

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102022000013186
Data Deposito	22/06/2022
Data Pubblicazione	22/12/2023

Classifiche IPC

Titolo

SISTEMA DI COMBINAZIONE COERENTE DI FASCIO E RELATIVO METODO DI CONTROLLO

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:
"SISTEMA DI COMBINAZIONE COERENTE DI FASCIO E RELATIVO
METODO DI CONTROLLO"

di LEONARDO S.p.A.

di nazionalità italiana

con sede in Piazza Monte Grappa 4 - 00195 Roma (RM)

Inventori: BISESTO Fabrizio Giuseppe, PERNA Alessandro,
COPPOLA Francesco, COSENTINO Alberto

Campo tecnico dell'invenzione

La presente invenzione riguarda un sistema di
combinazione coerente di fascio (CBC, Coherent Beam
Combination) e un relativo metodo di controllo.

Stato della tecnica

Come è noto, la combinazione coerente di fascio è una
tecnica che viene utilizzata per ottenere un fascio laser
ad alta potenza da una sorgente laser a bassa potenza.

Una combinazione coerente di fascio nota comprende una
sorgente laser che genera un fascio laser primario, un
divisore ("splitter") che divide il fascio laser primario
in N fasci secondari, un corpo di amplificazione avente N
canali, uno per ogni fascio secondario, e un'unità di
ricombinazione che ricombina gli N fasci secondari,
formando così un fascio di uscita focalizzato su un

bersaglio.

Infatti, la possibilità di ottenere un fascio laser ad alta potenza dall'amplificazione di una singola sorgente laser è limitata da effetti termici e da effetti ottici non lineari.

Al contrario, in un sistema di combinazione coerente di fascio, gli N canali sono amplificati singolarmente e poi ricombinati tra loro.

Questo consente l'uso della ricombinazione dei fasci amplificati per ottenere un'uscita ad alta potenza.

Se i fasci amplificati sono coerenti tra loro, i fasci amplificati interferiscono tra loro. In particolare, si desidera che i fasci amplificati interferiscano costruttivamente tra loro.

Infatti, in un caso teorico, se i fasci amplificati sono coerenti tra loro e hanno uno scostamento di fase reciproco uguale a zero o a un multiplo di 2π , allora il fascio ricombinato ha un'intensità di picco proporzionale a N^2 , in cui N è il numero di canali del sistema CBC.

Al contrario, se i fasci non sono coerenti tra loro, l'intensità del fascio ricombinato è soltanto proporzionale a N .

Tuttavia, mantenere i fasci amplificati coerenti tra loro e agganciati in fase tra loro richiede un controllo preciso della fase dei fasci amplificati.

La Richiedente ha verificato che i sistemi CBC noti hanno una bassa efficienza rispetto al caso teorico.

Oggetto e riassunto dell'invenzione

L'obiettivo della presente invenzione è superare gli svantaggi della tecnica anteriore.

La presente invenzione riguarda un sistema di combinazione coerente di fascio e un relativo metodo di controllo, come rivendicato nelle rivendicazioni allegate.

Breve descrizione dei disegni

La figura 1 mostra un diagramma a blocchi di un sistema di combinazione coerente, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione.

La figura 2 mostra in dettaglio il diagramma a blocchi di una porzione del presente sistema CBC, secondo una forma di realizzazione.

La figura 3 mostra in dettaglio il diagramma a blocchi di una porzione diversa del presente sistema CBC, secondo una forma di realizzazione.

La figura 4 mostra un diagramma a blocchi dettagliato di un'altra porzione del sistema CBC della figura 1, secondo una forma di realizzazione.

La figura 5 mostra un diagramma di flusso di un metodo di aggancio di fase per controllare il sistema CBC della figura 1.

La figura 5A mostra un diagramma di flusso di un

algoritmo di ottimizzazione del metodo di aggancio di fase della figura 5, secondo una forma di realizzazione.

Le figure 5B e 5C mostrano viste in pianta dall'alto schematiche di un sensore di intensità del sistema CBC della figura 1, durante l'uso, in due diverse condizioni di uso.

La figura 6 mostra un diagramma di flusso di un metodo di equalizzazione di ritardo per controllare il sistema CBC della figura 1.

La figura 7 mostra un esempio della distribuzione di intensità di un fascio laser ricombinato ottenibile mediante il sistema CBC della figura 1.

La figura 8 mostra un modulo processore del sistema CBC della figura 1, secondo una forma di realizzazione.

La figura 9 mostra un diagramma di flusso di un metodo di simulazione per controllare il sistema CBC della figura 1.

Descrizione dettagliata delle forme di realizzazione preferite dell'invenzione

La seguente descrizione è fornita per consentire ad un esperto nella tecnica di realizzare e utilizzare l'invenzione. Varie modifiche alle forme di realizzazione risulteranno facilmente evidenti agli esperti nella tecnica, senza scostarsi dall'ambito di protezione dell'invenzione rivendicata. Quindi, la presente invenzione

non intende essere limitata alle forme di realizzazione mostrate, ma ad essa deve essere accordato l'ambito di protezione più ampio conformemente ai principi e alle caratteristiche descritti nella presente e definiti nelle rivendicazioni allegate.

Salvo altrimenti definito, tutti i termini tecnici e scientifici utilizzati nella presente hanno lo stesso significato comunemente compreso da un comune esperto nella tecnica a cui appartengono le forme di realizzazione descritte. In caso di conflitto, prevarrà la presente domanda, incluse le definizioni. In aggiunta, gli esempi sono soltanto illustrativi e non intendono essere limitativi.

Ai fini di favorire la comprensione delle forme di realizzazione descritte nella presente, si fa riferimento ad alcune forme di realizzazione e si utilizzerà un linguaggio specifico per descrivere le stesse. La terminologia utilizzata nella presente ha il fine di descrivere soltanto particolari forme di realizzazione e non intende limitare l'ambito di protezione della presente divulgazione.

La figura 1 mostra un diagramma a blocchi di un sistema di combinazione coerente di fascio (CBC) 1 configurato per fornire un fascio ricombinato di uscita 2 avente un'intensità di picco elevata, per esempio fino a

decine di kW, indirizzato su un bersaglio T.

Il sistema CBC 1 può essere utilizzato per esempio per la rimozione di detriti nello spazio, applicazioni in spettroscopia e sagomatura di laser, comunicazione da punto a punto ("Point-to-Point communication") in aria (per esempio aria-aria, terra-aria, aria-spazio, terra-spazio), come contrasto per un sistema aereo senza equipaggio, dispositivi esplosivi improvvisati o come sistema di abbagliamento.

Il sistema CBC 1 comprende una sorgente laser 3, un allargatore di fascio 5 e un divisore 7, otticamente accoppiati tra loro, in particolare attraverso una fibra ottica.

La sorgente laser 3 genera un fascio laser primario 8 avente una larghezza di linea ristretta, per esempio inferiore a 20 kHz, l'allargatore di fascio 5 genera un fascio allargato 10 dal fascio laser primario 8 e il divisore 7 divide il fascio allargato 10 in N fasci secondari, dei quali sono mostrati qui soltanto un primo, un secondo, un terzo e un quarto fascio secondario 12A, 12B, 12C, 12D.

Il sistema CBC 1 comprende inoltre un corpo principale 15, accoppiato otticamente al divisore 7, e un'ottica di focalizzazione 17, accoppiata otticamente al corpo principale 15.

Il corpo principale 15 comprende una pluralità di canali, uno per ogni fascio secondario. In dettaglio, in riferimento alla figura 1, il corpo principale 15 ha un primo, un secondo, un terzo e un quarto canale 20A, 20B, 20C, 20D, che ricevono ognuno un rispettivo fascio secondario 12A, 12B, 12C, 12D e che forniscono ognuno un rispettivo fascio intermedio 21A, 21B, 21C, 21D.

L'ottica di focalizzazione 17 riceve i fasci intermedi da 21A a 21D ed è configurata per ricombinare i fasci intermedi 21A-21D e per generare il fascio di uscita ricombinato 2 indirizzato sul bersaglio T.

L'ottica di focalizzazione 17, come discusso in dettaglio qui di seguito relativamente alla figura 4, indirizza parte dei fasci intermedi 21A-21D verso un sensore di intensità, qui un fotodiodo 23, e verso un sensore di immagine, qui una fotocamera CCD 24.

In questa forma di realizzazione, il fotodiodo 23 è accoppiato a un motore 25, per esempio un attuatore piezoelettrico, che è configurato per muovere il fotodiodo 23 lungo uno o più assi, in particolare qui lungo tre assi ortogonali X, Y, Z.

Il sistema CBC 1 comprende inoltre un'unità di controllo 26 includente un'unità o un modulo di aggancio di fase 30 e un'unità o un modulo di compensazione di ritardo 31.

In questa forma di realizzazione, la sorgente laser 3 è un laser a fibra, in particolare un laser a fibra DFB monomodale avente un rumore di bassa intensità e un'elevata qualità di fascio, per esempio con un fattore M^2 minore di 1,05.

La sorgente laser 3 è sostanzialmente un laser monocromatico, avente per esempio una lunghezza d'onda di 1064 nm. Tuttavia, la lunghezza d'onda del fascio primario 8 generato dalla sorgente laser 3 può essere diversa, a seconda dell'applicazione specifica.

Secondo una forma di realizzazione, la sorgente laser 3 può essere configurata per fornire un fascio primario 8 di lunghezza d'onda variabile.

La sorgente laser 3 può essere una sorgente laser a onda continua o una sorgente laser a impulsi, qui una sorgente laser a onda continua.

L'allargatore di fascio 5, per esempio un modulatore chirp, un modulatore sinusoidale o un modulatore di rumore, amplia la larghezza di linea del fascio primario 8. Per esempio, il fascio allargato 10 può avere una larghezza di linea di circa decine di GHz, in particolare fino a 50 GHz.

La figura 2 mostra una forma di realizzazione dell'allargatore di fascio 5, qui un allargatore modulato a rumore, comprendente un modulatore di fase 35, in particolare un modulatore elettro-ottico, accoppiato tra la

sorgente laser 3 e il divisore 7 e pilotato da un segnale di ingresso a radio frequenza RF_{in} .

In dettaglio, l'allargatore di fascio 5 comprende un generatore di rumore 36 che genera un segnale di rumore NS, per esempio una forma d'onda di rumore o una sequenza binaria pseudocasuale (PRBS, Pseudorandom Binary Sequence), un amplificatore rf 37 che amplifica il segnale di rumore NS e un filtro passa-basso 38 che filtra il segnale di rumore amplificato, generando così il segnale di ingresso a radio frequenza RF_{in} .

Il filtro passa-basso 38 consente di impostare la larghezza di banda del segnale di ingresso a radio frequenza RF_{in} e, pertanto, la modifica di larghezza di banda ottica del fascio primario 8.

Secondo una forma di realizzazione, il filtro passa-basso 38 può anche comprendere moduli di sagomatura di segnale per modificare la sagoma spettrale del segnale di ingresso a radio frequenza RF_{in} , a seconda dell'applicazione specifica.

L'allargatore di fascio 5 comprende anche un carico di terminazione 39, che riceve un segnale di uscita a radio frequenza RF_{out} generato dal modulatore di fase 35 a partire dal segnale di ingresso a radio frequenza RF_{in} . Il carico di terminazione 39 può essere utilizzato per l'adattamento di impedenza e come dissipatore termico, per dissipare il

calore generato dal segnale di ingresso a radio frequenza RF_{in} nel modulatore di fase 35.

I canali 20A-20D del corpo principale 15 comprendono ognuno un amplificatore 40, un modulatore di fase 42, una linea di ritardo ottico 44 e un combinatore di apertura 46, accoppiati otticamente tra loro, in particolare qui attraverso una rispettiva fibra ottica.

L'amplificatore 40 di ciascun canale 20A-20D è accoppiato a una rispettiva fibra ottica che si estende dal divisore 7 e che porta il rispettivo fascio secondario 12A-12D. Gli amplificatori 40 di ciascun canale 20A-20D amplificano il rispettivo fascio secondario 12A-12D.

Gli amplificatori 40 hanno ognuno un rispettivo guadagno, per esempio fisso o variabile, compreso, per esempio, tra 10 e 10^9 .

L'unità di controllo 26, in particolare qui l'unità di equalizzazione di ritardo 31, può fornire un segnale S agli amplificatori 40, che controllano uno o più parametri degli amplificatori 40.

In dettaglio, il segnale S comprende una pluralità di segnali di controllo di fascio s_1 , s_2 , s_3 , s_4 , uno per ciascun amplificatore 40.

Per esempio, i segnali di controllo di fascio s_1 , s_2 , s_3 , s_4 possono controllare ciascuno il guadagno dell'amplificatore 40 di un rispettivo canale 20A-20D.

Secondo una forma di realizzazione, i segnali di controllo di fascio s_1 , s_2 , s_3 , s_4 possono comandare ciascuno l'accensione e lo spegnimento del rispettivo amplificatore 40, comandando così l'attivazione e la disattivazione del rispettivo canale 20A-20D. I modulatori di fase 42, per esempio formati ciascuno da un modulatore elettro-ottico o un estensore di fibra, ricevono un segnale di controllo di fase U, per esempio un segnale di tensione, dall'unità di aggancio di fase 30.

In dettaglio, il modulatore di fase di ciascun canale 20A-20D riceve un rispettivo segnale di controllo di fase u_1 , u_2 , u_3 , u_4 , per esempio un segnale di tensione, dall'unità di aggancio di fase 30.

I segnali di controllo di fase u_1 , u_2 , u_3 , u_4 controllano le variazioni di fase a cui sono sottoposti i fasci secondari 12A-12D che, dopo essere stati amplificati dal rispettivo amplificatore 40, si propagano attraverso il rispettivo modulatore di fase 42.

I modulatori di fase 42 possono per esempio essere realizzati come una guida d'onda, utilizzando un processo a scambio protonico, per ottenere una stabilità elevata anche ad elevata potenza ottica.

Le linee di ritardo ottico 44 sono linee di ritardo variabile che impostano la lunghezza del percorso ottico del rispettivo canale 20A-20D e ricevono un segnale di

controllo di ritardo D dall'unità di equalizzazione di ritardo 31. In dettaglio, le linee di ritardo ottico 44 ricevono ciascuna un rispettivo segnale di controllo di ritardo d_1 , d_2 , d_3 , d_4 dall'unità di equalizzazione di ritardo 31.

In pratica, i segnali di controllo di ritardo d_1 , d_2 , d_3 , d_4 possono regolare ciascuno la lunghezza fisica della rispettiva linea di ritardo ottico 44 e/o possono cambiare ciascuno l'indice di rifrazione della rispettiva linea di ritardo ottico 44.

Per esempio, le linee di ritardo ottico 44 possono essere estensori di fibra o linee di ritardo piegate.

Secondo una forma di realizzazione, le linee di ritardo ottico 44 possono comprendere ciascuna un ingresso di fibra accoppiato al rispettivo modulatore di fase 42, un'uscita di fibra accoppiata al combinatore di fascio 45 e un elemento opto-meccanico mobile, quale un retroriflettore, disposto tra l'ingresso di fibra e l'uscita di fibra che riflette il rispettivo fascio secondario 12A-12D proveniente dall'ingresso di fibra verso l'uscita di fibra. Muovendo il retroriflettore mobile è possibile cambiare la lunghezza del percorso attraversato dal rispettivo fascio secondario 12A-12D e, pertanto, la lunghezza del percorso ottico del rispettivo canale 20A-20D.

Per esempio, se le linee di ritardo ottico 44 comprendono detto elemento opto-meccanico mobile, i segnali di controllo di ritardo d_1 , d_2 , d_3 , d_4 possono controllare un attuatore, per esempio un attuatore piezoelettrico, configurato per muovere l'elemento opto-meccanico mobile.

Il combinatorio di fascio 45 ha una porzione di accoppiamento posteriore 45A, che riceve i fasci secondari 12A-12D che si propagano dalle linee di ritardo ottico 44, e una porzione di accoppiamento anteriore 45B avente una pluralità di aperture 46, che forniscono ognuna un rispettivo fascio intermedio 21A-21D.

Le aperture 46 sono disposte, sulla porzione di accoppiamento anteriore 45B, in una configurazione ad aperture affiancate ("tiled-apertures"), in particolare in una configurazione a nido d'ape, che consente un'elevata scalabilità nel numero di canali.

Tuttavia, le aperture 46 possono essere disposte, sulla porzione di accoppiamento 45B, in una configurazione diversa, a seconda dell'applicazione specifica e/o del fattore di riempimento desiderato.

Soltanto a titolo di esempio, la figura 3 mostra un esempio della porzione di accoppiamento 45B, in un caso in cui il sistema CBC 1 ha diciannove aperture 46 disposte in una configurazione a nido d'ape.

Le aperture 46 hanno una sezione trasversale circolare

avente un diametro d definente la dimensione ("waist") di fascio dei fasci intermedi 21A-21D.

Nella configurazione a nido d'ape, due aperture adiacenti 46A, 46B sono disposte ad una distanza l , per esempio misurata tra i centri delle due aperture adiacenti 46A, 46B.

Facendo ancora riferimento alla configurazione esemplificativa della figura 3, le aperture 46 sono disposte lungo un asse X in modo da formare una pluralità di file reciprocamente distanziate lungo un asse Y perpendicolare all'asse X.

In questa forma di realizzazione, due file che sono adiacenti lungo l'asse Y sono disposte ad una distanza h misurata in una direzione parallela all'asse Y. Per esempio, la distanza h può essere misurata tra i centri di due aperture di due file adiacenti.

La distanza h può essere espressa in funzione della distanza l con la formula: $h = l \cdot \sqrt{3}/2$.

Nuovamente con riferimento alla figura 1, il combinatorio di fascio 45 comprende una pluralità di elementi opto-meccanici 47, uno per ciascun canale 20A-20D, che accoppia il rispettivo fascio secondario 12A-12D che si propaga dalla linea di ritardo 44 verso l'apertura 46.

In dettaglio, ciascun elemento opto-meccanico 47 comprende un connettore di fibra 48 e un elemento ottico

49, disposto in corrispondenza della rispettiva apertura 46.

Il connettore di fibra 48 è accoppiato alla fibra ottica che si estende dalla linea di ritardo ottico 44. I fasci secondari 12A-12D provenienti dalle linee di ritardo ottico 44 si propagano nello spazio libero tra il connettore di fibra 48 e il rispettivo elemento ottico 49.

L'elemento ottico 49, per esempio una lente convergente, collima il rispettivo fascio secondario 12A-12D che si propaga dal connettore di fibra 48, generando così il rispettivo fascio intermedio 21A-21D.

Per esempio, il connettore di fibra 48 può essere posto in corrispondenza del piano focale del rispettivo elemento ottico 49.

Inoltre, in questa forma di realizzazione, ogni elemento opto-meccanico 47 comprende anche una maschera di intensità 50 disposta tra il rispettivo connettore di fibra 48 e il rispettivo elemento ottico 49.

La maschera di intensità 50 può ridurre la dimensione di fascio del fascio che si propaga dal connettore di fibra 48 e dall'elemento ottico 49, in modo tale che soltanto una porzione del fascio secondario 21A-21D, per esempio compresa tra il 95% e il 100%, in particolare di circa il 95%, sia trasmessa e formi il rispettivo fascio intermedio 21A-21D, mentre la porzione rimanente, per esempio compresa

tra il 5% e lo 0%, in particolare di circa il 5%, del rispettivo fascio secondario 21A-21D è bloccata.

La maschera di intensità 50 consente di ottimizzare il fattore di riempimento delle aperture 46 sulla porzione di accoppiamento anteriore 45B del combinatore di fascio 45.

La figura 4 mostra il sistema CBC 1, in cui è illustrata una forma di realizzazione dettagliata dell'ottica di focalizzazione 17.

L'ottica di focalizzazione 17 definisce un percorso ottico primario 53, che indirizza una prima porzione dei fasci intermedi 21A-21D verso il bersaglio T, e un percorso ottico secondario 54, che indirizza una seconda porzione dei fasci intermedi 21A-21D verso il fotodiodo 23 e la fotocamera CCD 24.

In dettaglio, il percorso ottico primario 53 dell'ottica di focalizzazione 17 forma un sistema ottico a due lenti comprendente una lente convessa 55, avente una lunghezza focale f_1 e disposta davanti alla faccia di accoppiamento anteriore 45B del combinatore di fascio 45, e una lente concava 56, avente una lunghezza focale f_2 e accoppiata otticamente alla prima lente 55.

La prima e la seconda lente 55, 56 consentono la ricombinazione reciproca dei fasci intermedi 21A-21D, formando così un fascio ricombinato 75.

Il fascio ricombinato 75 viene generato

dall'interferenza dei fasci intermedi 21A-21D. Pertanto, il fronte d'onda del fascio ricombinato 75 forma un pattern di interferenza avente un lobo principale e uno o più lobi secondari (come per esempio mostrato nella figura 7).

Inoltre, la posizione della lente concava 56 lungo il percorso ottico primario 53 può essere modificata, in uso, in modo tale che il sistema a due lenti formato dalla rete convessa 55 e dalla lente concava 56 abbia una lunghezza focale variabile.

Per esempio, la lunghezza focale del sistema a due lenti può essere cambiata a seconda della distanza del bersaglio T dal sistema CBC 1.

Per esempio, la lente concava 56 può essere accoppiata a un attuatore DC, non mostrato qui, configurato per muovere la lente concava 56 in modo da ridurre o aumentare la distanza tra la lente convessa 55 e la lente concava 56.

In questa forma di realizzazione, l'ottica di focalizzazione 17 comprende inoltre un primo specchio 58, disposto lungo il percorso ottico primario 53 tra la prima lente 55 e la seconda lente 56, e un secondo specchio 59, disposto lungo il percorso ottico primario 53 tra la lente concava 56 e il bersaglio T.

In pratica, il primo e il secondo specchio 58, 59 sono disposti in modo tale che il percorso ottico primario 53 sia ripiegato, riducendo così l'occupazione del sistema CBC

1.

L'ottica di focalizzazione 17 comprende anche un divisore di fascio 60 disposto lungo il percorso ottico primario 53, in particolare qui tra la lente concava 56 e il secondo specchio 59.

Il divisore di fascio 60 divide il fascio ricombinato 75 che si propaga dalla lente concava 56, formando così un fascio campione 63 che si propaga lungo il percorso ottico secondario 54.

Il divisore di fascio 60 campiona una piccola porzione, per esempio l'1% o anche meno, del fascio ricombinato 75, a seconda della potenza del fascio ricombinato 75 e della potenza ottica massima sostenuta dal fotodiodo 23 e dalla fotocamera CCD 24.

In dettaglio, il percorso ottico secondario 54 comprende un divisore di fascio 65, una lente di CCD 66, uno specchio 67 e una lente di fotodiodo 68.

Il divisore di fascio 65 inoltre divide il fascio campione 63 in modo tale che una prima porzione sia focalizzata dalla lente di CCD 66 sulla fotocamera CCD 24 e una seconda porzione sia indirizzata verso il fotodiodo 23 dallo specchio 67 e focalizzata sullo stesso dalla lente di fotodiodo 68.

La lente di CCD 66 e la lente di fotodiodo 68 possono essere scelte a seconda di una dimensione desiderata del

lobo principale della porzione del fascio ricombinato 75 che è indirizzata verso la fotocamera CCD 24 e, rispettivamente, il fotodiodo 24. Per esempio, la lente di CCD 66 e la lente di fotodiodo 68 possono essere scelte in modo tale che la dimensione del lobo principale del fascio ricombinato 75 sia uguale alla o minore dell'area attiva del fotodiodo 23 e, rispettivamente, della fotocamera CCD 24.

In questa forma di realizzazione, il percorso ottico secondario 54 comprende anche un'apertura o foro di spillo ("pinhole") 71 disposto tra la lente di fotodiodo 68 e il fotodiodo 23. Il pinhole 71 ha un'apertura approssimativamente uguale alla dimensione del lobo principale del fascio che si propaga dalla lente di fotodiodo 68. Per esempio, l'apertura del foro di spillo 71 può essere compresa tra 10 μm e 100 μm , in particolare di circa 100 μm .

In pratica, il fotodiodo 23 può misurare soltanto l'intensità del lobo principale del fascio che si propaga dalla lente di fotodiodo 68.

Il fotodiodo 23 fornisce un segnale di intensità INT, che è indicativo dell'intensità del fascio ricombinato 75, in particolare qui del lobo principale del fascio ricombinato 75. Infatti, conoscendo le caratteristiche di divisione del primo e del secondo divisore di fascio 60,

65, il segnale di intensità INT può essere utilizzato per ottenere l'intensità del lobo principale del fascio ricombinato 75.

Durante l'uso, l'unità di aggancio di fase 30 riceve il segnale di intensità INT dal fotodiodo 23 e fornisce i segnali di controllo di fase $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ ai modulatori di fase 42 dei canali 20A-20D.

L'unità di aggancio di fase 30 esegue un algoritmo di ottimizzazione ad anello chiuso che modifica il segnale di controllo di fase U in modo da massimizzare l'intensità misurata dal fotodiodo 23.

La figura 5 mostra un diagramma di flusso di un metodo 90 eseguito dal modulo di aggancio di fase 30 per massimizzare l'intensità misurata dal fotodiodo 23.

In un passo o fase 91, il modulo di aggancio di fase 30 riceve un segnale di rilevamento, qui il segnale di intensità INT dal fotodiodo 23.

In una fase 92, il modulo di aggancio di fase 30 calcola una funzione di costo dal segnale di rilevamento, in cui la funzione di costo è una funzione dell'intensità rilevata dal fotodiodo 23.

In una fase 93, il modulo di aggancio di fase 30 esegue un algoritmo di ottimizzazione che è configurato per massimizzare l'intensità misurata dal fotodiodo 23.

In una fase 94, il modulo di aggancio di fase 30

fornisce una pluralità di segnali di controllo di fase aggiornati ai modulatori di fase 42, in base ad un'uscita dell'algoritmo di ottimizzazione.

Secondo una forma di realizzazione, come mostrato nella figura 5A, l'unità di aggancio di fase 30 esegue, come algoritmo di ottimizzazione, un metodo 100 basato su un algoritmo di discesa del gradiente parallelo stocastico (SPGD, Stochastic Parallel Gradient Descent).

In una fase di inizializzazione 103, l'unità di aggancio di fase 30 inizializza i valori di fase dei fasci secondari 12A-12D ad una fase iniziale. In dettaglio, l'unità di aggancio di fase 30 fornisce un segnale di fase iniziale U_0 ai modulatori di fase 42. Per esempio, il segnale di fase iniziale U_0 può fornire lo stesso segnale di fase al modulatore 42 di ciascun canale 20A-20D, ovvero $U_0 = \{u_0, u_0, u_0, u_0\}$.

Tuttavia, l'unità di aggancio di fase 30 può applicare valori di fase diversi ai modulatori di fase 42, a seconda dell'applicazione specifica.

Il metodo 100 è un metodo iterativo. Ciascuna iterazione sarà indicata dall'indice k . Inoltre, nel seguito, l'indice j verrà utilizzato per identificare uno qualsiasi dei canali 20A-20D.

Ad ogni iterazione k , l'unità di aggancio di fase 30 genera, fase 105, un vettore di perturbazione di fase $\delta u(k)$

= $\{\delta u_1, \delta u_2, \delta u_3, \delta u_4\}$ comprendente una pluralità di tensioni di perturbazione $\delta u_1, \delta u_2, \delta u_3, \delta u_4$, una per ciascun modulatore di fase 42.

In dettaglio, le tensioni di perturbazione $\delta u_1, \delta u_2, \delta u_3, \delta u_4$ sono generate secondo una distribuzione di Bernoulli avente i valori v_1 e v_2 in cui v_2 è diverso da v_1 e in cui $P(\delta u_j = v_1) = p$ e $P(\delta u_j = v_2) = 1-p$.

Pertanto, ciascuna tensione di perturbazione δu_j può avere il valore v_1 o v_2 con una probabilità p e, rispettivamente, $1-p$.

Secondo una forma di realizzazione, i valori v_1 e v_2 hanno lo stesso modulo e il segno opposto, ovvero $v_1 = -v_2$.

Secondo una forma di realizzazione, $p=0,5$, cosicché $P(\delta u_j = v_1) = P(\delta u_j = v_2) = 0,5$.

Secondo una forma di realizzazione, $v_1 = -v_2$ e $p=0,5$.

Quindi, fase 107, l'unità di aggancio di fase 30 fornisce un segnale di controllo di fase $U = U(k-1) + \delta u(k) = \{u_1(k-1) + \delta u_1, u_2(k-1) + \delta u_2, u_3(k-1) + \delta u_3, u_4(k-1) + \delta u_4\}$ ai modulatori di fase 42.

In pratica, l'unità di aggancio di fase 30 somma il vettore di perturbazione di fase $\delta u(k)$ al segnale di controllo di fase $U(k-1) = \{u_1(k-1), u_2(k-1), u_3(k-1), u_4(k-1)\}$ che è stato determinato nella precedente iterazione $k-1$.

Alla prima iterazione, ovvero per $k=1$, il vettore di

perturbazione di fase $\delta u(k)$ è sommato al segnale di fase iniziale U_0 .

Pertanto, nella fase 107 i modulatori di fase 42 cambiano i valori di fase dei fasci secondari 12A-12D che si propagano nei rispettivi canali 20A-20D, rispetto ai valori di fase forniti nella precedente iterazione $k-1$.

Dato che le fasi dei fasci secondari 12A-12D sono state cambiate rispetto alla precedente iterazione $k-1$, cambia anche il pattern di interferenza formato dalla ricombinazione dei fasci intermedi 21A-21D. Di conseguenza, l'intensità del lobo principale misurata dal fotodiodo 23 cambia.

Il fotodiodo 23 misura un'intensità positiva $I_{+,k}$, che è indicativa del cambio di intensità nel fascio ricombinato 75 causato dal segnale di controllo di fase $U(k-1) + \delta u(k)$.

L'unità di aggancio di fase 30, fase 109, riceve il segnale di intensità INT dal fotodiodo 23.

L'unità di aggancio di fase 30 calcola, fase 111, una funzione di costo positiva $J_{+,k}$ data da $I_{+,k}/I_{\max}$, in cui $I_{\max}$ è l'intensità massima che può essere conseguita se i fasci intermedi 21A-21D sono perfettamente allineati, ovvero se la differenza di fase reciproca tra i fasci intermedi 21A-21D è 0 o un multiplo intero di 2π .

Quindi, fase 113, l'unità di aggancio di fase 30 fornisce un segnale di controllo di fase $U_c = U(k-1) -$

$\delta u(k) = \{u_1(k-1) - \delta u_1, u_2(k-1) - \delta u_2, u_3(k-1) - \delta u_3, u_4(k-1) - \delta u_4\}$
ai modulatori di fase 42.

In pratica, l'unità di aggancio di fase 30 sottrae il vettore di perturbazione di fase $\delta u(k)$ dal segnale di controllo di fase $U(k-1)$ che è stato determinato nella precedente iterazione $k-1$.

Alla prima iterazione, ovvero per $k=1$, il vettore di perturbazione di fase $\delta u(k)$ è sottratto dal segnale di fase iniziale U_0 .

Pertanto, nella fase 113 i modulatori di fase 42 cambiano i valori di fase dei fasci secondari 12A-12D che si propagano nei rispettivi canali 20A-20D, rispetto ai valori di fase forniti nella precedente iterazione $k-1$ E rispetto alla fase fornita nella fase 107.

Il fotodiodo 23 misura un'intensità negativa $I_{-,k}$, che è indicativa del cambio di intensità nel segnale ricombinato causato dal segnale di controllo di fase $U(k-1) - \delta u(k)$.

L'unità di aggancio di fase 30, fase 115, riceve il segnale di intensità INT dal fotodiodo 23.

L'unità di aggancio di fase 30 calcola, fase 117, una funzione di costo negativa $J_{-,k}$ data da $I_{-,k}/I_{\max}$.

Quindi, fase 119, l'unità di aggancio di fase 30 calcola un nuovo segnale di controllo di fase $U(k)$ aggiornando il segnale di controllo di fase $U(k-1)$ in base

al vettore di perturbazione di fase $\delta u(k)$ e alle funzioni di costo positiva e negativa $J_{+,k}$, $J_{-,k}$.

In dettaglio, in questa forma di realizzazione, il nuovo segnale di controllo di fase $U(k)$ viene calcolato come $U(k) = U(k-1) + \delta u(k) \cdot \gamma \cdot \delta J(k)$, in cui γ è un valore di guadagno e $\delta J(k)$ è la differenza tra le funzioni di costo positiva e negativa $J_{+,k}$, $J_{-,k}$, ovvero $\delta J(k) = J_{+,k} - J_{-,k}$.

Il valore di guadagno γ può essere scelto da un utente del sistema CBC 1, per esempio durante la calibrazione del sistema CBC 1.

L'unità di aggancio di fase 30, fase 121, fornisce il nuovo segnale di controllo di fase $U(k)$ ai modulatori di fase 42.

Pertanto, nella fase 121 i modulatori di fase 42 aggiornano la fase dei fasci secondari 12A-12D, in base al nuovo segnale di controllo di fase $U(k)$.

Il fotodiodo 23 misura un'intensità corretta $I_{corr,k}$, che è indicativa del cambio di intensità del segnale ricombinato 75 causato dal nuovo segnale di controllo di fase $U(k)$.

L'unità di aggancio di fase 30, fase 123, riceve il segnale di intensità INT dal fotodiodo 23.

L'unità di aggancio di fase 30 quindi calcola, fase 125, una funzione di costo corretta $J_{corr,k}$ come $I_{corr,k}/I_{max}$.

L'unità di aggancio di fase 30 verifica, fase 127, una condizione di convergenza del metodo di ottimizzazione 100.

In dettaglio, in questa forma di realizzazione, l'unità di aggancio di fase controlla se la funzione di costo corretta $J_{\text{corr},k}$ è uguale a o maggiore di una soglia di convergenza J_{th} , che può per esempio essere scelta da un utente durante una fase di calibrazione del sistema CBC 1.

Se la condizione di convergenza non viene verificata, ovvero qui se la funzione di costo corretta $J_{\text{corr},k}$ è minore della soglia di convergenza J_{th} (ramo N in uscita dalla fase 127), l'unità di aggancio di fase 30 ritorna alla fase 105 e genera un nuovo vettore di perturbazione casuale $\delta u(k+1)$ per la successiva iterazione $k+1$.

L'unità di aggancio di fase 30 quindi ripete tutte le fasi da 107 a 127.

Al contrario, se la condizione di convergenza viene verificata, ramo S in uscita dalla fase 127, l'unità di aggancio di fase 30 ritorna alla fase 123 e ripete le fasi 123, 125 e 127.

In pratica, se la condizione di convergenza viene verificata, l'unità di aggancio di fase 30 continua il monitoraggio della funzione di costo acquisendo il segnale di intensità INT (fase 123) e calcolando la funzione di costo associata (fase 125), fino a che la condizione di convergenza non è più verificata.

Per esempio, in risposta al fatto che la condizione di convergenza è verificata (ramo S di uscita dalla fase 127), l'unità di aggancio di fase 30 può ritornare immediatamente alla fase 123 o può attendere un intervallo di tempo, che può essere scelto a seconda dell'applicazione specifica, prima di ritornare alla fase 123.

Durante l'uso, le fasi dei fasci secondari 12A-12D possono essere sottoposte a variazioni indesiderate causate da fattori esterni. Per esempio, una deriva di temperatura può cambiare la lunghezza delle fibre ottiche in cui si propagano i fasci secondari 12A-12D, causando così uno scostamento di fase indesiderato tra i fasci secondari 12A-12D, che può degradarne il reciproco aggancio di fase.

Il metodo 100 consente di regolare le fasi dei fasci secondari 12A-12D in un anello chiuso, in modo tale che l'intensità del lobo principale del fascio ricombinato 75 sia mantenuta ad un valore massimo.

Inoltre, la Richiedente ha verificato che il metodo 100 consente anche di ridurre il rumore di potenza del fascio ricombinato 75 causato dalle fluttuazioni di fase ottica, in particolare in un intervallo di frequenze di dette fluttuazioni compreso tra 0 Hz e 2000 Hz.

Inoltre, il fatto che l'unità di aggancio di fase 30 continui il monitoraggio della funzione di costo anche dopo che è stata soddisfatta la condizione di convergenza (ramo

S dalla fase 127) consente al metodo 100 di conseguire un'elevata velocità di convergenza e allo stesso tempo di mantenere elevate le prestazioni del sistema CBC 1.

Il metodo 100 può anche essere utilizzato come metodo per orientare il fascio ricombinato di uscita 2, per esempio per seguire il bersaglio T se il bersaglio T si è spostato in una posizione diversa (come indicato per esempio da una linea tratteggiata nella figura 4).

La figura 5B mostra un esempio di una vista in pianta dall'alto schematica del fotodiodo 23, in cui il punto di fascio ("beam spot") 130 della porzione del fascio ricombinato 75 focalizzato dalla lente di fotodiodo 68 finisce completamente all'interno di un'area attiva 131 del fotodiodo 23. In questo caso, supponendo che l'unità di aggancio di fase 30 abbia verificato la condizione di convergenza, lo scostamento di fase reciproco tra i fasci secondari 12A-12D è ottimizzato e il lobo principale del fascio ricombinato 75 ha un'intensità massima.

Se, come mostrato nella figura 5C, il fotodiodo 23 viene spostato lungo un primo e un secondo asse X, Y, il punto di fascio 130 può finire soltanto in parte all'interno dell'area attiva 131.

Il movimento del fotodiodo 23 è controllato dal motore 25, per esempio un attuatore piezoelettrico avente un'elevata precisione, per esempio in grado di indurre uno

spostamento del fotodiodo 23 compreso tra 10 μm e 25 mm.

Il motore 25 può essere controllato dall'unità di controllo 26.

In risposta allo spostamento del fotodiodo 23, il fotodiodo 23 rileva una riduzione dell'intensità misurata.

Di conseguenza, quando l'unità di aggancio di fase 30 acquisisce il segnale di intensità INT (fase 123) e calcola la funzione di costo J (fase 125), la condizione di convergenza può non essere più verificata (fase 127). Pertanto, l'unità di aggancio di fase 30 ritorna alla fase 105 ed esegue una o più nuove iterazioni (dalla fase 105 alla fase 127) fino a soddisfare la condizione di convergenza.

Infatti, cambiando la fase applicata dai modulatori di fase 42, l'unità di aggancio di fase 30 è in grado di cambiare la posizione del fascio ricombinato 75, in particolare è in grado di spostare il lobo principale del fascio ricombinato 75, per esempio fino a che il punto di fascio 130 finisce di nuovo completamente all'interno dell'area attiva 131.

In pratica, spostando il fotodiodo 23, è possibile orientare il fascio ricombinato 75 e, pertanto, il fascio ricombinato di uscita 2.

La Richiedente ha verificato che il metodo 100 consente di conseguire un orientamento di fascio molto

rapido e preciso, per esempio per controllare con precisione la posizione del fascio ricombinato di uscita 2 in corrispondenza del bersaglio T. Per esempio, anche quando il bersaglio T è posto ad una distanza di circa 100 m dal sistema CBC 1, spostando il fotodiodo 23 con il motore 25, il sistema CBC 1 può essere in grado di regolare la posizione del fascio, in corrispondenza dell'ubicazione del bersaglio T, anche di pochi micrometri.

Secondo una forma di realizzazione, le linee di ritardo ottico 44 possono essere linee di ritardo variabile. La figura 6 mostra un diagramma di flusso di un metodo 150 eseguito dall'unità di ottimizzazione di ritardo 31 per equalizzare i percorsi ottici dei fasci secondari 12A-12D nei canali 20A-20D, secondo una forma di realizzazione.

Il metodo 150 inizia, fase 151, se l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 verifica che i percorsi ottici dei canali 20A-20D devono essere equalizzati.

Per esempio, il metodo 150 può essere eseguito durante una calibrazione del sistema CBC 1, per esempio prima di un primo uso del sistema CBC 1, o può essere eseguito periodicamente, durante l'uso, per esempio al momento della verifica di una condizione specifica.

L'unità di ottimizzazione di ritardo 31 seleziona, fase 153, uno dei canali 20A-20D da equalizzare e imposta

uno dei canali 20A-20D come canale di riferimento.

Per esempio, qui di seguito, il primo canale 20A è considerato come canale di riferimento e il secondo canale 20B come canale da equalizzare.

Tuttavia, uno qualsiasi dei canali 20A-20D può essere considerato come canale di riferimento. Per esempio, se i canali 20A-20D sono disposti in una struttura a nido d'ape nel combinatorio di apertura 45, il canale la cui apertura è disposta al centro della struttura a nido d'ape può essere considerato come canale di riferimento.

Nella fase 153, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 seleziona il primo canale 20A e il secondo canale 20B disattivando il terzo canale 20C e il quarto canale 20D.

Per esempio, il terzo canale 20C e il quarto canale 20D possono essere disattivati interrompendo l'emissione del corrispondente amplificatore 40. Per esempio, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 può fornire i segnali s_3 e s_4 in modo tale che i rispettivi amplificatori 40 blocchino la propagazione del terzo e del quarto fascio intermedio 21C e 21D.

Poi, fase 155, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 determina una stima grossolana della differenza di percorso ottico tra il secondo canale 20B e il canale di riferimento 20A. Per esempio, la stima grossolana può avere una precisione compresa tra pochi centimetri e diversi metri

della differenza di percorso ottico.

In questa forma di realizzazione, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 esegue una tecnica a onda continua di modulazione di frequenza (FMCW, Frequency Modulation Continuous Wave) per trovare la stima grossolana della differenza di percorso ottico tra il secondo canale 20B e il canale di riferimento 20A.

In dettaglio, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 fornisce un segnale chirp CHIRP alla sorgente laser 3 e, in risposta, acquisisce il segnale di intensità INT dal fotodiodo 23.

Il segnale chirp CHIRP ha una frequenza di chirp α che causa una modulazione temporale della lunghezza d'onda del fascio primario 8, in particolare fa in modo che la lunghezza d'onda del fascio primario 8 segua una rampa triangolare.

Se vi è un ritardo OPD_2 tra il canale di riferimento 20A e il secondo canale 20B, il segnale di intensità INT ha un battimento ad una frequenza di battimento f_b .

La relazione tra il ritardo OPD_2 e la frequenza di battimento f_b è:

$$OPD_2 = \frac{c f_b}{\alpha n},$$

in cui c è la velocità della luce nel vuoto e n è l'indice di rifrazione del mezzo attraversato dal primo e dal secondo fascio secondario 12A, 12B.

Quindi, fase 157, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 fornisce il segnale di controllo di ritardo d_2 alla linea di ritardo ottico 44 del secondo canale 20B, per compensare il ritardo OPD_2 .

In pratica, il segnale di controllo di ritardo d_2 accorcia o estende il percorso ottico della linea di ritardo ottico 44 del secondo canale 20B, per compensare il ritardo OPD_2 .

Per esempio, se la linea di ritardo ottico 44 del secondo canale 20B ha un elemento opto-meccanico mobile configurato per cambiare la lunghezza del percorso ottico della linea di ritardo ottico 44, allora il segnale di controllo di ritardo d_2 può controllare un attuatore, per esempio un attuatore piezoelettrico, configurato per spostare la linea di ritardo ottico 44 del secondo canale 20B.

Poi, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 trova una stima fine della differenza di percorso ottico tra il secondo canale 20B e il canale di riferimento 20A.

In dettaglio, fase 159, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 misura una visibilità di frangia V_2 dall'immagine IMG ricevuta dalla fotocamera CCD 24.

Nella fase 159, soltanto il primo canale 20A e il secondo canale 20B sono attivati; pertanto, il fascio ricombinato 75 è formato dall'interferenza tra il primo e

il secondo fascio intermedio 21A, 21B.

Di conseguenza, l'immagine IMG acquisita dalla fotocamera CCD 24 rappresenta il pattern di interferenza tra il primo e il secondo fascio intermedio 21A, 21B.

La visibilità di frangia V_2 può essere definita come:

$$V_2 = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-},$$

in cui I_+ è il valore massimo di intensità sull'immagine IMG, per esempio il valore di picco del lobo principale del pattern di interferenza, e I_- è il valore minimo di intensità sull'immagine IMG, per esempio uno zero del pattern di interferenza.

L'unità di ottimizzazione di ritardo 31 controlla, fase 161, se la visibilità di frangia V_2 soddisfa una condizione di qualità di interferenza. In questa forma di realizzazione, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 controlla se la visibilità di frangia V_2 è uguale a o maggiore di una soglia di visibilità di frangia V_{th} , che può essere scelta per esempio da un utente durante una calibrazione del sistema CBC 1.

In caso negativo, ramo N in uscita dalla fase 161, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 aggiorna, fase 163, il segnale di controllo di ritardo d_2 che è fornito alla linea di ritardo ottico 44 del secondo canale 20B, per aumentare la visibilità di frangia V_2 .

Per esempio, il segnale di controllo di ritardo d_2

viene aggiornato utilizzando un algoritmo noto di ricerca od ottimizzazione, quale un algoritmo di bisezione.

Se la linea di ritardo ottico 44 del secondo canale 20B ha un elemento opto-meccanico mobile, allora il segnale di controllo di ritardo d_2 viene aggiornato in modo tale che la linea di ritardo ottico 44 del secondo canale 20B sia spostata dal rispettivo attuatore, per accorciare, o estendere, conseguentemente il percorso ottico del fascio secondario 12B.

Poi, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 ripete la fase 159 per misurare la visibilità di frangia V_2 aggiornata e la fase 161 per controllare se la condizione di qualità di interferenza è stata soddisfatta.

Una volta raggiunta la soglia di qualità di interferenza, ovvero qui quando $V_2 \geq V_{th}$, ramo S in uscita dalla fase 161, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 ritorna alla fase 153 selezionando il $j+1$ -esimo canale. Nell'esempio considerato, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 seleziona il terzo canale 20C.

Pertanto, l'unità di ottimizzazione di ritardo 31 attiva il terzo canale 20C e disattiva il secondo canale 20B.

Secondo questa forma di realizzazione, il primo canale 20A viene ancora utilizzato come canale di riferimento.

L'unità di ottimizzazione di ritardo 31 poi ripete le

fasi da 155 a 163 per il terzo canale 20C.

Anche dopo che il percorso ottico del terzo canale 20C è stato equalizzato, le fasi da 153 a 163 vengono ripetute anche per il quarto canale 20D.

La figura 7 mostra un esempio sperimentale di una rappresentazione 3D della distribuzione spaziale dell'intensità della porzione del fascio campione 63 acquisita dalla fotocamera CCD 24, in uso. Tenendo in considerazione le caratteristiche di divisione del primo e del secondo divisore di fascio 60, 65, detta distribuzione di intensità è indicativa della distribuzione di intensità del fascio ricombinato 75 e, pertanto, del fascio ricombinato di uscita 2 indirizzato sul bersaglio T.

Misurando l'intensità di picco del lobo principale, dall'immagine IMG acquisita dalla fotocamera CCD 24 o dal segnale di intensità INT fornito dal fotodiodo 23, è possibile trovare l'efficienza del sistema CBC 1 calcolando il rapporto tra l'intensità di picco del fascio ricombinato 75 e l'intensità di picco di un singolo fascio intermedio 21A-21D, per esempio $\eta = I_{\text{max,CBC}}/I_{\text{max,SB}}$.

Teoricamente, l'efficienza del sistema CBC 1 dovrebbe essere uguale a N^2 , N essendo il numero di canali.

La Richiedente ha verificato che l'efficienza del sistema CBC 1 può conseguire un valore elevato, vicino al valore teorico.

In particolare, per un sistema CBC avente un numero di canali $N=7$, la Richiedente ha riscontrato un'efficienza sperimentale di 38,5, rispetto al valore teorico di $N^2=49$. Pertanto, il sistema CBC può avere un'efficienza complessiva di circa il 79% rispetto al valore teorico.

Secondo una forma di realizzazione, come mostrato nella figura 8, il sistema CBC 1 può comprendere anche un'unità o un modulo di analisi di temperatura 199 configurato per eseguire un metodo, illustrato nella figura 9 e indicato da 200, per simulare l'effetto delle variazioni di temperatura sul sistema CBC 1, in particolare delle variazioni di temperatura indotte dall'elevata potenza ottica del fascio ricombinato 75.

In dettaglio, il metodo 200 può essere eseguito su un componente specifico del sistema CBC 1, per ottimizzare i parametri di detto componente specifico.

In dettaglio, il metodo 200 può essere eseguito per uno qualsiasi degli elementi ottici dell'ottica di focalizzazione 17. Infatti, il fascio ricombinato 75 può raggiungere elevati valori di potenza ottica, per esempio all'incirca di decine di kW, il che può indurre elevate variazioni di temperatura negli elementi ottici dell'ottica di focalizzazione 17.

Secondo il metodo 200, in una fase 202, l'unità di analisi di temperatura 199 riceve dati indicativi delle

proprietà del componente sotto test (qui di seguito dati c.u.t., "component under test"). Il componente sotto test può essere, per esempio, la lente convessa 55 o la lente concava 56 o un altro qualsiasi dei componenti ottici dell'ottica di focalizzazione 17 mostrati discussi in riferimento alla figura 4.

Detti dati c.u.t. possono comprendere, per esempio, la geometria del componente sotto test, le proprietà ottiche, in particolare l'assorbimento, e le proprietà termiche del materiale di substrato del componente sotto test.

In una fase 204, l'unità di analisi di temperatura 199 riceve dati laser indicativi delle proprietà del fascio laser da analizzare, ovvero qui del fascio ricombinato 75, quali potenza ottica, dimensione di punto ("spot size") e lunghezza d'onda.

Poi, fase 206, l'unità di analisi di temperatura 199 utilizza i dati c.u.t. e i dati laser come ingresso per risolvere un'equazione di calore 3D alle derivate parziali del componente sotto test e fornisce in uscita una mappa di temperatura rappresentante le variazioni di temperatura indotte nel componente sotto test dalla propagazione del fascio laser.

In una fase 208, l'unità di analisi di temperatura 199 utilizza la mappa di temperatura come ingresso per calcolare le variazioni locali dell'indice di rifrazione

del componente sotto test che sono indotte dalle variazioni di temperatura. In dettaglio, l'unità 199 fornisce in uscita una mappa dell'indice di rifrazione aggiornato $n(x, y, z, \Delta T)$, per esempio data da $n(x, y, z, \Delta T) = n_0(x, y, z) + \Delta n(x, y, z, \Delta T)$, in cui la variazione Δn dell'indice di rifrazione in funzione di una variazione di temperatura ΔT dipende dal materiale di substrato del componente sotto test.

Poi, fase 210, l'unità 199 utilizza l'indice di rifrazione aggiornato $n(x, y, z, \Delta T)$ per trovare le variazioni di fase $\Delta\phi$ indotte dalle variazioni nell'indice di rifrazione. In dettaglio, in questa forma di realizzazione, l'unità 199 calcola una mappa 2D della variazione di fase attraverso la formula: $\Delta\phi(x,y,\Delta T) = \int_0^L \Delta n(x,y,z,\Delta T) dz$, in cui z è la direzione di propagazione del fascio laser all'interno del componente sotto test e L è la lunghezza del componente sotto test lungo la direzione di propagazione.

L'unità 199 converte, fase 212, la variazione di fase $\Delta\phi(x, y, z, \Delta T)$ in coordinate polari $\Delta\phi(r, \theta, \Delta T)$.

In dettaglio, l'unità 199 scompone la variazione di fase utilizzando i polinomi di Zernike Z come:

$$\Delta\phi(r, \theta, \Delta T) = \sum_{m,n} [a_{m,n} Z_n^m(r, \theta) + b_{m,n} Z_n^{-m}(r, \theta)],$$

in cui gli indici n, m si riferiscono all'andamento radiale e, rispettivamente, angolare della variazione di

fase.

I polinomi di Zernike possono anche essere espressi in termini di un singolo indice

$$i = \frac{n(n+2)+m}{2},$$

in modo tale che ogni polinomio di Zernike Z_i sia associato a una tipica aberrazione ottica e il corrispondente coefficiente rappresenti il peso di detta aberrazione ottica nel fronte d'onda scomposto. Per esempio, $i=0$ rappresenta lo scostamento di fase di pistone, $i=1,2$ l'inclinazione del fronte d'onda, $i=3,5$ l'astigmatismo, $i=4$ la defocalizzazione, ecc.

Poi, fase 214, l'unità 199 esegue un algoritmo di simulazione della propagazione ottica del fascio laser nel sistema CBC 1. L'algoritmo per la propagazione ottica, di per sé noto nella tecnica, riceve come ingresso un modello del sistema CBC 1, che per esempio può essere memorizzato precedentemente nell'unità 199 e fornito da un utente, e i polinomi di Zernike Z_i del componente sotto test.

L'algoritmo di simulazione fornisce in uscita dati delle proprietà ottiche del fascio ricombinato 75, quali le proprietà del fronte d'onda del fascio ricombinato 75, dopo la propagazione nel sistema CBC 1, in particolare dopo la propagazione attraverso il componente sotto test.

In base a detti dati di uscita, l'unità 199 determina, fase 216, i dati c.u.t., per esempio il materiale del

componente sotto test, che ottimizzano le proprietà ottiche del fascio ricombinato 75, per esempio che garantiscono una distorsione minima del fronte d'onda del fascio ricombinato 75 e un assorbimento minimo del fascio ricombinato 75, a seconda dell'applicazione specifica.

In dettaglio, i metodi 90, 100, 150 e 200 contribuiscono tutti a migliorare le prestazioni del sistema CBC 1 e a conseguire un valore di efficienza vicino al valore teorico.

Infine, è evidente che è possibile apportare modifiche e variazioni a quanto è stato descritto e illustrato nella presente, senza scostarsi con ciò dall'ambito di protezione della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Per esempio, il numero N di canali può essere diverso da quanto discusso in riferimento alla figura 1; in particolare, il sistema CBC 1 può avere fino a diciannove canali.

Per esempio, l'unità di aggancio di fase 30 può eseguire un algoritmo diverso, quale un algoritmo LOCSET.

Per esempio, l'unità di aggancio di fase 30 può essere implementata utilizzando una FPGA, un'unità DAC multi-canale o un hardware diverso. Per esempio, l'unità di aggancio di fase 30 può comprendere un'unità DAC multi-canale, da accoppiare alla fotocamera CCD e configurata per

estrarre l'intensità di picco dall'immagine IMG.

Il fascio campione 63 può essere diviso direttamente dai fasci intermedi 21A-21D, prima di essere ricombinato. In questo caso, l'ottica di focalizzazione comprenderebbe uno o più divisori di fascio disposti tra la porzione di accoppiamento anteriore 45B e la lente convessa 55.

In alternativa, ciascun elemento opto-meccanico può anche comprendere un rispettivo divisore di fibra che estrae una piccola porzione di potenza laser, per esempio inferiore allo 0,1%. In questo caso, ciascun fascio intermedio comprende una prima porzione, che si propaga attraverso l'apertura e che è focalizzata dall'ottica di focalizzazione sul bersaglio, e una seconda porzione estratta dal divisore di fibra che è focalizzata dall'ottica di focalizzazione sul sensore di immagine e/o sul sensore di intensità.

L'ottica di focalizzazione 17 può avere elementi ottici diversi rispetto a quanto mostrato nella figura 4; per esempio, lo specchio 58 e/o 59 può essere assente, in modo tale che il percorso ottico 53 non sia ripiegato. Inoltre, le lenti 55 e 56 possono avere lunghezze focali diverse e/o forme diverse.

RIVENDICAZIONI

1. Sistema di ricombinazione coerente di fascio (1) configurato per fornire un fascio ricombinato di uscita (2), comprendente:

- una sorgente laser (3) che fornisce un fascio sorgente (8) avente una larghezza di linea;

- un allargatore di fascio (5) accoppiato alla sorgente laser e configurato per fornire un fascio allargato (10) avente una larghezza di linea maggiore del fascio sorgente;

- un divisore (7) configurato per dividere il fascio allargato in una pluralità di fasci secondari (12A-12D);

- una pluralità di canali (20A-20D) accoppiati al divisore, ciascun canale essendo configurato per ricevere un rispettivo fascio secondario (12A-12D) e per fornire un rispettivo fascio intermedio (21A-21D), ciascun canale comprendendo un amplificatore ottico (40), un modulatore di fase (42), una linea di ritardo ottico (44) e un elemento opto-meccanico (47) che fornisce il rispettivo fascio intermedio;

- un sensore ottico (23, 24) configurato per fornire un segnale di rilevamento (INT, IMG) indicativo di un'intensità di un fascio ottico ricevuto;

- un'ottica di focalizzazione (17) configurata per ricevere i fasci intermedi (21A-21D), per fornire il fascio

ricombinato di uscita (2) da una prima porzione di ciascun fascio intermedio e per fornire un fascio ricombinato campionato (63) al sensore ottico da una seconda porzione (63) di ciascun fascio intermedio; e

- un'unità di controllo (30) accoppiata al sensore ottico e alla pluralità di canali,

in cui l'unità di controllo comprende un modulo di aggancio di fase (26) configurato per:

- fornire una pluralità di segnali di controllo di fase (u_1, u_2, u_3, u_4), ciascuno al modulatore di fase (42) di un rispettivo canale (20A-20D),

- ricevere il segnale di rilevamento (INT) dal sensore ottico, il segnale di rilevamento essendo indicativo di un'intensità del fascio ricombinato campionato;

- calcolare una funzione di costo (J) dal segnale di rilevamento (INT), la funzione di costo essendo una funzione dell'intensità del fascio ricombinato campionato;

- eseguire un algoritmo di ottimizzazione della funzione di costo, l'algoritmo di ottimizzazione essendo configurato per massimizzare l'intensità del fascio ricombinato campione; e

- fornire una pluralità di segnali di controllo di fase aggiornati, in base a un risultato dell'algoritmo di ottimizzazione.

2. Sistema di ricombinazione coerente di fascio

secondo la rivendicazione precedente, comprendente inoltre un attuatore (25) accoppiato al sensore ottico (23) e configurato per causare uno spostamento del sensore ottico.

3. Sistema di ricombinazione coerente di fascio secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui l'algoritmo di ottimizzazione è un algoritmo di discesa del gradiente parallelo stocastico (SPGD).

4. Sistema di ricombinazione coerente di fascio secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui l'allargatore di fascio (5) comprende un generatore di rumore (36, 37, 38) che fornisce un segnale di allargamento e un modulatore di fase di allargamento (35) che riceve il fascio sorgente (8), fornendo il fascio allargato (10), ed è controllato dal segnale di allargamento.

5. Sistema di ricombinazione coerente di fascio secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui ciascun elemento opto-meccanico (47) ha un'apertura (46) fornente il rispettivo fascio intermedio e comprende una rispettiva maschera di intensità (50) configurata per bloccare la trasmissione di una porzione del rispettivo fascio secondario (12A-12D).

6. Sistema di ricombinazione coerente di fascio secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui ciascun elemento opto-meccanico (47) ha un'apertura (46) che fornisce il rispettivo fascio intermedio, le

aperture (46) essendo disposte in una configurazione ad aperture affiancate.

7. Sistema di ricombinazione coerente di fascio secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il fascio ricombinato campionato (63) forma un pattern di interferenza avente un lobo principale, il sensore ottico comprendendo un fotodiodo (23) accoppiato ad un foro di spillo (71) avente una dimensione minore di una dimensione del lobo principale.

8. Sistema di ricombinazione coerente di fascio secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui le linee di ritardo ottico sono linee di ritardo variabile, configurate ciascuna per modificare la lunghezza del percorso ottico del rispettivo canale, l'unità di controllo (30) comprendendo inoltre un modulo di equalizzazione di ritardo (31) accoppiato ai canali e al sensore ottico, il modulo di equalizzazione di ritardo essendo configurato per:

- selezionare (153) un canale da ottimizzare e un canale di riferimento dalla pluralità di canali (20A-20D);

- determinare (155) una stima grossolana di un ritardo ottico tra il canale da ottimizzare e il canale di riferimento, dal segnale di rilevamento (INT);

- fornire (157) un segnale di controllo di ritardo (d_2) alla linea di ritardo ottico (44) del canale da

ottimizzare, in base a detta stima grossolana;

- determinare (159) una stima fine del ritardo ottico tra il canale da ottimizzare e il canale di riferimento, dal segnale di rilevamento (IMG);

- aggiornare (161, 163) il segnale di controllo di ritardo (d_2), in base a detta stima fine.

9. Sistema di ricombinazione coerente di fascio secondo la rivendicazione precedente, in cui il modulo di equalizzazione di ritardo è accoppiato alla sorgente laser (3) ed è configurato per eseguire una tecnica a onda continua di modulazione di frequenza (FMCW) per determinare la stima grossolana del ritardo ottico tra il canale da ottimizzare e il canale di riferimento.

10. Sistema di ricombinazione coerente di fascio secondo la rivendicazione 8 o 9, in cui il sensore ottico comprende un sensore di immagine (24) configurato per fornire un'immagine (IMG) del fascio ricombinato campionato, in cui il modulo di equalizzazione di ritardo è inoltre configurato per:

- ricevere l'immagine (IMG) del fascio ricombinato campionato;

- misurare una visibilità di frangia del fascio ricombinato campionato da detta immagine;

- aggiornare il segnale di controllo di ritardo (d_2), se la visibilità di frangia è inferiore a una soglia di

visibilità di frangia.

11. Metodo per controllare un sistema di ricombinazione coerente di fascio (1) configurato per fornire un fascio ricombinato di uscita (2), in cui il sistema di ricombinazione coerente di fascio comprende:

- una sorgente laser (3) che fornisce un fascio sorgente (8) avente una larghezza di linea;

- un allargatore di fascio (5) accoppiato alla sorgente laser e configurato per fornire un fascio allargato (10) avente una larghezza di linea maggiore del fascio sorgente;

- un divisore (7) configurato per dividere il fascio allargato in una pluralità di fasci secondari (12A-12D);

- una pluralità di canali (20A-20D) accoppiati al divisore, ogni canale essendo configurato per ricevere un rispettivo fascio secondario (12A-12D) e per fornire un rispettivo fascio intermedio (21A-21D), ciascun canale comprendendo un amplificatore ottico (40), un modulatore di fase (42), una linea di ritardo ottico (44) e un elemento opto-meccanico (47) che fornisce il rispettivo fascio secondario;

- un sensore ottico (23, 24) configurato per generare un segnale di rilevamento (INT, IMG) indicativo di un'intensità di un fascio ottico ricevuto;

- un'ottica di focalizzazione (17) configurata per

ricevere i fasci intermedi (21A-21D), per fornire il fascio ricombinato di uscita (2) da una prima porzione di ciascun fascio intermedio e per fornire un fascio ricombinato campionato (63) al sensore ottico da una seconda porzione (63) di ciascun fascio intermedio; e

- un'unità di controllo (30),

in cui il metodo comprende, da parte di un modulo di aggancio di fase (26) dell'unità di controllo:

- fornire una pluralità di segnali di controllo di fase (u_1, u_2, u_3, u_4), ciascuno al modulatore di fase (42) di un rispettivo canale (20A-20D),

- ricevere il segnale di rilevamento (INT) dal sensore ottico, il segnale di rilevamento essendo indicativo di un'intensità del fascio ricombinato campionato;

- calcolare una funzione di costo (J) dal segnale di rilevamento (INT), la funzione di costo essendo una funzione dell'intensità del fascio ricombinato campionato;

- eseguire un algoritmo di ottimizzazione della funzione di costo, l'algoritmo di ottimizzazione essendo configurato per massimizzare l'intensità del fascio ricombinato campionato; e

- fornire una pluralità di segnali di controllo di fase aggiornati, in base a un risultato dell'algoritmo di ottimizzazione.

12. Metodo secondo la rivendicazione precedente, in

cui il sistema di ricombinazione coerente di fascio comprende inoltre un attuatore (25) accoppiato al sensore ottico (23), in cui il sensore ottico ha un'area attiva (131) ricevente un punto del fascio ricombinato campionato, il metodo comprendendo inoltre una fase di orientamento di fascio includente comandare, da parte dell'attuatore, uno spostamento del sensore ottico, in modo tale che il punto del fascio ricombinato campionato finisce parzialmente all'esterno dell'area attiva, riducendo così l'intensità del fascio ricombinato campionato rilevata dal sensore ottico.

13. Metodo secondo la rivendicazione 11 o 12, il metodo comprendendo inoltre, da parte dell'unità di aggancio di fase (30):

- acquisire (123) un segnale di rilevamento aggiornato;

- calcolare (125) una funzione di costo aggiornata;

- verificare (127) se la funzione di costo aggiornata soddisfa una condizione di convergenza;

- se la condizione di convergenza è verificata, acquisire un nuovo segnale di rilevamento e calcolare una nuova funzione di costo aggiornata mentre la condizione di convergenza è verificata; e

- se la condizione di convergenza non è verificata, eseguire una nuova iterazione dell'algoritmo di

ottimizzazione e fornire una pluralità di nuovi segnali di controllo di fase aggiornati in base a un risultato della nuova iterazione.

14. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 11 a 13, in cui l'algoritmo di ottimizzazione è un algoritmo di discesa del gradiente parallelo stocastico iterativo comprendente, da parte del modulo di aggancio di fase, per ogni iterazione:

- generare (105) una pluralità di segnali di sfasatura casuale ($\delta u(k)$), uno per ciascun canale;

- fornire (107) una pluralità di segnali di controllo di fase positivi, ciascuno ad un rispettivo modulatore di fase, ciascun segnale di controllo di fase positivo essendo la somma tra un rispettivo segnale di controllo di fase effettivo ($U(k-1)$) determinato in una iterazione precedente e il rispettivo segnale di sfasatura casuale;

- acquisire (109) un segnale di rilevamento positivo;

- calcolare (111) una funzione di costo positiva dal segnale di rilevamento positivo;

- fornire (113) una pluralità di segnali di controllo di fase negativi, ciascuno ad un rispettivo modulatore di fase, ciascun segnale di controllo di fase negativo essendo la differenza tra il rispettivo segnale di controllo di fase effettivo e il rispettivo segnale di sfasatura casuale;

- acquisire (115) un segnale di rilevamento negativo;
- calcolare (117) una funzione di costo negativa dal segnale di rilevamento negativo;

in cui i segnali di controllo di fase aggiornati sono ciascuno una funzione del rispettivo segnale attuale di controllo di fase, del rispettivo segnale di sfasatura casuale e di una differenza tra la funzione di costo positiva e negativa.

15. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 11 a 14, in cui l'unità di controllo comprende inoltre un modulo di simulazione di temperatura (199) e il metodo comprende inoltre, da parte del modulo di simulazione di temperatura, una fase di simulare un componente ottico del sistema di ricombinazione coerente includente:

- ricevere primi dati indicativi di una geometria e un materiale del componente ottico;

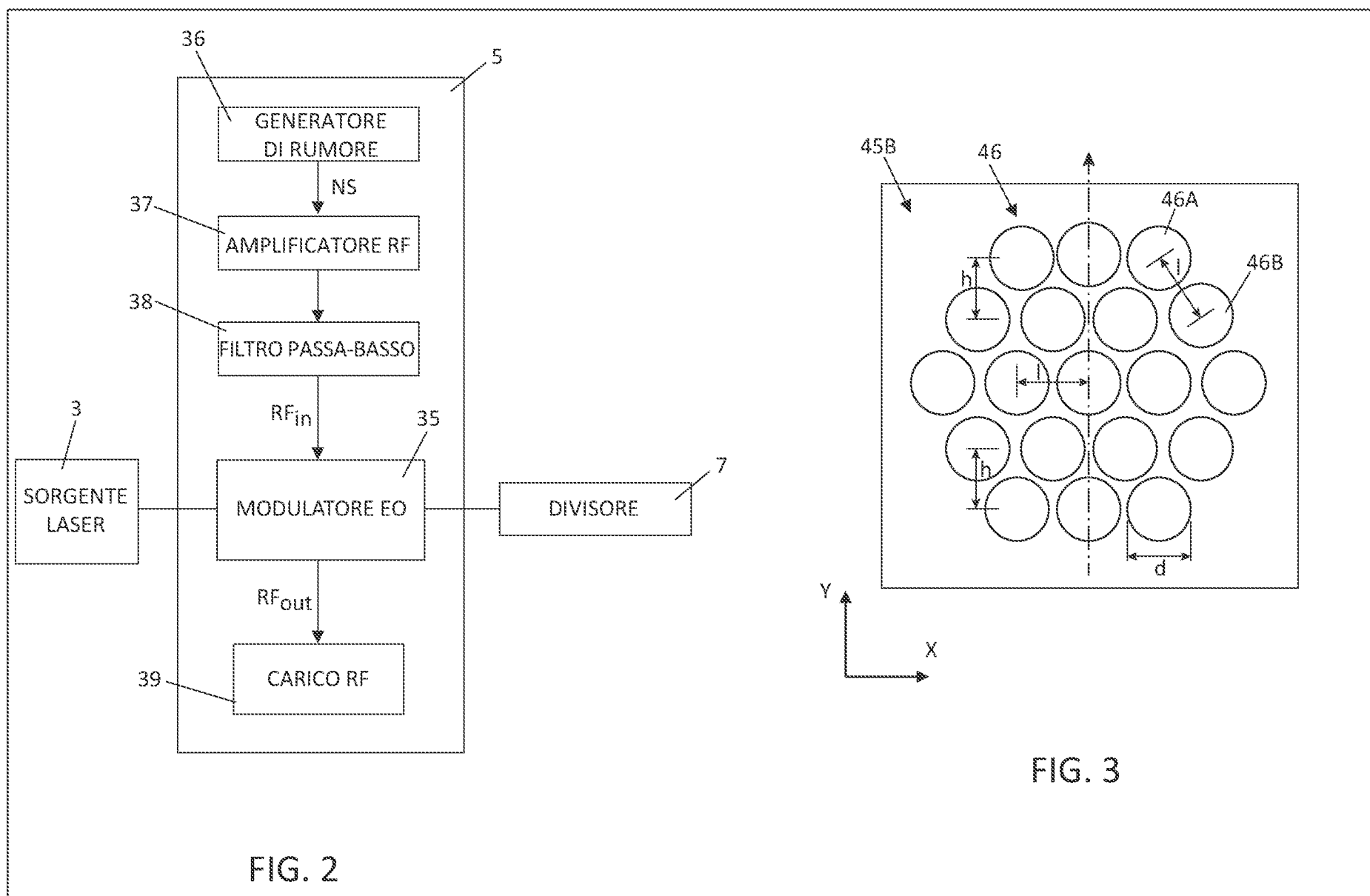
- ricevere secondi dati indicativi delle proprietà del fascio laser interagente con il componente ottico;

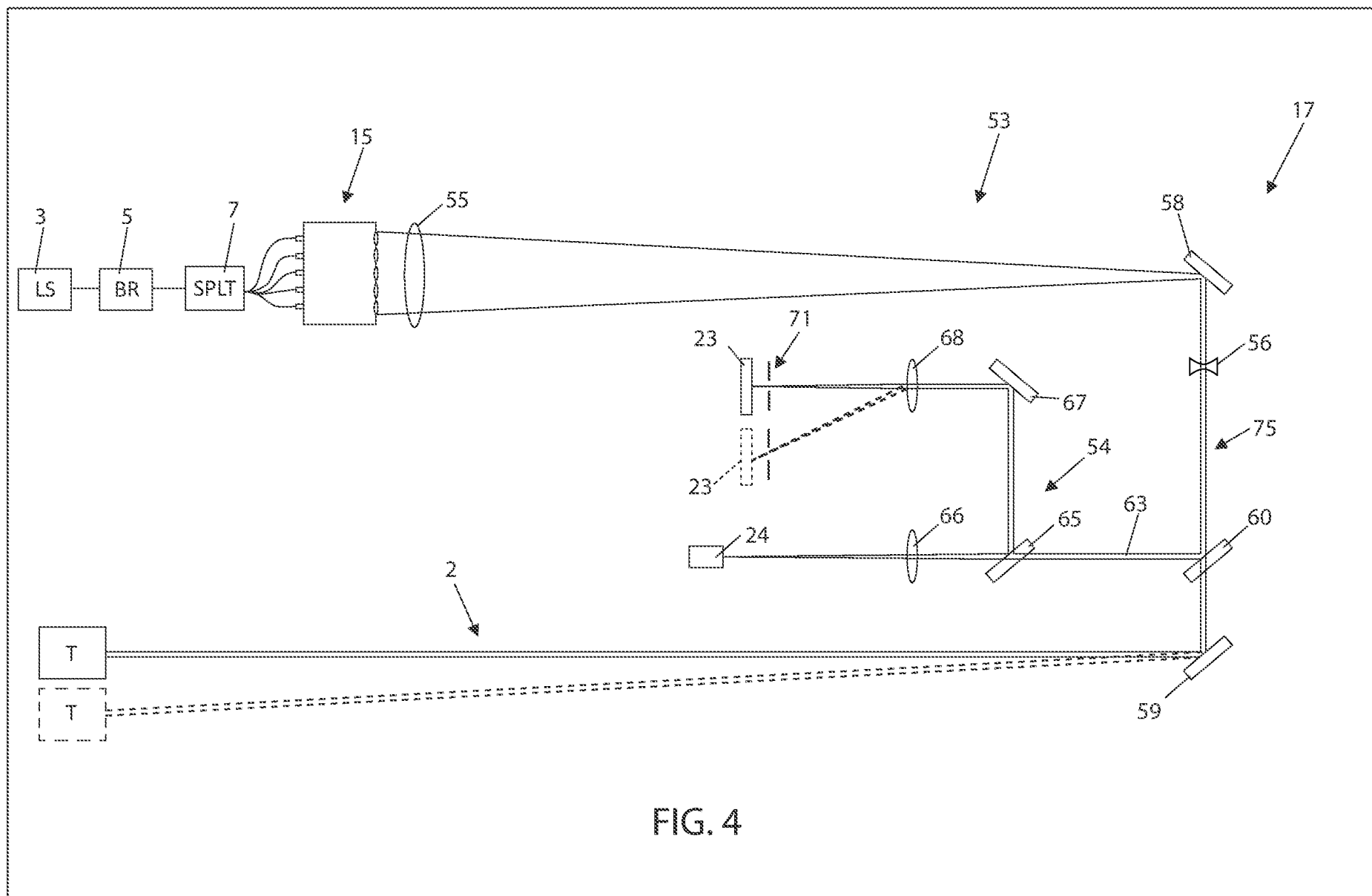
- determinare, dai primi e dai secondi dati, le variazioni di fase indotte dal componente ottico causate dall'interazione con il fascio laser;

- eseguire un algoritmo per simulare la propagazione ottica all'interno del sistema di ricombinazione coerente, l'algoritmo di simulazione ricevendo come ingresso dette variazioni di fase ed essendo configurato per fornire in

uscita le proprietà ottiche del fascio ricombinato di uscita; e

- determinare primi dati ottimizzati del componente ottico, in base a un risultato dell'algoritmo di simulazione.





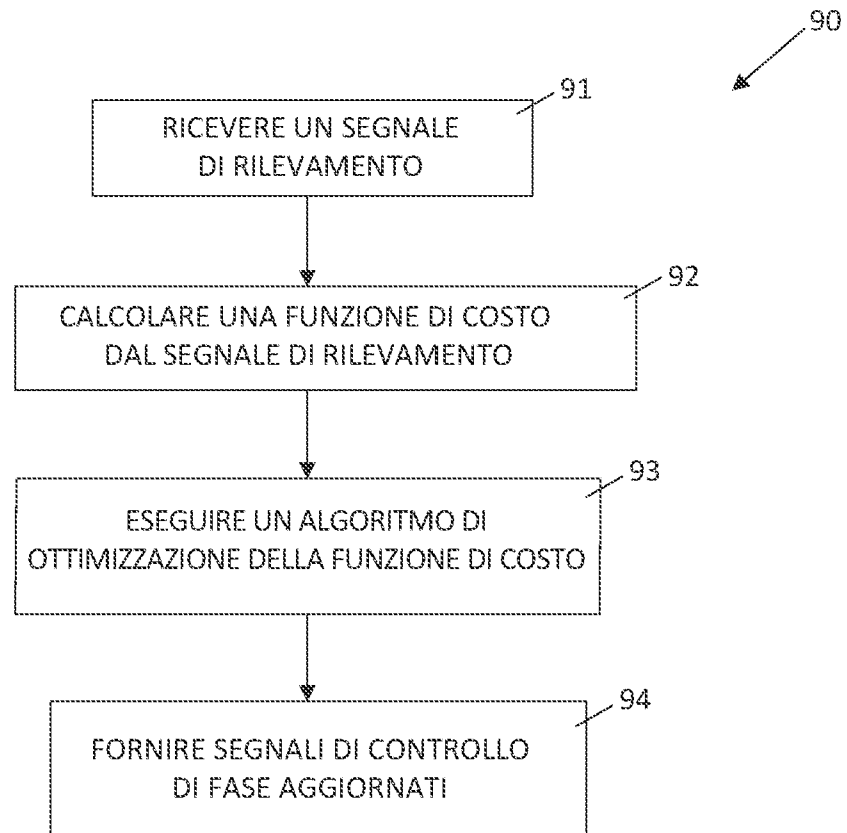


FIG. 5

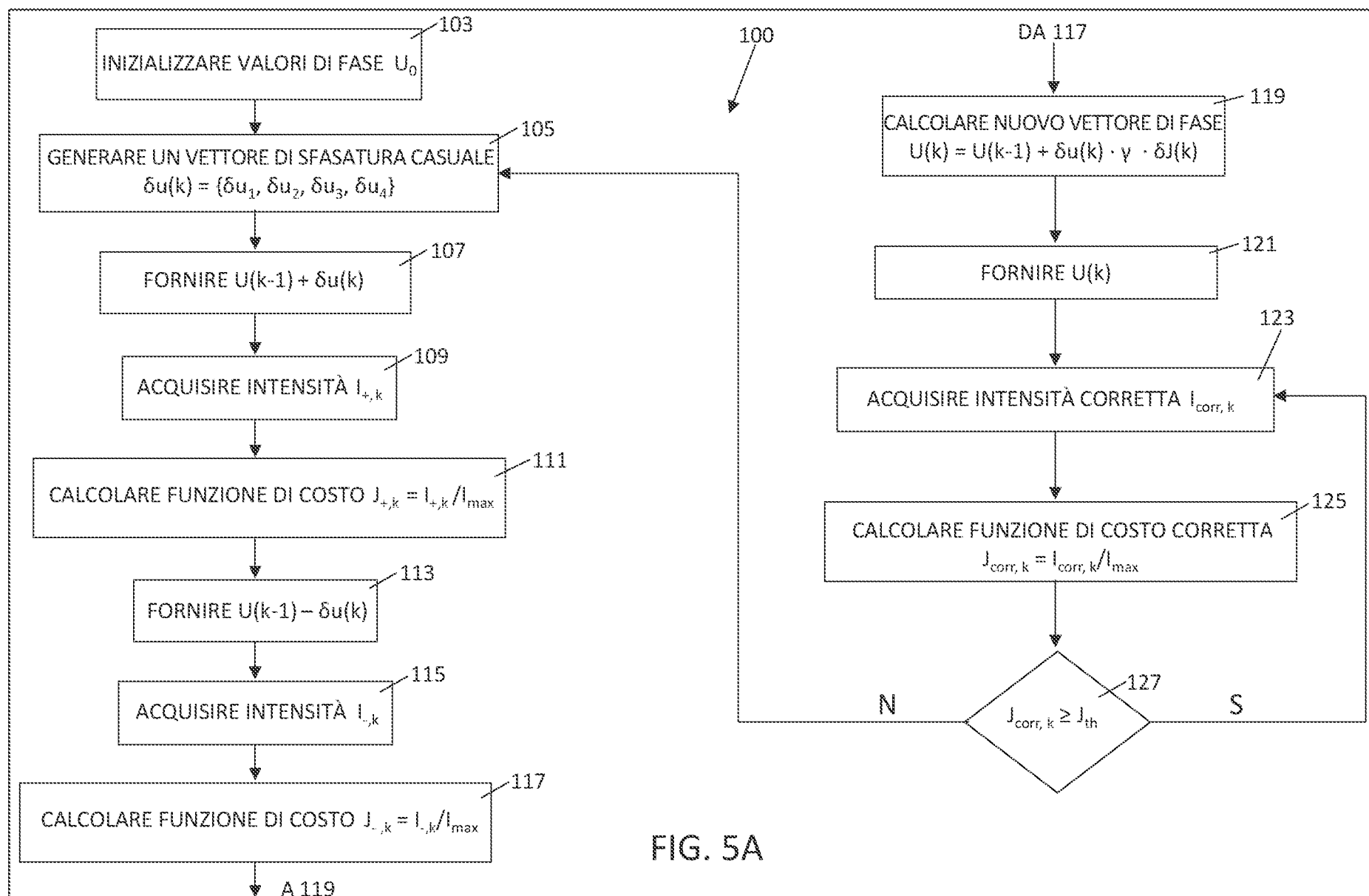


FIG. 5A

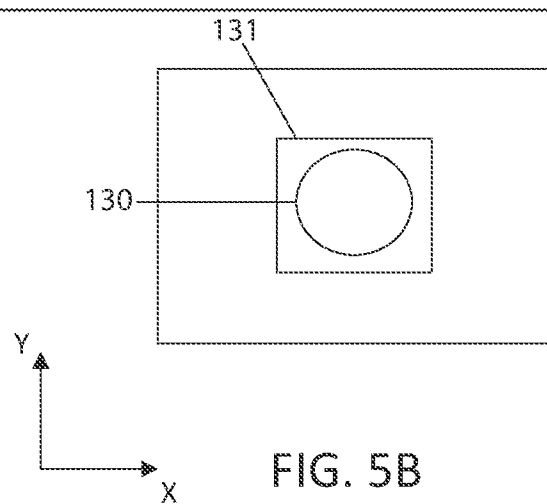


FIG. 5B

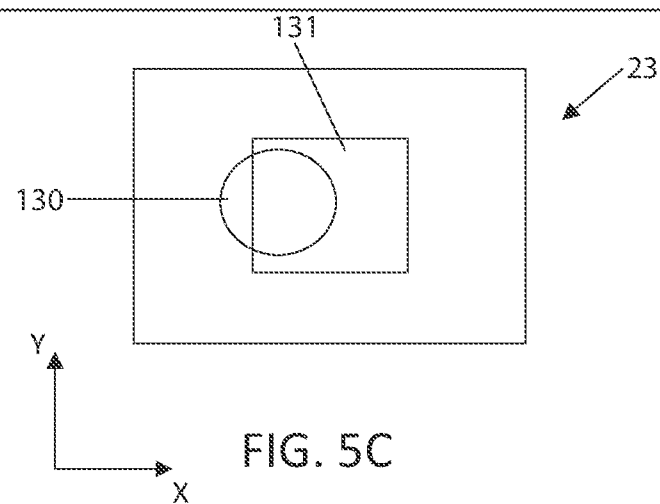


FIG. 5C

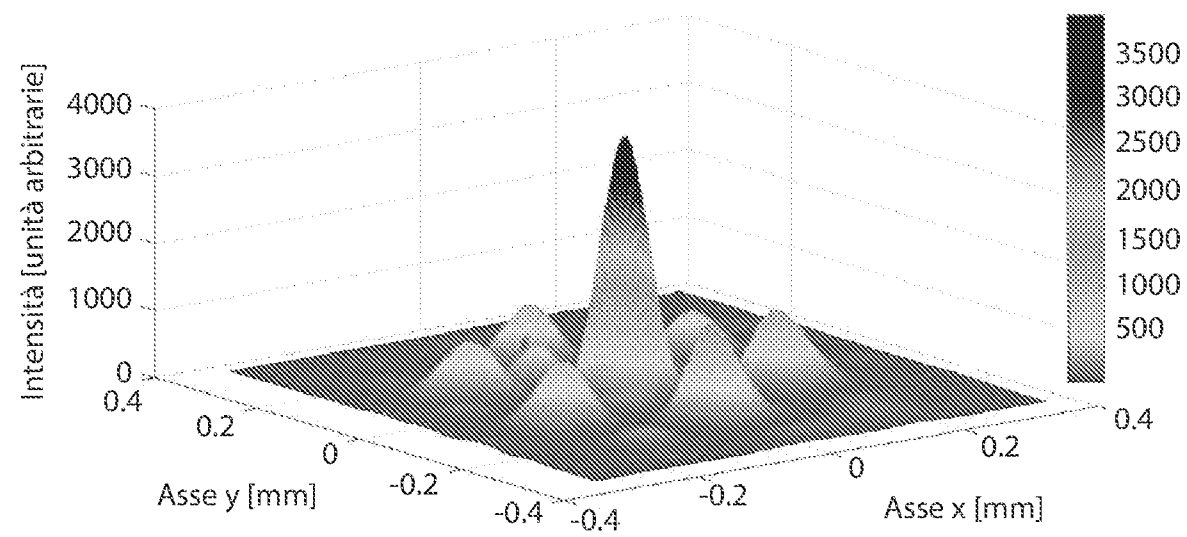


FIG. 7

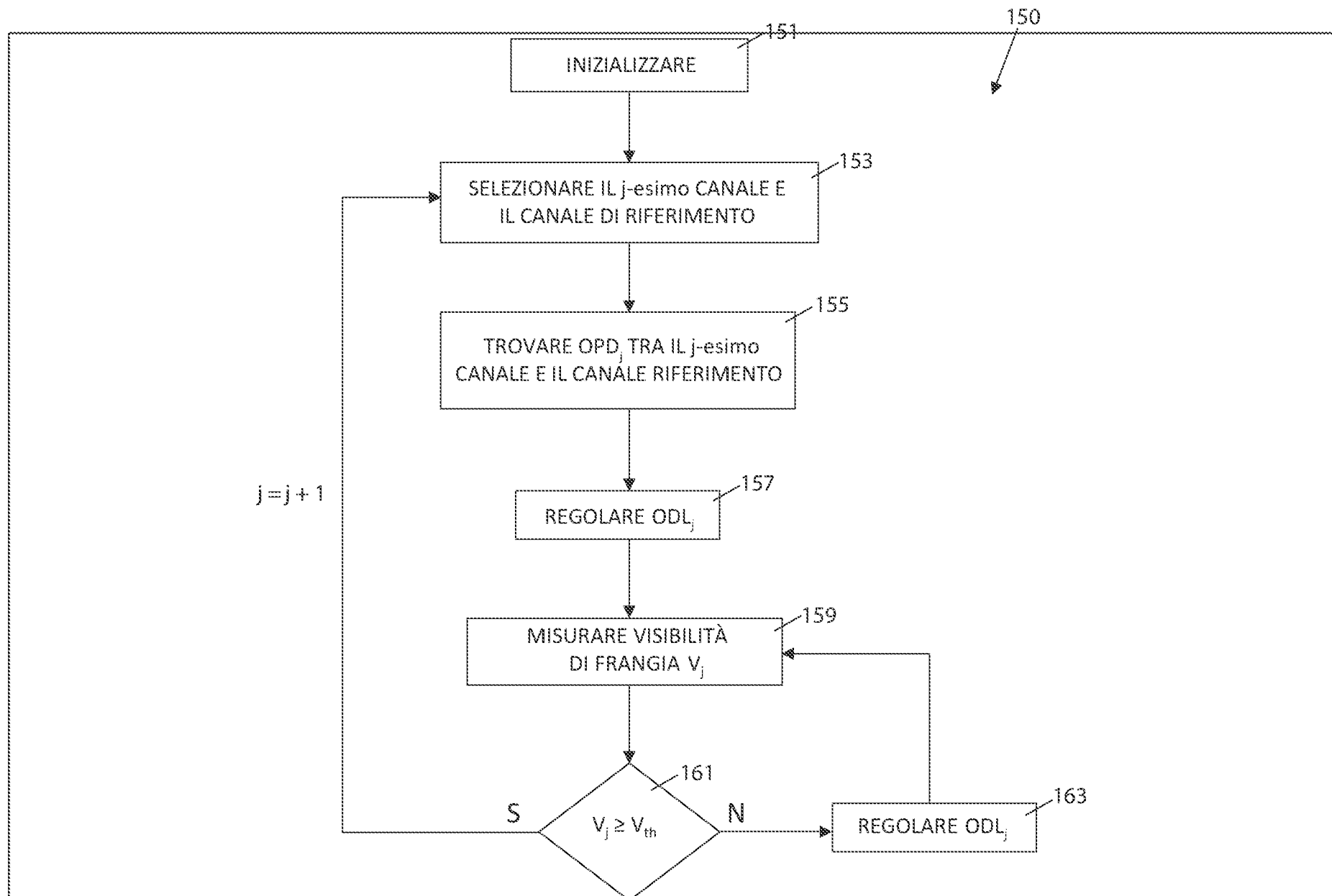


FIG. 6

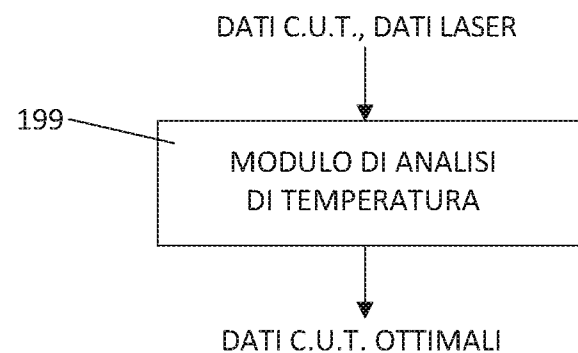


FIG. 8

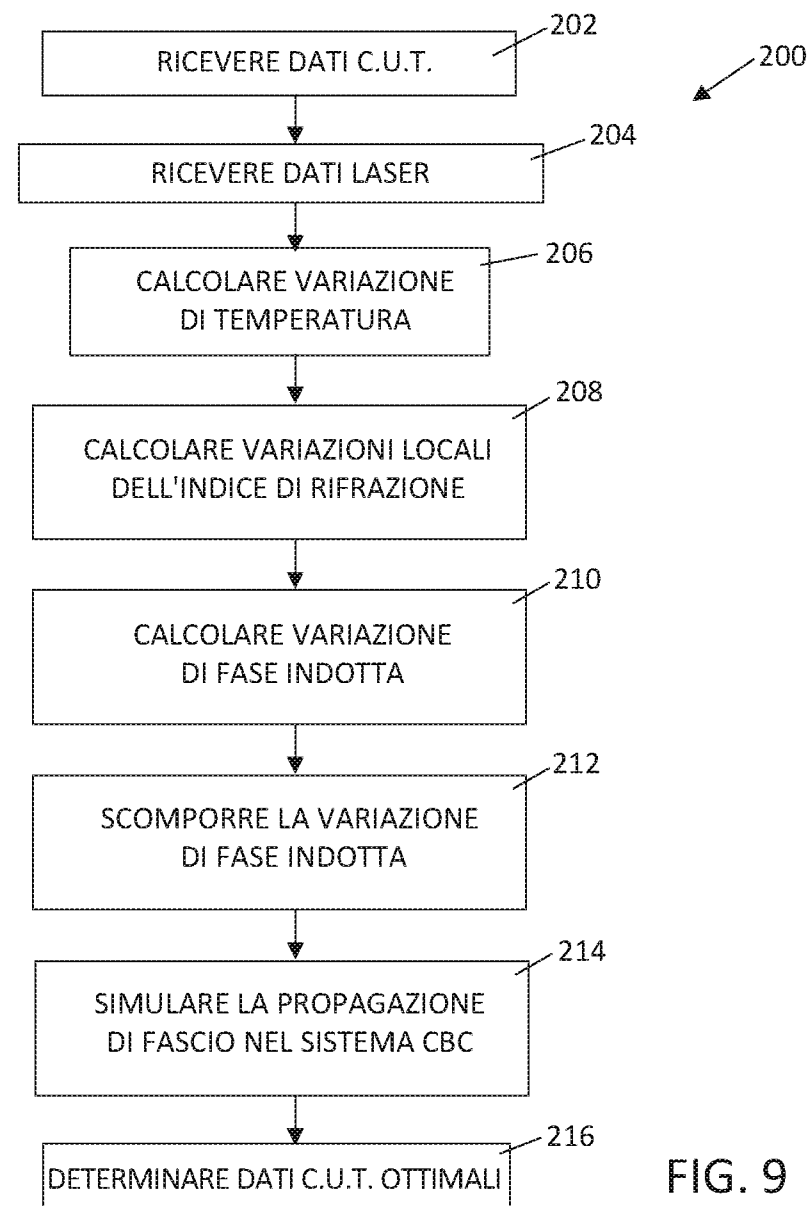


FIG. 9