



**MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO**  
**DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE**  
**UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI**

<b>DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO</b>	<b>102012902087704</b>
<b>Data Deposito</b>	<b>28/09/2012</b>
<b>Data Pubblicazione</b>	<b>28/03/2014</b>

Classifiche IPC

Titolo

TELESCOPIO, COMPRENDE UNO SPECCHIO PRIMARIO SFERICO, AD AMPIO CAMPO DI VISTA

# Telescopio, comprendente uno specchio primario sferico, ad ampio campo di vista

## Ambito Tecnico dell'Invenzione

Il gran numero di detriti presenti attorno alla Terra rappresenta un rischio crescente per la sicurezza dei satelliti operativi e per i veicoli spaziali anche alla luce del fatto che il loro numero è in rapido aumento. Pertanto le principali Agenzie Spaziali così come diversi Istituti, sia Pubblici che Privati, operanti nel Settore dello Spazio, stanno dedicando uno sforzo crescente a tale problematica - i cui argomenti fanno parte del quadro più generale della Consapevolezza sulla Sorveglianza dello Spazio (Space Surveillance Awareness, SSA) – viste le forti preoccupazioni che tale situazione suscita relativamente alla possibilità futura di accesso e sfruttamento dello Spazio.

Allo stato attuale dell'arte non esistono tecniche efficaci di rimozione attiva dei detriti spaziali, pertanto è importantissimo monitorare tali detriti in vario modo per conoscere le loro orbite e prevenire eventuali collisioni. Per raggiungere questo obiettivo è necessario costruire nel minor tempo possibile cataloghi ad elevatissima copertura degli oggetti orbitanti nello Spazio Limitrofo alla Terra, che comprendano anche oggetti caratterizzati da dimensioni molto ridotte, dimensioni che possono scendere fino a pochi centimetri di diametro per le regioni orbitali più basse.

La metodologia classica prevede l'utilizzo di osservazioni radar per orbite a bassa altitudine e di osservazioni ottiche per detriti posizionati ad altitudini più elevate. In effetti però anche per orbite LEO (Low Earth Orbits), che rappresentano l'applicazione di maggiore difficoltà, l'introduzione di stazioni di osservazione basate su sensori ottici a supporto dei sistemi radar, può fornire diversi vantaggi nella risposta alle problematiche poste dal settore SSA, potendo, tra l'altro, contribuire al contenimento dei costi necessari per l'implementazione ed il mantenimento di complessi sistemi radar. In particolare, diversi studi hanno dimostrato che oltre i 1000-1100 km di altitudine, l'apparecchiatura radar necessaria diventa estremamente onerosa nell'applicazione, dati gli enormi quantitativi di energia che devono essere rilasciati per raggiungere tali profondità, con conseguenti costi elevatissimi di allestimento ed operazione,

associati, d'altro canto, ad una serie ingente di problemi concernenti la sicurezza e la salvaguardia ambientale.

Il vantaggio offerto dalle soluzioni ottiche è reso chiaro da diverse considerazioni. La principale differenza fisica tra osservazioni ottiche e radar non è limitata solamente alla lunghezza d'onda del segnale ricevuto, ma piuttosto dipende dal tipo di illuminazione dell'oggetto osservato. In un sensore radar il bersaglio è illuminato attivamente dal segnale radar stesso, mentre nel caso di un sensore ottico ci si basa al contrario sulla ricezione passiva della luce diffusa dall'oggetto quando questo è illuminato dal Sole. In questo senso il vantaggio della tecnica ottica risiede esattamente nell'abbondante flusso di energia fornito dal Sole. In particolare i vantaggi sulle prestazioni di sistemi basati su sensori ottici derivano dal fatto che l'intensità dell'illuminazione della superficie ricevente è inversamente proporzionale al quadrato della distanza compresa tra l'oggetto bersaglio e l'osservatore, mentre nel caso di un radar tale intensità è inversamente proporzionale alla quarta potenza della medesima distanza. Inoltre, un sensore ottico rivela un segnale caratterizzato da una densità di energia per unità di sezione enormemente più elevata di quella raggiungibile dal sistema radar più potente attualmente concepibile.

D'altro canto, le osservazioni ottiche sono soggette ad altre limitazioni, anch'esse derivanti dal processo fisico di osservazione. Infatti, poiché la sorgente di illuminazione del satellite/detrito è il Sole, un requisito essenziale per l'osservazione ottica è che l'oggetto da rilevare risieda all'esterno del cono d'ombra della Terra. Del resto un sensore ottico di Terra non può operare a meno che la stazione di osservazione in cui è collocato sia all'interno dello stesso cono d'ombra della Terra. Inoltre l'elevazione dell'oggetto da osservare deve essere superiore ad un valore minimo fissato, tipicamente di c.a.  $15^\circ$  dall'orizzonte, in grado di garantire una massa d'aria sufficientemente ridotta in modo da evitare valori di 'seeing' atmosferici inaccettabili. Tutte queste limitazioni vanno a sommarsi agli effetti della curvatura della superficie terrestre.

Le condizioni sopradescritte inerenti l'illuminazione solare sono piuttosto restrittive: gli oggetti orbitanti, in particolare in orbite LEO, - che rappresentano la condizione più stringente -, risultano pertanto in condizioni di illuminamento ed osservabilità solo immediatamente dopo il tramonto ed immediatamente prima dell'alba. Va aggiunto che le migliori condizioni di osservazione si verificano quando l'angolo di fase è minimo, evento che si propone durante i minuti immediatamente successivi al tramonto o immediatamente precedenti l'aurora. Oggetti molto piccoli, fino a qualche centimetro di diametro, sono rilevabili solo quando passano in prossimità del bordo del cono d'ombra terrestre, ad angoli di fase minimi a cui appaiono più luminosi, e pertanto durante finestre temporali molto ristrette in prossimità dell'alba e del tramonto. In pratica è importantissimo iniziare le operazioni di osservazione non appena il cielo è abbastanza buio da evitare che il bagliore di fondo porti le immagini a saturazione, e di converso, terminare le operazioni il più tardi possibile a ridosso dell'alba.

Un altro requisito stringente, necessario per le attività di monitoraggio ed inseguimento degli oggetti presenti nello Spazio Limitrofo alla Terra, in modo che queste risultino efficaci di fronte all'incremento veloce di Soggetti operanti nel settore dello Spazio, è dettato dalla necessità di definire rapidamente la catalogazione di una elevata percentuale della popolazione di oggetti ivi orbitanti, caratterizzati da dimensioni tali da renderli potenziali generatori di eventi catastrofici in caso di collisione. Per rendere l'idea, questo requisito si traduce nella necessità di catalogare non meno del 99% di tutti gli oggetti di diametro superiore a 8-10 cm che risiedono nella fascia orbitale avente altezza al perigeo compresa tra 1000 e 1400 km. Figure corrispondenti si possono esprimere per le fasce orbitali più elevate con un conseguente aumento del diametro minimo degli oggetti da catalogare. Ciò non ostante questo non rilassa in alcun modo i requisiti sul sensore ottico, in quanto l'aumento di dimensioni degli oggetti da catalogare è compensato dall'incremento corrispondente della loro distanza. Dal lato opposto, l'aumento della luminosità che si verifica per oggetti posizionati ad orbite più basse in condizioni di fase ottimale, è compensato dalla maggiore velocità apparente degli oggetti stessi (che nella fascia LEO può arrivare a superare 1/3 di grado al secondo). Questo effetto forza i fotoni che arrivano dall'oggetto a distribuirsi su una riga di pixels del fotoregistratore quando l'immagine dell'oggetto viene acquisita, con la conseguenza di ridurre il corrispondente valore del rapporto Segnale su Rumore di un fattore  $1/T$ , dove  $T$  è il numero di pixels attraversati.

Attraverso l'elaborazione delle tracce rilasciate dagli oggetti nell'immagine della porzione del cielo dove gli oggetti transitavano durante l'acquisizione dell'immagine stessa, è possibile ottenere un insieme di parametri orbitali inerenti le orbite percorse dagli oggetti registrati. In particolare la combinazione degli insiemi di parametri orbitali ottenuti da almeno due tracce osservate appartenenti allo stesso oggetto, rilevate a tempi diversi o da stazioni diverse, permette il calcolo dell'insieme completo di parametri definenti in modo univoco l'orbita dell'oggetto, che consente di ottenere una sua catalogazione preliminare.

Per raccogliere dati di catalogo utili però le suddette orbite devono essere calcolate con una precisione molto elevata, requisito che implica la necessità di ottenere immagini delle tracce degli oggetti da catalogare ad elevata risoluzione, tipicamente dell'ordine del secondo d'arco. A questo punto, una volta che l'oggetto è stato scoperto e preliminarmente catalogato, una ulteriore procedura di raffinamento dell'orbita è necessaria, sia sfruttando altre tracce dell'oggetto registrate a tempi successivi, sia inseguendo l'oggetto in modo da mantenere la sua posizione fissa in un pixel dell'immagine. Quest'ultimo approccio, definito tecnicamente 'Tasking' o 'Follow up', consiste nell'inseguire l'oggetto nel cielo durante tutto il tempo di acquisizione dell'immagine (tempo di esposizione), mediante un movimento appropriato del telescopio. In questo modo si mantiene l'immagine dell'oggetto fissa su un singolo o al più su un

ristretto numero di pixels, in modo da consentire ai fotoni di accumularsi e non di distribuirsi su una striscia, in modo da migliorare drasticamente il valore di rapporto segnale su rumore.

Riepilogando, è necessario generare rapidamente e mantenere aggiornati cataloghi di oggetti che coprano una percentuale molto elevata della popolazione distribuita nelle diverse fasce orbitali dello Spazio Limitrofo alla Terra, determinando i loro parametri orbitali con elevata accuratezza e aggiornando questi sistematicamente, per mantenere il grado di accuratezza necessario, e ridurre quindi al minimo il numero di riosservazioni.

Questo scenario si traduce nella necessità di implementare telescopi di aperture di ingresso sufficientemente ampia, (in modo da raccogliere un numero di fotoni sufficiente a rilevare anche gli oggetti meno luminosi), con ampissimo campo di vista (campo di vista maggiore di dieci gradi quadri) e con capacità di movimentazione veloce, pur permettendo tempi di esposizione brevi (anche meno di un secondo) e riposizionamento veloce (in pochi secondi), in modo da scandagliare ampie porzioni di cielo, là dove le condizioni di osservazioni sono ottimali anche per oggetti di luminosità molto debole. Inoltre il sensore ottico deve fornire immagini con qualità ottica elevata e risoluzione limitata solo dal 'seeing' atmosferico, in modo da ottenere la necessaria precisione sui parametri orbitali durante il processo di determinazione dell'orbita degli oggetti scoperti.

Dal punto di vista meccanico è perciò necessario implementare strutture a dinamica veloce e ad elevata rigidità, per poter effettuare un riposizionamento rapido del Telescopio con cicli brevissimi di smorzamento delle vibrazioni, così da ottenere una elevata precisione di puntamento e stabilità di movimento.

## **Stato dell'Arte**

Nonostante il gran numero di tipi di telescopio e soluzioni inerenti adottate per l'Astronomia e le attività a questa correlate, solo un numero molto ristretto di architetture e relativi disegni, offre in linea di principio alcune delle stringenti caratteristiche ottiche, necessarie per soddisfare le necessità poste dalle tematiche SSA.

Lo sviluppo di telescopi con risoluzione critica definita su un ampio campo di vista registrò un importante avanzamento con l'introduzione del telescopio di Schmidt. In fatti, paragonato con un telescopio standard a fuoco primario provvisto di correttore di campo, il telescopio di Schmidt può produrre immagini di buona qualità su un campo notevolmente più ampio. Pertanto l'architettura Schmidt è stata ampiamente utilizzata per fotografia ed osservazione ad ampio campo del cielo e rappresenta una soluzione allo stato dell'arte nel campo dei telescopi ad

ampio campo [J. L. Synge, "The Theory of the Schmidt Telescope", J. Opt. Soc. Am., 3, 129-136, (1943); D. Lynden-Bell and R. V. Willstrop, "Exact optics – VI. Schmidt cameras and prime correctors", Mon. Not. R. Astron. Soc. 387, 677–688 (2008)].

Uno dei vantaggi principali offerti dall'architettura Schmidt è rappresentato dall'applicazione di uno specchio sferico come elemento primario riflettente. Tale specchio sferico riceve la luce che ha attraversato una lente asferica sottile, definita come lastra di correzione o correttore, che compensa le distorsioni dell'immagine prodotte dalla forma sferica del primario stesso.

Dal punto di vista del progetto il vantaggio principale dell'architettura Schmidt risiede nel fatto che il campo di vista di uno specchio sferico non ha aberrazioni dipendenti dal campo di vista stesso: ogni punto nel campo è identico, dal momento che uno specchio sferico non ha un unico asse ottico. Al contrario, per uno specchio primario parabolico, l'aberrazione sferica è nulla per tutti i raggi, ma il coma produce una degradazione delle immagini fuori asse, che aumenta linearmente con lo spostamento rispetto al centro del campo. Come diretta conseguenza della curvatura sferica della lente primaria, in un telescopio Schmidt standard il correttore di campo è normalmente posizionato nel centro di curvatura del primario, allo scopo di trasformare il fronte d'onda incidente, in modo tale da farlo ritornare sferico dopo la riflessione sul primario e direzionare quindi i raggi luminosi in un singolo punto.

Al di là di tutti i vantaggi offerti dall'introduzione di un primario a superficie sferica, che è la forma più semplice ed accurata che passa essere prodotta anche su elementi di diametro relativamente ampio, è necessario però sottolineare che la produzione di un corrispondentemente ampio correttore asferico (ad esempio uno Schmidt di 0.9 m di apertura di ingresso richiede tipicamente un correttore di 0.6 m di diametro) è un compito molto oneroso in termini di tempo e rappresenta di fatto uno dei passaggi più critici nella realizzazione del telescopio: in pratica, nella produzione di un telescopio basato sul modello Schmidt, la lastra correttrice può diventare il maggiore elemento critico, richiedendo uno sforzo di realizzazione e verifica molto rilevante allorché siano necessari diametri di ingresso relativamente elevati.

La curvatura del piano focale che deriva dalla configurazione di Schmidt pone inoltre seri problemi nell'applicazione dei moderni sensori basati sulla tecnologia planare dei semiconduttori, quali CCD, CMOS, etc., che non possono essere deformati, contrariamente a quanto avveniva per le lastre fotografiche, in uso al tempo dell'introduzione dello Schmidt. Inoltre l'elemento di acquisizione dell'immagine è posizionato all'interno del tubo del telescopio, con conseguente ostruzione della pupilla e generali condizioni di difficile accessibilità, in particolare quando condizioni di raffreddamento o addirittura criogeniche sono necessarie (come nella maggior parte delle applicazioni reali) per l'operazione dei rivelatori d'immagine. Un elemento ulteriore da considerare è il significato del termine 'ampio campo di vista' per un telescopio Schmidt: questo infatti deve essere inteso non maggiore di circa dieci gradi quadri quando una risoluzione non migliore di tre secondi d'arco è richiesta sull'intero campo di vista.

Diverse varianti dell'architettura Schmidt semplice sono state proposte. Una versione modificata di tale architettura, di particolare interesse, è il cosiddetto Schmidt-Cassegrain concentrico. Questo telescopio è impostato su un sistema di tipo Cassegrain a due specchi combinato con un correttore a piena apertura di tipo Schmidt. Varie combinazioni tra la posizione del correttore e le coniche dei due specchi Cassegrain sono possibili, con diverse proprietà ottenibili a livello di campo di immagine. Uno Schmidt-Cassegrain realizzato con entrambi gli specchi Cassegrain sferici risulta corretto solo per l'aberrazione sferica, presenta leggero astigmatismo, mantiene presente il coma e genera una forte curvatura del campo. Inoltre il correttore induce piccole aberrazioni a livello di sfero-cromatismo. In pratica questa soluzione rappresenta una ulteriore deviazione dal concetto di campo piatto, risultando in un'immagine alquanto curva. Inoltre essendo entrambi gli specchi sferici, per ridurre al minimo l'astigmatismo ed il coma è necessario che i due raggi di curvatura siano diversi, perciò per ridurre le aberrazioni fuori asse, lo stop di apertura (posto in corrispondenza del correttore) deve essere nel centro di curvatura del primario: in questo modo tutte e tre le superfici (immagine, primario e secondario) sono concentriche con centro di curvatura nel vertice dello stop di apertura (correttore).

Al di là quindi dei maggiori vincoli da rispettare nella realizzazione, poiché la curvatura del piano focale è almeno della stessa entità di quella generata da una architettura Schmidt classica se non maggiore, gli unici vantaggi offerti da questa variante concentrica sono dati dall'accessibilità del piano focale e da una ridotta lunghezza del sistema. Inoltre, a causa della forte curvatura del secondario (se paragonato ad un Cassegrain classico), le dimensioni di questo risultano leggermente ridotte per produrre l'immagine in una posizione di facile accessibilità.

Una ulteriore variante del telescopio Schmidt-cassegrain è rappresentata dalla configurazione compatta, denominata Baker-Schmidt, in grado di fornire le caratteristiche di un sistema Schmidt-Cassegrain totalmente corretto con lo stop (correttore) significativamente più vicino al primario. Come conseguenza il primario deve avere focale corta (ottica molto veloce), pertanto le aberrazioni fuori asse, (in particolare il coma), prodotte da questo sono di entità particolarmente significativa. Per cancellare tali aberrazioni è necessario che entrambi gli specchi secondario e primario siano asferici, e in particolare, il fatto che per entrambi siano richieste curve oblate ellissoidali rende la fabbricazione particolarmente difficoltosa. Inoltre, in generale, la forte asfericità del primario porta a quasi triplicare l'entità delle aberrazioni di una sfera corrispondente, in modo tale che il secondario riesce a compensare solo per una piccola porzione di queste. Conseguentemente, compensare una così elevata aberrazione sferica richiede correttori asferici molto più complessi. Non di meno, la forte asfericità del primario rende fortemente importanti anche i contributi di aberrazione sferica di ordine superiore, che possono essere poco contrastati dall'azione del secondario. Infine, se paragonata ad una configurazione Schmidt semplice di focale equivalente, questa configurazione presenta una

maggiore componente di aberrazione sfero-cromatica. Pertanto, anche considerando le difficoltà che questi elementi introducono a livello di fabbricazione, si può affermare che la camera compatta di tipo Baker-Schmidt rappresenta una soluzione meno appetibile nonostante la maggiore compattezza offerta.

Schroeder ha proposto una versione tiltata del telescopio Baker-Schmidt, costituita da tutti elementi riflettenti [D.J. Schroeder, "All-reflecting Baker-Schmidt flat-field telescopes", *Appl. Opt.*, 17(1), 141-144 (1978)]. In particolare Schroeder ha analizzato sia una configurazione Baker-Schmidt tiltata, sia una configurazione sempre di questa architettura in cui il correttore è costituito da una superficie riflettente, in modo da avere una camera Baker-Schmidt realizzata da superfici tutte riflettenti. Questa configurazione rappresenta in pratica il massimo di ciò che a livello di architetture Schmidt e derivate si può attualmente ottenere in termini di prestazioni, e cioè, in termini di qualità ottica su estensione di campo di vista, con una risoluzione migliore di tre secondi d'arco su quasi dieci gradi quadri di campo. Va osservato che l'introduzione di superfici fuori asse pone immediatamente seri problemi di allineamento e di controllo termico qualora tale concetto dovesse essere applicato a sistemi con aperture di ingresso relativamente elevate ed operanti in condizioni ambientali naturali (escursioni di temperatura notturne, stagionali, ecc.), per non menzionare poi la ingente serie di problematiche collegate alla produzione ed alla verifica di ottiche asferiche di grandi dimensioni.

Un primo tentativo di produrre una correzione più radicale dei contributi di aberrazione fondamentali fu fatto mediante l'introduzione di uno specchio terziario. Una prima soluzione in merito fu presentata da Willstrop [*Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, vol. 210, Oct. 1, 1984, p. 597-609.]. Lo scopo di questa nuova configurazione era quello di fornire un campo di vista di 6-8 gradi quadri con una risoluzione d'immagine migliore del 'seeing' (i.e. 0.5 secondi d'arco nelle migliori condizioni), una superficie di piano focale con curvatura moderata sulla quale poter accomodare curvandole lastre fotografiche a guisa dell'architettura Schmidt, una focale veloce per ottenere esposizioni limitate solo dal fondo-ciolo, unitamente ad una struttura compatta, tale da permettere l'utilizzo di un domo di dimensioni ridotte e quindi meno costoso. Tale soluzione condusse alla cosiddetta camera Paul-Baker, la cui caratteristica fondamentale risiede nel fatto che il secondario è sferico, così che i raggi luminosi non risultano propriamente paralleli dopo le prime due riflessioni, ma sono deviati nella stessa maniera operata da un correttore Schmidt. In questo modo il terziario risulta anch'esso sferico, con la conseguente produzione di immagini di elevata qualità su un ampio campo di vista. Tale configurazione è stata denominata anche con l'appellativo di Marsenne-Schmidt. Considerata la curvatura ottenuta nel piano focale, nuovamente ci si trova di fronte ad un sistema poco adatto all'utilizzo di moderni fotorivelatori basati sulla tecnologia planare a semiconduttore, intolleranti a qualsiasi tipo di deformazione meccanica, e che richiede comunque l'utilizzo di superfici asferiche di

grandi dimensioni (primario) qualora aperture di ingresso relativamente ampie debbano essere utilizzate.

L'introduzione di ulteriori superfici asferiche fu originariamente proposta da Korsch [ D. Korsch, Appl. Opt. 11(12), 2986-2987, (1972); D. Korsch, Appl. Opt. 16(8), 2074-2077, (1977); D. Korsch, Appl. Opt. 19(21), 3640-3645, (1980)], che illustrò una soluzione consistente in una configurazione a tre specchi, chiamata a tal proposito Telescopio Anastigmatico a Tre Specchi (Three Mirror Anastigmatic Telescope, TMA). Diverse configurazioni a tre specchi erano state presentate precedentemente al TMA, senza che però alcuna di queste avesse aperto la via ad implementazioni praticamente utilizzabili, le principali limitazioni essendo dovute alla scarsa accessibilità del piano focale oppure alla forte ostruzione centrale, a focali estremamente ed invariabilmente veloci oppure a configurazioni largamente asimmetriche.

La configurazione di Korsch presenta invece alcune caratteristiche chiave che permettono alla luce di essere estratta da una architettura TMA e diretta ad un piano focale potenzialmente ampio e posto lontano dall'asse ottico del telescopio. In pratica la configurazione Primario - Secondario è simile a quella di un Cassegrain, con la formazione di una immagine reale subito dietro il primario. L'immagine secondaria è così riformata da uno specchio terziario ad ingrandimento circa unitario. Un piccolo specchio piano, posto tra il primario ed il terziario, ripiega il fascio luminoso perpendicolarmente all'asse del telescopio, verso la superficie dove l'immagine finale viene formata. In questo modo la 'massa' del piano focale e tutto il corrispondente equipaggiamento sussidiario non ostruiscono né la pupilla né il campo di vista.

A partire dalla versione originale proposta da Korsch, diverse varianti sono state mostrate e studiate dato il vasto campo di applicazioni che si è aperto a questo tipo di architettura, che si è rivelata in grado di dimostrare la possibilità di produrre strumenti di 'imaging' corretti quasi al limite di diffrazione su campi di vista estremamente ampi.

Ciononostante, a causa della focale Cassegrain molto ridotta da applicare con conseguente elevata magnificazione, le tolleranze ottiche richieste da entrambe le porzioni, sia di testa (primario e secondario) che di coda (terziario), risultano decisamente stringenti, caratteristica sconveniente per applicazioni in condizioni ambientali naturali. Inoltre, poiché il piano focale vede direttamente la sezione ottica di testa (primario-secondario) attraverso il foro praticato nello specchio di estrazione del fascio luminoso, il trattamento dei fenomeni di riflessione multipla parassita ('straylight') deve essere praticato mediante l'opportuna applicazione di 'baffles' a tutti gli specchi primario, secondario e terziario, con notevole complicazione del disegno.

A tal riguardo, Korsch ha descritto anche sistemi TMA anulari, che utilizzano parimenti tre specchi asferici più uno specchio piano di estrazione. Il principale vantaggio offerto dalle

configurazioni anulari del TMA è la schermatura pressoché totale dei raggi di 'straylight', che la pupilla consente, essendo posta in posizione accessibile. D'altro canto questa configurazione presenta grossi svantaggi, come conseguenza della corta distanza di lavoro tra pupilla e piano focale, che portano alla formazione di un'immagine fortemente non telecentrica e che soffre di distorsioni significative.

Negli ultimi anni, grazie all'ampissimo campo di vista ottenibile, configurazioni fuori asse di TMA hanno incontrato particolare favore. Uno dei principali vantaggi offerti dalle configurazioni fuori asse è dato dalla non ostruzione del campo di vista, pur mantenendo le caratteristiche di qualità ottiche delle soluzioni non fuori asse. Resta però evidente che, dato il massiccio impiego di superfici asferiche richiesto da qualunque configurazione di tipo TMA, ogni applicazione a sistemi di elevata apertura di ingresso deve essere valutata con particolare attenzione, per stimare in modo realistico tutti i vantaggi e gli svantaggi che concorrono all'economia del sistema, (dati i numerosi e complessi problemi di realizzazione, verifica ed allineamento posti da superfici asferiche di grandi dimensioni), ed in particolare quando si prevedono applicazioni di terra.

In quest'ultimo caso, per il quale i limiti imposti dal 'seeing' atmosferico naturale rendono inappropriato ed inutile l'applicazione di sistemi corretti al limite di diffrazione quali quelli forniti da configurazioni TMA, al di là dell'ampissimo campo di vista fornito che può apparire come una caratteristica attrattiva, è assolutamente opportuno considerare anche tutte le problematiche di implementazione e mantenimento in condizioni ambientali naturali estremamente variabili.

Un concetto rivoluzionario è stato introdotto molto recentemente da Ragazzoni, nel tentativo di risolvere le problematiche di realizzazione legate alla classe di telescopi di larghissimo diametro, con l'introduzione del concetto denominato come 'Occhio di Mosca' (Fly-Eye) [R. Ragazzoni et al., 'A Smart Fast Camera', Proc. SPIE 5492, 121 (2004); G. Gentile et al., 'Wide-field imaging on 8- to 100-meter class telescopes', Proc. SPIE 6269, 62695V (2006)].

Il progetto di una camera ad ottica veloce (includendo in questo un correttore ad ampio campo) deve fornire: un ampio campo di vista (che si traduce fisicamente in ottiche di grandi dimensioni); una focale veloce per ottenere un campionamento appropriato con le dimensioni dei pixels dei fotorivelatori attualmente disponibili (che si traduce nella scelta di una stazione di Fuoco Primario o di un Riduttore Focale in una stazione focale secondaria); la capacità di compensare aberrazioni dipendenti dal campo relativamente largo (che conduce all'introduzione di un certo numero di elementi ottici di controllo simultaneo delle diverse distorsioni del fronte d'onda, spesso richiedendo complesse superfici asferiche nel processo di disegno ottico); ed infine un'ampia area di fotorivelatori (che si traduce nell'adozione di un certo numero di singoli elementi di largo formato, componibili tra loro su qualche lato)

In pratica, la maggior parte dei problemi sopra listati sono semplicemente una conseguenza del primo: infatti, riducendo il requisito sul campo di vista, tutte le difficoltà tecniche sopra citate risultano sostanzialmente ridotte se non addirittura eliminate in blocco.

In particolare un riduttore focale per un piccolo Campo di Vista può essere ottenuto con ottica semplice, non appena si abbia a disposizione una pupilla accessibile. Questo stesso può inoltre essere utilizzato per compensare aberrazioni che ci si aspetta essere lentamente variabili su un campo ridotto.

In pratica il principio di base introdotto consiste nel replicare un riduttore focale, di dimensioni relativamente ridotte, su una matrice bidimensionale, in grado quindi di ricoprire nell'insieme un Campo di Vista ben più ampio. In questo modo è possibile ricoprire l'intero Campo di Vista con un insieme ordinato a matrice di elementi semplificati, costituiti da lenticelle di ridotte dimensioni, ciascuno operante sulla porzione ridotta di campo ad esso assegnata.

Nel caso presentato da Ragazzoni viene riportato un sistema di immagine ad ampio campo per un campo totale di tre gradi di diametro (c.a. sette gradi quadri): i riduttori focali a lenti applicati differiscono per il tipo scelto di aberrazione da correggere nel piano della pupilla, che è pertanto funzione della posizione radiale nel piano focale. Il sistema presentato di lenti è collocato nel fuoco tipo Cassegrain del Telescopio, per il quale una configurazione a mosaico di chip di fotorivelatori è prevista.

Questa metodologia ad occhio di mosca è applicata ad un modello classico di tipo Cassegrain, quindi con specchi asferici e con un piano focale caratterizzato da aspetti di contiguità critici, se si considera il numero di fotorivelatori richiesto per ricoprire il Piano Focale stesso. Tale soluzione è naturalmente dettata dalla enorme apertura di ingresso del telescopio per il quale è stata ideata, e non risulterebbe in alcun modo conveniente se trasferita direttamente a telescopi di apertura più moderata, seppur relativamente ampia, per i quali configurazioni a mosaico di fotorivelatori sono particolarmente sconvenienti a causa delle diverse problematiche generate dalla prossimità dei singoli moduli, nonché dalla circuiteria elettronica e fluidica necessarie ai relativi sistemi di pilotaggio, controllo e condizionamento.

## **Sommario dell'Invenzione**

L'invenzione consiste in un:

Telescopio con ampio campo di vista, maggiore di dieci gradi quadri, comprendente uno specchio primario sferico, fornito di un sistema di ripartizione del Campo di Vista, che ne

mantiene la continuità, posto in prossimità del fuoco dello specchio primario e costituito da  $n$  superfici speculari piane e da un corrispondente numero di correttori, posizionati dopo tale sistema di ripartizione

Le caratteristiche principali che emergono da tale architettura innovativa sono le seguenti:

1. Rispetto ad una architettura Schmidt tradizionale le porzioni del Piano Focale che si ottengono sono piane, grazie ai correttori posizionati a seguito del sistema di ripartizione del Campo di Vista, contrariamente a quanto accade per una soluzione Schmidt che produce Piani Focali curvi, non adatti alla applicazione di sensori basati sulla moderna tecnologia planare dei semiconduttori.
2. La configurazione innovativa consente l'applicazione di correttori distinti (che possono essere sia identici sia differenti a seconda della funzionalità richiesta per la porzione dedicata di Campo di Vista) per ogni porzione di Campo di Vista prodotta dal sistema di ripartizione. Tali correttori sono pertanto di dimensioni molto ridotte se confrontati col correttore centrale richiesto da una configurazione tradizionale tipo Schmidt, per la quale tale correttore asferico, posto nel centro di curvatura dello specchio primario, ha dimensioni paragonabili alla apertura di ingresso del telescopio, una caratteristica che genera molte difficoltà nell'implementazione allorché l'apertura di ingresso debba essere di diametro rilevante.
3. Rispetto ad uno Schmidt tradizionale gli elementi sensibili che registrano l'immagine di ogni singola  $n$ -esima porzione del Campo di Vista, sono posti esternamente all'apertura del telescopio, evitando in questo modo di produrre ostruzione ed offrendo inoltre facilità di accesso ed operazione. Questo aspetto è di particolare rilevanza quando all'elemento sensibile debba essere associato un sistema di raffreddamento, situazione che si dimostra invece sempre critica per una configurazione Schmidt convenzionale.
4. In ciascuna delle  $n$  porzioni del Campo di Vista, generate dal sistema di superfici speculari piane, è applicata una camera a singolo chip, che permette di registrare l'immagine della corrispondente porzione di Campo di Vista con la necessaria risoluzione ottica. Questo elemento offre sia elevata modularità, – come ad esempio nel caso in cui tutte le singole camere o un sottogruppo di esse siano identiche –, sia la possibilità di applicare camere differenti, fornite di elementi ottici specializzati e quindi in grado di fornire diverse funzionalità nelle diverse porzioni di Campo di Vista generate, come ad esempio nel caso di applicazioni spettrometriche.
5. Grazie alla simmetria sferica dello specchio primario, in caso le  $n$  porzioni in cui viene suddiviso il Campo di Vista siano della stessa forma e dimensioni, allora le corrispondenti  $n$  camere possono essere tutte identiche, con la conseguente implementazione di un sistema largamente modulare, facile da implementare e mantenere.

6. Questa configurazione permette di osservare un Campo di Vista continuo, maggiore di dieci gradi quadri, – ma anche fino a molte decine di gradi quadri –, con una risoluzione ottica spinta fino a valori limitati dal 'seeing' atmosferico o migliori.
7. Rispetto a configurazioni a specchi multipli, questa architettura innovativa permette di applicare solamente superfici riflettenti sferiche e planari, consentendo pertanto di evitare superfici speculari asferiche con tutte le problematiche correlate alla loro produzione, allineamento ed operazione, in particolare allorquando aperture di ingresso relativamente ampie siano richieste. Inoltre il primario non presenta aperture, fori o aree cieche che arrestano parte della luce che su di esso incide, ma è piuttosto costituito da una superficie riflettente sferica, totalmente utilizzata per la raccolta della luce.

Le caratteristiche sopra elencate producono i seguenti vantaggi:

1. La riduzione delle dimensioni dei correttori consente una loro implementazione o mediante l'utilizzo di elementi ottici commerciali (lenti) o in alternativa tramite l'applicazione di elementi ottici non commerciali ma di facile standardizzazione. Questo approccio implica una cospicua riduzione dei costi e può portare alla produzione in serie di tali componenti pur mantenendo inalterate le prestazioni.
2. Il concetto innovativo consente di utilizzare un'ottica primaria veloce, da cui risultano una sensibilità elevata (in termini di capacità di raccolta della luce), dal punto di vista ottico, così come una struttura del telescopio compatta e rigida, dal punto di vista optomeccanico, adatta per applicazioni a dinamica veloce, per la scansione rapida di vaste porzioni di cielo.
3. Per le loro ridotte dimensioni, i correttori possono essere realizzati con elementi quasi auto allineanti, che non richiedono pertanto sistemi di aggiustamento fine per ogni singolo componente, e quindi in grado di consentire un assemblaggio veloce. Inoltre tali sistemi possono essere facilmente provvisti con cornici ed intelaiature di sostegno auto compensanti, in grado di compensare automaticamente le escursioni della temperatura esterna, permettendo perciò di operare realmente in un intervallo ampio di condizioni naturali (estate, inverno, diverse latitudini ed altitudini, etc.)
4. Telecamere a singolo chip fotorivelatore, – sia dedicate che commercialmente disponibili –, possono essere applicate nei sotto Piani Focali corrispondenti alle diverse porzioni del Campo di Vista, in modo da consentire una lettura veloce delle immagini raccolte, per applicazioni di scansione rapida del cielo, con considerevole riduzione del rumore elettronico di lettura, se paragonate a configurazioni classiche.
5. La possibilità di evitare configurazioni a mosaico di fotorivelatori nel piano focale, – dal momento che ogni singola porzione è di dimensioni tali da ospitare un elemento a singolo chip fotorivelatore –, consente di ottenere una copertura completa del campo di vista totale osservato, senza introdurre spazi vuoti a causa delle cornici dei moduli foto ri-

velatori, della loro circuiteria e dei loro sistemi di condizionamento, e permette quindi di acquisire immagini con un fattore correlato di riempimento che può raggiungere in linea di principio anche il 100%.

6. La presenza di elementi singolo chip fotorivelatore per ogni porzione del campo prodotta, evita anche tutte le problematiche introdotte dalle configurazioni a mosaico che sono legate alla contiguità dei singoli elementi di foto rivelazione, come ad esempio la reciproca complanarità, la necessità di condizionamento ed isolamento termico, ecc.
7. Ogni camera modulare può essere provvista di un otturatore veloce, eventualmente corredato con un sistema di temporizzazione preciso, in grado di fornire misure spazio-temporali degli oggetti osservati con elevata precisione. Questa caratteristica è un elemento chiave per le prestazioni strumentali di misure di alta precisione.
8. Ogni camera modulare può essere provvista di elementi ottici dedicati, quali filtri, polarizzatori, elementi dispersivi delle componenti in lunghezza d'onda, etc., in grado quindi di consentire diverse funzionalità per diverse applicazioni nelle varie porzioni di campo realizzate dal sistema di ripartizione.
9. La forma sferica del primario consente di realizzare un sistema di focalizzazione veloce e semplice, mediante l'aggiustamento di almeno tre punti fissati del primario stesso, eventualmente evitando in questo modo sistemi di focalizzazione dedicati per ogni singola camera.

## Breve Descrizione delle Figure

La Figura 1 mostra uno schema di realizzazione dell'invenzione.

## Descrizione dettagliata di una possibile realizzazione dell'invenzione.

La Figura 1 mostra uno schema di una possibile realizzazione dell'invenzione. in tale Figura è riportata una singola n-esima porzione dell'intera struttura: infatti, data la generica simmetria sferica dello specchio primario, tale sezione può essere replicata n volte in modo da ottenere un Campo di Vista complessivo n-volte più ampio di quello osservato dalla porzione singola.

(1) Specchio Primario; (2) fuoco dello specchio primario; (3) specchio piano a sagoma romboidale (faccia); (4) camera ottica con correttore; (5) n-esima porzione del piano focale (n-esimo sotto piano focale)

La luce, incidente da angoli diversi sullo specchio primario (1), viene da questo focalizzata su uno specchio piano di forma romboidale (3), - posizionato in prossimità del fuoco del primario (2) -, che dirige il fascio ottico verso il sistema di camera ottica (4), in cui sono posizionati il correttore e l'insieme di lenti, necessari a produrre l'immagine della porzione dedicata di Campo di Vista nella corrispondente porzione di Piano Focale (5).

La forma romboidale dello specchio piano (3) posto in prossimità del fuoco (2) dello specchio primario (1), consente di introdurre  $n$  repliche, ciascuna inclinata in maniera opportuna e in modo continuo e contiguo alle repliche limitrofe, così da formare nell'insieme un riflettore prismatico sfaccettato a facce piane, che consente di conseguenza di ricoprire un Campo di Vista continuo di estensione pari ad  $n$  volte il campo interessato da una singola replica. La forma romboidale dello specchio piano diventa, per proiezione della camera, un'area di forma quadrata nel piano focale, delle dimensioni giuste per ospitare un elemento foto-rivelatore di immagine a singolo chip.

Nella configurazione riportata come esempio, una singola porzione generata da una singola faccia piana romboidale ricopre un Campo di Vista complessivo maggiore di 2.9 gradi quadri, con una risoluzione ottica migliore di 0.7 secondi d'arco su tutto il campo osservato.

La risoluzione ottica è fornita dal sistema di lenti della camera applicata (4), mentre il Campo di Vista è definito dalla Lunghezza Focale Effettiva del sistema Telescopio (cioè quella registrata al Piano Focale) e dall'area dell'immagine (proiezione della singola faccia romboidale (3) del solido sfaccettato), nella porzione corrispondente di Piano Focale (5)

Infatti, come conseguenza di una legge ottica elementare che viene ripresa per convenienza del lettore, la dimensione di scala in termini di campo di vista di un'area quadrata di lato  $l$  (espresso in micrometri), posta nel piano focale di un telescopio, corrisponde ad una porzione di Campo di Vista,  $s$  (espressa in secondi d'arco), che è definita dalla seguente relazione:

$$s = 206265 * l / *f^1$$

dove  $f$  è la Lunghezza Focale Effettiva del telescopio, espressa in metri.

Nell'esempio riportato, la Lunghezza Focale Effettiva al Piano Focale è di 2m, quindi un'area quadrata di  $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ , - una dimensione tipica dei pixels di moduli CCD commerciali -, corrisponde ad un Campo di Vista di  $1.54 \times 1.54$  secondi d'arco quadri.

Nel disegno riportato in Figura 1, ogni singola camera alloggia un modulo fotorivelatore CCD a singolo chip composto da 4kx4k pixels, che registra quindi l'immagine su un sotto Campo di Vista complessivo maggiore di 2.9 gradi quadri, - come riportato -, per un'area complessiva di 6x6 cm<sup>2</sup> del Piano Focale.

Un solido sfaccettato la cui superficie è formata anche da 16 facce (ciascuna delle quali insiste su un sotto campo maggiore di 2.9 gradi quadri) può essere applicato come ripartitore di campo, in luogo di una singola faccetta romboidale, consentendo perciò di ricoprire un campo di vista continuo complessivamente maggiore di 10 gradi quadri e fino a più di 45 gradi quadri, con una risoluzione ottica migliore di 0.7 secondi d'arco sull'intero campo osservato.

La continuità del campo è garantita in questo caso dalla contiguità delle facce speculari romboidali che nel loro insieme formano una superficie continua di un solido geometrico, mentre l'omogeneità della risoluzione ottica è garantita dal fatto che n repliche della stessa identica camera sono applicate, ciascuna delle quali fornisce esattamente quella qualità ottica sulla porzione di campo cui è dedicata.

Naturalmente quello riportato è uno dei possibili esempi di realizzazione, in quanto diverse configurazioni possono essere implementate sulla base del sistema di ripartizione del Campo di Vista applicato, selezionando la Lunghezza Focale Effettiva opportuna, le dimensioni del pixel del modulo fotorivelatore alloggiato nella singola camera, decidendo la forma e l'area delle facce speculari piane costituenti il ripartitore di campo, in modo da ricoprire in maniera continua un ampissimo Campo di Vista (sia in modo isometrico che non) con risoluzione ottica limitata dal 'seeing' atmosferico o migliore e caratterizzato dalla forma geometrica richiesta.

## Rivendicazioni

1. Telescopio, comprendente uno specchio primario sferico, con ampio Campo di Vista maggiore di dieci gradi quadri caratterizzato dal fatto di detto telescopio è provvisto di un sistema di ripartizione del Campo di Vista, che ne mantiene la continuità, posizionato in prossimità del fuoco dello specchio primario e che detto sistema di ripartizione del Campo di Vista è costituito da  $n$  superfici riflettenti piane e da un numero corrispondente di correttori posti dopo tale sistema di ripartizione.
2. Telescopio secondo la rivendicazione 1 caratterizzato dal fatto che dopo ogni correttore del suddetto sistema di ripartizione è posizionato un elemento sensibile in grado di raccogliere l'immagine di ogni singola  $n$ -esima porzione del Campo di Vista.
3. Telescopio secondo la rivendicazione 2 caratterizzato dal fatto che l'elemento sensibile di raccolta dell'immagine è posto esternamente all'apertura del telescopio.
4. Telescopio secondo la rivendicazione 3 caratterizzato dal fatto che l'elemento sensibile di raccolta dell'immagine di ogni singola  $n$ -esima porzione del Campo di Vista generata dalle  $n$  superfici riflettenti piane è una camera indipendente a singolo chip, che permette di registrare l'immagine della corrispondente porzione di Campo di Vista con la risoluzione ottica richiesta.
5. Telescopio secondo la rivendicazione 4 caratterizzato dal fatto che tutte le camere o un sottogruppo di esse sono identiche.
6. Telescopio secondo la rivendicazione 4 caratterizzato dal fatto che tutte le camere o un sottogruppo di esse sono diverse.

7. Telescopio secondo la rivendicazione 1 caratterizzato dal fatto che i correttori sono realizzati con elementi quasi auto allineanti.
  
8. Telescopio secondo la rivendicazione 3 caratterizzato dal fatto che i sistemi ottici costituenti i correttori sono dotati di telai di sostegno auto compensanti.
  
9. Telescopio secondo la rivendicazione 4 caratterizzato dal fatto che telecamere indipendenti a singolo chip sono applicate ad ogni n-esima porzione del Campo di Vista.
  
10. Telescopio secondo la rivendicazione 3 caratterizzato dal fatto che ogni camera modulare è fornita di un otturatore rapido, eventualmente dotato di un sistema preciso di temporizzazione.

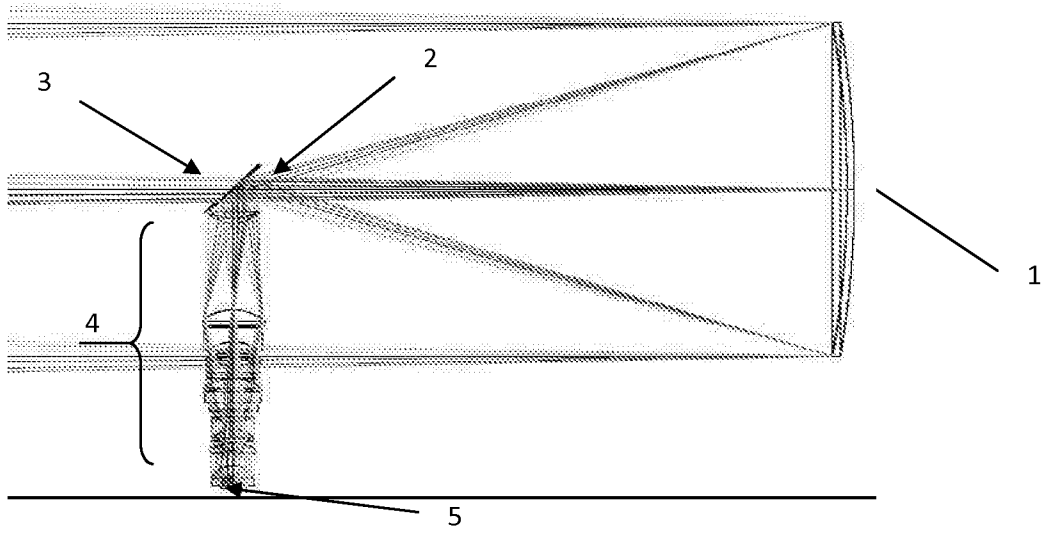


Fig. 1