



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE

*Dipartimento
di
Elettronica e Telecomunicazioni*

Rapporto n° DET-1-02

Impiego delle misure di
attenuazione IR laser
per il telerilevamento a piccola scala
delle specie gassose in atmosfera

Fabrizio CUCCOLI, Luca FACHERIS, Dino GIULI

Gennaio 2002



Sommario:

Introduzione	5
Premessa teorica	7
Radiazioni elettromagnetiche e molecole atmosferiche	7
Reti di monitoraggio ed elaborazione tomografica	9
Applicazioni	10
Apparati di misura	13
Campagne di misura.	16
Misure in ambiente geotermico	17
Misure in ambiente vulcanico	20
Ricerca di massimi con tecniche tomografiche	20
Scoperta di aree di emissione	24
Considerazioni finali	27
Riferimenti bibliografici	28
Riferimenti degli autori	29

Introduzione

Nel presente rapporto sono riportate le linee essenziali relative ai risultati dell'attività di ricerca svolta presso il DET nell'ambito di studi su sistemi innovativi di monitoraggio della composizione molecolare atmosferica per applicazioni a piccola scala. I sistemi di monitoraggio oggetto dell'attività di ricerca descritti in questo documento prevedono l'impiego, da un lato, di laser operanti nell'infrarosso come dispositivi chiave per la costruzione di apparati in grado di determinare le concentrazioni medie di tratta delle specie atmosferiche su volumi di atmosfera di dimensioni dell'ordine del chilometro e dall'altro, di tecniche di elaborazione dati a base tomografica, applicate alle misure su concentrazioni medie di tratta, per la stima della distribuzione spaziale delle concentrazioni molecolari atmosferiche.

I suddetti sistemi sono stati pensati e studiati per applicazioni di monitoraggio molecolare atmosferico, laddove gli attuali sistemi di monitoraggio puntiforme (es. le centraline di monitoraggio della qualità dell'aria nei centri urbani) non possono essere utilizzati o dove l'informazione sulla composizione molecolare atmosferica richiede una maggiore risoluzione spazio-temporale di quella ottenibile con i sistemi oggi disponibili.

Dopo una breve descrizione degli aspetti fisico-chimici utili alla comprensione delle capacità operative dei dispositivi impiegati, nel documento sono descritte alcune delle possibili applicazioni dei sistemi di monitoraggio proposti in condizioni reali.

La parte sperimentale dell'attività di ricerca è stata ottenuta con l'impiego di un apparato laser per la misura della concentrazione media di tratta di CO₂. È importante sottolineare che ai fini di questo documento, cioè di focalizzare l'attenzione sulle potenzialità dei sistemi di monitoraggio atmosferico proposti, non è significativa la scelta della specie molecolare; pertanto la CO₂ molecolare deve essere considerata semplicemente come specie molecolare di prova.

La disponibilità del suddetto apparato, in grado di fare misure di concentrazione media di tratta di una sola specie molecolare, ha permesso sia la verifica delle prestazioni di misura degli apparati laser che l'applicazione delle tecniche di elaborazione dati a base tomografica a misure reali, in modo da sperimentare la loro effettiva efficacia per il monitoraggio atmosferico nelle applicazioni reali. Tale efficacia è da quantificarsi ed intendersi nel senso di adeguata risoluzione spaziale e temporale della composizione atmosferica dipendentemente dall'applicazione considerata.

Si fa in ogni caso presente che la scelta della CO₂ nasce da alcune considerazioni: in primo luogo non è tossica, ed essendo reperibile a basso costo, è adatta per simulazioni di diffusione e trasporto in atmosfera; è presente in tutti gli ambienti considerati; è di particolare interesse come responsabile dell'effetto serra; è un indicatore in applicazioni geotermiche e vulcaniche. Parte dell'attività sperimentale è stata fatta proprio in ambienti vulcanici e geotermici grazie alla ottima conoscenza del comportamento della CO₂ in prossimità di siti noti di emissione da parte dei colleghi del Dipartimento di Scienza della Terra, con i quali da alcuni anni è attiva una collaborazione per la sperimentazione dei sistemi di misura proposti in applicazioni di monitoraggio di siti vulcanici.

È utile far presente che i risultati sperimentali presentati, anche se provenienti solo da misure in ambienti geotermici e vulcanici, non devono essere considerati circoscrivibili esclusivamente agli ambienti operativi presi in esame. Tutte le analisi e le diverse considerazioni circa prestazioni e le potenzialità dei sistemi di monitoraggio proposti sono da considerarsi valide in ogni possibile applicazione simile.

Per quanto è noto agli scriventi relativamente allo stato dell'arte della produzione di apparati laser in grado di eseguire le misure descritte, esiste attualmente solo un'azienda al mondo che produce e commercializza tali sistemi. L'architettura e le metodologie di misura di questi apparati sono in continua evoluzione; ad oggi questi sono in grado di misurare una decina di specie molecolari, sia su una, sia su molte tratte. La limitazione delle specie molecolari misurabili e le poche diversificazioni di architettura e metodologie di misura sono dovuti in parte a difficoltà effettive di carattere tecnico scientifico, ma per una rilevante parte anche alla scarsità della domanda commerciale rispetto a certi apparati. Attualmente il principale mercato di questi strumenti è quello del controllo delle emissioni degli impianti petrolchimici, che è di nicchia.

È auspicabile che i risultati delle nostre ricerche siano uno stimolo, da un lato, per accrescere le capacità di controllo e monitoraggio dell'atmosfera in tutte quelle situazioni dove questo è richiesto, e dall'altro, per attivare un interesse industriale ed economico in settori di mercato che, pur non essendo ancora rilevanti, potrebbero ricoprire una parte importante nel panorama dei sistemi e servizi per il monitoraggio ambientale.

Premessa teorica

Radiazioni elettromagnetiche e molecole atmosferiche

Le proprietà di interazione fra la radiazione elettromagnetica e i composti molecolari sono ben note da tempo, ma solo nell'ultimo decennio è stato possibile sfruttarle proficuamente per applicazioni di monitoraggio ambientale, grazie all'evoluzione tecnologia nella costruzione dei dispositivi elettronici necessari alle misure dei parametri ambientali.

Con il termine interazione si intendono gli effetti di assorbimento ed emissione di energia elettromagnetica da parte delle specie molecolari. Le caratteristiche spettrali di emissione/assorbimento di una specie molecolare sono dipendenti da molteplici parametri; sicuramente ogni specie molecolare è differenziabile da un'altra sulla base della propria composizione atomica e tale differenziazione porta alla differenziazione delle caratteristiche di interazione. Il tipo di atomi costituenti la molecola, e la loro configurazione spaziale, sono responsabili della capacità della molecola stessa di assorbire/emettere energia elettromagnetica a determinate frequenze (lunghezze d'onda). Le frequenze di assorbimento/emissione della molecola sono direttamente legate ai possibili stati energetici che questa può assumere: ogni frequenza di interazione è proporzionale alla differenza energetica di due stati energetici ammissibili. Tali frequenze prendono il nome di linee di emissione/assorbimento o più semplicemente linee di transizione. L'insieme di tutte le linee di transizione di una molecola definisce lo spettro di assorbimento/emissione di quella molecola. Le condizioni di pressione e temperatura dell'ambiente circostante influenzano pesantemente la forma dello spettro di emissione/assorbimento causando il cosiddetto allargamento spettrale.

Le specie molecolari presenti nell'atmosfera terrestre hanno molte linee di transizione nella regione spettrale dell'infrarosso. Pertanto, una radiazione elettromagnetica all'infrarosso che si propaga nell'atmosfera terrestre interagisce con le specie molecolari che "incontra" durante il suo cammino. Assumendo limitato l'intervallo spettrale della radiazione propagante, l'interazione avviene solo con quelle molecole che hanno proprietà di assorbimento/emissione all'interno di tale intervallo spettrale. Il risultato dell'interazione è la perdita di energia da parte della radiazione elettromagnetica in quanto assorbita dalle molecole (nelle applicazioni discusse in questo documento, gli effetti di emissione da parte delle specie molecolari danno un contributo che può essere considerato più che trascurabile!). Ciò implica che la perdita di energia di una radiazione elettromagnetica che si propaga da un punto A ad un punto B dell'atmosfera è direttamente dipendente dalla presenza di specie molecolari assorbenti fra i punti A e B. Inoltre l'entità della perdita di energia è funzione della quantità di molecole delle specie assorbenti.

Nel caso in cui lungo il percorso di propagazione fra i punti A e B l'assorbimento di energia è dovuto solo ad una specie molecolare (condizione possibile quando esiste una sola specie molecolare che ha linee di transizione dominanti nell'intervallo spettrale della radiazione elettromagnetica), allora la perdita di energia fra i punti A e B è funzione solo dalla quantità di quella specie molecolare. In questo caso, dalla misura della perdita di energia (quindi misura di energia nei punti A e B) è possibile risalire direttamente alla quantità numerica della specie assorbente. La condizione descritta è ottenibile quando l'intervallo dello spettro della radiazione considerata contiene linee di transizione dominanti di una sola specie molecolare.

La composizione dell'atmosfera terrestre è tale per cui è possibile individuare intervalli spettrali caratterizzati dalla presenza di linee di transizione dominanti di una sola specie molecolare. Come accennato sopra, le condizioni di pressione e temperatura condizionano la larghezza dello

spettro: per valori di pressione e temperatura tipici della superficie terrestre l'occupazione spettrale di una singola linea di transizione è dell'ordine di 100 nm.

Sorgenti all'infrarosso come i diodi laser a semiconduttore permettono di generare radiazioni caratterizzate da larghezze di spettro dell'ordine di 1 nm e potenze dell'ordine di decine di mW. Le caratteristiche spettrali di questi dispositivi sono sicuramente sufficienti per soddisfare le condizioni spettrali per le radiazioni elettromagnetiche descritte sopra (per le applicazioni di telerilevamento le radiazioni emesse dai diodi laser, opportunamente filtrate, possono essere considerate monocromatiche). I diodi laser possono quindi essere utilizzati per costruire apparati di trasmissione in grado di trasmettere radiazione IR monocromatica verso un apposito ricevitore; in tal modo è possibile misurare la potenza trasmessa e quella ricevuta fra due punti A e B posizionando un trasmettitore in A ed un ricevitore in B.

Se la frequenza/lunghezza d'onda del diodo laser è regolata all'interno di un intervallo spettrale caratterizzato da linee di transizione dominanti di una singola specie molecolare, dalla misura dell'attenuazione fra trasmettitore e ricevitore è possibile ricavare la quantità di quella specie molecolare presente fra trasmettitore e ricevitore.

Fissate le caratteristiche di radiazione del trasmettitore (es. potenza e larghezza del fascio laser), la massima distanza fra trasmettitore e ricevitore dipende dalla qualità della misura di potenza che si vuole ottenere al ricevitore. A parità di potenza trasmessa, maggiore è la distanza e minore è la potenza al ricevitore; inoltre, fissata la distanza fra trasmettitore e ricevitore, l'elevata variabilità della composizione atmosferica (es. vapor d'acqua), e delle condizioni ambientali in genere, sono causa di forti variazioni della potenza al ricevitore e quindi della qualità con cui è possibile ottenerne una misura. Tenuto conto di tutto ciò, si può in ogni caso affermare che, utilizzando trasmettitori a diodo laser a semiconduttore, è possibile coprire distanze fino a qualche chilometro.

In sostanza, con l'impiego di dispositivi laser all'infrarosso, è possibile costruire apparati in grado di misurare la quantità delle specie molecolari presenti in un volume di atmosfera interessato dalla propagazione di una radiazione laser. Poiché il percorso di propagazione è quello fra un trasmettitore ed un ricevitore (praticamente una linea retta), il volume di atmosfera sotto osservazione è approssimabile ad un cilindro di sezione praticamente infinitesima (definita dalla sezione delle ottiche in trasmissione e ricezione) il cui asse è la congiungente il trasmettitore con il ricevitore. In altre parole, è possibile misurare la quantità delle specie molecolari in un cilindro infinitesimo di atmosfera.

La grandezza che viene effettivamente misurata nel suddetto cilindro è la cosiddetta "*concentrazione lineare*". Indicando con p la concentrazione volumetrica di una specie molecolare, il contenuto di questa nel suddetto cilindro è dato da $p \cdot dA \cdot dl$ dove dA è la sezione del cilindro ed L la distanza fra trasmettitore e ricevitore. Dividendo per la sezione dA si ottiene la concentrazione lineare, le cui dimensioni sono una concentrazione per unità di lunghezza. Esprimendo la concentrazione in ppm (parti per milione), l'unità di misura della concentrazione lineare è il ppmm (parti per milione per metro); oppure, se la concentrazione è espressa in g/m^3 , allora la concentrazione lineare è espressa in g/m^2 .

Reti di monitoraggio ed elaborazione tomografica

La misura della concentrazione lineare su una singola tratta fra due punti fissi permette di avere un monitoraggio tempo continuo delle specie sotto osservazione lungo la congiungente i due punti in termini di quantità media lungo la tratta. Un insieme di misure di concentrazioni lineari su tratte non coincidenti e intersecanti, opportunamente elaborate, può essere utilizzato per ricostruire l'andamento della concentrazione delle specie sotto osservazione all'interno dell'area interessata dalla presenza delle tratte di misura.

Il tipo di elaborazione necessaria è una elaborazione di tipo tomografico e l'insieme di più tratte di misura definisce una rete tomografica di monitoraggio.

In generale per tomografia si intende un processo matematico che permette di ricostruire un qualcosa a partire dalle sue proiezioni. Nel nostro caso il qualcosa è il campo di concentrazione delle specie molecolari e le proiezioni sono le misure di concentrazione lineare.

In termini matematici le concentrazioni lineari non sono altro che integrali di linea sul campo scalare delle concentrazioni.

Una qualsiasi rete tomografica di monitoraggio, cioè un insieme di tratte non coincidenti e intersecanti, ha un'estensione limitata e quindi è sempre definibile una struttura chiusa di contenimento. Se tutte le tratte della rete giacciono su uno stesso piano, l'intera rete può essere racchiusa all'interno di una superficie piana chiusa il cui perimetro è la struttura di contenimento. Più in generale, una rete di monitoraggio può essere sempre racchiusa all'interno di un volume la cui superficie esterna è la struttura di contenimento. L'elaborazione tomografica, indipendentemente dalle tecniche utilizzate, permette di ricostruire il campo di concentrazione all'interno della struttura di contenimento della rete. In generale si hanno campi di concentrazione ricostruiti a tre dimensioni, ma nel caso di reti giacenti su un solo piano, i campi ricostruiti sono limitati a due dimensioni.

Ad oggi la nostra attività di ricerca nello sviluppo di tecniche tomografiche per la ricostruzione di campi di concentrazione è stata limitata a problemi piani, quindi a reti giacenti su un solo piano, ma tutte le considerazioni e i risultati raggiunti sono direttamente applicabili a problemi volumetrici.

La risoluzione e l'affidabilità del campo di concentrazione ricostruito dipendono, oltre che dalla tecnica di elaborazione utilizzata, dalla configurazione della rete tomografica di monitoraggio in termini di numero di tratte, di posizione relativa e di geometria degli incroci di tratta. In sostanza dalla topologia della rete. Quindi è utile individuare la topologia ottimale della rete secondo l'obiettivo finale delle operazioni di monitoraggio. A tal fine sono utili alcune considerazioni: maggiore è il numero di tratte, maggiore è il contenuto informativo e quindi migliore è la ricostruzione in termini di risoluzione ed affidabilità; a parità di tratte disponibili sono possibili svariate soluzioni specialmente per quanto riguarda la geometria degli incroci; da un punto di vista logistico, posizionare una rete di monitoraggio significa posizionare una serie di dispositivi di trasmissione e ricezione all'interno dell'area di interesse e pertanto le caratteristiche orografiche ed altimetriche entrano sicuramente in gioco nella scelta della topologia; inoltre non deve essere dimenticato che gli apparati di misura hanno un costo e che quindi il rapporto qualità/prezzo deve essere opportunamente considerato nelle operazioni di scelta.

Tutto questo suggerisce di investire nella ricerca di procedure e metodi in grado di fornire parametri ed indici utili per la decisione della rete di monitoraggio ottimale una volta stabilito l'obiettivo di monitoraggio in termini di prestazioni, efficienza e risoluzione. A questo scopo si ricorda che è allo studio un apposito sistema di classificazione delle prestazioni delle reti tomografiche al variare della topologia.

Applicazioni

Per misurare la concentrazione lineare su una tratta sono possibili due configurazioni per i dispositivi di ricezione e trasmissione: la prima, e probabilmente la più immediata, è quella che prevede di posizionare il trasmettitore ad uno dei due estremi della tratta ed il ricevitore all'altro (figura 1 (a)), mentre la seconda prevede di posizionare trasmettitore e ricevitore allo stesso estremo e all'altro un retroriflettore passivo in grado di riflettere la radiazione nella stessa direzione della radiazione incidente, indipendentemente dall'angolo di incidenza (figura 1 (b)). (questi retroriflettori possono essere ottenuti o con un foglio di materiali rifrangenti o con piani di specchi disposti a vertice di cubo).

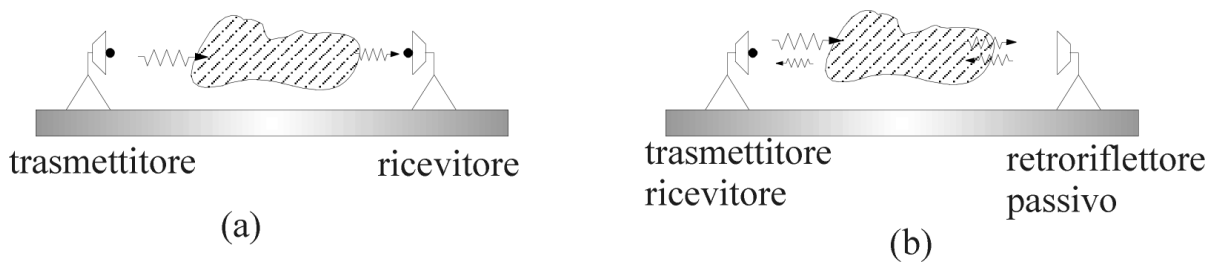


Fig 1 - Disposizione dei dispositivi di trasmissione e ricezione per la misura delle concentrazioni lineari: (a) - trasmettitore e ricevitore posizionato agli estremi della tratta, (b) - trasmettitore e ricevitore posizionati in uno dei due estremi di tratta e retroriflettore nell'altro.

È utile fare delle considerazioni su alcune caratteristiche delle due configurazioni, senza addentrarsi troppo nella descrizione dettagliata del perché dei loro pregi e difetti. La configurazione con retroriflettore passivo permette di realizzare una rete di monitoraggio a tratte multiple utilizzando un solo trasmettitore e un solo ricevitore e posizionando un certo numero di retroriflettori intorno alla coppia trasmettitore/ricevitore come nel caso della rete circolare di figura 2.

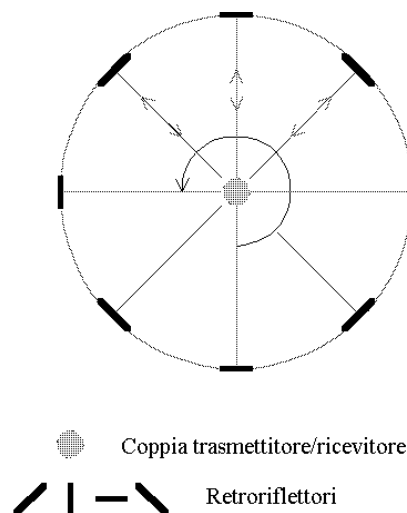


Fig 2 - Esempio di copertura superficiale utilizzando retroriflettori ed una sola coppia ricevitore/trasmettitore.

Se la coppia di trasmissione e ricezione è in grado di gestire contemporaneamente più radiazioni laser in direzioni diverse, allora con questo tipo di reti è possibile un monitoraggio tempo continuo dello spazio occupato dalla rete. Altrimenti il trasmettitore ed il ricevitore possono essere

posizionati su un sistema di puntamento, tipo quelli utilizzati nei radar, in modo da ottenere un monitoraggio a scansione dell'area interessata dalla rete.

Le configurazioni con retroriflettore sono sicuramente convenienti da un punto di vista economico, dato che il costo di un retroriflettore è circa la centesima parte del costo della coppia trasmettitore/ricevitore.

Da un punto di vista di tecnico, avere trasmettitore e ricevitore nello stesso posto semplifica molto le operazioni di misura della perdita di potenza, che risulta essere doppia nella configurazione con retroriflettore rispetto a quella senza, poiché la radiazione laser attraversa 2 volte (andata e ritorno) la massa molecolare assorbente. Il fatto di raddoppiare la potenza persa fa sì che la massima distanza della tratta di misura è sicuramente minore nella configurazione con retroriflettore rispetto a quella senza.

Da un punto di vista delle elaborazioni tomografiche, dove sono importanti gli incroci delle tratte, è evidente che una rete come quella di figura 2 non può essere impiegata per applicazioni tomografiche. Sono necessari almeno due coppie trasmettitore/ricevitore come nella rete di figura 3. È importante osservare come lo stesso retroriflettore è utilizzato per più di una tratta.

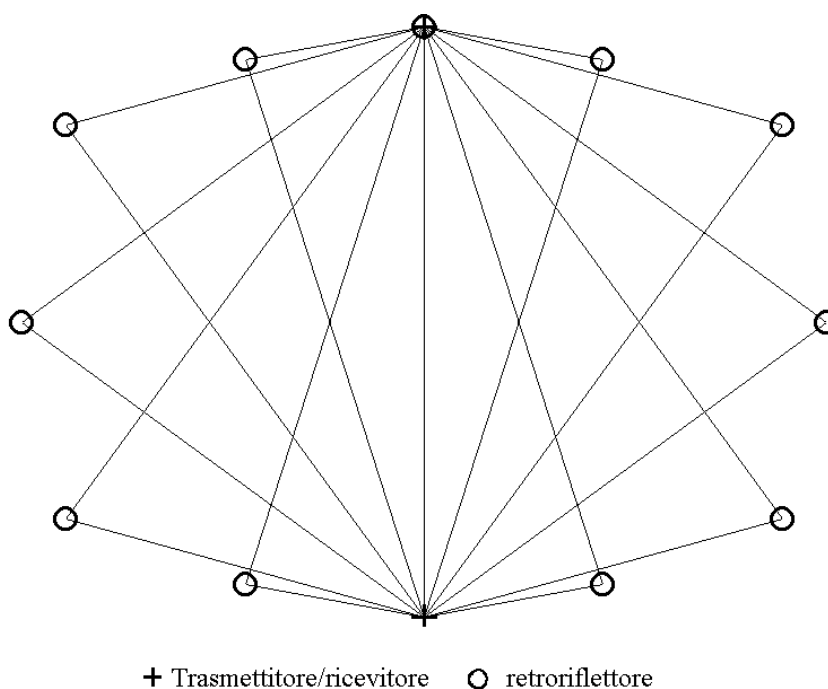


Fig 3 - Esempio di rete per misure di concentrazione lineare con due coppie trasmettitore/ricevitore

Da queste considerazioni emerge che le configurazioni delle reti di monitoraggio con retroriflettori sono da considerarsi più vantaggiose per le applicazioni di monitoraggio a tratta multipla, sia con elaborazione tomografica, sia senza.

I settori applicativi a carattere ambientale dove è possibile impiegare i sistemi di monitoraggio proposti in questo documento sono numerosi:

- il monitoraggio di aree urbane per il controllo della qualità dell'aria respirata (es. CO, NO_x)
- il monitoraggio di siti industriali per il controllo delle emissioni in particolari ambienti di lavoro
- il monitoraggio di aree adibite a discariche per il controllo degli odori (es. H₂S CH₄),

- il monitoraggio di aree vulcaniche per il controllo delle emissioni gassose per fini di prevenzione (es. CO₂ , H₂S).

In tutti questi casi sia sistemi di monitoraggio a singola tratta, sia quelli con reti di misura a tratta multipla con elaborazioni tomografiche possono tornare utili, dipendentemente dal tipo di monitoraggio richiesto. La funzione principale dei sistemi a tratta singola è quella di fornire l'andamento temporale della concentrazione lineare, dal quale poi è possibile calcolare gli andamenti medio orario, giornaliero, settimanale etc. I sistemi a tratta multipla, anch'essi impiegabili per ottenere gli andamenti temporali, hanno delle funzionalità in più tipo la scoperta di punti di massimo e l'inseguimento degli ammassi gassosi all'interno di aree o volumi oggetto del monitoraggio.

Nelle aree urbane esistono due principali applicazioni: la prima, con una rete localizzata a 50-100 m da terra, dove i dispositivi di misura sarebbero alloggiati sopra i tetti degli edifici, per la misura dell'andamento delle concentrazioni su una sezione orizzontale dell'atmosfera urbana, la seconda, con una rete a sviluppo verticale, dove i dispositivi di misura sarebbero sistemati sulle pareti verticali degli edifici più alti, per la misura dell'andamento delle concentrazioni su una sezione verticale dell'atmosfera urbana. La misura della concentrazione in senso orizzontale e verticale, congiunta alle rilevazioni a terra, ottenute con le centraline di monitoraggio oggi già pienamente operative in molte città, garantirebbe una misura volumetrica delle concentrazioni atmosferiche. Tale misura aumenta certamente il livello di conoscenza della dinamica atmosferica sopra i centri urbani e aggiunge elementi informativi nuovi su cui basare le decisioni di intervento per migliorare le condizioni dell'aria dei centri urbani.

Laddove sono note sorgenti di emissione di sostanze gassose, come nel caso di ciminiere degli impianti industriali, o sorgenti naturali in aree geotermiche e vulcaniche, può risultare necessario il controllo dello stato di emissione per segnalare situazioni di pericolo. In questo senso, un sistema a tratta singola che attraversa la zona di emissione permetterebbe il controllo in tempo continuo delle condizioni di emissione e le eventuali situazioni di pericolo o allarme sarebbero subito segnalate. Nel caso in cui la sorgente non sia ben individuabile ed è necessario un controllo superficiale o volumetrico, la rete a tratta singola sarebbe sostituita da una rete a tratte multiple con funzioni di scoperta e di inseguimento di punti di massimo .

È utile ricordare che i sistemi di misura proposti sono sistemi di rilevamento a distanza, quindi sarebbero particolarmente adatti in tutte quelle situazioni dove l'ambiente di misura è, o particolarmente rischioso per la salute umana, come quelli vulcanici, o difficilmente accessibile, come le aree adibite a discarica e i territori con particolari caratteristiche orografiche come le valli alpine.

Apparati di misura

La nostra attività di ricerca, inerente l'applicazione delle metodologie di misura basate sulla misura dell'attenuazione di radiazione elettromagnetica, era stata portata avanti solo a livello teorico fino al 2000, quando, attraverso ricerche bibliografiche, è emerso che un'azienda canadese, la "Boreal laser" produce e commercializza apparati laser all'infrarosso in grado di misurare la concentrazione lineare di alcune specie molecolari in atmosfera con l'impiego di retroriflettori secondo la configurazione in figura 1 (a). Ad oggi quest'azienda commercializza apparati per la misura di una singola specie molecolare sia su tratta singola sia su tratte multiple.

La fase sperimentale della nostra attività di ricerca è iniziata nel 2001, grazie all'acquisto di un apparato per la misura della CO₂ su singola tratta. I principali elementi (dispositivi) che costituiscono gli apparati a singola tratta sono:

- un *Gasfinder*: unità ricetrasmittente di una radiazione laser IR (figura 6) opportunamente scelta in base alla specie molecolare per la quale il gasfinder è programmato. I dispositivi principali contenuti al suo interno, e disposti come in figura 4, sono un trasmettitore laser, un ricevitore ed una cella contenente un campione noto del gas da misurare.
- Un retroriflettore piano con pannello rifrangente per tratte di lunghezza fino a circa 100 m
- Un retroriflettore a vertice di cubo per distanze superiori a circa 100 m
- Gruppo batterie per un'autonomia di 6 ore circa

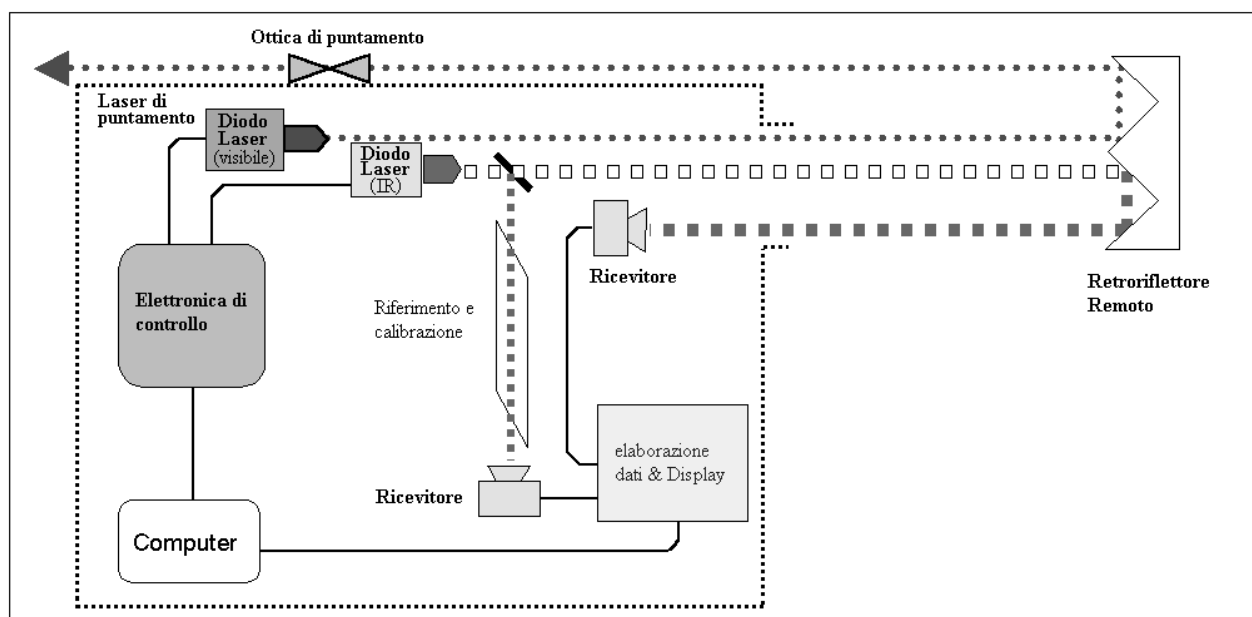


Fig. 4 - Schema di funzionamento dell'unità Gasfinder. Con il tratto a pallini, il percorso di propagazione della radiazione visibile utile per allineare l'unità trasmettitore/ricevitore al retroriflettore. Con il tratto a quadretti, il percorso della radiazione IR verso il retroriflettore e verso il campione di riferimento interno.

L'unità Gasfinder è dotata di una interfaccia utente (pulsanti di comando e visore a cristalli liquidi) che permette la lettura diretta della concentrazione lineare. È anche possibile la trasmissione dei dati all'esterno tramite un'interfaccia seriale RS232.

La concentrazione lineare di tratta è determinata tramite un processo di elaborazione dati basato sul confronto fra le misure di attenuazione di potenza sulla tratta esterna e quelle sulla cella campione interna. La lunghezza d'onda della radiazione laser emessa è modulata in modo da scandire l'intervallo spettrale occupato da una linea di transizione della specie molecolare di

interesse. Il segnale laser così modulato è trasmesso, alternativamente, verso il retroriflettore e verso la cella campione. I segnali ricevuti sono poi messi in relazione fra loro per determinare un coefficiente di correlazione ai minimi quadrati fra i segnali ricevuti dall'esterno e quelli dalla cella campione. Tale coefficiente, moltiplicato per la concentrazione lineare nota del campione, fornisce direttamente la concentrazione lineare di tratta. Il tipo di elaborazione è tale per cui, gli effetti di perdita di potenza indipendenti dalla presenza della specie di interesse sono trascurabili ai fini della misura finale della concentrazione lineare. Una volta dislocati gli strumenti, è sufficiente poco più di un secondo di tempo di elaborazione per ottenere il valore della misura.

Il gasfinder per la misura della CO₂ è programmato per scandire l'intervallo spettrale intorno a 1580 nm. Nella figura 5 è riportato il coefficiente di assorbimento in tale intorno considerando le concentrazioni tipiche di un'atmosfera terrestre standard al livello del suolo. L'andamento spettrale è stato ottenuto per mezzo di un software di nostra produzione che utilizza i parametri spettroscopici del database HITRAN96. Nell'intorno di 1580 nm l'assorbimento totale (linea nera) è dominato da quello della CO₂ e l'unica altra specie significativa è l'H₂O.

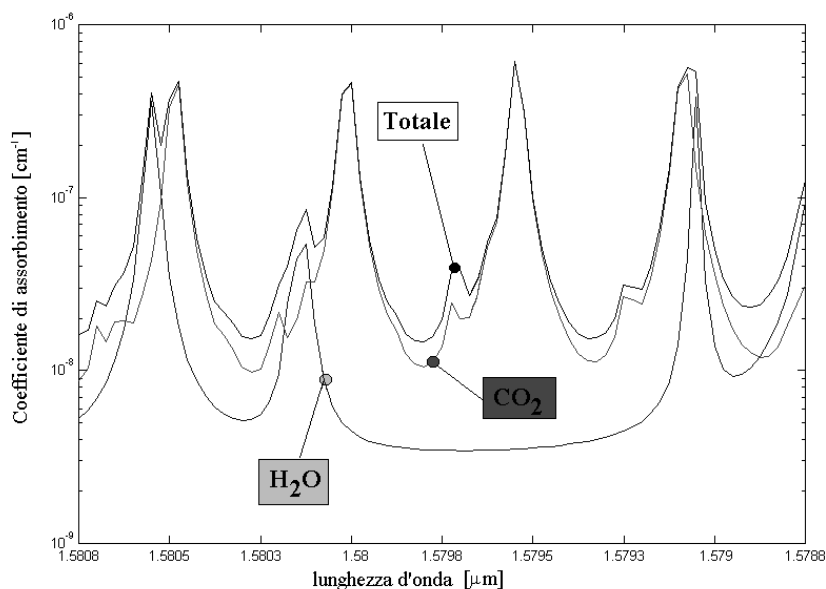


Fig. 5 - Coefficiente di assorbimento di un centrimetro di atmosfera considerando concentrazioni standard e condizioni di temperatura e pressione tipiche della superficie terrestre (1013 mbar, 293 °K).

Le prestazioni di quest'apparato di misura vengono fornite in termini di valore minimo di concentrazione lineare misurabile; nel caso della CO₂ tale valore è di 1000 ppm. Ciò significa che se siamo interessati alla misura della CO₂ in un ambiente dove il valore di concentrazione puntuale minimo è di 320 ppm, per ottenere una misura significativa devo fare in modo che la distanza fra l'unità gasfinder e il retroriflettore sia almeno di 4 metri. Pertanto, a seconda del livello di CO₂ atteso, il parametro di minima concentrazione lineare permette di stimare la minima lunghezza di tratta possibile.

Per quanto riguarda il valore massimo di concentrazione vale il discorso opposto: il massimo valore di CO₂ atteso permette di stimare la massima distanza di tratta, senza dimenticare che in questo caso contano anche le proprietà riflettenti del retroriflettore, in particolare la dimensione della superficie riflettente. Deve inoltre essere tenuto conto che certe condizioni ambientali, tipo la presenza di nebbia, possono causare forti perdite di potenza tali da impedire il ritorno del segnale al ricevitore. In questi casi viene segnalato lo stato di "assenza di segnale" indicando l'impossibilità di calcolare la concentrazione lineare. In ogni caso, la massima lunghezza di tratta è dell'ordine del chilometro.

È importante osservare che la misura di concentrazione lineare ha ben poco significato se non si conosce anche la lunghezza della tratta a cui è riferita. Infatti, un valore di 10000 ppm su una tratta di 1 metro è relativa ad una concentrazione media sulla tratta di 10000 ppm, mentre su una tratta di 1 km è relativa a solo 10 ppm, cioè 1000 volte inferiore!

La misura della distanza non è una funzione di cui questi apparati sono forniti, pertanto la strumentazione deve essere corredata da sistemi di misura delle distanze tipo.



Fig. 6 - Foto di una unità Gasfinder

Campagne di misura.

In questa sezione sono riportati e discussi alcuni risultati delle prime campagne di misura di CO₂ fatte in situazioni reali con l'utilizzo del gasfinder. Durante l'anno 2001 sono state fatte misure in ambiente urbano, rurale, geotermico e vulcanico. In tutti i casi, le misure della lunghezza di tratta sono state ottenute con un telemetro laser con portata di 1 km circa e risoluzione di 1 m.

Negli ambienti rurali ed urbani le campagne di misura fatte fino ad oggi hanno avuto solo lo scopo di verifica delle prestazioni della strumentazione, pertanto, in questo documento, sono riportati solo dei risultati relativi alle campagne di misura in ambiente geotermico e vulcanico perché ritenuti sufficientemente esaurienti ai fini della descrizione delle metodologie di monitoraggio.

Per l'ambiente geotermico, le misure sono state fatte in prossimità di una polla acquosa caratterizzata da forte emissione di CO₂. La polla, di circa 10 m di diametro, si trova in aperta campagna vicino alla cittadina di Pienza (SI) ed è facilmente accessibile. In questo caso l'obiettivo finale del monitoraggio è risalire alla portata di emissione della polla con l'impiego delle misure di concentrazione lineare. Per questa applicazione sarà impiegata una rete multitratta di monitoraggio in grado di coprire il volume soprastante la polla. Le misure saranno poi elaborate con procedure a base tomografica per risalire alla concentrazione volumetrica, che sarà successivamente presa come dato di ingresso per algoritmi di inversione di modelli di diffusione e trasporto in atmosfera. In questo documento sono riportati gli andamenti temporali della concentrazione lineare su alcune delle tratte di misura che attraversano il volume di aria sopra la polla, oltre che ad un resoconto numerico complessivo.

Nel caso di ambiente vulcanico, le misure sono state fatte presso la solfataria di Pozzuoli (Napoli). In questo caso l'obiettivo è stato quello di provare le prestazioni di un software di ricostruzione tomografica, ai fini dell'individuazione dei punti di massimo di concentrazione all'intero dell'area di emissione. Disponendo di un apparato a singola tratta, l'insieme delle misure è stato preso in tempi diversi: per circa 30 tratte sono state impiegate circa 5 ore. Oltre al resoconto numerico, qui sono riportati anche i prodotti di un software di ricostruzione tomografica allo scopo di mostrare le potenzialità delle reti di monitoraggio multitratta congiuntamente a procedure di elaborazione dati a base tomografica.

Anche a Pozzuoli sono state fatte misure per la stima della portata di emissione. In questo caso l'obiettivo è la stima della portata di CO₂ di un soffione che, a differenza del caso di Pienza, ha un'estensione superficiale decisamente limitata (qualche decimetro quadrato) e non c'è presenza di acqua. Qui sono riportati gli andamenti temporali per mostrare come è possibile utilizzare le misure di concentrazione lineare multitratta sia per individuare le zone di emissione laddove queste non sono note a priori, sia per la stima della portata.

Misure in ambiente geotermico

Il sito delle misure in ambiente geotermico si trova in aperta campagna, in prossimità della città di Pienza (SI), ed è riportato nella foto qui sotto. E' possibile farsi un'idea delle dimensioni spaziali del sito riferendosi a quelle della persona posta sul bordo sinistro della polla acquosa. La disposizione dei dispositivi (unità gasfinder e retroriflettori) per la sessione di misura è riportata nello schema di figura 8



Fig. 7 Polla acquosa caratterizzata da emissioni di CO_2 in prossimità della città di Pienza (SI)

Sono state fatte misure di concentrazione lineare, sia su tratte che attraversano il volume di aria sopra la polla, (quelle numerate da 1 a 4 nella figura 8) sia su tratte esterne a tale volume (la numero 5 nella figura 8).

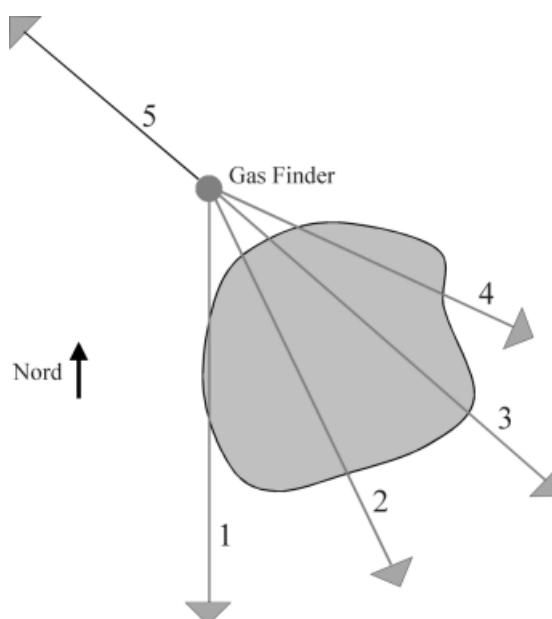


Fig. 8 - Schema della disposizione dell'unità Gasfinder e dei retroriflettori (Disegno non in scala).

La sessione di misure è stata fatta il 22 agosto 2001. Nella tabella 1 sono riportati i valori numerici riassuntivi della sessione di misura, tratta per tratta, e di seguito gli andamenti temporali della concentrazione media (concentrazione lineare/lunghezza di tratta) di ogni tratta. La temperatura dell'aria si è mantenuta intorno ai 29 °C e il vento era di intensità e direzione variabile con prevalenza verso nord durante l'intera sessione di misura.

Considerazioni:

- la tratte che attraversano il volume di aria sopra l'area di emissione risultano quelle con maggiore concentrazione media (la più alta sulla tratta n.2), così come era atteso.
- le maggiori oscillazioni dei valori misurati (vedi deviazione standard) sono dovute alle condizioni di turbolenza del fenomeno di emissione (non stazionarietà del fenomeno di emissione e non stabilità della direzione e velocità del vento).
- I valori di concentrazione della tratta n. 5 sono notevolmente stabili (bassa deviazione standard) e non sono influenzati dalle condizioni di vento. Il volume di aria attraversata dalla tratta n. 5 non è interessato dal fenomeno di emissione. Il valore di concentrazione della tratta 5 rappresenta il valore di fondo dell'area circostante la polla di emissione

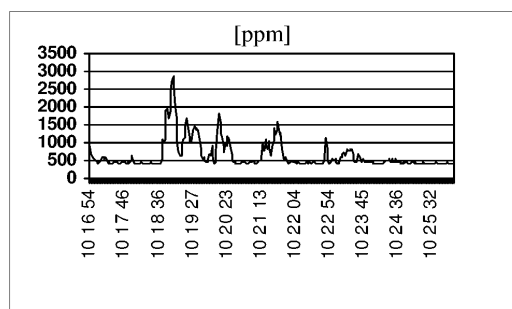
N_tratta	Lunghezza tratta	Inizio	Fine	Durata	Concentrazione media* di tratta	Concentrazione minima di tratta	Concentrazione massima di tratta	Deviazione standard	N. valori utili	Concentrazione lineare media* di tratta
	[m]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[sec]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]		[ppmm]
1	22	10:16:52	10:26:05	553	642	409	2871	399	321	14122
2	23	10:53:22	10:59:51	389	870	406	2297	363	225	20014
3	24	11:04:00	11:20:26	986	633	378	1615	193	568	15187
4	18	11:22:26	11:36:16	830	436	364	970	71	446	7851
5	20	11:40:55	11:47:20	385	383	376	391	3	214	7652

* valore medio sul numero di campioni utili (2^a colonna da destra).

Tabella 1 - Risultati numerici della sessione di misura presso la polla acquosa nei pressi di Pienza (SI) del 22 agosto 2001. La numerazione delle tratte (prima colonna da sinistra) è relativa a quella di figura 8. La concentrazione media di tratta (6^a colonna da sinistra) è data dal rapporto fra la concentrazione lineare media di tratta (prima colonna da destra) e la lunghezza di tratta (2^a colonna da sinistra). In neretto i valori minimo e massimo rilevati.

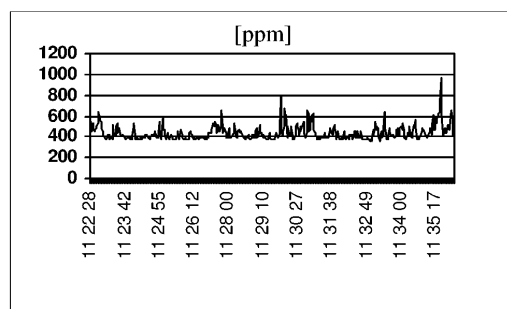
Tratta n. 1

lunghezza: 22 m



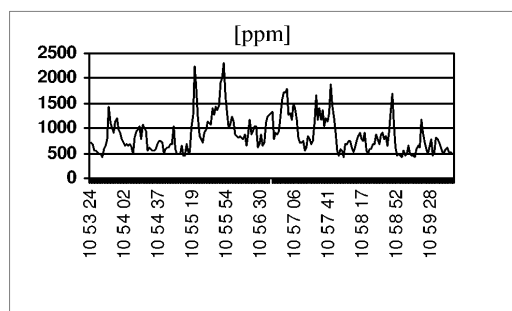
Tratta n. 4

lunghezza: 18 m



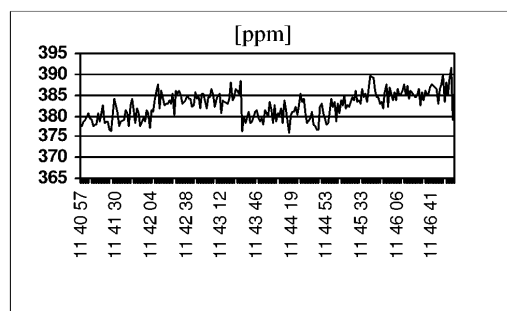
Tratta n. 2

lunghezza: 23 m



Tratta n. 5

lunghezza: 20 m



Tratta n. 3

lunghezza: 24 m

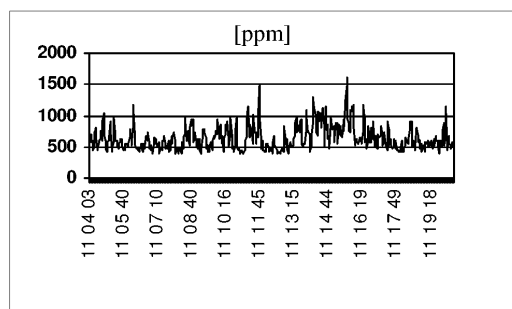


Fig 9 - Andamento temporale delle concentrazioni di tratta secondo la numerazione riportata in figura 8. Il riferimento temporale è espresso in ore minuti secondi

Misure in ambiente vulcanico

Ricerca di massimi con tecniche tomografiche

Il sito delle misure in ambiente vulcanico si trova all'interno della solfatara di Pozzuoli (NA) ed è riportato nella foto qui sotto. La superficie di maggiore emissione, recintata per motivi di sicurezza, ha un'estensione di qualche migliaio di metri quadrati ed è caratterizzata da numerose fratture nel terreno dalle quali fuoriescono vari composti gassosi compreso la CO_2 e il vapore acqueo.



Fig.10 Zona di emissioni gassose all'interno della solfatara di Pozzuoli (NA)

Le misure di concentrazione lineare di CO_2 sono state fatte su circa 30 tratte, delle quali circa 20 attraverso il volume soprastante la superficie di emissione di figura 10 ad un'altezza media dal suolo compresa fra 1.5 e 2 metri.

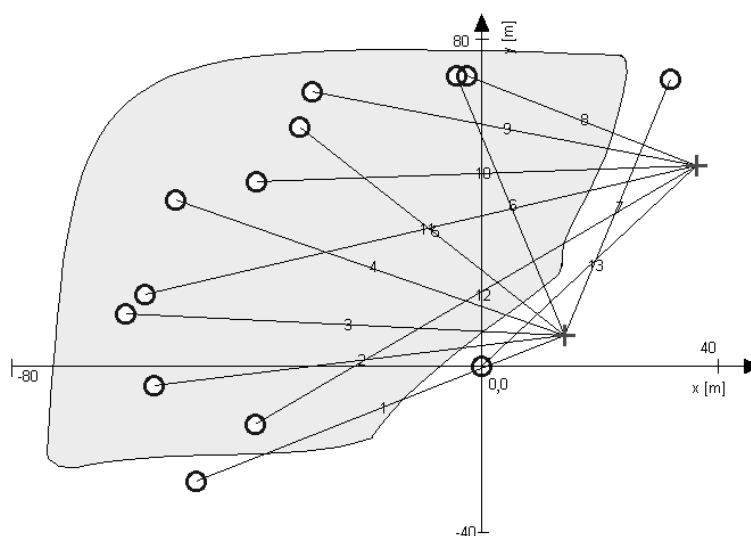


Fig 11 - Disposizione schematica delle rete di misura a 13 tratte sopra l'area di emissione rappresentata dalla superficie in grigio. Le croci e i cerchi indicano i punti dove sono stati posizionati rispettivamente l'unità Gasfinder e i retroriflettori (disegno in scala).

Di tutte le tratte misurate si riportano qui i risultati relativi solo a quelle utilizzate nelle procedure di elaborazione dati a base tomografica. L'insieme di queste tratte forma la rete riportata in figura 11.

La sessione di misura è stata fatta nel giorno 20 novembre 2001 e, oltre alle misure di concentrazione lineare, sono stati misurati anche la temperatura, la velocità e la direzione del vento i cui andamenti temporali sono riportati nelle figure 12

N_tratta	Lunghezza tratta	Inizio	Fine	Durata	Concentrazione media* di tratta	Concentrazione minima di tratta	Concentrazione massima di tratta	Deviazione standard	N. valori utili	Concentrazione lineare media* di tratta
	[m]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[sec]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]		[ppmm]
1	72	09:13:35	09:17:15	220	682	581	882	67	121	49147
2	71	09:22:30	09:26:00	210	676	578	966	85	77	48025
3	75	09:37:30	09:42:00	270	532	420	708	69	94	39934
4	74	09:44:25	09:49:30	305	578	467	821	65	143	42775
5	68	10:18:25	10:23:00	275	733	350	939	111	136	49766
6	66	10:23:40	10:31:45	485	517	451	651	34	265	34126
7	65	10:45:00	10:47:20	140	464	388	697	57	71	30142
8	45	11:18:38	11:24:55	377	747	410	1305	140	177	33625
9	68	11:36:19	11:41:00	281	542	418	792	89	126	36886
10	75	11:50:25	11:54:06	221	591	425	832	93	110	44340
11	99	12:33:41	12:41:38	477	614	452	835	76	230	60778
12	98	12:52:40	12:57:16	276	553	464	724	47	146	54235
13	61	13:04:50	13:09:06	256	507	436	708	46	134	30929

* valore medio sul numero di campioni utili (2^a colonna da destra).

Tabella 2 - Risultati numerici della sessione di misura presso la solfatara di Pozzuoli (NA) del 20 novembre 2001. La numerazione delle tratte (prima colonna da sinistra) è relativa a quella di figura 11. La concentrazione media di tratta (6^a colonna da sinistra) è data dal rapporto fra la concentrazione lineare media di tratta (prima colonna da destra) e la lunghezza di tratta (2^a colonna da sinistra). In neretto i valori minimo e massimo rilevati.

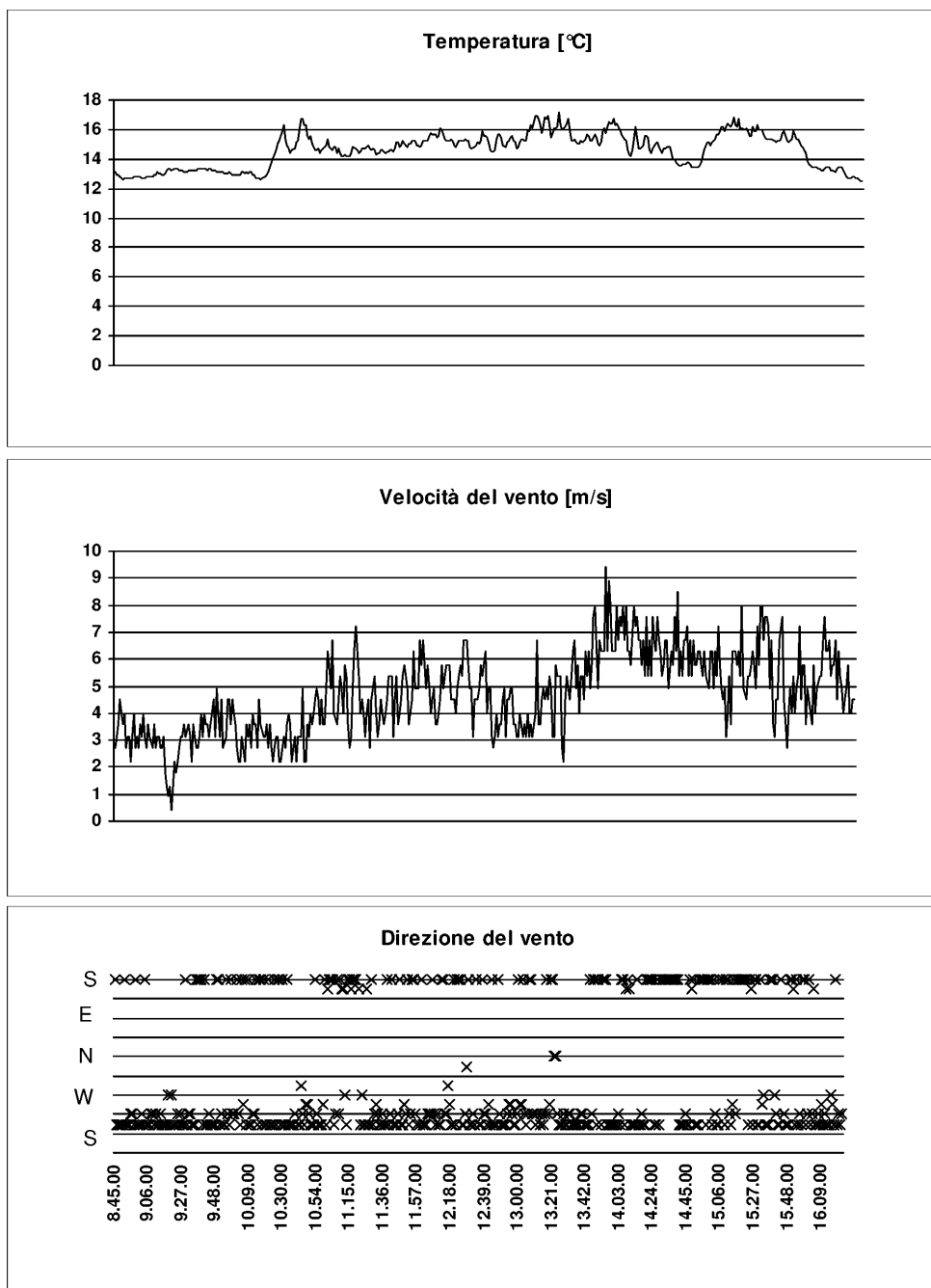


Fig 12 - Andamento temporale delle condizioni di temperatura, velocità e direzione del vento. In ascissa il riferimento temporale è espresso in ore minuti secondi

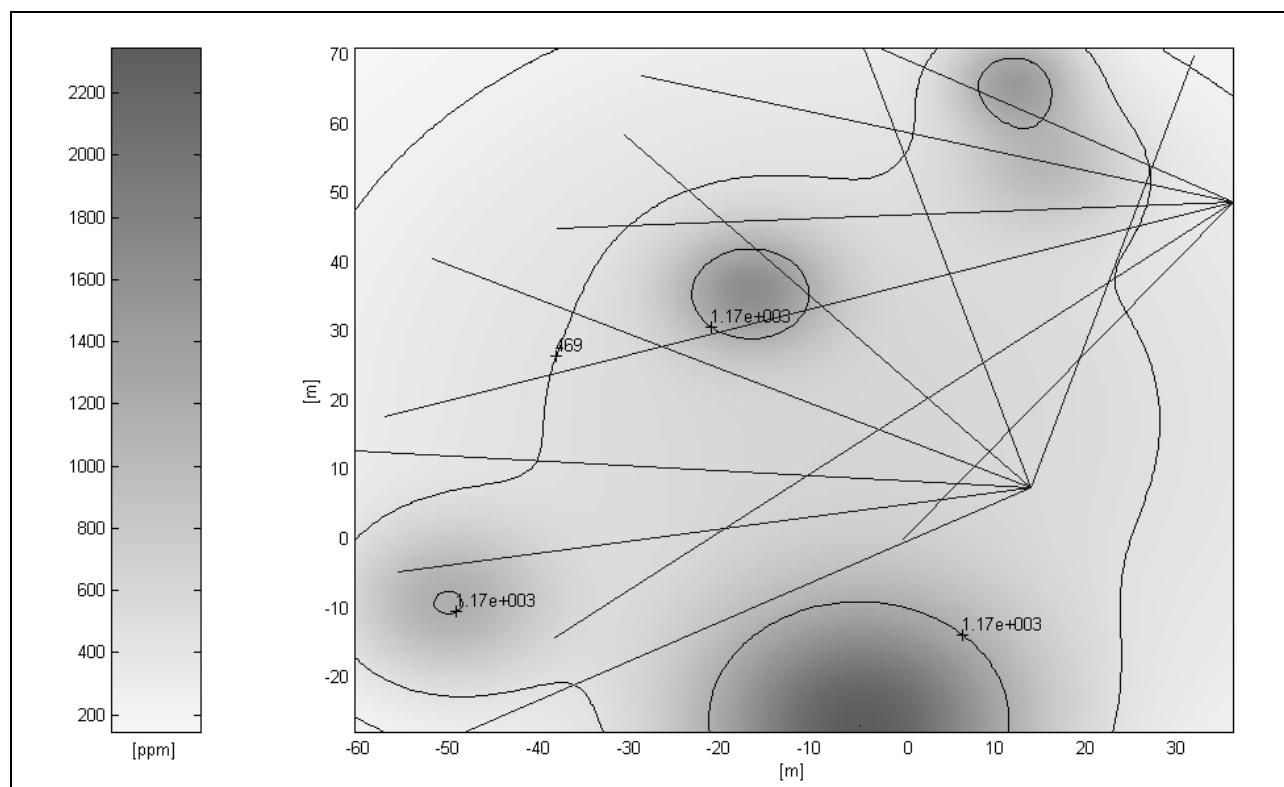


Fig 13 - Esempio di ricostruzione tomografica utilizzando i valori medi temporali delle concentrazioni lineari sulle tratte della rete in figura 11. Il campo bidimensionale ricostruito ha senso solo all'interno dell'area interessata dalla rete di misura, quindi, dei quattro massimi locali, solo i tre più in alto devono essere presi in considerazione. Tali massimi corrispondono effettivamente a 3 zone principali di emissione gassose all'interno dell'area recintata.

Nella tabella 2 sono riportati i valori numerici riassuntivi delle misure di concentrazione lineare relative alle tratte costituenti la rete in figura 11.

I valori medi temporali delle concentrazioni lineari sono stati poi utilizzati come parametri di ingresso in procedure di elaborazione dati a base tomografica per ricostruire il campo bidimensionale della concentrazione di CO_2 all'interno della superficie coperta dalla rete di figura 11. Il risultato della ricostruzione è riportato in figura 13.

Considerazioni:

- la tratta con maggiore concentrazione media risulta la n. 8, quella con minore concentrazione media la n. 7.
- le oscillazioni dei valori misurati (vedi deviazione standard) sono dovute alle condizioni di turbolenza del fenomeno di emissione (non stazionarietà del fenomeno di emissione e non stabilità della direzione e velocità del vento).
- le misure sulle tratte sono fatte in tempi diversi e la durata di osservazione su ogni singola tratta (in media 5 minuti) è troppo breve, rispetto alla dinamica dei fenomeni osservati (emissione e condizioni di vento), per dare una valutazione d'insieme delle misure medie temporali.
- Il campo di concentrazione ricostruito con tecniche tomografiche, basato sui valori medi temporali di concentrazione lineare sul periodo di osservazione, presenta 3 valori di massimo relativo le cui posizioni corrispondono a zone di emissione dominante.
- La tipologia della rete utilizzata non è ottimale ai fini delle elaborazioni tomografiche.

Scoperta di aree di emissione

Anche in questo caso l'area interessata dalle misure è interna alla zona recintata della solfatara di Pozzuoli (NA). Tale area è caratterizzata da una fessura nel terreno di qualche decimetro quadrato (figura 14 (a)) che immette in atmosfera una notevole quantità di gas. L'unità Gasfinder è stata posta ad una distanza di 10 metri circa dalla fessura, in condizioni di sicurezza (figura 14 (b)). Intorno alla fessura sono stati dislocati 4 retroriflettori, tutti orientati nella direzione dell'unità Gasfinder, a formare i vertici di una superficie rettangolare, in modo che una sola delle 4 tratte di misura attraversa il volume di aria direttamente interessato dall'emissione. La topologia della rete di misura è riportata nella figura 15.

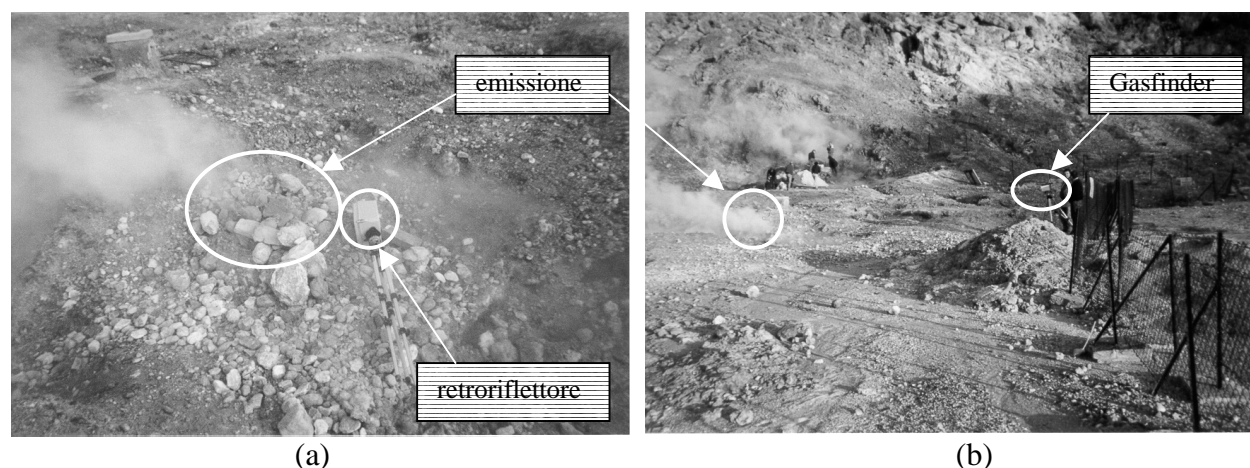


Fig 14 - (a) fessura nel terreno dalla quale fuoriescono le emissioni gassose con a lato uno dei retroriflettori, (b) operazioni di misura con il Gasfinder esterno alla rete di protezione.

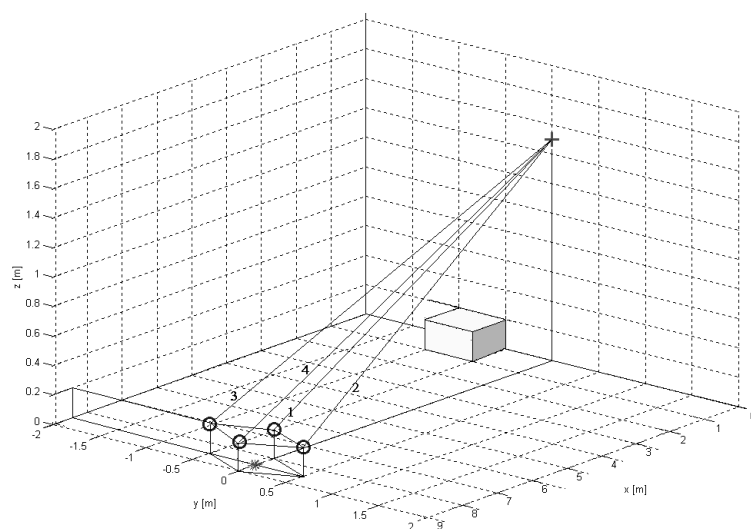


Fig 15- Disposizione schematica 3D delle tratte: il Gasfinder è in $(x,y,z)=(0,0,1.5)$ m e i 4 retroriflettori sono ai vertici di un quadrato su un piano ad una altezza di 0.2 m. Il parallelepipedo disegnato sotto la posizione del gasfinder ha solo lo scopo di aiutare la visione 3D del disegno.

Contemporaneamente alle misure di concentrazione lineare sono state acquisite anche le condizioni di temperatura, direzione e velocità del vento che sono riportate in figura 12. In tabella 3 è riportato

il resoconto numerico e in figura 16 gli andamenti temporali delle concentrazioni medie sulle 4 tratte.

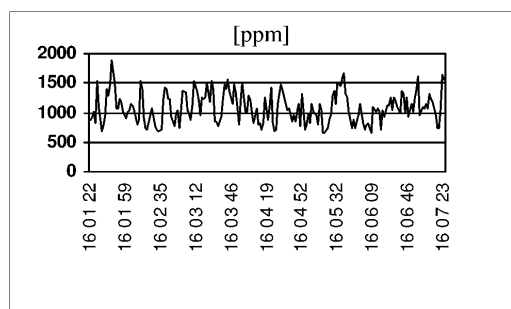
N_tratta	Lunghezza tratta	Inizio	Fine	Durata	Concentrazione media* di tratta	Concentrazione minima di tratta	Concentrazione massima di tratta	Deviazione standard	N. valori utili	Concentrazione lineare media* di tratta
	[m]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[sec]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]		[ppmm]
1	8	16:01:20	16:07:24	364	1082	665	1894	260	196	8770
2	9	15:46:01	15:51:21	320	845	465	2085	309	166	7275
3	9	15:53:59	15:59:55	356	885	537	1746	225	177	7621
4	9	15:37:45	15:43:30	345	2583	798	4117	730	111	23491

* valore medio sul numero di campioni utili (2^a colonna da destra).

Tabella 3 - Risultati numerici della sessione di misura sopra uno dei soffioni della solfataria di Pozzuoli (NA) del 20 novembre 2001. La numerazione delle tratte (prima colonna da sinistra) è relativa a quella di figura 15. La concentrazione media di tratta (6^a colonna da sinistra) è data dal rapporto fra la concentrazione lineare media di tratta (prima colonna da destra) e la lunghezza di tratta (2^a colonna da sinistra). In neretto il valore massimo rilevato.

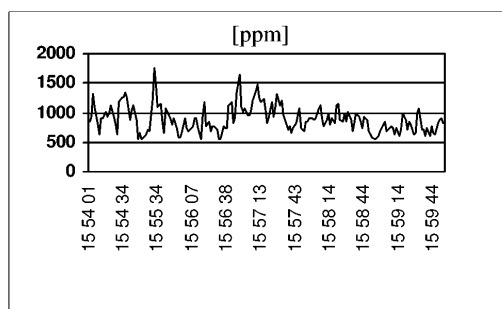
Tratta n. **1**

lunghezza: **8 m**



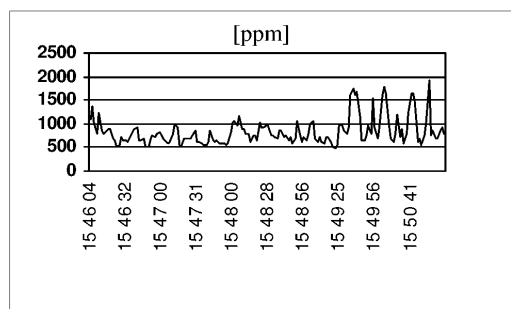
Tratta n. **3**

lunghezza: **9 m**



Tratta n. **2**

lunghezza: **9 m**



Tratta n. **4**

lunghezza: **9 m**

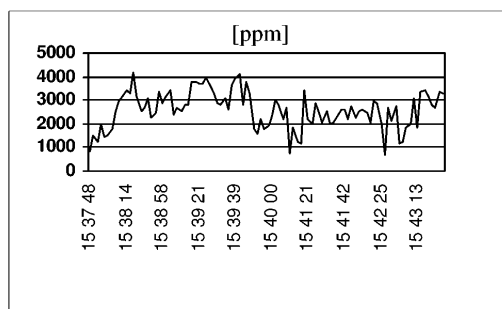


Fig 16 - Andamento temporale delle concentrazioni di tratta secondo la numerazione riportata in figura 15. Il riferimento temporale è espresso in ore minuti secondi

Considerazioni:

- Fra i valori di concentrazione media di tratta, quello relativo alla n. 4 è notevolmente superiore rispetto agli altri (circa 2.5 volte). Ciò implica che all'interno del quadrato sotto monitoraggio è presente una sorgente di CO₂. Pertanto, la topologia della rete di misura impiegata permette di individuare una zona di emissione.
- La differenza di concentrazione lineare fra la tratta 4 e la tratta 1, è pari a 14720 ppm. Questo valore è una misura indiretta della concentrazione lineare su una tratta di 1 metro immediatamente sopra l'area di emissione, poiché la differenza di percorso fra le due tratte è relativa al volume di aria subito sopra la suddetta area. 14720 ppm su una tratta di un metro portano ad una concentrazione media di 14720 ppm. Pertanto, è possibile stimare la concentrazione con risoluzione lineare dipendente dalla disposizione dei retroriflettori: diminuendo le distanze relative fra i retroriflettori (in questo caso quella fra le tratte 1 e 4) aumenta la risoluzione lineare.
- La variazione della direzione e della velocità del vento è la principale causa delle oscillazioni delle misure di concentrazione lineare su tutte le tratte.
- Le cause di emissione sono tali da poter considerare la portata un processo stazionario, ma gli intervalli di misura sono stati troppo brevi (rispetto alla dinamica meteorologica) per poter utilizzare i valori medi temporali ai fini della stima della portata di emissione.

Considerazioni finali

I risultati complessivi della attività di ricerca, alcuni dei quali presentati in questo documento, mostrano che è possibile progettare sistemi di telerilevamento innovativi per il monitoraggio della composizione gassosa di volumi d'aria in applicazioni a piccola scala, utilizzando dispositivi laser all'infrarosso ed opportune procedure di elaborazione dati.

La sperimentazione sinora effettuata ha permesso di considerare obiettivi, luoghi e condizioni operative di monitoraggio differenti tra loro. Questa differenziazione ha consentito di evidenziare che ogni applicazione di monitoraggio (tipologia di ambiente, numero e tipo delle specie molecolari di interesse presenti, risoluzione spazio temporale delle misure, ecc.) necessita di uno specifico sistema e che le soluzioni oggi praticabili non sono sufficienti a coprire tutte le possibili casistiche. E' pertanto necessario ed auspicabile investire risorse nello sviluppo dei dispositivi e degli apparati di misura oggi disponibili, oltreché nello sviluppo delle metodologie di elaborazione dei relativi dati.

Tale necessità, oltre che da un punto di vista di ricerca scientifica e tecnologica di base, si impone anche a fronte della crescente domanda di sistemi e metodi per il controllo dell'aria, come nel caso dei centri urbani dove, come nel recente inverno, numerose amministrazioni pubbliche sono state costrette a prendere provvedimenti per ridurre le emissioni inquinanti a causa del superamento dei livelli di allarme.

Sulla base dei risultati descritti in questo rapporto, si ritiene che le soluzioni innovative di monitoraggio atmosferico, basate sull'approccio strumentale e di sistema qui proposto, permetterebbero di aumentare sensibilmente il livello di conoscenza dello stato atmosferico locale e costituirebbero un valido supporto informativo per gli organi preposti alle decisioni in merito a questioni ambientali.

Riferimenti bibliografici

1. F. Cuccoli, L. Facheris, S. Tanelli, D. Giuli: 2000 "Infrared tomographic system for monitoring the two-dimensional distribution of atmospheric pollution over limited areas", IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens., 38(1).
2. D. Giuli, L. Facheris, S. Tanelli, 1999: "Microwave inversion technique based on stochastic approach for rainfall field monitoring" IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens. 37(5), 2536-2555.
3. D. Giuli, A. Toccafondi, G. Biffi Gentili and A. Freni, "Tomographic Reconstruction of Rainfall Fields through Microwave Attenuation Measurements", J. Appl. Meteor., vol. 30, pp. 1323-1340, 1991.
4. R.T. Ku, E. D. Hinkley, J. O. Sample, 1975 : "Long-path monitoring of atmospheric carbon monoxide with a tunable diode laser system " Applied Optics, vol. 14, n. 4, pag. 854-861
5. D.T Cassidy, J. Reid, 1982: "Atmospheric pressure monitoring of trace gases using tunable diode lasers" Applied Optics, vol. 21, n. 7, pag. 1185-1190
6. E.D. Hinkley: "Laser Monitoring of the Atmosphere", Topics in Applied Physics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1976.
7. L.S. Rothman, 1987: "The HITRAN database: 1986 edition" Applied Optics, vol. 26, pagg. 4058-4097
8. R.M. Measures "Laser remote sensing" Wiley Interscience, 1981
9. W. Demtroeder: "Laser Spectroscopy" Springer Verlag, 1981
10. P. Werle, 1998: "A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors" Spectrochimica Acta, Part A 54, pagg. 197-236
11. V.E. Zuev: "Propagation of visible and infrared radiation in the Atmosphere" Springer Verlag
12. A. Ishimaru: "Wave propagation and scattering in random media" Academic Press, 1978
13. E.D. Hinkley, K.W. Nill, F.A. Blum, 1976: "Laser spectroscopy of atoms and molecules" Topics in Applied Physics vol. 2, Springer Verlag

Riferimenti degli autori

- Fabrizio CUCCOLI è ricercatore CNIT (Consorzio Nazionale Interuniversitario delle Telecomunicazioni) presso l'unità operativa di Firenze presso il DET (Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni).
Tel.: +39 055 4796382
Fax.: +39 055 488883
email: cuccoli@achille.det.unifi.it
- Luca FACHERIS è ricercatore presso il DET (Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni), Università di Firenze.
Tel.: +39 055 4796274
Fax.: +39 055 488883
email: facheris@ingfi1.ing.unifi.it
- Dino GIULI è professore di I fascia presso il DET (Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni), Università di Firenze.
Tel.: +39 055 4796370
Fax.: +39 055 488883
email: giuli@diefi.die.unifi.it