

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102008901642547A1

Publication Date

20100107

Applicant

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE-INFM ISTITUTO NAZIONALE PER LA FISICA

Title

PROCEDIMENTO PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL PARTICOLATO
ATMOSFERICO MEDIANTE UN DISPOSITIVO LIDAR A RETRODIFFUSIONE
ELASTICA E RETRORIFLESSIONE, E SISTEMA LIDAR PER L'ATTUAZIONE
DEL PROCEDIMENTO

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:
"Dispositivo lidar a retrodiffusione elastica e re-
troriflessione per la caratterizzazione del parti-
colato atmosferico"

di: CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - INFN I-
STITUTO NAZIONALE PER LA FISICA DELLA MATERIA, na-
zionalità italiana, Corso F. Perrone, 24 - 16152
GENOVA; CNISM - CONSORZIO NAZIONALE INTERUNIVERSI-
TARIO PER LE SCIENZE FISICHE DELLA MATERIA, nazio-
nalità italiana, Via della Vasca Navale, 84 -
00146 ROMA

Inventori designati: Nicola SPINELLI, Xuan WANG,
Maria Grazia FRONTOSO

Depositata il: 7 Luglio 2008

* * *

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda un procedimen-
to per la caratterizzazione del particolato atmo-
sferico mediante un dispositivo lidar, comprendente
le fasi seguenti:

inviare un impulso laser nell'atmosfera, parte
del quale viene retrodiffusa dal particolato pre-
sente nell'atmosfera generando un segnale di retro-
diffusione diretta, propagantesi verso il disposi-
tivo lidar;

rilevare il segnale di retrodiffusione diretta; e

determinare caratteristiche ottiche del particolato sulla base del segnale di retrodiffusione diretta rilevato.

L'applicazione della tecnica lidar alla caratterizzazione degli aerosoli atmosferici è ben consolidata. Essa si realizza in varie forme, sfruttando diversi fenomeni fisici e diverse tecnologie. È tuttavia fortemente limitata da alcuni vincoli di carattere generale, in particolare per quanto riguarda l'effettivo impiego nel controllo della qualità dell'aria negli ambiti pubblici e privati, quali ad esempio il controllo delle polveri sottili in aree urbane, il controllo delle emissioni di impianti industriali, di impianti per la produzione di energia, di inceneritori ecc..

Il principio di base è il seguente: un impulso laser di breve durata (tipicamente da qualche unità fino ad un centinaio di nanosecondi (10^{-9} s)) viene inviato in atmosfera e la radiazione retrodiffusa viene raccolta da un sistema di ricezione ed acquisizione (telescopio, sistema di selezione spettrale, rivelatori). La radiazione retrodiffusa trasporta informazioni sullo spessore di aria attra-

versato, mentre il tempo di rivelazione consente di determinare la distanza degli strati atmosferici.

Nella configurazione più semplice, un lidar per il particolato utilizza un solo fascio laser ed un solo sistema di rivelazione accordato alla stessa lunghezza d'onda del laser. In tale configurazione, il processo fisico coinvolto è quello della retrodiffusione elastica da parte dei gas e del particolato atmosferico.

In questo caso l'equazione che descrive il segnale rivelato in funzione della distanza dall'apparato contiene come incognite il coefficiente di estinzione $\alpha_p(z,\lambda)$ ed il coefficiente di retrodiffusione $\beta_p(z,\lambda)$ del particolato, che costituiscono i parametri ottici da determinare (z rappresenta la distanza dello strato d'aria considerato e λ la lunghezza d'onda utilizzata).

In realtà, pur supponendo noti tutti i parametri strumentali, l'equazione lidar non può essere risolta esattamente nelle incognite $\alpha_p(z,\lambda)$ e $\beta_p(z,\lambda)$. Per questo motivo, quando non si dispone di altri dati, occorre assumere delle ipotesi che hanno a che fare direttamente con la natura del particolato. Il metodo comunemente utilizzato in questo

caso consiste nel ritenere noto il valore del rapporto tra il coefficiente di estinzione ed il coefficiente di retrodiffusione, detto Lidar Ratio (LR), ed applicare uno degli algoritmi noti [1, 2].

La scelta del valore di LR viene fatta a partire dalla conoscenza delle condizioni atmosferiche, da analisi statistiche, da classificazioni del particolato a seconda dei siti, delle condizioni, delle stagioni, dell'umidità relativa, ecc. È chiaro, quindi, come tale scelta comporti un'enorme incertezza, generalmente stimata tra il 10% ed il 50%, sul coefficiente di retrodiffusione. L'incertezza sul coefficiente di estinzione è ovviamente ancora maggiore; di riflesso, il grado di arbitrarietà nella caratterizzazione del particolato diviene spesso inaccettabile.

La difficoltà viene superata dotando il sistema lidar della possibilità di rivelare simultaneamente anche il segnale ottico corrispondente alla diffusione Raman da parte delle molecole di azoto o di ossigeno (in entrambi i casi si tratta di costituenti stabili dell'atmosfera, dei quali la concentrazione in funzione dell'altezza può essere considerata nota con buona precisione).

La rivelazione simultanea del segnale elastico

e del segnale Raman consente l'applicazione di noti algoritmi per la determinazione sia del coefficiente di estinzione che del coefficiente di retrodiffusione alla lunghezza d'onda del fascio laser utilizzato [3, 4], sia pure con alcune ipotesi su aspetti particolari, come la dipendenza del coefficiente di estinzione dalla lunghezza d'onda, che però possono essere quantitativamente controllate.

D'altra parte la tecnica Raman non può essere applicata alle lunghezze d'onda del vicino infrarosso a causa della dipendenza della sezione d'urto del processo da λ^{-4} . Inoltre, il basso valore assoluto della sezione d'urto Raman comporta l'uso di fasci laser di elevata potenza, con conseguenti problemi economici, tecnici e di sicurezza, che si aggiungono ad una non trascurabile complessità nell'elaborazione dei dati.

Inoltre, la determinazione dei parametri chimico-fisici del particolato è possibile attraverso l'applicazione di algoritmi di inversione solo se sono disponibili misure di α_p e β_p a diverse lunghezze d'onda [5, 6], in particolare anche nell'infrarosso, dove però la tecnica Raman non è applicabile.

Una diversa tecnica per la determinazione dei

parametri ottici del particolato atmosferico prevede di dotare l'apparato lidar di un sistema per la scansione angolare, in modo che l'atmosfera sia sondata in un breve intervallo di tempo lungo diverse direzioni che formano angoli noti rispetto alla direzione zenitale [7]. Nell'ipotesi che l'atmosfera rimanga stabile durante lo svolgimento delle misure e soprattutto che le proprietà dell'atmosfera stessa dipendano solo dalla coordinata verticale (omogeneità orizzontale), questa tecnica consente di ottenere direttamente la misura dello spessore ottico del particolato e del coefficiente di retrodiffusione in funzione della coordinata verticale.

Mentre la complicazione tecnica relativa alla movimentazione del lidar è superabile, le condizioni di omogeneità orizzontale dell'atmosfera si verificano solo in speciali casi nei quali le condizioni meteorologiche e l'orografia del sito sono particolarmente favorevoli. Nel complesso l'applicabilità di questo metodo è molto limitata.

Altre varianti della tecnica lidar sono utilizzate in alcuni casi (lidar ad alta risoluzione spettrale, lidar ad assorbimento differenziale); esse però si basano su una spinta analisi spettrale

del segnale, richiedono sorgenti laser specifiche (riga stretta nel primo caso, doppia lunghezza d'onda accordabile nel secondo) e la conoscenza della natura del materiale bersaglio. L'applicazione in oggetto è inoltre ulteriormente limitata dal fatto che l'assorbimento da parte del particolato avviene in maniera predominante nell'ultravioletto ($\lambda < 300$ nm) e su larga banda, con conseguenti difficoltà legate all'interferenza con componenti gassosi ed alla necessità di avere sorgenti laser accordabili.

Con l'obiettivo di superare gli inconvenienti suddetti, gli inventori [8] hanno recentemente introdotto una nuova tecnica di elaborazione dei segnali di due apparati lidar che sondano l'atmosfera nella stessa direzione, ma in verso opposto, come accade per lidar da terra e da satellite, o da aereo (algoritmo CESC - Counterpropagating Elastic Signal Combination). Con tale tecnica è possibile utilizzare la sola retrodiffusione elastica per ottenere una misura diretta del coefficiente di retrodiffusione aerosolico a qualunque lunghezza d'onda senza alcuna ipotesi sulle caratteristiche chimico-fisiche del particolato. La tecnica consente di determinare in maniera indipendente anche lo

spessore ottico ed il coefficiente di estinzione aerosolica, in condizioni di rapporto segnale-rumore favorevole.

La tecnica suddetta ha tuttavia lo svantaggio di potere essere applicata solo operando simultaneamente con due dispositivi lidar posti alle estremità del tratto di atmosfera sotto controllo e puntati l'uno verso l'altro. Essa quindi prevede la duplicazione dell'apparato lidar, con conseguenze sui costi, sulla logistica e sulla complessità della gestione del sistema nel suo complesso.

La presente invenzione si prefigge lo scopo di permettere una determinazione precisa dei parametri ottici e della distribuzione spaziale, senza ricorrere ad ipotesi a priori, evitando gli inconvenienti delle tecniche note.

Secondo la presente invenzione tale scopo viene raggiunto grazie ad un procedimento per la caratterizzazione del particolato atmosferico del tipo definito all'inizio, nel quale

è prevista una superficie riflettente posizionata ad una distanza prestabilita dal dispositivo lidar, per cui una parte dell'impulso laser che raggiunge direttamente la superficie riflettente viene retroriflessa e successivamente viene retro-

diffusa dal particolato presente nell'atmosfera generando un segnale di retrodiffusione contropropagante, diretto verso la superficie riflettente, il quale segnale raggiunge la superficie riflettente e viene a sua volta retroriflesso verso il sistema lidar; e

si rileva anche il segnale della retrodiffusione contropropagante, per cui detta determinazione delle caratteristiche del particolato avviene anche sulla base del segnale di retrodiffusione contropropagante rilevato.

Modi particolari di realizzazione dell'invenzione formano oggetto delle rivendicazioni dipendenti.

Forma ulteriore oggetto dell'invenzione un sistema lidar per la caratterizzazione del particolato atmosferico mediante un procedimento secondo l'invenzione, il quale include:

un dispositivo lidar, comprendente un sistema trasmettitore atto ad inviare detto impulso laser nell'atmosfera, ed un sistema ricevitore atto a rilevare detti segnale di retrodiffusione diretta e contropropagante; ed

una superficie riflettente posizionata ad una distanza prestabilita dal dispositivo lidar, atta a

riflettere verso il dispositivo lidar la parte dell'impulso laser che raggiunge direttamente la superficie riflettente ed il segnale di retrodiffusione contropropagante.

In sintesi, la presente invenzione si basa sull'applicazione di una tecnica di retroriflessione per la generazione di segnali lidar contropropaganti. Questa tecnica consente la realizzazione di dispositivi che utilizzano la sola retrodiffusione elastica e forniscono una misura diretta del coefficiente di retrodiffusione aerosolico a qualunque lunghezza d'onda senza alcuna ipotesi sulle caratteristiche chimico-fisiche del particolato (grazie ad un adattamento dell'algoritmo CESC sopra menzionato). La tecnica consente di determinare in maniera indipendente anche lo spessore ottico ed il coefficiente di estinzione aerosolica, in condizioni di rapporto segnale-rumore favorevole.

L'applicazione può prevedere l'impiego simultaneo di diverse lunghezze d'onda (dall'ultravioletto all'infrarosso); in questo modo è possibile una caratterizzazione completa del particolato e della distribuzione spazio-temporale delle sue proprietà chimico-fisiche, come concentrazione, indice di rifrazione, composizione e di-

istribuzione dimensionale.

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione verranno più dettagliatamente esposti nella descrizione particolareggiata seguente di una sua forma di attuazione, data a titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

la figura 1 è una rappresentazione schematica di un procedimento per la caratterizzazione del particolato atmosferico secondo l'invenzione;

la figura 2 è una rappresentazione schematica di un sistema lidar per attuare il procedimento di figura 1;

la figura 3 rappresenta uno schema a blocchi funzionali del sistema lidar di figura 2;

la figura 4 rappresenta uno schema costruttivo del sistema di ricezione di un dispositivo lidar operante a tre lunghezze d'onda;

la figura 5 riporta il grafico delle funzioni di sovrapposizione per il segnale di retrodiffusione diretta e contropropagante;

la figura 6 riporta il grafico del segnale lidar simulato in funzione del tempo;

la figura 7 riporta il segnale simulato, corretto per la distanza, in funzione della distanza

dal sistema lidar;

la figura 8 riporta il profilo del coefficiente di retrodiffusione aerosolica determinato sulla base del segnale simulato, insieme a quello del segnale assunto per ipotesi nella simulazione; e

la figura 9 riporta il profilo del coefficiente di estinzione aerosolica determinato sulla base del segnale simulato, insieme a quello del segnale assunto per ipotesi nella simulazione.

Con riferimento alla figura 1, un procedimento per la caratterizzazione del particolato atmosferico prevede l'uso di un dispositivo lidar 10, il quale convenzionalmente invia un impulso laser nell'atmosfera, parte del quale viene convenzionalmente retrodiffusa dal particolato presente nell'atmosfera generando un segnale di retrodiffusione, che nella presente descrizione verrà designata come "diretta", che si propaga verso il dispositivo lidar 10. Il percorso dell'impulso laser che interagisce in parte con il particolato generando il segnale di retrodiffusione diretta è contrassegnato con Dir nella figura 1.

Il metodo proposto secondo l'invenzione si basa sull'idea di porre sul percorso del fascio laser una superficie riflettente 20, quale quella di uno

specchio, ad una distanza prestabilita d dal dispositivo lidar 10. In questo modo, una parte dell'impulso laser che raggiunge direttamente (cioè senza interagire con il particolato) la superficie riflettente 20 viene retroriflessa da tale superficie e successivamente viene retrodiffusa dal particolato presente nell'atmosfera generando un ulteriore segnale di retrodiffusione, che nella presente descrizione verrà designata come "contropropagante", diretto verso la superficie riflettente 20. Il segnale di retrodiffusione contropropagante raggiunge la superficie riflettente 20 e viene retroriflesso verso il dispositivo lidar 10, dove verrà rilevato. Il percorso dell'impulso laser che in parte giunge alla superficie riflettente e da questa viene riflesso all'indietro, e successivamente interagisce con il particolato producendo il segnale di retrodiffusione contropropagante, è contrassegnato con Cp nella figura 1.

Secondo l'invenzione, lo stesso lidar 10 potrà rivelare sia il segnale che corrisponde all'attraversamento dello spessore atmosferico nella direzione dal dispositivo lidar allo specchio, sia quello corrispondente al percorso inverso.

La situazione è schematizzata nella figura 1; per semplicità l'atmosfera sondata dal fascio laser è supposta a densità nulla (ovvero trascurabile) dovunque tranne che in un sottile strato Sz, posto ad una distanza z dal dispositivo lidar 10.

Il segnale retrodiffuso dallo strato atmosferico raggiunge il sistema di ricezione del dispositivo lidar 10 seguendo sia il percorso Dir (segnale lidar normale) sia il percorso Cp (segnale lidar contropropagante), dopo un tempo che sarà rispettivamente pari a

$$t_1 = \frac{2 \cdot z}{c} \quad ; \quad t_2 = 2 \cdot \frac{(d + (d - z))}{c} \quad .$$

In pratica il segnale ricevuto avrà 3 componenti: un impulso corrispondente alla retrodiffusione diretta da parte dello strato, al tempo t_1 , un segnale dovuto alla riflessione diretta dello specchio (relativo alla parte dell'impulso laser che non ha subito alcuna interazione con il particolato) al tempo $t_m = \frac{2 \cdot d}{c}$, e quello dovuto alla retrodiffusione della radiazione contropropagante al tempo t_2 . Ovviamente vale la relazione: $t_m - t_1 = t_2 - t_m$, che esprime la proprietà di simmetria introdotta dallo specchio piano.

I due segnali lidar (retrodifuso diretto e contropropagante), sono temporalmente separati sul rivelatore del sistema lidar 10 e possono quindi essere utilizzati per l'applicazione di un algoritmo derivato dall'algoritmo CESC sopra menzionato.

Consideriamo il segnale retrodifuso alla stessa lunghezza d'onda del fascio laser incidente (segnale di retrodiffusione elastica). Nel seguito indicheremo con $RCS_d(z)$ e $RCS_c(z)$ i segnali espressi in termini di numero di fotoni, corretti per il quadrato del percorso dal dispositivo lidar (questa correzione compensa la variazione dell'angolo solido di accettazione del ricevitore), rispettivamente corrispondenti alla retrodiffusione diretta dello strato Sz ed alla retrodiffusione del segnale contropropagante.

I due segnali possono essere scritti come:

$$RCS_c(z) = r^2 \cdot \frac{E_0}{h\nu} \cdot A \cdot \Delta z \cdot \eta \cdot O'(z) \cdot \beta(z) \cdot \exp(-2\tau_{0M}) \cdot \exp(-2\tau_{zM}) \quad (1)$$

$$RCS_d(z) = \frac{E_0}{h\nu} \cdot \Delta z \cdot A \cdot \eta \cdot O(z) \cdot \beta(z) \cdot \exp(-2\tau_{0z}) \quad (2)$$

Nelle equazioni 1) e 2) z indica la distanza dal lidar, E_0 è l'energia del segnale emesso dal laser, h è la costante di Planck, ν è la frequenza

della radiazione, A è la superficie utile del telescopio di ricezione, Δz è la risoluzione spaziale, η è l'efficienza complessiva dell'apparato, r è la riflettività dello specchio, $\beta(z)$ è il coefficiente di retrodiffusione totale e $O(z)$ ed $O'(z)$ sono le funzioni di sovrapposizione del lidar.

I termini $\tau_{0M} = \int_0^d \alpha(\zeta) d\zeta$, $\tau_{zM} = \int_z^d \alpha(\zeta) d\zeta$ e

$\tau_{0z} = \int_0^z \alpha(\zeta) d\zeta$ rappresentano rispettivamente lo spessore ottico lungo il percorso dal lidar 10 allo specchio 20, lungo il percorso dallo specchio 20 allo strato Sz a distanza z dal lidar 10, e lungo il percorso dal lidar 10 allo strato Sz a distanza z , mentre $\alpha(\zeta)$ è il coefficiente di estinzione funzione della coordinata spaziale.

Limitiamo per il momento l'analisi all'osservazione di strati atmosferici posti a distanza superiore alla quota di sovrapposizione totale. In questo caso possiamo considerare costanti le funzioni $O(z)$ ed $O'(z)$ ed inglobarne il valore nella costante strumentale.

Il prodotto tra i due segnali sarà dato da:

$$P(z) = RCS_c(z) \cdot RCS_D(z) = \left(\frac{E_0}{h\nu} \right)^2 \cdot r^2 \cdot (A \cdot \Delta z)^2 \cdot \eta^2 \cdot \beta^2(z) \cdot \exp[-2 \cdot (\tau_{oM} + \tau_{zM} + \tau_{oz})] \quad (3)$$

Vale la relazione: $\tau_{0z} + \tau_{zM} = \tau_{oM}$, e quindi il coefficiente di retrodiffusione può essere ricavato dall'equazione (3) come:

$$\beta(z) = \sqrt{P(z)} \cdot \frac{h\nu}{E_0 \cdot A \cdot \Delta z \cdot T_{oM}^2 \cdot r \cdot \eta} \quad (4)$$

Nell'equazione (4) la quantità $T_{oM} = \exp(-\tau_{oM})$ esprime la trasmissività atmosferica tra il lidar e la posizione dello specchio. Il valore di T_{oM} può essere determinato attraverso una procedura di calibrazione dell'apparato che consiste nel misurare l'ampiezza del segnale ottico direttamente riflesso dalla superficie dello specchio. Infatti questo segnale può essere espresso come:

$$S_M = \frac{E_0}{h \cdot \nu} \cdot r \cdot \eta \cdot T_{oM}^2 \cdot \frac{A}{s}$$

ove s è la superficie della sezione trasversale del fascio laser dopo il percorso di andata e ritorno.

Quindi il coefficiente di retrodiffusione totale diviene:

$$\beta(z) = \frac{1}{S_M \cdot \Delta z \cdot s} \sqrt{P(z)}$$

ed il coefficiente di retrodiffusione del particolato può essere ricavato dalla relazione:

$$\beta_p(z) = \beta(z) - \beta_{mol}(z)$$

nella quale $\beta_{mol}(z)$ rappresenta il contributo della componente molecolare, che può essere determinato a partire da modelli atmosferici standard e tramite la conoscenza di temperatura e pressione.

Se si prende in considerazione il rapporto R delle equazioni (1) e (2):

$$R(z) = \frac{RCS_C(z)}{RCS_D(z)} = r^2 \cdot \exp[-2(\tau_{0M} + \tau_{zM} - \tau_{0z})] = r^2 \cdot \exp(-4\tau_{0M}) \cdot \exp(4\tau_{0z}) \quad (7)$$

Lo spessore ottico fino alla distanza z sarà dato da:

$$\tau_{0z}(z) = \frac{1}{4} \left[\ln \frac{R(z)}{r^2} + 4\tau_{0M} \right] \quad (8)$$

Lo spessore ottico tra due punti di coordinate z_{min} e z_{max} è quindi:

$$\tau(z_{max} - z_{min}) = \frac{1}{4} [\ln R(z_{max}) - \ln R(z_{min})] \quad (9)$$

Il coefficiente di estinzione del particolato $\alpha_p(z)$ si ottiene quindi derivando l'equazione (7) rispetto a z :

$$\alpha_p(z) = \frac{1}{4} \frac{d}{dz} [\ln R(z)] - \alpha_{mol}(z) \quad (10)$$

Va infine sottolineato che l'unica ipotesi che deve essere verificata è che il contributo dello scattering multiplo possa essere trascurato. L'influenza dello scattering multiplo dipende dallo spessore ottico dello strato atmosferico sondato e dall'angolo solido sotto il quale esso è osservato. Condizioni sfavorevoli si verificano in presenza di nubi o in condizioni di nebbia densa.

Il sistema richiede una calibrazione che può essere eseguita, come precedentemente accennato, rivelando il segnale riflesso direttamente dallo specchio 20. Questo metodo ha il vantaggio di poter essere applicato durante ciascun ciclo di misura. Il segnale ottico corrispondente alla riflessione diretta dello specchio 20 è di intensità molto elevata, mentre il segnale lidar, ed in particolare quello contropropagante, è molto debole, quindi la rivelazione simultanea dei due segnali da parte dello stesso rivelatore richiederebbe una dinamica del rivelatore e del sistema di acquisizione molto elevata. Questo ostacolo può essere superato: 1) utilizzando un rivelatore separato (ad esempio un fotodiodo veloce) per la radiazione riflessa dallo specchio, e 2) con un opportuno montaggio del laser

e dell'apparato di ricezione (configurazione bistatica).

In pratica occorre fare in modo che la direzione di propagazione del fascio e la direzione di puntamento del telescopio di ricezione formino un piccolo angolo, sufficiente a far sì che la radiazione direttamente riflessa dallo specchio colpisca il fotodiodo ma non entri nel campo di vista del telescopio.

La situazione è schematizzata nella figura 2, dove con 101 è indicato il sistema laser, con 103 è indicato il telescopio ricevente, mentre con PD è indicato il rivelatore separato per la radiazione riflessa dallo specchio 20.

La configurazione è praticamente realizzabile a condizione che la divergenza del fascio laser sia significativamente inferiore all'apertura del campo di vista FOV del telescopio, ma questa condizione è sempre verificata nella pratica.

In questa configurazione il fotodiodo PD rivela il segnale della riflessione diretta, indicato con RD in figura 2, mentre il telescopio 103 raccoglie la radiazione retrodiffusa dal particolato.

Va tenuto in considerazione il fatto che questa configurazione comporta che il fascio laser ed

il campo di vista del telescopio non siano completamente sovrapposti; quindi, a piccole distanze occorre tenere conto della funzione di sovrapposizione $o(z)$ indicata nell'equazione (2). In particolare questa funzione assume valori diversi per il segnale retrodiffuso diretto e quello contropropagante. In entrambi i casi essa dipende solo dai parametri geometrici del dispositivo, quindi si tratta di una caratteristica che, una volta determinata, non si modifica se non quando l'apparato subisce delle variazioni. Ne consegue che essa può essere determinata in fase di collaudo con l'impiego di due dispositivi simili disposti in modo che la regione di sovrapposizione parziale dell'uno corrisponda alla regione di sovrapposizione totale dell'altro.

Una diversa metodologia di calibrazione consiste nel posizionare un dispositivo per la determinazione della concentrazione di particolato lungo il percorso del fascio laser, ad una nota distanza dal lidar. Un nefelometro può consentire di determinare il coefficiente di retrodiffusione nel punto considerato e quindi di utilizzare una procedura simile a quella descritta precedentemente. La frequenza con la quale questo tipo di calibrazione deve essere ripetuta dipende dalla stabilità delle

caratteristiche del sistema lidar (energia del laser, efficienza del rivelatore); tali parametri possono essere resi molto stabili con le tecnologie attualmente disponibili.

Lo schema a blocchi funzionali del dispositivo lidar 10 è riportato nella figura 3. La costituzione di tale dispositivo è di per sé convenzionale, e comprende un sistema laser 101, un'ottica di rinvio 102, un telescopio 103, un'ottica di ricezione e selezione spettrale 104, uno o più rivelatori 105, un sistema di puntamento 106, ed un'elettronica di controllo ed acquisizione 107.

Per il sistema laser 101 esistono molte soluzioni commerciali, a diverse lunghezze d'onda dall'IR all'UV. La tabella 1 mostrata nel seguito riporta le caratteristiche tipiche per un laser operante nel visibile.

L'ottica di rinvio 102 è costituita da un *beam steerer* (sistema di due specchi piani), con movimentazione micrometrica controllata, per l'allineamento ottimale della direzione di propagazione del fascio.

Il telescopio 103 può essere realizzato in diverse configurazioni, ma probabilmente la più efficace è la configurazione Cassegrain, che consente

di avere una ridotta lunghezza a parità degli altri parametri.

L'ottica di ricezione e selezione spettrale 104 provvede ad inviare la radiazione raccolta dal telescopio 103 al sistema di selezione spettrale e da questo ai rivelatori. Lo schema costruttivo per un dispositivo che operi a tre lunghezze d'onda è riportato in figura 4.

Un diaframma D posto nel piano focale del telescopio 103 definisce l'apertura angolare del dispositivo. La radiazione raccolta viene collimata da una lente L ed inviata ad un sistema di specchi dicroici SD e filtri interferenziali a banda stretta IF, che consentono di separare i fasci corrispondenti alle diverse lunghezze d'onda.

Può essere necessario variare l'intensità dei segnali in funzione delle condizioni di misura (giorno/notte, nubi o nebbia) al fine di mantenere in regime lineare la risposta dei rivelatori 105. A questo scopo ciascun canale di rivelazione comprende un attenuatore variabile AV.

Una soluzione praticabile per i rivelatori 105 prevede l'uso di fotomoltiplicatori (indicati con PM in figura 4) per radiazione UV o visibile e APD (avalanche photodiode) per radiazione IR.

Se il dispositivo lidar viene utilizzato con una serie di elementi riflettori 20, il sistema di puntamento 106 deve provvedere ad orientarlo su ciascuno di essi, in sequenza. Se è presente un unico elemento riflettore, il sistema di puntamento 106 può essere limitato ad una movimentazione manuale per l'allineamento con lo specchio.

Quanto all'elettronica di controllo ed acquisizione 107, le funzioni riguardano:

il controllo del dispositivo

l'acquisizione dei segnali dei rivelatori, che può avvenire sia in forma analogica che digitale (fotoconteggio).

I vantaggi del sistema secondo l'invenzione sono i seguenti:

- Il dispositivo consente di determinare direttamente la distribuzione spaziale e l'evoluzione temporale del coefficiente di retrodiffusione a partire dal solo segnale elastico, senza fare alcuna ipotesi a priori sulla natura del particolato.
- La determinazione del coefficiente di retrodiffusione a diverse lunghezze d'onda risulta poco gravosa sia dal punto di vista tecnico che da quello economico rispetto ai sistemi lidar che utilizzano la tecnica Raman, che peraltro nell'IR non è

applicabile. Il dispositivo proposto risulta meno complesso, meno costoso, di più semplice gestione di un sistema lidar Raman.

- Il dispositivo consente di determinare con buone prestazioni lo spessore ottico dello strato atmosferico sondato e, in condizioni di rapporto segnale/rumore favorevole, anche il coefficiente di estinzione e quindi il Lidar Ratio LR.

- Con l'impiego di diverse lunghezze d'onda è possibile determinare il Color Index ed il Coefficiente di Angstrom, che rispettivamente esprimono la dipendenza del coefficiente di retrodiffusione e di quello di estinzione dalla lunghezza d'onda.

- L'applicazione dell'infrarosso è particolarmente rilevante per la caratterizzazione del particolato di dimensioni comprese tra 0,1 μm e 10 μm (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀). Questo risulta particolarmente utile per un'applicazione efficace delle tecniche di inversione ai fini della determinazione dei parametri chimico-fisici del particolato (concentrazione, indice di rifrazione, distribuzione dimensionale) per le quali è necessario disporre di misure dei parametri ottici a diverse lunghezze d'onda, che siano tra loro sufficientemente distanti.

- Opera con piccole differenze di prestazioni sia nelle ore notturne che in quelle diurne (si veda la simulazione sotto descritta).
- L'implementazione per l'uso *stand-alone* risulta estremamente semplice.
- È autocalibrante, nel senso che si ricalibra durante ciascuna misura.

I vantaggi rispetto ai sistemi convenzionali di misura del particolato in relazione al controllo della qualità dell'aria sono:

- la risoluzione temporale può essere dell'ordine dei minuti;
- si può posizionare l'apparato lidar e lo specchio in posizioni elevate (su pali, edifici o su rilievi), in modo che il percorso della radiazione attraversi l'area da sottoporre a controllo (strade con elevata intensità del traffico veicolare, zone estese di produzione di particolato, ad esempio zone ad alta industrializzazione, inceneritori, centrali per la produzione di energia ecc.);
- dotando il dispositivo di un sistema meccanico di puntamento è possibile una mappatura del particolato in funzione del tempo su di un'ampia superficie.

Simulazione

Al fine di verificare le prestazioni del sistema proposto, è stata effettuata una simulazione completa.

È stato simulato un tipico segnale lidar con una risoluzione spaziale di 6 metri. È stata introdotta inoltre una componente di "rumore" dovuta sia alla statistica che al segnale di fondo, dipendente dal rumore elettronico, dalla corrente di buio dei fotomoltiplicatori e dalla radiazione solare.

La lunghezza d'onda usata nella simulazione è pari a 532 nm e corrisponde al caso nel quale il rumore di fondo è elevato a causa della luce diurna, ed inoltre si trova nella regione di minima soglia dal punto di vista della sicurezza nell'uso di fasci laser.

Nella simulazione sono stati presi in considerazione solo processi di scattering singolo da parte dei componenti atmosferici, considerando lo scattering Mie e quello di Rayleigh da parte rispettivamente delle particelle di aerosol e delle molecole.

Le proprietà atmosferiche sono state fissate utilizzando per la componente molecolare un modello di atmosfera standard e considerando per la compo-

nente aerosolica condizioni tipiche di una zona urbanizzata. In particolare è stata simulata una situazione nella quale il fascio laser attraversa zone caratterizzate da diversi contributi in termini di particolato, localizzati in zone poco estese, che simulano strade con elevata intensità del traffico veicolare e zone estese, ad esempio aree ad alta industrializzazione.

La distribuzione delle sorgenti è stata scelta in modo da rappresentare situazioni realistiche e consentire anche la determinazione della risoluzione spaziale dei dati finali.

Per semplicità nel calcolo del profilo spaziale del modello atmosferico, la simulazione è stata fatta ipotizzando che il sistema sia posizionato al livello del mare e disposto in modo tale che il percorso del fascio laser sia orizzontale. Variazioni da queste condizioni (lidar disposto ad una quota diversa e/o direzione arbitraria di puntamento) non modificano la funzionalità del dispositivo.

I valori dei parametri utilizzati nella simulazione sono elencati nella tabella 1 seguente. Essi sono stati desunti da misure lidar ottenute con un apparato realmente operante alla medesima lunghezza d'onda.

Tabella 1

Laser		Telescopio	
Energia per impulso (μJ)	0,5	Raggio (cm)	15
Frequenza di ripetizione (Hz)	2000	Lunghezza Focale (m)	1
Divergenza (con <i>Beam Expander</i>) (mrad)	0,1	Apertura diaframma (mm)	0,3
Lunghezza d'onda (nm)	532	Apertura angolare (mrad)	0,3
Durata impulso (ns)	< 40		
Retroriflettore		Ottica di ricezione	
Distanza (m)	2000	Efficienza complessiva	0,5
Apertura (m)	0,6	Filtro interferenziale	< 3
		Banda passante (nm)	
		Trasmissività nella banda	0,3
Riflettività	0,5	Tempo di integrazione (s)	600
Rivelatore			
Efficienza quantica	0,3		
Risoluzione spaziale (segmentale) (m)	10	Background-giorno (cps)	2000
Distanza fascio laser - asse del telescopio (cm)	20	Background-notte (cps)	0

Tenuto conto delle caratteristiche del laser (energia per impulso, durata e divergenza con espansore di fascio) il dispositivo soddisfa pienamente le condizioni poste dalle norme di sicurezza nell'uso di sorgenti laser [9].

Si è ipotizzato che l'acquisizione del segnale lidar avvenga in fotoconteggio, attraverso l'uso di un dispositivo elettronico tipo Multiscaler, commerciale, con una risoluzione temporale compatibile con la risoluzione spaziale di 10 m (*dwell time* ~70ns).

Per il calcolo del coefficiente di retrodiffusione e di quello di estinzione il segnale simulato è stato mediato su 10 minuti. Nella elaborazione non è stato applicato alcun filtro al segnale.

In figura 5 è riportato il grafico delle funzioni di sovrapposizione per il segnale di retrodiffusione diretta e contropropagante. Nella ricostruzione dei parametri ottici del particolato queste funzioni sono considerate note attraverso misure indipendenti, come illustrato precedentemente.

In figura 6 è riportato il segnale simulato in funzione del tempo a partire dall'istante di emissione dell'impulso laser.

In fig. 7, il segnale simulato, corretto per la distanza (Range Corrected Signal) è riportato in funzione della distanza dal dispositivo lidar. La curva superiore si riferisce alla retrodiffusione diretta, mentre quella inferiore è il risultato della retrodiffusione del segnale riflesso contro-

propagante. Allo scopo di mettere in evidenza il contributo della luce solare, nella figura è riportato il segnale simulato sia per misure diurne che per misure notturne.

In figura 8 è riportato il profilo del coefficiente di retrodiffusione aerosolica, determinato applicando l'algoritmo sopra descritto al segnale simulato, insieme a quello ipotizzato nella simulazione. La curva continua rappresenta l'andamento del coefficiente di retrodiffusione assunto per ipotesi. Nella figura sono riportati gli andamenti ottenuti nel caso diurno e notturno.

Dalla figura si evince che il profilo del coefficiente di retrodiffusione viene ricostruito con uno scarto inferiore all'1% per distanze da circa 200 m fino a 2 km (distanza lidar-specchio). La risoluzione spaziale complessiva risulta pari a 6 m. Le fluttuazioni presenti a distanze inferiori a 200 m sono dovute alla bassa intensità del segnale di retrodiffusione contropropagante ed all'influenza della funzione di sovrapposizione che assume valori molto bassi a piccolissime distanze.

In figura 9 è riportato il profilo del coefficiente di estinzione aerosolica determinato applicando l'algoritmo sopra descritto al segnale simu-

lato (giorno e notte) insieme a quello assunto per ipotesi nella simulazione.

L'accuratezza della ricostruzione del profilo ipotizzato corrisponde ad uno scarto inferiore al 5% a partire da 400 m di distanza. La risoluzione spaziale complessiva risulta di circa 50 m.

La simulazione del funzionamento del dispositivo completo dimostra che i coefficienti di estinzione e di retrodiffusione aerosolica possono essere determinati in modo assoluto, senza alcuna ipotesi, con risoluzioni spaziali dell'ordine di pochi metri e risoluzioni temporali di 10 min, su distanze di alcuni km e con prestazioni praticamente identiche per misure diurne o notturne, utilizzando parametri corrispondenti a reali condizioni di lavoro e componenti commerciali. Con tali parametri vengono inoltre superati agevolmente i problemi di sicurezza [9] nell'uso di sorgenti laser senza per questo limitare le prestazioni.

Riferimenti

[1] Klett, J.D.: **Stable analytical inversion solution for processing lidar returns.** *Appl. Optics*, **20**, 211-220, (1981)

- [2] Fernald et al., **Determination of Aerosol Height Distributions by Lidar**, (1972), *Journal of Applied Meteorology*, **11**, pp.482-489.
- [3] Ansmann et al., **Combined Raman Elastic Backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter and lidar ratio**, (1992) *Appl. Phys.B*, **55**,18-28.
- [4] Ansmann et al., **Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar**, (1990), *Opt. Lett.* **15**, 746-748.
- [5] C. Böckmann, **Hybrid regularization method for the ill-posed inversion of multiwavelength lidar data to determine aerosol size distribution**, *Appl. Opt.*, **40** (2001) 1329-1342.
- [6] Müller, D., Wandinger, U., and Ansmann, A. **Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: simulation**, *Appl. Opt.*, **38**(12):2358-2368, (1999).
- [7] M.Sicard et al., **Variational method for the retrieval of optical thickness and the backscatter coefficient from multiangle lidar profiles**, (2002), *Applied Optics*, vol.41, n.3.
- [8] Wang, Xuan et al. : , **Retrieval of atmospheric particles optical properties by combining ground-**

based and spaceborne lidar elastic scattering profiles, 28 May 2007 / Vol. 15, No. 11 / OPTICS EXPRESS 6734.

[9] Shane D. Mayor and Scott M. Spuler **"Raman-shifted eye-safe aerosol lidar"** APPLIED OPTICS Vol. 43, No. 19 _ 1 July 2004.

RIVENDICAZIONI

1. Procedimento per la caratterizzazione del particolato atmosferico mediante un dispositivo lidar (10), comprendente le fasi seguenti:

inviare un impulso laser nell'atmosfera, parte del quale (Dir) viene retrodiffusa dal particolato (Sz) presente nell'atmosfera generando un segnale di retrodiffusione diretta, propagantesi verso il dispositivo lidar;

rilevare il segnale di retrodiffusione diretta; e

determinare caratteristiche ottiche del particolato sulla base del segnale di retrodiffusione diretta rilevato;

caratterizzato dal fatto che

è prevista una superficie riflettente (20) posizionata ad una distanza prestabilita d dal sistema lidar, per cui una parte (Cp) dell'impulso laser che raggiunge direttamente la superficie riflettente viene retroriflessa e successivamente viene retrodiffusa dal particolato (Sz) presente nell'atmosfera generando un segnale di retrodiffusione contropropagante diretto verso la superficie riflettente, il quale segnale raggiunge la superficie riflettente e viene a sua volta da questa re-

troriflesso verso il sistema lidar; e

si rileva anche il segnale di retrodiffusione contropropagante, per cui detta determinazione delle caratteristiche del particolato avviene anche sulla base del segnale di retrodiffusione contropropagante rilevato.

2. Procedimento secondo la rivendicazione 1, in cui la determinazione delle caratteristiche del particolato comprende la determinazione del coefficiente di retrodiffusione $\beta_p(z, \lambda)$ del particolato in funzione della distanza z dal dispositivo lidar e della lunghezza d'onda λ dell'impulso laser, sulla base del prodotto fra il segnale di retrodiffusione diretta rilevato ed il segnale di retrodiffusione contropropagante rilevato.

3. Procedimento secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui la determinazione delle caratteristiche del particolato comprende la determinazione del coefficiente di estinzione $\alpha_p(z, \lambda)$ del particolato in funzione della distanza z dal dispositivo lidar e della lunghezza d'onda λ dell'impulso laser, sulla base del rapporto fra il segnale di retrodiffusione contropropagante rilevato ed il segnale di retrodiffusione diretta rilevato.

4. Procedimento secondo una delle rivendicazioni

precedenti, in cui un'ulteriore parte dell'impulso laser raggiunge direttamente la superficie riflettente e viene retroriflessa verso il sistema lidar senza interagire con il particolato, generando un segnale di retroriflessione diretta (RD), ed in cui detto segnale di retroriflessione diretta viene rilevato separatamente da detto segnale di retrodiffusione diretta e contropropagante, ed è utilizzato per la calibrazione del dispositivo lidar.

5. Sistema lidar per la caratterizzazione del particolato atmosferico mediante un procedimento secondo una delle rivendicazioni precedenti, includente

un dispositivo lidar (10), comprendente un sistema trasmettitore (101, 102) atto ad inviare detto impulso laser nell'atmosfera, ed un sistema ricevitore (103, 104, 105) atto a rilevare detto segnale di retrodiffusione diretta e contropropagante; ed

una superficie riflettente (20) posizionata ad una distanza prestabilita d dal dispositivo lidar, ed atta a riflettere verso il dispositivo lidar la parte dell'impulso laser che raggiunge direttamente la superficie riflettente ed il segnale di retrodiffusione contropropagante.

6. Sistema lidar secondo la rivendicazione 5, per la caratterizzazione del particolato atmosferico mediante un procedimento secondo la rivendicazione 4, in cui detto sistema ricevitore del dispositivo lidar comprende almeno un rivelatore (105) atto a rilevare detto segnale di retrodiffusione diretta e contropropagante, ed un rivelatore (PD) separato atto a rilevare detto segnale di retroriflessione diretta.

CLAIMS

1. A method for the characterization of atmospheric particles by means of a lidar device (10), comprising the following steps:

 sending a laser pulse in the atmosphere, a part of which (Dir) is backscattered by the particles (Sz) in the atmosphere thus generating a direct backscattering signal that propagates towards the lidar device;

 detecting the direct backscattering signal, and

 determining optical characteristics of the particles on the basis of the detected direct backscattering signal;

 characterized by the fact that

 it is provided a reflecting surface (20) that is positioned at a predetermined distance d from the lidar system, whereby a part (Cp) of the laser pulse that directly reaches the reflecting surface is backreflected and is later backscattered by the particles (Sz) in the atmosphere thus generating a counterpropagating backscattering signal directed towards the reflecting surface, which signal reaches the reflecting surface and is in turn backreflected by it towards the lidar system, and

the counterpropagating backscattering signal is also detected, so that the determination of the characteristics of the particles is made also using the counterpropagating backscattering signal.

2. A method according to claim 1, in which the determination of the characteristics of the particles includes determining the backscattering coefficient $\beta_p(z, \lambda)$ of the particles as a function of the distance z from the lidar device and the wavelength λ of the laser pulse, on the basis of the product of the detected direct backscattering signal and the detected counterpropagating backscattering signal.

3. A method according to claim 1 or 2, in which the determination of the characteristics of the particles includes determining the extinction coefficient $\alpha_p(z, \lambda)$ of the particles as a function of the distance z from the lidar device and the wavelength λ of the laser pulse, on the basis of the ratio between the detected counterpropagating backscattering signal and the detected direct backscattering signal.

4. A method according to any of the preceding claims, wherein a further part of the laser pulse directly reaches the reflecting surface and is

backreflected towards the lidar system without interacting with the particles, thus generating a direct backreflection signal (RD), and wherein the direct backreflection signal is detected separately from said direct and counterpropagating backscattering signals, and is used for calibrating the lidar device.

5. A lidar system for the characterization of atmospheric particles by means of a method according to any of the preceding claims, including a lidar device (10), including a transmitter system (101, 102) for sending said laser pulse in the atmosphere, and a receiver system (103, 104, 105) for detecting said direct and counterpropagating backscattering signals, and

a reflecting surface (20) positioned at a predetermined distance d from the lidar device, and capable of reflecting the part of the laser pulse directly reaching the reflecting surface and the counterpropagating backscattering signal towards the lidar device.

6. A lidar system according to claim 5, for the characterization of the atmospheric particles by means of a method according to claim 4, in which said receiver system of the lidar device includes

at least one detector (105) for detecting said direct and counterpropagating backscattering signals, and a different detector (PD) for detecting the direct backreflection signal.

Fig. 1

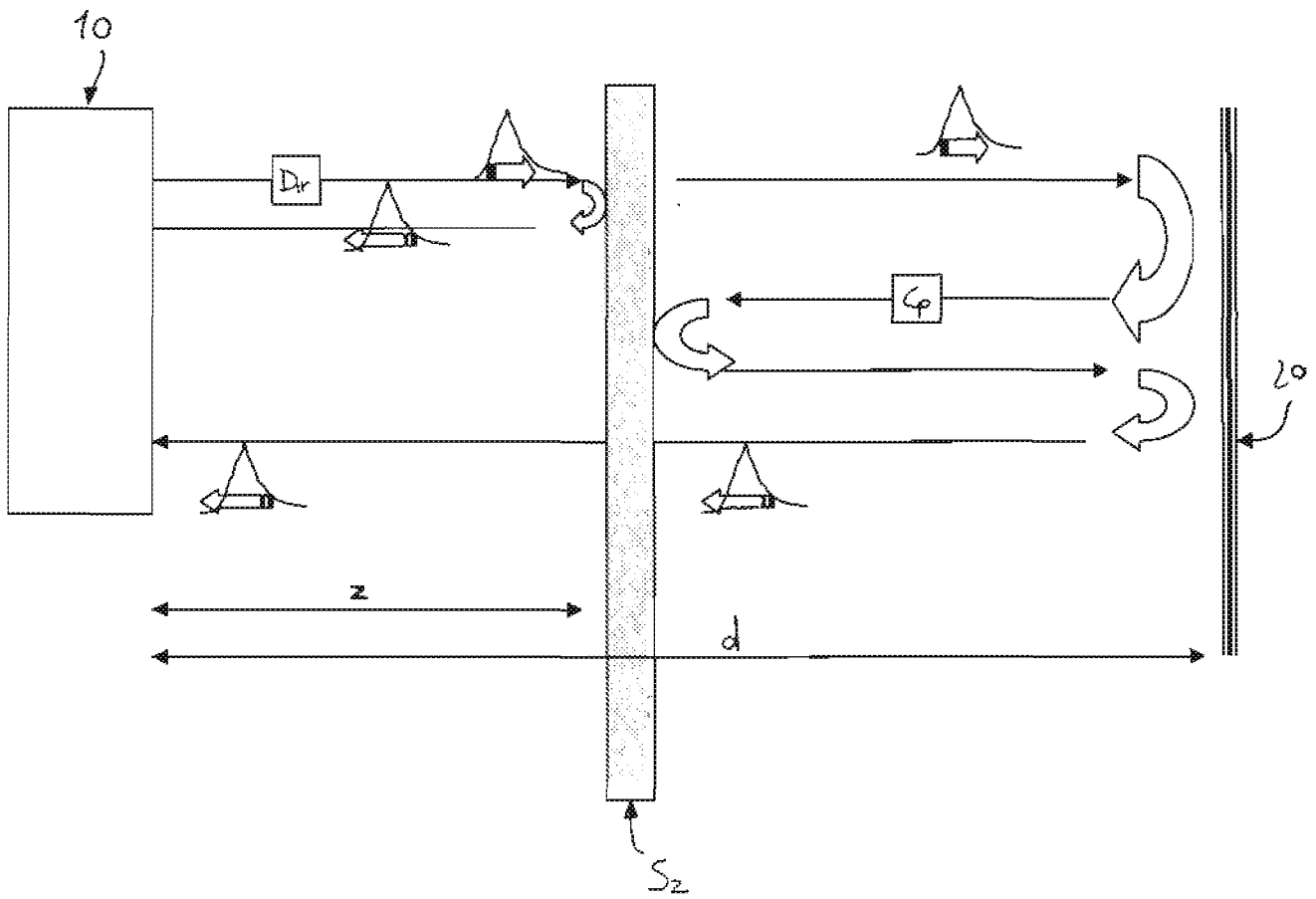


Fig. 2

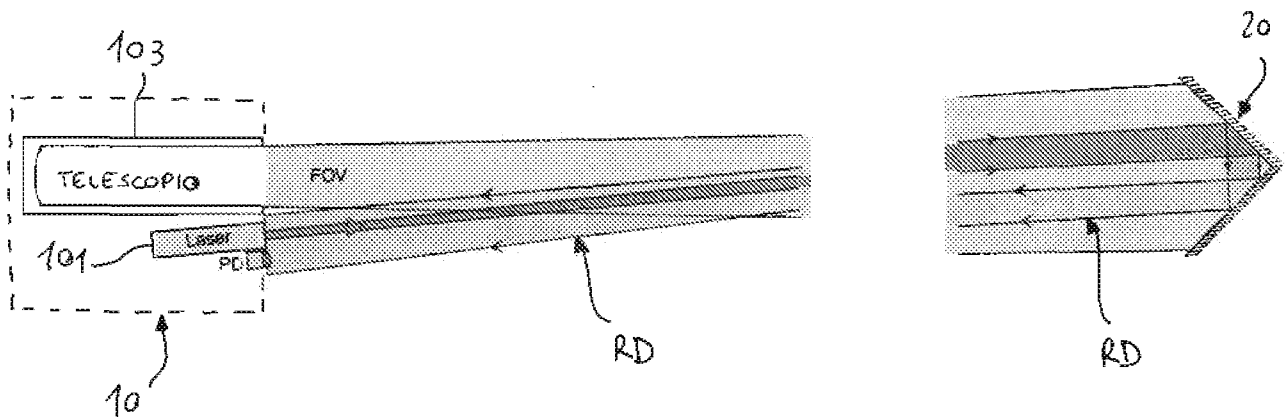


Fig. 3

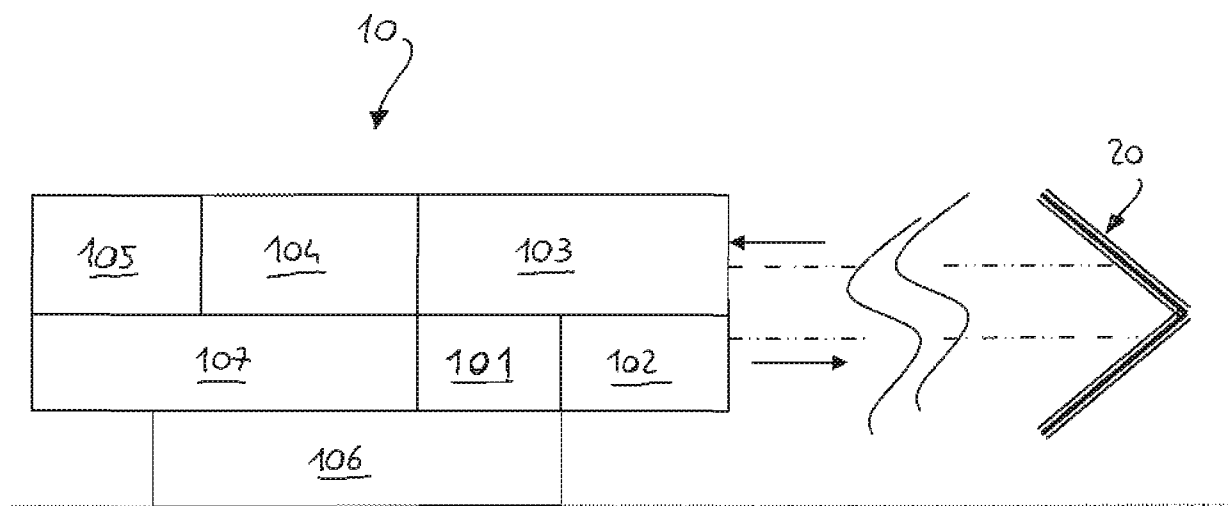


Fig. 4

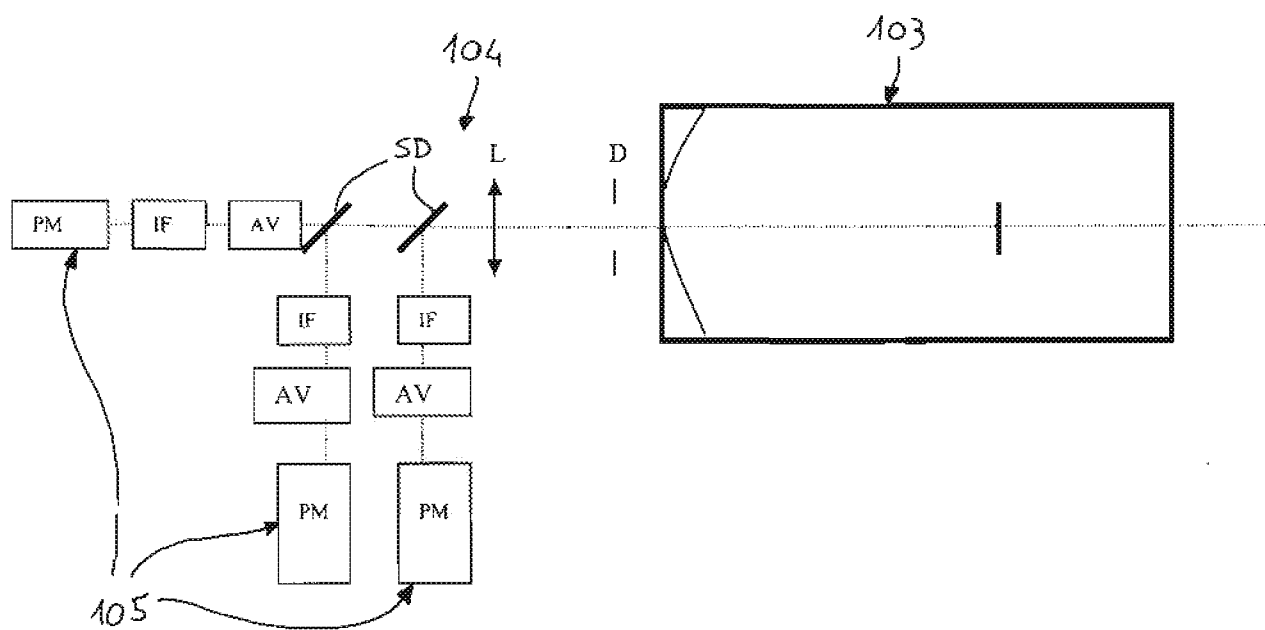


Fig. 5

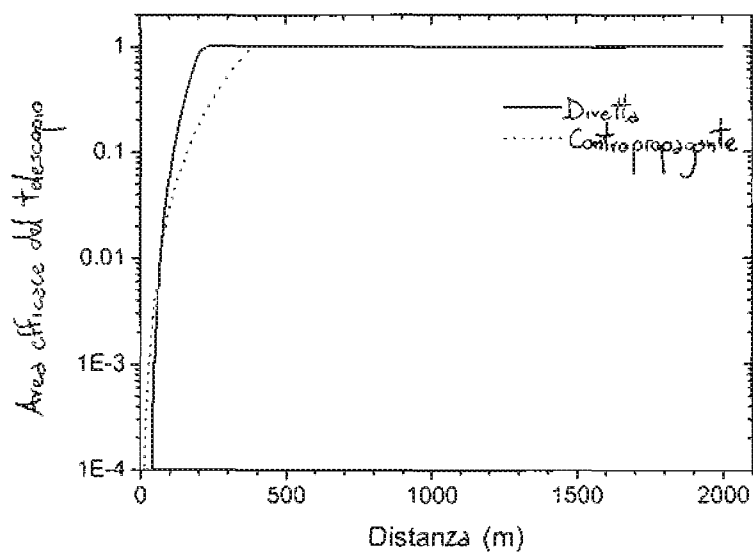


Fig. 6

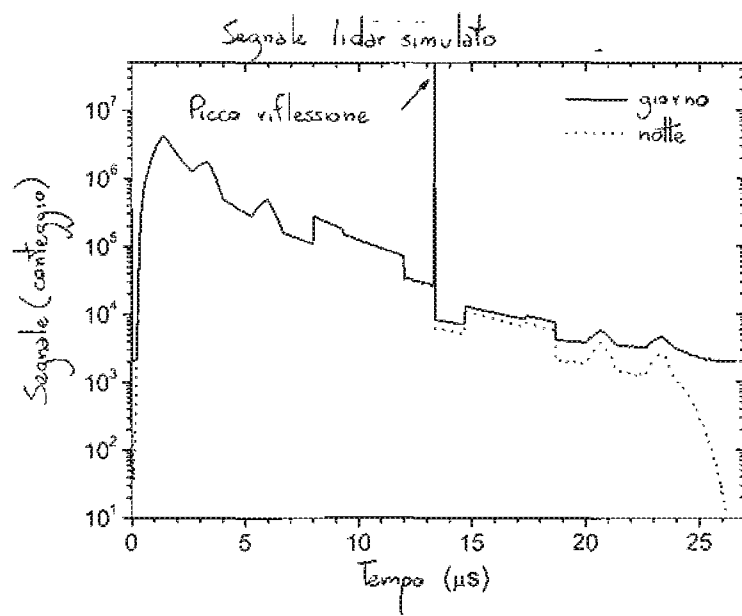


Fig. 7

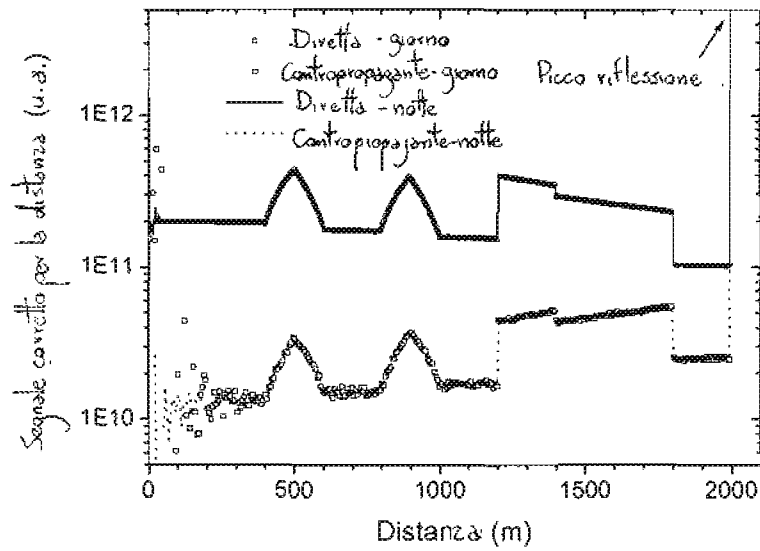


Fig. 8

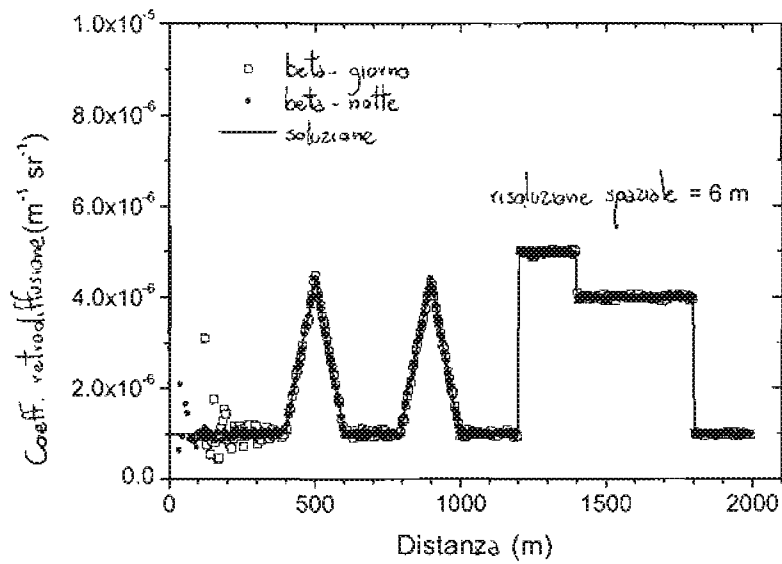


Fig. 9

