
Arbetsrapport SGC A24

FLYGBUREN FJÄRRANALYS FÖR
GASDETEKTERING

SLUTRAPPORT FRÅN FÄLT LABORATIVA FÖRSÖK

Sven Åke Ljungberg
KTH BMG, Gävle

Augusti 2000



Sammanfattning

Försöken med flygburen gasvisualisering med hjälp av IR-kamera har visat att tekniken kan användas vid läckage på gasledningen i storleksordningen 10 m³/h eller större. Ett stort problem har varit att helikoptern, som använts under proven, blåst iväg gasen och därmed försvårat visualiseringen. Gasen som strömmar ut ur en läckande gasledning har ofta en relativt hög hastighet vilket gör att den snabbt blandas med luft och därmed späs ut till koncentrationer som kan vara svåra att skilja från bakgrundsstrålningen.

Gasen ger distinkta temperaturförändringar av marktemperaturen när den strömmar ut och dessa temperaturförändringar kan ses från luften även om gasen i sig ej kan visualiseras.

Vid gstryck över ca 4 bar kunde gasen visualiseras och den utströmmande gasens rörelser kunde urskiljas på de videoupptagningar som gjordes under försöken.

Från avfallsupplag har metangasflöden i samma storleksordning tydligt visualiserats. Trycket på denna gas är mycket lågt vilket ger låga utströmningshastigheter och därför höga koncentrationer i den utströmmande gasen.

Resultaten från de flygburna testen med IR och helikopter har bidragit med viktig kunskap som komplement till tidigare utförda markbaserade test inom det refererade pilotprojektet. De redovisade försöken bör ses som ett första led i en fördjupad studie med syfte att utföra repetitiva flygburna fältlaborativa test under strikt kontrollerbara och verklighetstroga förhållanden, för att erhålla en mer heltäckande bild av den flygburna teknikens användbarhet och begränsningar för detektering av gasemissioner.

Flygburen fjärranalys för gasdetektering

Slutrapport från fältlaborativa försök

SAMMANFATTNING	1
BAKGRUND	3
PROBLEMBILD	3
FÖRSÖK MED MARKBASERAD IR-TEKNIK FÖR GASDETEKTERING	4
”Remote passive och active gas imaging” - remote sensing?	4
FÖRSÖK MED HELIKOPTERBUREN IR-TEKNIK FÖR GASDETEKTERING	5
Teknisk utrustning - instrumentplattform - instrumentbärare	5
Planering och genomförande av flygburna fältlaborativa test	6
Resultat	8
Resultat från brandövningsfältet BARBARA - naturgasläckage	8
Visualisering av biogas från avfallsupplag	10
Utvärdering av teknik och metod	11
FÖRSLAG TILL FORTSATT FÖRSÖK	12

Bakgrund

Frågor kring funktion och säkerhet vid produktion, distribution och konsumtion av gas och kemiska produkter, säkerhet vid transport av farligt gods, energi- och miljöaspekter på avfallshantering och deponier samt frågor om energiförbrukningens miljöeffekter har fått en ökad internationell uppmärksamhet under de senaste decennierna. Vid universitet, högskolor och företag och vid olika branschorgan bedrivs forskning och utveckling för att möta industrins och samhällets krav på säker produktion och distribution av energi, gas, och kemiska produkter.

Sverige har en högt utvecklad industriell produktion och teknisk infrastruktur, och en internationellt sett väl fungerande miljöpolitik. Kommunala och statliga organ som Miljö- och Hälsoskyddskontor, Naturvårdsverket, Räddningsverket, Sprängämnesinspektionen, m fl. ger råd och anvisningar och anger krav och riktlinjer för olika verksamheter utifrån direktiv från Riksdag och Regering via departementen.

Erfarenheter från både internationella och svenska studier visar att det är angeläget att utföra kontroll och underhåll av gastekniska system för att säkerställa funktion och driftsäkerhet och för att öka systemets tekniska och ekonomiska livslängd.

Avsaknaden av träffsäker och kostnadseffektiv operativ teknik och metoder för kontroll och statusbestämning av gastekniska system kan ge brister i informations- och beslutsunderlag, planering och prioritering av åtgärder, och kan resultera i allvarliga effekter för såväl drift och funktion som säkerhet och miljö.

Problembild

Emission av gas sker från en mängd olika källor relaterade till produktions och distributions system, industri och energiprocesser, system för transport av farligt gods, läckage från deponier för avfall och från naturliga källor som torvmossor, gasemissioner i byggnader, etc. Vissa gaser är potentiellt explosiva eller giftiga, andra är harmlösa om de inte blandas med andra ämnen, som syre eller vatten. Läckage av gas kan påverka drift och funktion i produktions och distributionssystem, eller äventyra mänskligt liv och miljö. Olika gaser har olika gaskaraktäristika, flöde, tryck, rumslig spridning, och absorberar ljus i olika absorptions band.

Som exempel kan nämnas metangas, som är en brännbar och explosiv gas vid en blandning av 5-15¹% syre och som finns både i vår naturskapade omgivning, i avfallsupplag och i produktions och distributionssystem. Metangas har sin högsta absorption vid 3,37 respektive 7,9 μ m, har ett gstryck som varierar från <1 millibar för gasläckage från avfallsupplag till 3-8 bar för gas produktion och distributions system. Metangas har 23 ggr. aggressivare inverkan på energibalansen i atmosfären än t ex. CO₂. Ett annat exempel är gasol (LPG) som är en brännbar och explosiv gas. Medan metangas är lättare än luft och tenderar att stiga upp och spridas i lufthavet så är gasol tyngre än luft och tenderar att ligga kvar i marknivå. SF₆ (svavelhexafluorid) är en annan viktig gas som bl a används som isolator i

¹ AGA Gashanbok, AGA AB, 1982

elektriska transformatorer (Gas Insulated Switchgears, GIS). SF₆ har också en aggressiv inverkan på energibalansen i atmosfären.

Det är viktigt att på ett tidigt stadium kunna spåra källan till ett gasläckage och att kunna visualisera och kartlägga den rumsliga spridningen av gasen. De flesta gaser kan inte detekteras med mänskliga sensoriska system (syn, lukt, etc). Traditionell mätteknik och metoder är inte kostnadseffektiva, har dålig träffsäkerhet, och är ofta svåra att operera i fält.

Det föreligger behov av högupplösande och flexibla bildgenererande mätsystem för detektera gasläckage från olika källor med en operativ räckvidd från några få meter till 500-1000 m, och med en geometrisk upplösning från 1 mm² för småskalig, till 10-100 mm² för storskalig avbildning och mätning.

Modern fjärranalys typ högupplösande IR-teknik och kraftfulla lasersystem har öppnat nya möjligheter för att utveckla träffsäkra, stabila och kostnadseffektiva stationära, handburna, landmobila och flygburna system för detektering och avbildning av gasemissioner.

Försök med markbaserad IR-teknik för gasdetektering

Inom ramen för en pilotstudie "Fjärranalys för att spåra och kartlägga gasformiga läckage och föroreningar" har utförts en serie upprepade markbaserade fältlaborativa försök med högupplösande IR-teknik för s.k. "passive gas imaging", för att detektera och visualisera emissioner av gas från gasproduktions- och distributionsanläggningar, ledning ovan och under mark samt emissioner av biogas från avfallsanläggningar. Utvecklad teknik och metoder avses även kunna användas för gasdetektering av andra gaser och tillämpningar, t ex. vid transport av farligt gods och vid industriprocesser.

Under perioden 1996 - 1998 har det utförts upprepade försök att under kontrollerbara former detektera och visualisera gasläckage från ledningssystem ovan och under mark. Merparten av försöken har utförts med högupplösande IR-teknik (med och utan filter) monterade på markbaserade instrumentbärare, typ mobil mätenhet med reglerbar mast, från brandstege, etc. Testen har utförts främst vid Malmö Brandkårs gasövningsplats samt vid SYSAVs (Spillepeng, Malmö) och NSRs (Filborna, Helsingborg) avfallsupplag. Resultaten från dessa försök har blivit internationellt uppmärksammade och har redovisats vid bl a SPIE THERMOSENSE XIX, 1997 (bilaga 1), och vid internationella arbets- och referensgruppsmöten anordnade vid Gas Research Institute (GRI) Chicago samt vid Svenskt Gastekniskt Center (SGC).

"Remote passive och active gas imaging" - remote sensing?

Med "remote passive gas imaging" avses här att man registrerar och visualiserar gasens egenutstrålning inom ett visst bestämt våglängdsområde, med hjälp av en värmekamera med lämplig detektor och filterteknik.

Med "remote active gas imaging" avses här att man sänder ut en laserstråle som returneras in i strålgången på en värmekamera som visualiserar gasen, s.k. "backscatter" (BAGI). Man använder en

laser som arbetar inom den aktuella gasens absorptionsvåglängdsområde och en referenslaser som arbetar utanför gasens absorptionsområde. Vid "active gas imaging" används således en kombination av IR- och laserteknik.

Med "remote sensing" avses att registreringen sker på avstånd utan att vidröra objektet-gasen.

För en mer ingående beskrivning av "passive and active gas imaging" hänvisas till bifogad forskningsartikel "State-of-the-art and Future Plans for IR-imaging of Gaseous Fugitive Emissions", bilaga 1.

Försök med helikopterburna IR-teknik för gasdetektering

Ett viktigt led i utvecklingen av träffsäker och kostnadseffektiv teknik och metoder för detektering och kartläggning av gasemissioner från ledningssystem, avfallsupplag, etc. är att testa användbarhet och begränsningar hos flygburna passiva och aktiva fjärranalys- system.

Den 16 och 17 oktober 1997 utfördes försök med helikopterburna IR-teknik, s.k. passive gas imaging, för att detektera, kartlägga och visualisera simulerade läckage av metangas från ledningssystem förlagda under mark och av biogas från ledningssystem ovan mark. Försöken utfördes vid Malmö Brandkärs gasövningsplats samt vid Filborna avfallsupplag i Helsingborg.

Teknisk utrustning - instrumentplattform - instrumentbärare

De flygburna testen utfördes med en högupplösande AGEMA Thermovision 1000 värmekamera med en Stirling kyld MCT SPRITE detector, 8-14 μm , med 789x400 bildelement per bild. Värmekamera var monterad i en s.k. GIMBLE, ARGUS 350 Stable Eye type C, stabiliserande plattform, med en Hughes 500 helikopter som instrumentbärare (Fig. 1). Värmekameran opereras inifrån cockpit med hjälp av en handhållen manöverpanel och joystick enhet.



Figur 1. Högupplösande AGEMA Thermovision 1000 långvågs värmekamera, 8-14 μm , monterad i en s.k. GIMBLE, ARGUS 350 Stable Eye type C, stabiliserande plattform, med en Hughes 500 helikopter som instrumentbärare.

Värmebilderna från registreringen lagrades kontinuerligt på en analog bandspelare och ett urval värmebilder lagrades på hårddisk för senare bearbetning och analys i bildlaboratorium. Värmebildsdata visualiserades på en bildmonitor under pågående flygning, synlig för såväl piloten som operatören av IR-systemet. Systemet inkluderar också en högupplösande videokamera och en GPS-enhet, som dock inte användes vid de aktuella fältförsöken.

Det är värt att notera att det IR-system som använts vid försöken, AGEMA THV 1000, inte är designat för att detektera gas, utan för övervakningsändamål, s.k. "surveillance applications". Det bör också noteras att enligt teknisk specifikation så arbetar THV 1000 inom våglängdsområdet 8-14 μm , medan den aktuella gasen, metangas har sin största absorption vid 3.39 respektive 7.9 μm . Resultatet från upprepade fältlaborativa försök visar emellertid att detektorn i THV 1000 också är känslig inom det övre våglängdsområdet för metangas, 7.9 μm , vilket i efterhand bekräftats av tillverkaren.

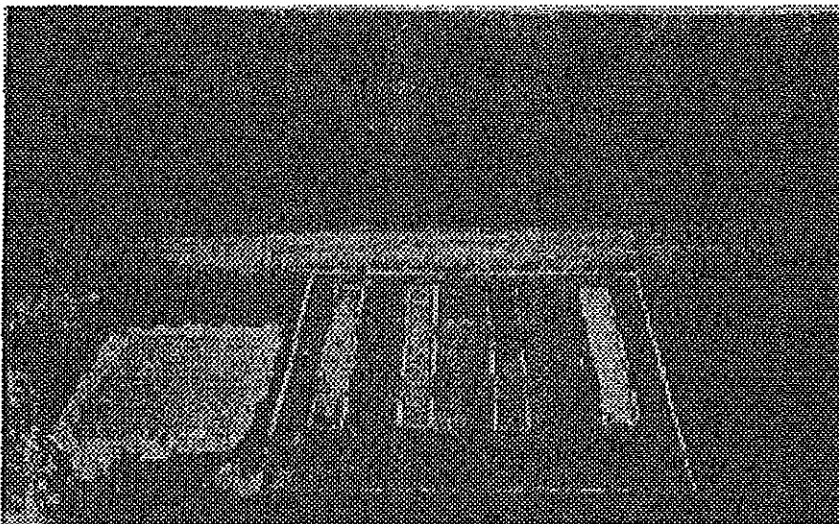
Planering och genomförande av flygburna fältlaborativa test

Med vägledning av resultaten från tidigare markbaserade fältlaborativa försök med gasdetektering med högupplösande IR-teknik från mobil enhet, respektive brandstege planerades och utfördes fältförsöken med helikopter enligt följande:

1. Testen utfördes under för tillämpningen acceptabla men ej optimala väder- och utstrålningsförhållanden, med ett ΔT mellan mätobjekt och referensobjekt på 2°C, lufttemperatur 5-7°C, himmelstrålningstemperatur på -53 - -57°C, molnfri himmel, NV vind 1-3 m/s, och en

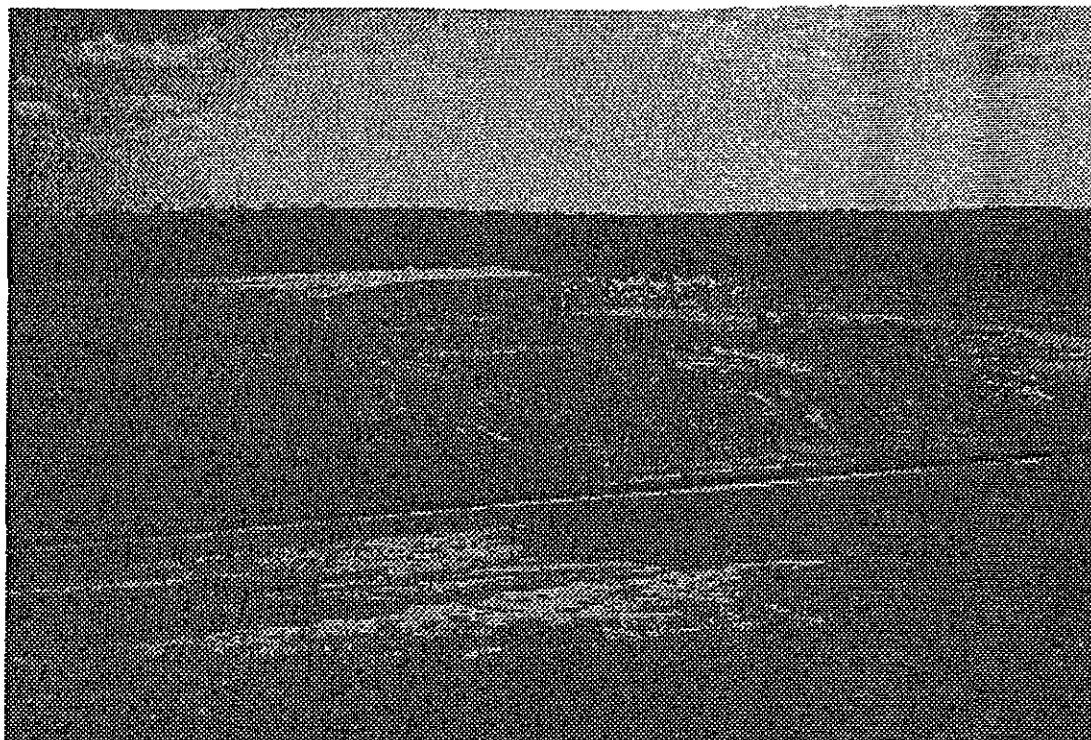
relativ luftfuktighet på ca 80 %. Det hade varit önskvärt med ett större ΔT mellan mätobjekt och referensobjekt, vilket skulle givit en mer kontrastrik bild med mindre signal/ brus förhållanden.

2. Registrering utfördes repetativt vid olika naturgastryck, från 0,5 till 8 Bar, och från olika flyghöjd, från 30 (90 ft) upp till 300 m (1500 ft). För olika tryck, från 0,5 till 8 Bar utfördes registrering från olika flyghöjd upp till en höjd där gasen ej kunde detekteras. Det utläckande flödet från ledningarna har varierat mellan någon enstaka m^3/h till ca 20 m^3/h vid de högre ledningstrycken. Någon registrering av flödena har ej skett utan dessa har beräknats utifrån antagande om storlek på de hål som gjorts i ledningarna.
3. Operativa test utfördes dels med helikoptern stillastående (hovring), dels genom överflygning med kameran riktad snett fram i helikopterns i rörelseriktning.
4. Under pågående registrering gjordes noteringar av iakttagelser av specifika funktionsrelaterade egenskaper hos IR-system, manöverorgan, funktion hos upphängningsanordningen (GIMBLE-enheten), helikopter och samverkan mellan pilot och operatör. Resultatet från iakttagelserna användes senare för utvärdering av operativ användbarhet och begränsningar hos de tekniska delsystemen, det totala systemkonceptet och arbetsmetoden.
5. Under dag 1 utfördes helikopterregistrering av simulerade gasläckage från ledningssystem förlagd under mark, Malmö Brandkårs gasövningsplats (se fig.2.)



Figur 2. Fältlaboratorium för landmobila och flygburna test av simulerade gasläckage från ledning ovan och under mark, Malmö Brandkårs brandövningsplats, BARBARA, Spillepeng.

Dag 2 utfördes registrering av verkliga emissioner av biogas från vertikala gasledningar ovan mark, vid Filborna avfallsupplag i Helsingborg, NSR (Fig. 3).



Figur 3. Testyta för markbaserad och flygburna test av simulerade gasläckage från avfallsupplag, Filborna, Helsingborg.

Resultat

Resultat från brandövningsfältet BARBARA - naturgasläckage

Resultaten från de aktuella försöken med flygburen IR-teknik för detektering och visualisering av gas ingår som ett viktigt komplement till resultaten från de olika markbaserade fältlaborativa försök som tidigare utförts i pilotstudien, vid gasövningsplatsen i Malmö och vid Filborna avfallsupplag i Helsingborg.

Vad gäller gasdetektering finns två olika typer av metoder, (1) en metod där man gör jämförande analys av skillnader i strålningstemperatur för ett mätobjekt och ett referensobjekt, och där man använder ΔT som ett mått och indikator på ett avvikande tillstånd, en sekundär effekt av förekomst av ett gasläckage (indikatormetoden), och (2) en metod där man direkt kan visualisera ett gasläckage ("passive gas imaging"). I vissa fall kan endera metoden användas, i andra fall kan de båda metoderna komplettera varandra.

Grundläggande för infraröd teknik eller termografi är att man registrerar och analyserar avvikande strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster, där ΔT förekommer mellan ett mätobjekt och ett referensobjekt. Avvikelser i strålningstemperatur och form och utseende på strålningstemperaturmönstret används som indikator på skada eller avvikande energirelaterat tillstånd på teknisk infrastruktur, produktions- eller distributionssystem, som fjärrvärme- el, VA-, eller på en gasledning. Metoden används också med framgång för statusbestämning inom andra tillämpningsområden, som t ex inom byggnads, material, tillverknings, och försvarsindustrin.

Flygvärmebilden, figur 4, visar avvikande strålningstemperatur för en markyta med ett i övrigt homogent strålningstemperaturmönster där de ljusa ytorna/punkterna indikerar läckage av metangas från markförlagd ledning. Gasen från det simulerade läckaget transmitteras genom de olika materialskikten från ledningen upp till markytan där gasen emitteras och ger upphov till en sekundär effekt i form av avvikande strålningstemperatur och temperaturmönster. Värmebilden är registrerad den 16/10, kl. 10.16, från en flyghöjd på ca 30 m (90 ft) och med ett gstryck på 0.5 Bar. Figuren (4) indikerar att det finns upp till fem läckage på ledningssystemet. Totala läckflödet kan bedömas vara 2 - 10 nm³/h.

Vid det aktuella tillfället kunde gasläckaget inte visualiseras. Orsaken till detta är att nedsvepet från helikopterns rotor ger upphov till kastvindar som effektivt sveper bort och blandar om gasen. Vid liknande fältlaborativa försök med IR-systemet monterat på en brandstege på 30 m höjd kunde gasläckage visualiseras från 50 millibars tryck.

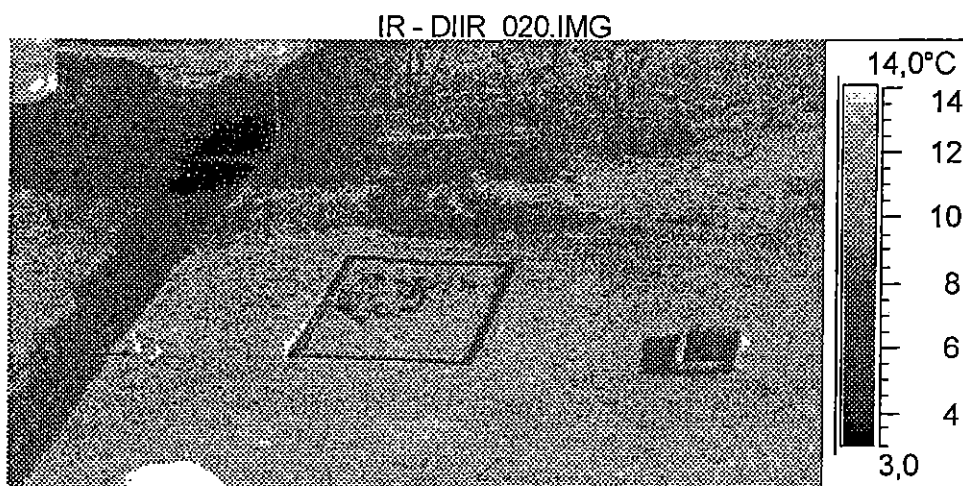


Figur 4. Flygvärmebild med avvikande strålningstemperatur och temperaturmönster, ljusa punkter som indikerar läckage av metangas från markförlagd ledning, bekräftat i fält. Flyghöjd 30 m (90 ft), gstryck 0,5 Bar.

Flygvärmebilden, figur 5, är tagen från ca 60 m (180 ft) höjd, med 0,5 Bars gstryck. Detta gstryck motsvara ett läckflöde på 2 - 10 nm³/h. Registreringen är utförd den 16/10, kl. 15.11, d v s fem timmar senare än värmebilden figur 4. Notera att de sekundära effekterna av förekomst av gasläckage i likhet med figur 4 framträder klart i figur 5, men återfinns här som mörka väl avgränsbara punkter mot en ljusgrå bakgrund. Skillnaden i gråtonsåtergivning vid läckageställena i figur 4 och 5 förklaras av att värmebilden i figur 4 är registrerad på förmiddagen vid en tidpunkt då gasen är varmare än omgivande markyta (ljusa punkter), medan värmebilden, figur 5, är registrerad på eftermiddagen då marken värmts upp och gasen är relativt sett kallare än omgivande markyta (mörka punkter). Gasen i figur 5 kan i likhet med figur 4 inte visualiseras p g a ett kraftigt nedsvep av luftströmmar från helikopterns rotor som effektivt transporterar bort gasen från markytan.

Vid högre gstryck (ca 4 bar och uppåt) kunde gasen visualiseras med befintlig värmekamera. Gasflödet var då i storleksordningen 50 - 100 nm³/h. Speciellt tydligt framträder gasen på de videofilmer som togs vid mättillfällena och där gasens rörelse tydligt kan urskiljas.

Grundläggande vid termografi är att tolkning och analys av värmebilder normalt avser jämförelser av relativ strålningstemperatur och strålningstemperaturmönster. Vid mätning av absoluttemperatur i en värmebild krävs information om ytmaterialens egenskaper och emissionsfaktor.

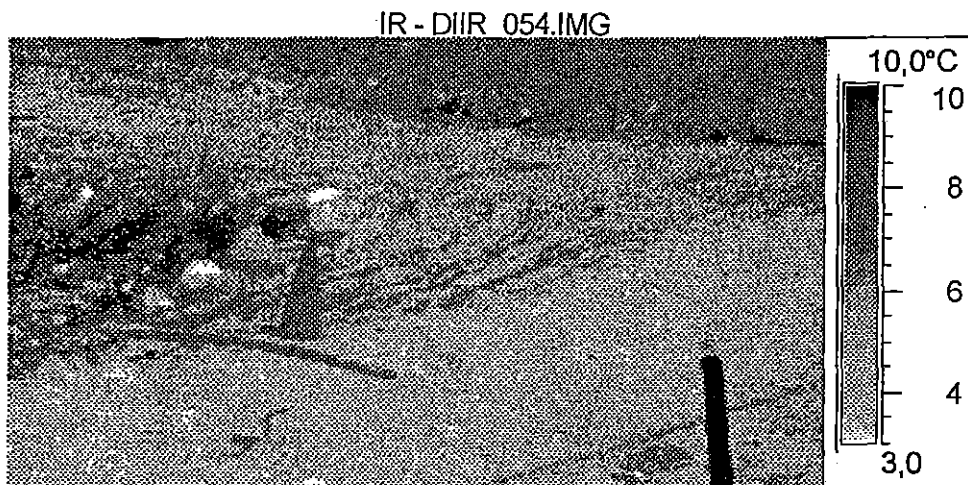


Figur 5. Flygvärmebild som i likhet med figur 4 visar avvikande strålningstemperatur och temperaturmönster och indikerar läckage av metangas från markförlagd ledning, mörka punkter, bekräftat i fält. Flyghöjd 60 m (180 ft), gastryck 0,5 Bar. Gasen kan inte visualiseras p.g.a. ett kraftigt nedvep av luftströmmar från helikopterns rotor.

Visualisering av biogas från avfallsupplag

Läckage av biogas (ca 50 % metangas, ca 50 % CO₂) sker genom att gasen transmitteras genom olika marklager genom sprickbildningar i upplaget upp till markytan, varifrån den emitteras till atmosfären. Nedbrytning av organiskt material och bildandet av biogas sker genom en anaerob process, d v s utan närvaro av luftens syre. Läckage av biogas ger upphov till en markant temperaturhöjning i markytan vid läckagestället (20 - 60°C) och är oftast lätt att detektera med IR-teknik. Det är också möjligt att visualisera ett läckage av biogas från ledningssystem vid en avfallsanläggning, vilket illustreras i värmebilderna, figur 6.

I figur 6 visas ett av sex vertikala gasrör som anslutits till ett system av horisontellt förlagda rör placerade inne i avfallsupplaget, med syfte att transportera biogas till en pumpanläggning för behandling av gasen och utvinning av energi. Vid tillfället för registrering var de vertikala gasrören inte anslutna till pumpstationens ledningssystem, utan biogasen strömmade rakt ut i atmosfären. Den utströmmande gasen kunde inte ses med blotta ögat, men kunde registreras och visualiseras med hjälp av flygburen IR-teknik. Värmebilderna, figur 6, visar hur biogasen strömmar ut från avfallsupplaget via ett av de vertikala rören. Resultatet är unikt och har rönt stor internationell uppmärksamhet. Läckaget av biogas från de sex rören finns registrerat i real-tid på videoband som finns bl a hos SGC. Flyghöjd ca 60 m (180 ft), gasflöde ca 15m³/timme.



Figur 6. Flygvärmebilder som visar läckage av biogas från ett vertikalt rör vid Filborna avfallsanläggning. Flyghöjd ca 60 m (180 ft), gasflöde ca 15m³/timme.

Utvärdering av teknik och metod

IR-teknik. Som påpekats inledningsvis bör noteras att IR-systemet som använts vid testen inte är utvecklat för gasdetektering, utan för övervakningsändamål. Tillverkaren kände inte till att detektorn i värmekameran var känslig inom absorptionsbandet för metangas 7.9 μm . Det var av en ren tillfällighet som det uppdagades att AGEMA THV 1000 kan användas för att detektera och visualisera läckage av metangas. Upptäckten gjordes i samband med traditionell termografering i syfte att kartlägga metodens användbarhet och begränsningar för att detektera sekundära effekter i form av avvikande marktemperatur som ett indirekt mått på förekomst av gasläckage från ledning ovan och under mark, och från avfallsupplag.

Resultaten från upprepade markbaserade och flygburna fältlaborativa försök visar att högupplösande IR-teknik är en framkomlig väg för att detektera och visualisera gasläckage från tekniska system och från avfallsupplag. De olika flygburna försöken gav kunskap om beteendet hos

metan- och biogas i atmosfärens nedre skikt och om den aktuella IR-teknikens fördelar och begränsningar. Resultaten från försöken bekräftade att IR-tekniken har en stor informationspotential, men att såväl teknik som metod bör vidareutvecklas, uppgraderas för att kunna bli operativ och kostnadseffektiv för gasillämpningar.

Instrumentplattformen, GIMBLE, ARGUS 350 Stable Eye type C bör uppgraderas och optimeras för flygburen gasdetektering. Resultaten från flygtesten gav uppslag till en rad tekniska åtgärder för att förbättra de operativa egenskaperna hos instrumentplattformen. T.ex. krävs en distinkt målsökning med möjlighet att bibehålla och fokusera objektet i bild vid oplanerade rörelser hos helikoptern.

Helikopter som instrumentbärare, dess operativa användbarhet och begränsningar för flygburen gasdetektering testades. Det konstaterades att det generellt sett är svårt att stillastående fokusera ett objekt (hovra), dels för att helikoptern normalt är känslig för vindrörelser, dels för att nedsvepet från rotorn effektivt sveper bort gasmolnet vid markytan och gör det omöjligt att visualisera gasen, speciellt vid låg höjd (30 -100 m), lågt tryck och låga flöden. Vidare bekräftades vikten av att flygtesten planeras noggrant och utförs av en väl samtränad besättning (pilot och operatör).

Förslag till fortsatta försök

Det är viktigt att i fält testa och utvärdera operativ användbarhet och begränsningar inte bara av enskilda tekniska komponenter och delsystem, utan av hela systemkonceptet, inkluderande IR-system, instrumentplattform, instrumentbärare (helikoptern), navigeringssystem (GPS) pilot och operatör.

Fortsatt FoU-verksamhet bör i första hand inriktas mot vidareutveckling och fältlaborativa test av THV 1000 för detektering och visualisering av gasemissioner. Eventuellt bör ett nytt högupplösande IR-system tillverkas som är specialdesignat för gasdetektering, med en detektor känslig inom den specifika gasens absorptionsområde, kombinerat med en högupplösande videokamera för registrering inom synligt ljus. Med denna typ av systemkoncept kan man koncentrera sig på att utveckla ett IR-system med en högupplösande smalbandig detektor speciellt anpassad till den aktuella gasen och komplettera med en ljuskänslig videokamera med god geometrisk bildåtergivning, där IR-bilden överlagras på en fotografisk bild, en s.k. "superviewer".

Instrumentplattformen bör vidareutvecklas. Repetativa tester bör utföras för att ta fram underlag för att förbättra plattformens operativa egenskaper för gasillämpningar.

Vidare bör upprepade fältlaborativa försök med hela systemkonceptet utföras, för tekniska delsystem och metoder under olika väder och utstrålningsförhållanden för att testa den flygburna IR-teknikens och arbetsmetodens operativa användbarhet och begränsningar.

Delar av den föreslagna FoU-verksamheten planeras att utföras inom ramen för ett fördjupat svenskt projekt, respektive inom ett internationellt samverkansprojekt.

Bilaga 1

State-of-the-Art and Future Plans for IR Imaging of Gaseous Fugitive Emission

S Å Ljungberg, T J Kulp, T G McRae

Reprinted from Termosense XIX, 1997:

An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications

PROCEEDINGS REPRINT



SPIE—The International Society for Optical Engineering

Reprinted from

Thermosense XIX: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications

22–25 April 1997
Orlando, Florida



Volume 3056

State-of-the-Art and Future Plans for IR Imaging of Gaseous Fugitive Emission

Sven-Åke Ljungberg

The Royal Institute of Technology, Dept. of Built Environment
Box 88, S-801 02 Gävle, Sweden

Tom J. Kulp

Sandia National Laboratory
Livermore, CA 94551-0969, USA

Tom G. McRae

Laser Imaging Systems
Punta Gorda, FL 33950, USA

ABSTRACT

The means to detect, visualize and survey different kinds of gases within industrial and energy processes, technical infrastructure, landfill bodies, indoor and outdoor environment are discussed. The current status and future plans for IR imaging technologies in the US and in Sweden are described. Primary consideration is given to mobile and airborne Remote Sensing systems, such as current laser-based imaging technologies, advanced IR systems with and without filter techniques, and two-dimensional gas-correlation techniques, being used or under development. Results of recent laboratory and field experiments involving the imaging of natural gas leaks under both controlled and actual conditions are presented and discussed. Plans for future field testing and technology improvements are described.

Keywords: gas imaging, gas leak detection, fugitive emission, thermography, IR-Laser, backscatter laser radiation, gas manufacturing-distribution, landfill bodies, dangerous goods, function, security.

1. INTRODUCTION

Gas emissions appear from a large range of sources related to production and distribution systems, industrial and energy processes, transportation systems for dangerous goods, leaks from landfill bodies or natural sources like peat mosses, etc. Some of the gases are potentially explosive or poisonous, others are harmless if not mixed with other material, like oxygen or hydrogen. Leaks may influence the function of production and distribution systems, or may be hazardous to human life or environment. Different gases have different gas characteristic, flow, pressure, spatial distribution, and absorb light in different absorption bands.

For example, methane gas is a gas which is flammable and explosive at a mixture of 5-20 % in air, and appears both in the natural environment and in man made production and distribution systems. Methane gas has its absorption peaks both in 3.37 and 7.9 μ m, has pressure conditions which varies from < 1 millibar for

leaks from landfill bodies to 3-8 bar for gas production and distribution systems. Methane gas has 23 times more influence on the energy balance of the atmosphere than for instance CO₂. Another example is liquefied petroleum gas (LPG) which is a highly flammable and explosive gas. While methane gas is lighter than air and tends to rise up into the sky, LPG is heavier than air and tends to stay near the ground.

It is for several reasons of importance to be able to detect the leak source of gases, and to visualize and map the spatial distribution of the gas plume. Most gases are not detectable by human sensor systems, and traditional surveying techniques and methods have poor accuracy, are labor intensive, and are normally not cost-efficient.

There is a need for highly sensitive and flexible gas imaging techniques for detection of leaks from different gas sources, with ability to detect leak plumes at an operating range from a few meters up to 500 m (1500 feet) or more, and with a geometric resolution from 1 square mm for small scale surveying, up to 10-100 square mm for large scale surveying. There is also a need for cost-efficient operative methods that define the advantages and limitations of the gas imaging techniques for a specific gas application.

Modern remote sensing techniques like high resolution thermography and powerful laser systems have opened up new possibilities to develop accurate, stable and cost-efficient handhold, landmobile and airborne gas detection systems for a wide variety of applications. This paper gives the state-of-the-art for active and passive remote sensing techniques and methods to detect, visualize and to map the spatial distribution of different gases. Most of the studies presented are devoted to detection of methane gas, mainly for scientific and practical reasons. The techniques and methods presented are applicable for most other gases, using suitable detectors, filters, lasers, etc.

The Gas Research Institute (GRI) in the US has for several years performed a substantial research of active remote sensing in order to develop gas detection techniques, mainly for gas production and distribution system applications. The research has been performed by contractors like Laser Imaging Systems (LIS), Lawrence Livermore (LLNL) and Sandia National Laboratories (SNL). The Royal Institute of Technology, Department of Built Environment (KTH-BMG), and the Lund Institute of Technology, Division of Atomic Physics Sweden have performed research devoted mainly to passive remote sensing techniques for a wider variety of applications, aiming at gas production and distribution systems, landfill bodies, transportation of dangerous goods, and health related problems, and gases within industrial production processes in buildings.

An agreement has been made between GRI and KTH-BMG to create a base for an international exchange of experiences with the aim to form an international research project for gas detection, including gas production and distribution system and environmental applications. This approach is supported among others by Swedish gas producers & distributors like Sydgas AB, Vattenfall Naturgas AB, The Swedish Gas Technical Center, and by commercial companies dealing with landfill bodies, like Nordvästra Skånes Renhållnings AB (NSR), Sydvästra Skånes Renhållnings AB (SYSAV), and by Swedish safety authorities, like Malmö Firebrigade. We welcome other internationally established researchers and institutions to participate in this project.

2. GAS-DETECTION TECHNIQUES AND METHODS

The detection and location of gas leaks is a common problem in a variety of industrial activities that include natural gas production, chemical and petroleum production, and industrial applications requiring integrity testing of sealed systems (detection of pinhole leaks in refrigeration coils, fuel tanks, etc.). Similar technical problems of gas leak detection do also apply for gas emissions from other gas sources and activities, like gas manufacturing at landfill bodies, transportation of dangerous goods, and health related problems of buildings. Motivations for leak detection include reduction of product loss, concerns for safety, and compliance with environmental regulations. The technical requirements for an ideal leak sensor differ from those of a typical point gas sensor (such as a stack monitor or gas chromatograph), because it must measure the gas density as a function of spatial position in order to determine the location of a leak source.

In recent years, infrared (IR) gas plume imaging has emerged as a new means of leak detection that can instantly indicate gas plume spatial distributions. Gas imaging systems have been developed that operate in both active and passive modes. In active imaging, a laser is used to illuminate a scene as it is viewed by an IR camera (1). A gas plume present in the scene is visualized if it absorbs a sufficient fraction of the backscattered laser radiation to create a detectable contrast in the video image. In passive imaging, a scene is imaged via its thermal IR emission using a spectrally-filtered (by a filter, etalon, or spectrometer) camera that permits an image to be made using a narrow band of wavelengths. A gas image is generated if a plume is present in the scene that absorbs at wavelengths in the spectral passband, and if the plume has a sufficient temperature or emissivity difference from the background to create a contrast in the image (2). Passive gas imaging has been investigated by many organizations, Sandsten (3), Chiarantini, et al (4), Kanagava, et al (5). A lot of the research of passive gas imaging have been performed by military research institutions, and the reports have not been available.

To date the US active imaging efforts have involved use of CO₂, IR HeNe and difference frequency solid state lasers. The results of some active and passive imaging work conducted at Osaka Gas Company (Japan) were reported in 1995 (5). The Osaka Gas work used both an IR HeNe laser and a globar lamp as the illumination source.

Passive Gas Imaging

The instrumental requirements for passive gas imaging differ depending on if the purpose for the surveillance is to: (a) trace and indicate a leak source, (b) detect a leak source, visualize the gas plume, and map its spatial distribution, or (c) detect gas leaks, visualize and make concentration measurements of the gas. This generally requires a high resolution infrared system with a detector with its peak sensitivity corresponding to the absorption band of the specific gas to be studied. If the IR camera has a broad band detector a bandpass filter designed for the absorption band for the specific gas is usually requested. This blocks out disturbing background radiation, improving the signal-to-noise ratio, and increasing the sensitivity to the gas of interest. When making gas visualization and concentration measurements with passive gas imaging one have to work with two wavelength or some kind of gas-correlation technique like in the study "Gas imaging using infrared gas-correlation spectrometry", by J. Sandsten (3).

Passive gas imaging with infrared techniques with and without filters has been used to indicate and visualize gas leaks from distribution pipes buried in ground or placed above ground. There has been two stages of development using: (a) traditional thermography to detect secondary effects of the presence of gas, such as temperature differences on the surface, and variations in surface temperature patterns, (b)

passive gas imaging techniques, which like in the active gas imaging is used to directly visualize the gas, detect the gas leak source, and give information of the gas plume spatial distribution in real-time. Here referred as (a) "traditional thermography", respectively (b) "passive gas imaging".

Traditional thermography to detect secondary effects of gas leaks is used commercially for instance in the US. Results from field experiments performed within the gas project of Malmö, Sweden (see "3. Laboratory and field tests.."), proves that traditional thermography could be used as a rather simple indicator method to indirectly point out gas leaks from pipes buried in ground, and probably also to detect gas emissions from landfill bodies. Similar experiences have been achieved from a comprehensive research project investigating the advantages and limitations of airborne and landmobile thermography for district heating networks applications (6).

The shortcomings for traditional thermography, the indicator technique/method, are that it is weather dependent, and that the interpretation and analysis should be performed for surfaces with similar surface materials in order to avoid effects of variation in the emissivity factor. Besides, for leak detection from gas distribution systems, and for gas leaks in connection to accidents at transportation of dangerous goods, etc., one want to visualize the gas plume and determine the location of the leak source in real-time, and also to be able to follow the spatial distribution of the gas plume in order to give instructions for actions to technicians on ground. This could only be performed with either the passive (visualizing) or the active gas imaging technique/method.

Passive gas imaging in order to detect and visualize gases has been performed as experimental tests in laboratory, and as field tests, using different IR-techniques with and without filter, and using IR gas-correlation spectroscopy (3). The results from these tests indicate that it is possible to trace and detect gas leaks from gas production and distribution systems located above or buried in ground.

Compared to active gas imaging techniques IR-techniques have not been designed specific for gas imaging detection. Most of the tests have been performed with standard IR-techniques, taken from the shelf, with no modifications for gas application. Looking at the specifications of infrared systems available at the market it is easy to state that with few exceptions the systems are not suitable for gas detection. Either the detector is not sensitive enough or has its maximum sensitivity far away from the absorption pike of the spectral passband of the specific gas. One should bear this in mind when evaluating the technical shortcomings of to date passive gas imaging. For future use of passive imaging it is necessary to design or redesign IR-systems, detectors and filter techniques specific for gas applications.

The passive gas imaging work done by Osaka Gas consisted of both theoretical and experimental studies (5). The theoretical analysis showed the effect on the gas image contrast against the background of the gas temperature and the background temperature and emissivity. All of these parameters greatly effect the sensitivity of the passive imaging method, and since the gas temperature, background temperature, and emissivity may vary in an unknown manner in the field, the gas detection with passive gas imaging systems must be performed with caution, with current IR-techniques.

The Osaka experimental work studied the effect of IR filter bandpass on the ability of the IR camera to distinguish the image of the gas plume. The more narrow is the filter bandpass about the absorption wavelength of the gas, the better is the signal-to-noise ratio. However, a narrow filter bandpass decreases the amount of IR light transmitted to the detector making imaging of the gas plume more difficult. A variable bandpass filter is recommended to account for variations in background conditions and gas absorption properties.

Another passive method uses a gas correlation spectroscopy approach to selectively image the gas of interest (3). In the standard gas correlation spectroscopy method, light from a broad band IR source is passed through two identical absorption cells before being detected. One cell is filled with a high concentration of the gas of interest while the other is empty. Since the detected light passing through the gas-filled cell has no spectral content corresponding to the gas to be detected, it does not respond to the presence of any gas between the cell and the IR source. However, the light passing through the other empty cell is attenuated by the presence of the gas. This difference in signal corresponds to the amount of gas present. If another gas with a different spectral absorption pattern is introduced into the inspection region, it produces an attenuation of the light passing through both cells. This makes the gas correlation spectroscopy technique specific to the reference gas used.

In the work done by Sandsten (3), a split cassegrainian telescope is used to produce two images of a heated surface area. The light that makes up one of the images is passed through a gas cell containing the gas to be imaged. A computer is used to capture and process the two images. This image processing requires several seconds which currently limits the method at its current design to laboratory studies. Gas images of methane and nitrous oxide have been obtained with the gas correlation gas imaging technique, however no detection sensitivities have been reported to date.

Active Gas Imaging

The instrumental requirements for active gas imaging are: (a) laser emission at a gas-absorbing and atmospherically transparent wavelength; (b) framing at or near real-time video rates (30 Hz) to allow resolution of plume motion; (c) sufficient backscatter signal-to-noise ratio to permit visual detection of the attenuation caused by the minimum gas concentration that is to be imaged; (d) sufficient field-of-view to encompass a recognizable portion of the gas plume; and (e) sufficient spatial resolution to resolve the smallest plume to be detected.

The optical signal must be "budgeted" differently in an active imaging system than in line-of-sight two-wavelength systems. These line-of-sight systems focus the entire return signal onto a single detector and which is able to signal average for extended periods of time. To achieve two-dimensional operation, wide field-of-view, and high data rates, it is necessary to sacrifice imaging range and some degree of gas sensitivity. To date, active gas imaging systems have been developed with imaging ranges of up to 360 m (7) and gas sensitivities (for various gases) in the range between 1 and 100's of ppm-m (1).

The best way to describe gas imaging is with a picture such as the simulated leak location demonstration shown in Figure 1. For this demonstration, a leak was simulated at the top of the third gas cylinder from the right by using a refrigerant gas from the small cylinder at the base of the larger cylinders. The active gas imaging system produces a real-time standard black and white TV picture on the camcorder-style viewfinder for operator viewing, or can be hardwired to a larger TV monitor as shown in Figure 1. As can be seen, the presence of the leak and its source are easily identified.



Fig. 1. Active Gas Imaging Demonstration

In principle, active gas imaging can be achieved by a number of instrumental configurations that employ pulsed or continuous-wave (cw) lasers in conjunction with scanner- or focal-plane array (FPA)-based IR cameras. All commercially available systems developed to date employ a raster-scanned camera in conjunction with a cw laser source (8). Raster-scanning is achieved using a pair of galvanometrically-driven scan mirrors that sweep the laser beam and the instantaneous field-of-view of a single-element detector across the target at video rates. The optical arrangement that makes this possible is shown in Figure 2. With this design, the laser beam and the instantaneous field-of-view of the IR detector are synchronously scanned across the target area. Since the laser must only illuminate the area being inspected by the detector at any instant in time, useful detection ranges are achieved with minimal laser power. The signal generated by the detector is formatted to produce a laser-illuminated, real-time video image of the scene.

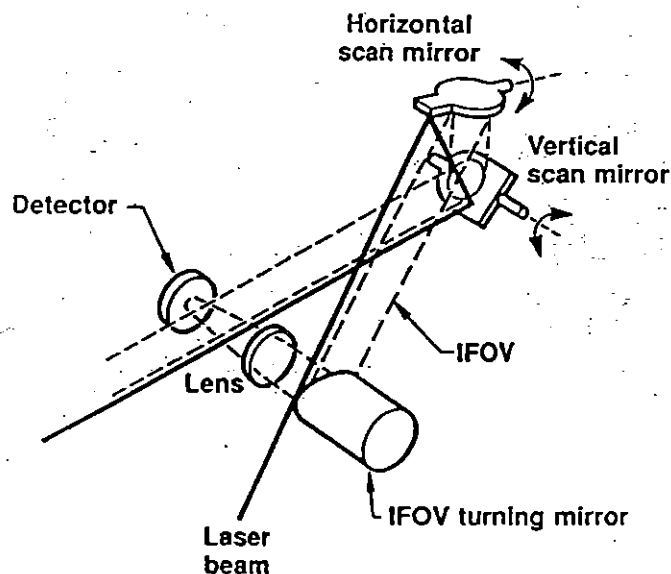


Fig. 2. The Synchro-scan Gas Imaging Optical Configuration

In the Osaka active gas imaging work (5), the expanded beam from an IR HeNe laser or a globar source was used to illuminate the background which was viewed by an IR camera. This is a much simpler approach than the synchro-scan systems, but has only a limited range due to the amount of power required to illuminate the background at distances greater than several meters.

3. LABORATORY AND FIELD TESTS, EVALUATIONS AND APPLICATIONS

Passive Gas Imaging

Field laboratory tests using passive gas imaging techniques have been performed, simulating leaks from methane gas production and distribution systems, during controlled pressure, flow and leak conditions, and during different weather and radiation conditions. The tests have been performed at a gas field laboratory site located at the Malmö Firebrigade gas fire exercise field, at the south coastal region of Sweden.

The main IR-system used in the tests is an AGEMA Thermovision 1000 with a Stirling cooled MCT SPRITE detector, 8-12 μm , with 798x400 pixels per image. operated with and without filters. The IR-system was mounted on a cart, a fire ladder and a hydraulic mast on a Mitsubishi Wagon, operating at a distances from 10 - 100 m from the gas leak source.

The gas field laboratory consists of two test sites, one site with an open steel gas pipe, a concrete construction with a steel pipe, and a rectangular area with three buried perforated polyurethane gas pipes covered with 1 m (3 feet) coarse gravel, Figure 3 (left). The other site especially designed for gas simulation has 8 polyurethane pipes buried 1 m in ground, with 0.5 and 1.0 mm holes, covered with different materials, like sand, gravel, clay, etc., with a grass surface for a part of one of the pipe graves, Figure 3 (right).

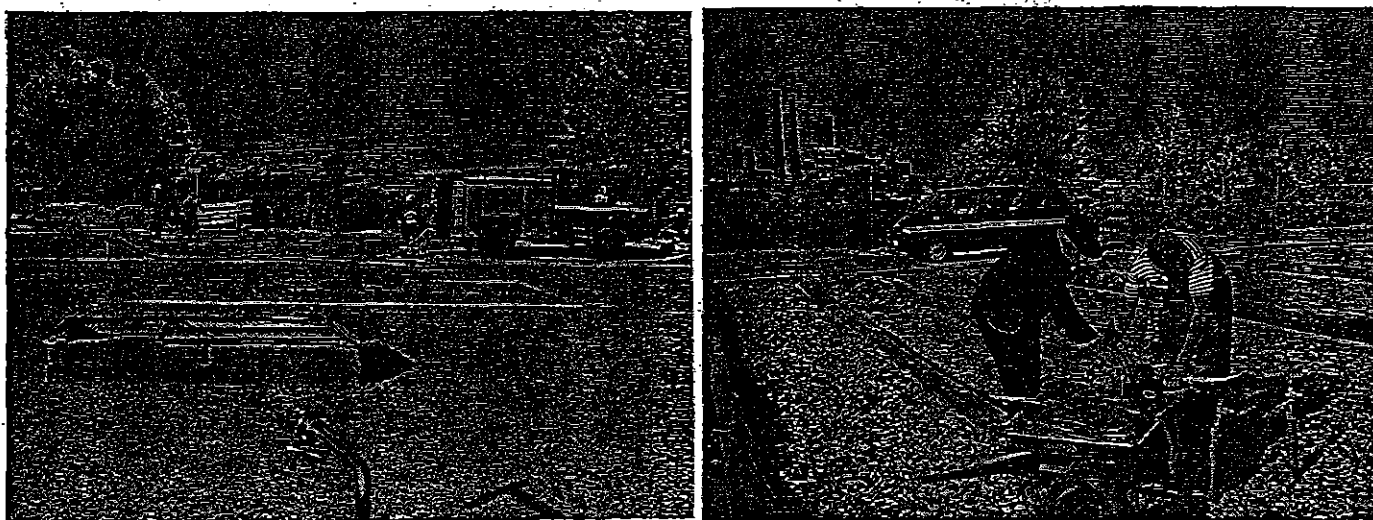


Fig. 3. The gas field laboratory with two test sites, one with gas pipes located above and buried in ground, (left,) and a test site designed for simulation of gas leaks from gas pipes buried in ground, with different cover materials, like sea sand, gravel, clay, and grass cover, etc. (right).

Simulation of methane gas leaks were made at pressure conditions from 1 millibar to 8 bar. Pressure, gas flow, surface gas concentration, radiation and weather conditions, surface temperatures of gas leak surfaces and of reference surfaces were measured before, during and after every test.

The tests were performed during the period June - December 1996, as day and nighttime registrations, at clear-sky and overcast conditions, with high and low sun radiation, low and high humidity (60 - 90 %), windspeeds from 1 - 10 m/s, and at surface and ambient temperatures varying from 25°C to -3°C. The gas leak simulation was performed for surfaces with homogenous surface materials in order to decrease the influence of the emissivity factor.

Most of the gas simulation test were performed with the infrared camera mounted on a hydraulic mast on a mobile unit, Figure 4. Airborne registrations with the IR-systems mounted on helicopter and fixed-winged aircraft are planned to be performed during Spring 1997.

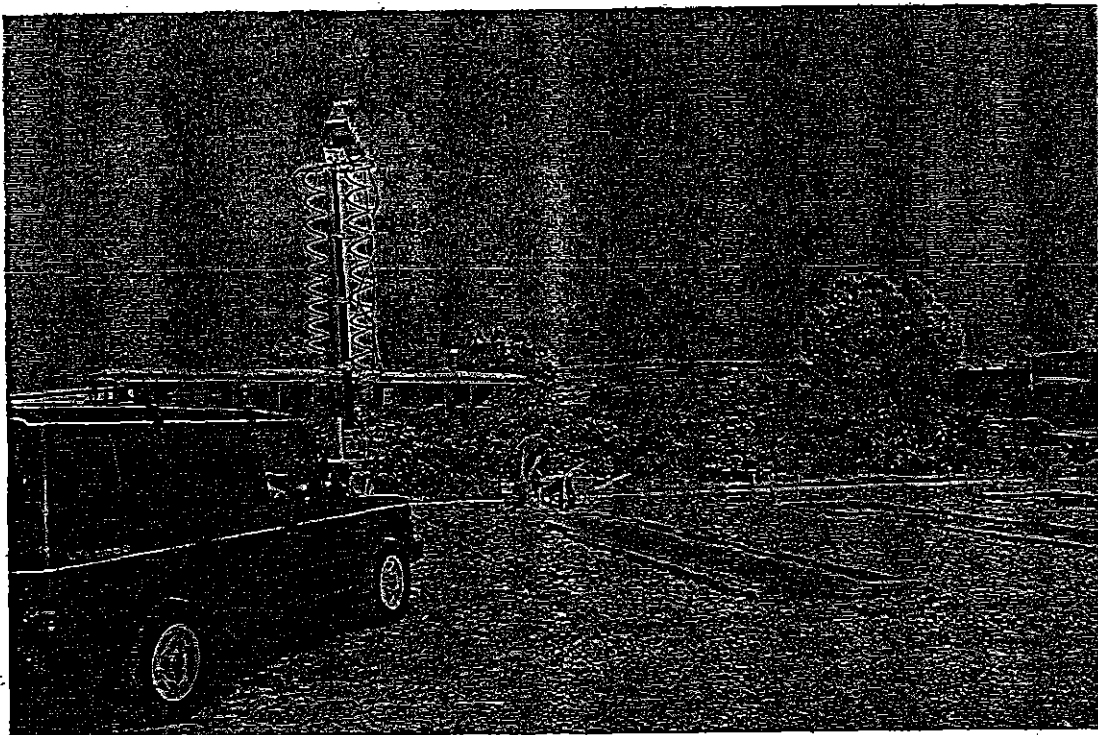


Fig. 4. The mobile unite with the IR-camera mounted on a hydraulic mast, and with an image laboratory within the car.

The results from the pilot-study performed at the Malmö Firebrigade gas exercise field should be looked upon as an information base for further research and development of passive gas imaging for different gas applications. The gas leak simulation tests brought up problems related to: detector sensitivity, spectral range of the IR-detector and the absorption pike of the specific gas, gas performance in different materials, pressure conditions, surface gas concentration, weather and radiation conditions, etc. It should for example be noticed that for some of the gas pipe graves designed for gas simulation, it was difficult to trace the gas leaks, and measure the surface gas concentration with traditional gas detection techniques, even at pressure conditions at 3 bars.

It is well known by technicians performing gas leak investigations in practice that it sometimes is very difficult to trace gas leaks from pipes buried in ground, and to pinpoint the leak source with traditional point gas sensors. The gas does take the easiest way up to the surface. This means that if the gas leak source is covered with heavy, tight materials like clay the gas finds its way up to the surface, and the leak could appear far away from the leak source. Regarding the gas test site we did know the location of the pipes and consequently should be able to trace and locate the gas leaks and measure the surface gas concentration. It should be noticed that the traditional gas inspection equipment was run by a technician with several years of experiences of gas detection. In order to find the gas leaks we put the gas on fire and found that the gas was dispersed on a large surface area for pipe graves with low surface gas concentrations, Figure 5. The results from this part of the study proves that it can be rather difficult and labor intensive to trace gas leaks with traditional point gas sensors.



Fig. 5. The gas lit on fire illustrates the problem of gas dispersion over large areas above the surface of the leak source, in this case a pipe with a 1 mm hole.

Because of the experiences with gas leak performance in different ground materials we put the gas on fire in order to map the gas surface dispersion and to pinpoint the leak source using it as a reference when several hours later making the test with passive gas imaging, simulating gas leaks from objects buried in ground.

Several tests were performed using traditional infrared surveying for relative measurement and comparisons of radiative surface temperature for gas leak detection from pipes buried in ground with temperatures for undisturbed reference surfaces, with similar surface materials and emissivity factor. The delta T in combination with deviation of temperature radiation pattern was used as indicators to trace and pinpoint methane gas leaks at the ground surface.

Some of the tests were performed as a 1 - 2 hours time-series registration with repeated storage of one image every ten minutes, on PC hard disk, and as a continuous recording on a video tape recorder. The tests

included both time series with one gas pressure level at 10, 15, 30, respectively 50 millibar, and series starting from 10 millibars ending at 8 bars pressure.

One of the results from this part of the study was that we noticed that a methane gas leak from gas pipes buried in ground gives a "foot-print" on the surface in a rather short time, from 10 minutes to 1 hour, depending on pressure level and weather conditions. At periods with high sun radiation, and high surrounding and surface temperature, one could easily follow the process where the leaking methane gas cools down as it adjusts to the atmospheric pressure, and makes its "foot-print" on the surface. The surface temperature at the leak source becomes gradually cooler, and appears as a dark spot in the thermogram, Figure 6 (left). During periods with low sun radiation, and low air and surface temperature the surface at the gas leak point gradually becomes warmer then the surrounding surface, and appears as a bright spot in the thermogram, Figure 6 (right).

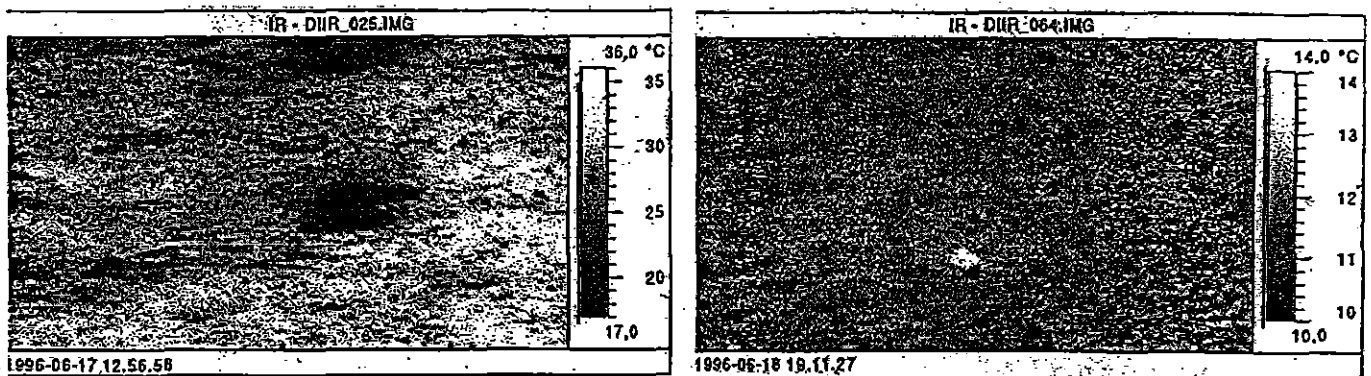


Fig. 6. Thermograms indicating gas leak from gas pipes buried in ground, with (left) a relatively lower temperature of the gas, dark spot in the thermogram, and (right) relatively warmer gas temperature, bright spot in the thermogram.

There are critical radiation and weather conditions which give low temperature differences of the leaking gas and the surrounding surface, influencing the signal-to-noise ratio due to low IR-radiation, fading out the information in the thermogram. This effect was more attenuated making tests with two new types of FPA-cameras, with lower thermal resolution. The problem described seems in general to be related to weather situations like stable low pressure overcast conditions, with low day light radiation. In our tests this phenomena appeared mostly at registration performed in December 1996, but also in short periods at the shift between day and night, due to low temperature contrast between the objects studied.

During the tests with the traditional thermography indicator method were also performed parallel tests using the IR-system as a passive imaging visualizing system, with and without filters. A comparison with the two methods showed that the passive gas imaging visualizing method was much more sensitive to unfavorable radiation and weather conditions than the traditional thermography method. The "foot-prints" of the gas leaks were still to be seen even at conditions where the gas was not visualized. This is of interest when evaluating the advantages and limitations of the present techniques and methods, and their complementary to another.

Fig. 7 illustrates the information potential of traditional thermography to indicate gas leaks from methane gas pipes buried in ground. The "foot-prints" of the gas leaks could clearly be distinguished by the dark spots on the surface. Notice also the gas plumes above the dark spots.

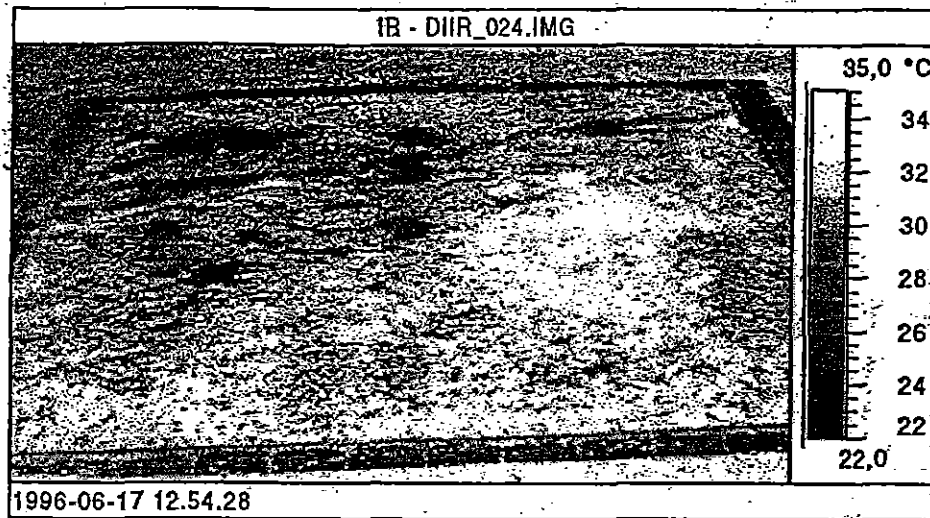


Fig. 7. Thermogram from traditional thermography with dark spots = lower relative radiative temperature, indicating methane gas leaks simulated from three perforated pipes buried in ground.

Performing gas simulation tests using the IR-scanner for passive gas imaging, without filter, the gas plume could easily be detected from 1 millibar pressure, during appropriate radiation and weather conditions. At low daylight radiation, heavy overcast in combination with a low delta T of the gas and its ambient surrounding it was difficult to visualize the gas plume. Improvements of the delectability was achieved by mounting a bandpass filter. Different field tests gave at hand that it was easier to see the gas plume with the filter, from 1 millibar up to 3 bars pressure. From 3 up to 8 bars pressure the gas plume was easier to detect and visualize without filter. Even at nighttime registrations the gas plume could be detected and visualized. Registrations were performed from 10 -100 m (33 - 330 feet) distance from the objects.

The information potential of passive gas imaging is illustrated by Figure 8 a-c, which shows (a) gas plumes from gas simulations of three perforated pipes buried in ground, surveyed with IR with filter, (b) a gas plume from a pipe mounted in a concrete construction, and (c) a gas plume from an open gas pipe. It should be noted that these figures do not give justice to the quality of the visualization of the gas plumes, but should be seen from the video recordings.

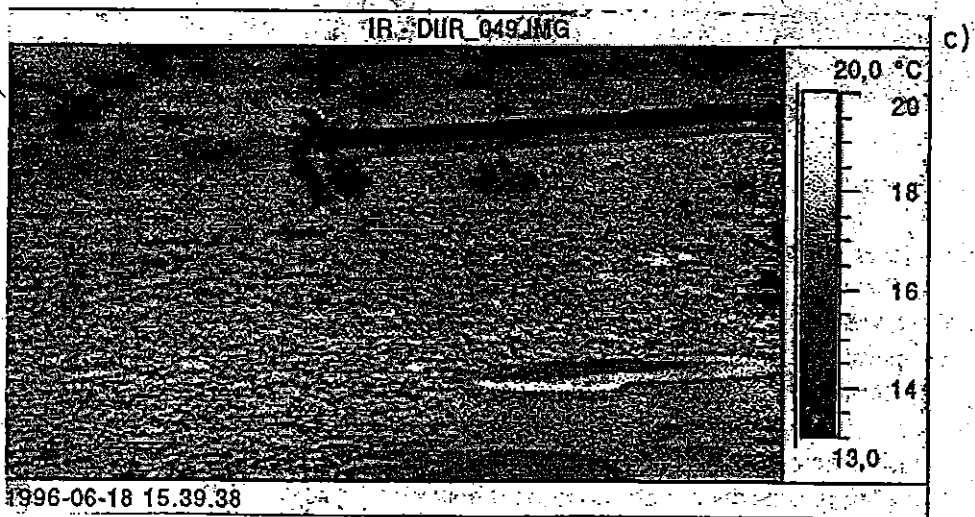
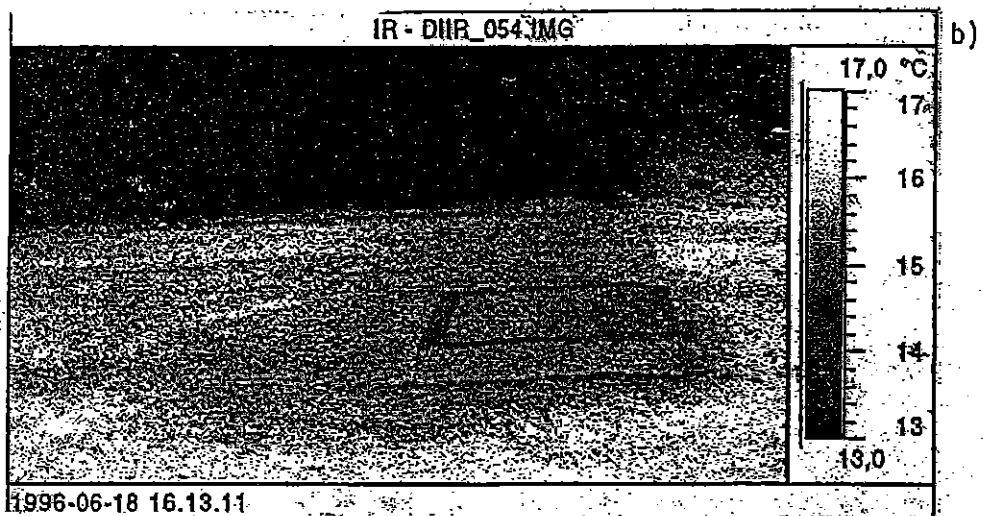
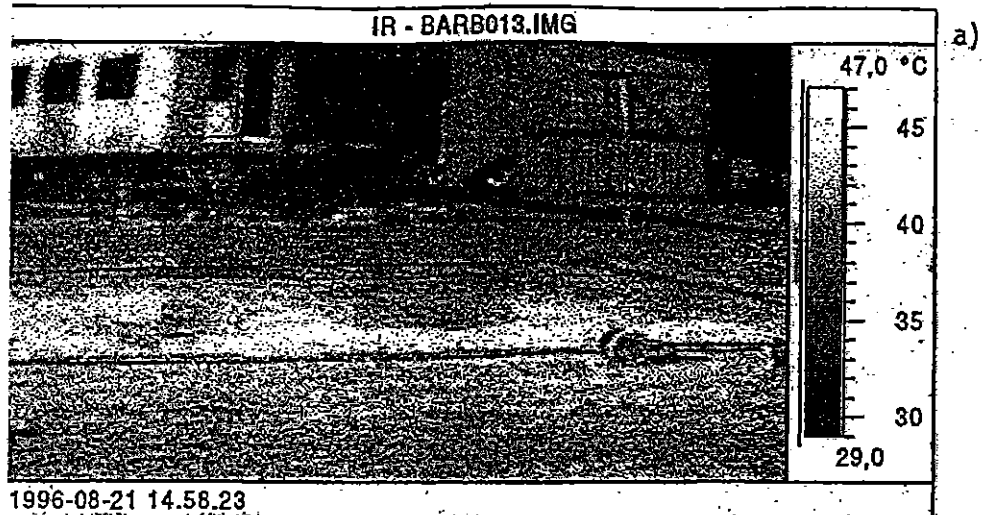


Fig 8 a-c. Detection and visualization of methane gas plumes with IR with filter, from (a) three perforated pipes buried 1 m (3 feet) in ground, (b) a pipe located in a 1m deep open concrete construction, (c) an open pipe, \approx 0.5-1 bars pressure..

Active Gas Imaging

Synchro-scan gas imaging systems have been built using either CO₂ or IR helium neon (HeNe) lasers. The former is capable of detecting over 70 different gases absorbing in the 9-11 μ m range of the IR. The latter operates at 3.39 μ m and was developed by Laser Imaging Systems (LIS) under funding by the Gas Research Institute (GRI) to detect methane in natural gas emissions. An image generated by the HeNe-based system at a gas utility compressor station is shown in Figure 9. Although this proof-of-concept system has demonstrated the ability to visualize natural gas leaks as small as that required for a typical appliance pilot light (9), the available power of current IR HeNe lasers has restricted the operating range of the system to less than 7 meters. In order to be useful to the gas industry, a range of at least 20 meters is required.

LIS has been able to use the IR HeNe active gas imaging system to study the dispersion of above-ground natural gas leakage plumes (10). A controlled leak facility was constructed to produce a range of leak rates into several different windspeeds that allowed simultaneous top and side viewing by the IR HeNe imaging system. These two-angle video images were processed and used to produce a natural gas leakage optical density plume model. If certain assumptions can be made about the leakage plume dispersion mechanics, the concentration within the plume can be extracted.



Fig. 9. Active Imaging of Natural Gas Compressor Station Leaks.

Even with CO₂ lasers up to 20 watts, the imaging range of the first synchro-scan active systems was limited to 80-100 m. The need for longer range motivated work at Lawrence Livermore (LLNL) and Sandia National Laboratories (SNL) to develop a new gas imaging system that could operate at ranges compatible with airborne operation from a helicopter. Under funding by the US Navy, range improvement was achieved by developing a new raster-scanner design that increased the receiver collection aperture by using telescopic optics and separated transmitting and receiving optical paths (7). During later evaluations (11), it was used to visualize controlled plumes of sulfur hexafluoride (SF₆) having path-integrated densities as low as 3 ppm-m at ranges as distant as 364 m.

SNL has also been involved in the development of a pulsed gas imaging system (12). This work, funded by GRI and the US Department of Energy (DOE), was motivated by the need for a natural gas imaging system having greater standoff range than the LIS IR HeNe system. This SNL proof-of-principle pulsed design

uses a 30 Hz repetition-rate difference-frequency laser (100 mW average power) to flood-illuminate a scene as it is imaged by a 256x256 snapshot-mode InSb FPA (see Figure 10). The 200 μ sec gate of the FPA is synchronized with the laser pulse to allow efficient collection of the backscatter signal, while minimizing the collection of passive radiation. Range is increased because of the high average power of the pulsed source and the large collection aperture that is compatible with the FPA receiver. The first pulsed imaging system demonstrated a range of about 25 m; however, when an improved customized FPA is installed in the system, the range is projected to increase to greater 70 m.

In addition to range, the pulsed imaging system provides benefits not presently available in the synchro-scanned systems. High resolution operation with an FPA increases sensitivity to small leaks. Pulsed operation is compatible with nonlinear conversion processes that allow access to many long- and mid-IR wavelengths not attainable with a cw source, thereby increasing the number of gases that can be detected. The source used in the SNL system is continuously tunable over the 3-3.5 μ m range, thereby spanning the bulk of the IR CH-stretching region. This allows virtually any organic vapor to be imaged.

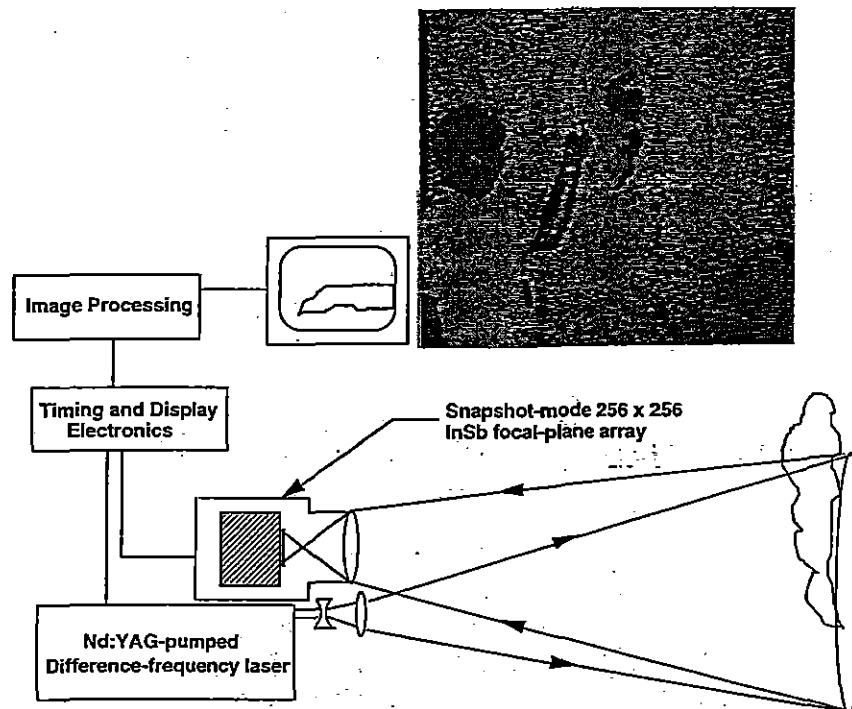


Fig. 10. Active Imaging Using a Pulsed Laser and Focal Plane-Array Camera

Finally, rapid continuous tuning makes differential two-wavelength imaging possible (13). The SNL pulsed imaging system is currently capable of operating in two frequency-switching modes. In the first, frames are displayed as the laser is rapidly switched between preset wavelengths that are on and off a gas absorption band. This causes the gas plume to flicker in the video image, making it more noticeable to an operator. In the second, frames collected at the different wavelengths are subtracted or divided and the result is displayed. Ultimately, this mode may be used to determine path-integrated gas density. This is effectively an imaging differential absorption lidar (DIAL).

Table 1 summarizes the past, current and development status of the active gas imaging systems.

TABLE 1. Status of Active Gas Imaging Systems

System	Laser	Power (watts)	Wavelength (μm)	Range (m)	Field-of-view (degrees)	Resolution (mrad)
Original synchro-scan(a)	CO ₂	20	9-11	100	18 x 14	3-4
Original synchro-scan(b)	HeNe	.03	3.39	7	18 x 14	3-4
Long range synchro-scan(c)	CO ₂	20	9-11	360	3.6 x 2.7	0.6
pulsed FPA(c)	difference frequency OPA	0.1	3-3.5	70	5 x 5	0.02
Original synchro-scan(d)	PPLN OPO	2	1-5	40	18 x 14	1
Improved synchro-scan(d)	CO ₂	3	9-11	36	18 x 14	1.3

(a) developed at LLNL & LIS, (b) LIS, (c) SNL, (d) under development

Available gas imaging techniques and methods

To date there are active gas imaging techniques and methods on the market, mainly for industrial applications. The past, current and development status of active gas imaging systems is presented in table 1. Here one can see that there is a rapid development towards more powerful and sensitive active gas imaging systems. Three versions of synchro-scan gas imaging systems are on the market. All three use a cw CO₂ lasers in the 3-8 W power range, trademark "GasVue". One version is a tunable system capable of imaging about 80 different gases at ranges of up to 30 meters. The primary application of this GasVue system is the location of fugitive gas emissions at chemical plants and other industrial facilities.

The other two versions are single gas systems which in their standard configuration are tuned to image the tracer gas SF₆. The short range model (5 m) has located SF₆ leaks as small as 51 gm/year (0.016 std. cc/min), and is designed for fixed installation assembly-line leak checking applications (15). There is also a shoulder-mount version of this single gas system which has a leak detection range of 10 m. Both of these single gas systems can be designed to detect other gases, but at reduced leak detection sensitivity.

4. FUTURE DEVELOPMENT

Gas emissions from industrial processes, gas production and distribution systems, safety questions related to transport of dangerous goods, gas emissions from landfill bodies and natural sources, health related gas emissions in buildings are all problems of great national and international interest.

The result from passive and active gas imaging research presented in this paper proves the importance of international joint efforts in order to develop adequate techniques and methods for gas detection for both industrial, safety and environmental applications. The future research and development is planned to be organized within an international umbrella organization, run by among others The Gas Research Institute (GRI) US, The Royal Institute for Technology, Dept. of Built Environment, (KTH-BMG) Sweden, Gas producers and distributors represented by the Swedish Gas Technical Center (SGC), and by representative institutions for landfill bodies, and safety authorities from different countries.

The gas detection techniques, especially the active gas imaging technique, has come far in a short time. However, both the active and passive gas imaging techniques need a substantial support for further research and development. So does the development of cost-efficient operational gas detection methods. A mutual reasonable goal should be to produce complete gas imaging techniques and operative methods by the year 2000.

Regarding passive gas imaging there are plans to develop new or modify existing IR systems implementing detectors with high sensitivity within the actual wavelength band of the specific gas, and to test combinations of well defined bandpass filters for different gases and applications. There are also plans for development and modification of a gas imaging IR-scanner for large-scale surveying of gas distribution systems, gas emissions from landfill bodies, and environmental applications. It is also necessary to modify and perform tests of different instrumental platforms for landmobile, and airborne applications, including tests with GPS for position determination of leak sources. The research is planned to be performed by KTH-BMG in co-operation with research institutions in Scandinavian and in the US, and with instrumental manufacturers, and different end users.

Future activities at SNL include the continued refinement of natural gas imaging technology and the development of differential-mode imaging techniques to improve gas imaging sensitivity. In addition, SNL is involved in the development of a periodically-poled lithium niobate (PPLN) laser source suitable for continuously-tunable high power cw imaging in the 1-5 μm range.

The R&D efforts at LIS are focused on two areas: upgrading of the existing scanner design, and development of a production prototype natural gas imaging system. Under an Air Force funded SBIR project (14), LIS is designing a smaller, more mobile version of their CO₂ laser-based scanner with a high-resolution video image. This effort calls for the complete redesign of the synchro-scan optical system, and replacement of the CO₂ laser water cooling system by direct thermoelectric cooling. LIS is also working with SNL and several laser manufacturers toward developing cw laser systems capable of 0.25 W or better in the 3-3.5 μm region.

The international research group is planned to meet up 1 - 2 times per year in order to exchange experiences, and plan for future research activities of mutual interest. There are also plans to perform field tests with different gas detection techniques developed in for instance the US, in field test laboratories, and for land field bodies in Sweden, etc.

5. CONCLUSIONS

The results from the different research and development activities presented in this paper shows that gas imaging techniques have a great information potential for different gas applications. However, it also points out that there are important improvements to be done to stand up to the technical and operational requirements from the end user.

Different gas applications require different technical design and operational properties. This means that it is probably not possible to develop a gas imaging system that could meet the different requirements for all kind of applications. It is obvious that for leak detection of a gas distribution system or a landfill body is needed a more powerful laser, a more sensitive detector, larger operating range and field-of-view, etc., than for indoor industrial applications.

To date it is possible to use high resolution passive and active gas imaging techniques and methods to trace and detect gas leaks, and to map the spatial distribution of gas plumes. The passive gas imaging techniques and methods are to be considered not yet fully developed and scientifically tested for operational use in practice. While the active gas imaging techniques have reached a development stage where it could be tested operationally for different gas detection applications.

Passive gas imaging, if performed during controlled and appropriate radiation and weather conditions, could be used to detect methane gas leaks, and map gas plume spatial distribution at pressure conditions from 1 millibar to >8 bar, at an operating distance from 10 - 100 m. To date active gas imaging can be performed for a wide variety of gases, with gas sensitivities in the range between 1 and 100's of ppm-m (1), and at operating imaging ranges of up to 360 m (7).

Gas imaging techniques and methods have the potential to become an important tool for different gas applications in the near future. However, to reach this goal it is necessary to perform further and deepened research in order to develop operative techniques and methods, and to investigate the sensitivity to different gases, and the advantages and limitations of passive and active gas imaging for different applications.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The studies presented in this paper have been supported by the Gas Research Institute (GRI), US NAVY, US Dept of Energy, Sydgas AB, Vattenfall Naturgas AB, Nordvästra Skånes Renhållnings AB (NSR), Sydvästra Skånes Renhållnings AB (SYSAV), and by Malmö Firebrigade, Sweden. The authors would like to gratefully acknowledge the support and joint efforts which have led to the results from the R&D projects related in this paper.

7. REFERENCES

1. T. G. McRae and T. J. Kulp, "Backscatter Absorption Gas Imaging: a New Technique for Gas Visualization", *Applied Optics*, 1993, Vol 32, 4037-4050.
2. Flanigan, Dennis F, "Detection of Organic Vapors with Active and Passive Sensors: A Comparison", *Applied Optics*, Vol 25, No. 3, p. 4253, Dec 1986.
3. J. Sandsten, H. Edner and S. Svanberg, "Gas Imaging using Infrared Gas- Correlation Spectrometry", submitted to *Optics Letters*, 6/28/96.
4. L. Chiarantini and P. Coppo, "Infrared monitoring system for urban solid waste landfills: experimental activities for biogas outflow modeling, QIRT94- Eurotherm Series 42-EETI ed, Paris 1995.
5. T. Kanagawa, H. Ueda, K. Sumida and T. Nishio, "Flammable Gas Imaging System using Infrared Absorption", *Proceedings of the 1995 International Gas Research Conf.*, Vol I, p. 539, Nov, 1995.
6. S-Å. Ljungberg, "Thermography for district heating networks applications: operational advantages and limitations", *SPIE Vol 934, Thermosense X*, 1988.
7. T. J. Kulp, R. Kennedy, D. Garvis, L. Seppala, D. Adomatis, and J. Stahovec, "Further Advances in Gas Imaging: Field Testing of an Extended Range Gas Imager", *Proceedings of the International Conference on Lasers '90*, November, 1990.
8. T. G. McRae, (to U.S. Dept. of Energy), U.S. Patent 4,555,627, 1985.
9. "The Real-Time Visualization of Natural Gas Leakage Plumes by an Infrared Laser Imaging System", *GRI Topical Report, GRI-92/0335*, June, 1990.
10. McRae, T. G., and L. L. Altpeter, "Natural Gas Leak Dispersion Studies Using an infrared Gas Imaging System", *Proceedings of the 1992 International Gas Research Conf.*, Vol II, p. 1312, Nov, 1992.
11. Kulp, T. J., R. Kennedy, M. DeLong, and D. Garvis, "The Development and Testing of a Backscatter Absorption Gas Imaging (BAGI) System Capable of Imaging at a Range of 300 m", *SPIE Vol. 1936, Applied Laser Radar Technology*, 1993, p.204.
12. Kulp, T. J., P. E. Powers, and R. Kennedy, "Design of a Mid-IR Active Imaging System for Gas Detection using a Pulsed Laser Source", *CLEO/QELS '96*, paper CWB3, Anaheim, CA, June 1996.
13. Powers, P. E., T. J. Kulp and R. Kennedy, "Issues Effecting Differential Absorption Laser Imaging of Gas Leaks", *CLEO/QELS '96*, paper CWB17, Anaheim, CA, June 1996.
14. T. G. McRae, Development of a Portable Gaseous Leak Locator, SBIR Phase I Final Report, USAF AEDC/DOT, Arnold AFB, TN, May 1996, AEDC AF95- 003.
15. T. G. McRae, "Remote Sensing Technique for Leak Testing of Components and Systems", *Materials Evaluation*, 1989, Vol 47, 1308-1312.