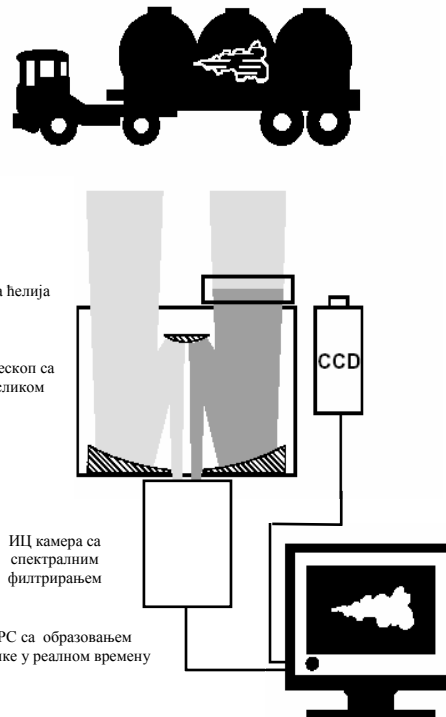
4 МЕРЕЊЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ ГАСА

Калибрација концентрације гаса амонијака врши се интеграљењем релативне трансмитансе система у границама таласних бројева од 700 cm^{-1} до 1100 cm^{-1} , повећањем концентрације гаса, и тада дељењем опадајуће укупне релативне трансмитансе са укупном релативном трансмитансом без гаса. Ова процедура је описана за случај директних мерења апсорпције. У радовима [2,3] коришћене су база података QASoft, молекуларна спектроскопска база података HITRAN из 1996, програм квантитативне анализе за мерење гасова, ИЦ анализе и софтвер GRAMS/32.

Прорачун је најпре био извршен за врло велике температурне разлике између позадине и гаса. У практичним ситуацијама термалне позадине, мора се узети у обзир сопствено зрачење гаса. Гас се може открити на основу сопственог зрачења на апсорпционим линијама са интензитетом од $[(1 - \tau) \times L_G]$, где је L_G интензитет зрачења црног тела на температури гаса T_G . Ово се може видети као виша ефективна трансмитанса гаса, и овај ефекат може бити прорачунат разликом трансмитованог интензитета позадине на температури T_B и емисије интензитета гаса на температури T_G . Корекција трансмитансе као функције концентрације се врши за уобичајену експерименталну вредност $\Delta T = 18\text{ K}$ ($\Delta T =$

$T_B - T_G$), а ΔT мора бити познато, за $\Delta T = 0\text{ K}$ нема апсорпције, случај да су апсорпција и емисија прекинуте.

Теоретски прорачун вредности укупне трансмитансе за различите ΔT био је проверен у лабораторији. Једна Al плоча $8 \times 8\text{ cm}^2$, са превлаком од високоемисионе црне боје повезана са Peltier-овим елементом, употребљена је као позадина циља. Испред овога се поставља дебела



Слика 4. Сценарио откривања штетних гасова термовизијском камером

ћелија 20 mm напуњена са концентрацијом $20000\text{ ppm} \times \text{m}$ гаса амонијака. Гасна ћелија се држи на константној температури 294 K , док је температура позадине циља променљива. Лабораторијска поставка је уносила грешку услед одређивања одступања нивоа сигнала детектованог камером. Ово одступање је углавном од топлотне мисије саме камере, филтра и телескопа.

5. ОБРАДА РЕЗУЛТАТА

ИЦ камера је прикључена на PC фрејм гребером са брзим SCSI хард диском, дозвољавајући снимање у реалном времену 12-битни формат слике, 272×136 пиксела, брзином 15 фрејмова у секунди. За комуникацију с диск јединицама веома често се користи и SCSI, који представља брзи и универзални паралелни интерфејс.

Две слике А и В су снимљене истовремено коришћењем Cassegrain-овог телескопа, ИЦ камере и фрејм гребера. Снимљене су А-слика ИЦ сцене која се види кроз један од отвора телескопа и В-слика исте сцене са гасном ћелијом испред другог отвора.

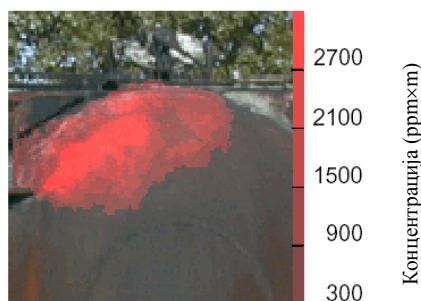
Процесирање слика омогућује одузимање од слика одговарајућу разлику. Нормализована слика Е, из Cassegrain-овог телескопа је са грешком, изазвана несавршеним поступком и асиметричним вињетингом, расипно светло два отвора, $E = A_0/B_0$. Е је снимљена када није присутан гас у сцени. Сликe су дигитално преклопљене померањем и извршена је оптимизација у области од интереса која садржи гас, а следеће

процесирање слике је искључило ову област. Гасна корелација је предвиђала резултантну слику $G=A/B/E$. Нивои концентрације амонијака представљају средњу вредност добијену симулацијом у програму GRAMS/32 и прорачуном у Excel-у (види 4. поглавље).

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Експериментална поставка је приказана на сл. 4. Мерења су извршена напољу, дан је био сунчан са температуром ваздуха од 18-21 °С и релативном влажношћу 50%. Време је било претежно ветровито са ветром 12 m/s. Снимана сцена је зарђала цистерна за гас која представља позадину, са температуром од 30-40 °С и коефицијентом емисивности $\varepsilon=0.9$. Боце гаса са амонијаком, метаном и етиленом су прикачене помоћу дугачке цеви симулирајући цурење.

Оптичка опрема била је постављена на растојању 20 m од приколице. Истовремено се формирају слике објекта ИЦ осетљивом камером са Cassegrain-овим телескопом. Термовизијска камера AGEMA 900 LW користи Stirling-ов хладњак, MCT SPRITE детектор и скенер који скенира објекат линију по линију. Генерисана слика линије, са резолуцијом 272×136 пиксела. Слика је раздвојена у две области помоћу Cassegrain-овог телескопа 136×136 пиксела свака. Телескоп има одвојена конкавна огледала са укупном пријемном површином од $2 \times 10 \text{ cm}^2$. Рефлектована оптика телескопа укључује два примарно, и секундарно алуминијумско огледало. Алуминијум са MgF_2 превлаком има рефлективност 96% у спектралном опсегу рада термовизијске камере. Позиције примарних огледала су подешене завртњем са финим навојем тако да фокусирају зрачење на померено секундарно огледало дуж заједничке оптичке осе. Камера је опремљена са одговарајућим интерферентним филтрима. Интерферентни филтри су постављени на филтерску плочицу испред детектора у камери. Испред телескопа је постављена гасна ћелија дебљине 20 mm која додатно филтрира једну од слика. Гасна ћелија је испуњена одговарајућом количином одређеног гаса што је чини непрозирном на јачим апсопционим линијама. Две слике које су тако настале користе се за издвајање слике чистог гаса и елиминисање разлика у термалном зрачењу позадине као и шума које уносе други гасови или честице. Истовремено снимање сцене у видљивом делу спектра је изведено са CCD камером која је постављена близу телескопа.



Слика 5. Кадар који приказује цурење амонијака са сликом колор скале концентрације*

* Мерни услови : време 14:30, температура ваздуха 18 °С, температура површине позадине 36 °С, релативна влажност 48 %, истицање гаса 10-100 l/min, ZnSe гасна ћелија са амонијаком на 101325Pa., филтер: Spectrogon LP9200.

Просторна дводимензионална концентрација \times дужина амонијака, са растућим истицањем од прве до последње слике, показана је на слици 5. Слика генерисана на овај начин узима у обзир ограничења концентрације од 200 ppm \times m.

7. ЗАКЉУЧАК

Откривање појаве штетних гасова у радним просторијама, допринеће спречавању експлозија гасова, елиминисању пожара и изазивању огромне штете. У раду је приказана визуелизација гаса у реалном времену помоћу ИЦ топлотног зрачења позадине и гасне корелације. Показана је могућност квантитативног праћења испуштања гаса. Међутим, тада је нужно тачно познавање температурне разлике између гаса и позадине. Осетљивост технике је у опсегу 200 ppm \times m за амонијак ($\Delta T=18 \text{ K}$) на фреквенцији слике 15 Hz (временска резолуција термовизијске камере је $\Delta t=66.66 \text{ ms}$ или 15 слика у једној секунди) са процењеним побољшањем осетљивости за фактор 10, ако је обављено временско ограничење и просторно усредњавање. Ограничења детекције су услед несавршености у конструкцији телескопа резултујући у грешкама слике и проблемима варијације подешавања. Ови се ефекти могу контролисати снимањем слике без присутног гаса у сцени. Са бољом конструкцијом телескопа неће бити потребне две полуслике са и без гасно корелационе ћелије, може бити употребљен за потпуну компензацију променљиве позадине. Потенцијално, неколико гасова могло је бити посматрано са осетљивошћу камере у области таласних дужина 8-14 μm . QWIP детектор са подешеном спектралном осетљивошћу побољшаће перформансе ове технике, па се нпр. могу посматрати цевоводи у реалном времену. Пошто се ова техника ослоњена на разлике температуре између ваздуха и температуре позадине, то је важно изабрати одговарајући временски интервал за посматрање.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] T.J. Kulp, P.E. Powers and Kennedy, "Remote imaging of controlled gas releases using active and passive infrared imaging", in *Infrared Technology and Applications*, eds. B.F. Andresen, M. Stojnik Scholl, Proc. XXIII SPIE, 3061, pp.269/278, 1997
- [2] P.L. Hanst, QASoft '96 "Database and quantitative analysis program for measurements of gases", *Infrared Analysis Inc.*, Anaheim, Ca, 1996.
- [3] GRAMS/32, Array basic programming language, Galactic Industries Corp.
- [4] Robert Siegel, John R. Howell: "Thermal radiation heat transfer", New York McGraw/Hill, Inc. 1972
- [5] H. C. Hottel, A. F. Sarofim: "Radiative Transfer", New York McGraw/Hill, Inc. 1973

Abstract - Real-time imaging of gas leaks was demonstrated using an IR camera employing outdoor thermal background radiation. Ammonia, ethylene and methane detection was demonstrated in the spectral region 7-13 μm . Imaging was accomplished using an optical filter and a gas-correlation cell matching the absorption band of the gas.

APPLIED THERMAL IMAGING IN DETECTION HARMFUL GASES

Ljubiša Tomić