

ASTRONOMIA

LA RIVISTA DELL'UNIONE ASTROFILI ITALIANI

gennaio - febbraio 2008

n. 1



Atti del XL Congresso UAI di Faenza

Fabrizio Liberati, Massimo Riccardi, Giorgio Bianciardi, Giorgio Perrotta,

Il telescopio spaziale *AstroSat-SkyWave* (UAI – AMSAT): studio di fattibilità dell'osservatorio FLAVIO

Sezione Strumentazione - UAI - f.liberati@optoservice.it, r.massimo@alice.it, g.bianciardi@unisi.it, gperrotta@alice.it

Abstract

The paper presents the first results of an on-going feasibility study of a spaceborne high performance, compact, multifunctional telescope that will constitute the primary payload of the first of a two-microsatellite system – dubbed *AstroSat-SkyWave* – jointly proposed by the Unione Astrofili Italiani (UAI) and the Radio Amateur Satellite Corporation -Italia (AMSAT-IT). The mission goals – photometry, imaging and spectrometry – are briefly summarized before discussing the dimensioning criteria which have led to a quite compact Houghton-Cassegrain-derived configuration with an aperture of 250 mm and a $f/3.6$. The three main modes of operation are then briefly presented along with some data on the selected CCD and on the ways for dynamically reconfiguring the focal plane based on a CCD-carrier plate. Initial considerations on key problems, mainly technology and materials-related, resulting from the feasibility study are also illustrated, among which the envisaged use of the telescope to perform as high accuracy star sensor for microsatellite attitude control. This feasibility study – while pointing to specific items requiring deeper analyses and trade-offs – confirms the feasibility of the Instrument for which contributions by Amateur Astronomers and Researchers, in selected hardware and software areas, are expected.

Introduzione

L'osservatorio FLAVIO (*FL*ying *A*mateur *V*isibile and *I*nfrared *O*bservatory) costituisce il *payload* del primo microsatellite del progetto *AstroSat-SkyWave*. L'osservatorio, proposto dall'Unione Astrofili Italiani (UAI) e da dalla *Radio Amateur Satellite Corporation -Italia* (AMSAT-IT), si propone come uno strumento ambizioso e versatile ma compatto ed economico a disposizione di educatori, amatori e ricercatori.

FLAVIO ha tre funzioni principali:

- acquisire immagini del cielo con tempi di osservazione anche lunghi, sfruttando i benefici di una postazione esterna all'atmosfera terrestre e con la possibilità di osservare l'intera volta celeste;
- effettuare misure fotometriche, in almeno due bande spettrali (V & R), per la caratte-

rizzazione delle variazioni di luminosità di stelle, asteroidi e altri oggetti celesti, con una precisione minima, alle magnitudini che verranno studiate, di 5/1000.

- acquisire informazioni sullo spettro irradiato da stelle.

Tutte le osservazioni saranno effettuate nel visibile e nel vicino infrarosso, da 400 a 1900 nm, permettendo di raccogliere la zona spettrale di massima emissione anche di stelle relativamente fredde (sino a 3000 K).

Scopo principale è fornire agli educatori uno strumento potente e unico per la didattica e la divulgazione dell'astronomia.

Criteri di dimensionamento

Il microsatellite ha dimensioni complessive non eccedenti 350×350×600 mm. Tenendo conto degli spazi necessari per le parti meccaniche di fissaggio e sostegno, l'ingombro massimo ha determinato una pupilla di ingresso di 250 mm. La scelta della distanza focale equivalente del telescopio è frutto di un compromesso tra campo di vista totale ed istantaneo, risoluzione, luminosità e compatibilità con il sensore. Quest'ultimo è il *Fairchild Imaging 3041*, già qualificato per applicazioni spaziali, costituito da 2048 pixel × 2048 pixel di 15 μ m di *pitch*, per una superficie totale di 30.72 mm × 30.72 mm. Per rispettare criteri di dimensionamento, risoluzione e di campo di vista (maggiore possibile), è stata scelta per la focale il valore di 900 mm: il campo di vista risulta $2^\circ \times 2^\circ$. Grazie all'assenza di assorbimenti, *scattering* e perturbazioni di fronte d'onda dovute all'atmosfera terrestre, alla sensibilità della telecamera ulteriormente esaltata dal fatto di essere raffreddata per conduzione verso una parete fredda del satellite, alla possibilità di integrare e mediare acquisizioni su tempi lunghi, ci si aspetta di riuscire a rivelare corpi celesti di magnitudine intorno alla 22 (nella banda R) in modalità 'telescopio'. In modalità 'fotometria' si mira ad ottenere una sensibilità che consenta di misurare le caratteristiche tempo-variabili, alla precisione di almeno 5/1000 di magnitudine, di stelle e altri astri da magnitudine 14 a magnitudine 18. Il parametro che sembrerebbe penalizzato dalle scelte fatte è la risoluzione; questa è strettamente legata alle dimensioni dei rivelatori, ma comunque è limitata dalle

microoscillazioni del satellite. Ogni pixel sottende un angolo di 3.4 secondi di arco, ovvero 16.7 μ rad.

Il dimensionamento effettuato rende la risoluzione ed il contrasto delle immagini che si otterranno dal telescopio compatibili con la grandezza dei pixel. La massima frequenza spaziale risolvibile dalla CCD, frequenza di Nyquist [1], è pari a 33.33 coppie di linee al millimetro che, con la focale scelta, corrisponde ad una risoluzione di 30 coppie di linee a *mmrad*. A questa frequenza, l'MTF ideale per un sistema ottico privo di aberrazioni e di imperfezioni costruttive così dimensionato è pari a circa 0.80 [2], che garantisce un ottimo contrasto anche nel caso di osservazione di oggetti estesi quali la superficie lunare o terrestre.

Schema ottico del telescopio

Per contenere una focale di 900 mm in una lunghezza di 300 mm circa, si impone uno schema di tipo completamente riflessivo o misto riflessivo rifrattivo. Noi abbiamo cercato di utilizzare uno schema misto che consentisse di correggere le aberrazioni su un campo angolare ampio senza far uso di superfici asferiche. Questa scelta consente vantaggi di economia e facilità di costruzione, migliore finitura per le superfici ottiche e facilità di test dei singoli componenti. L'estensione della banda spettrale da raccogliere induce a concentrare la potenza ottica negli elementi riflessivi, intrinsecamente acromatici, lasciando una potenza trascurabile in quelli rifrattivi, utilizzati di fatto per la sola correzione delle aberrazioni monocromatiche.

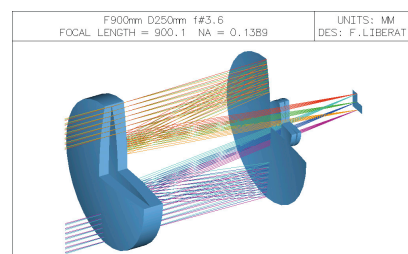


Figura 1. Sezione parziale dello schema ottico del telescopio in assonometria. Sono tracciati per diverse altezze di incidenza sulla pupilla di ingresso una serie di raggi tangenziali (o meridionali) con le tre inclinazioni relative al centro e ai bordi superiore ed inferiore dell'immagine limitata dalla dimensione della CCD.

Lo schema ottico che ne deriva si può definire un *Houghton-Cassegrain* modificato: oltre agli specchi primario e secondario, sono presenti una prima coppia di lenti correttive esterne, con il compito principale di ridurre l'aberrazione sferica dello specchio primario, e una seconda coppia di lenti correttive tra il secondario e il piano focale, con il compito principale di ridurre le aberrazioni extra assiali. Grazie alla bassissima potenza degli elementi rifrattivi, si è potuto utilizzare uno stesso tipo di vetro per tutte le quattro lenti in quanto queste non procurano cromatismo. Si è scelto un *crown* dalle caratteristiche di facile lavorabilità, buona resilienza, minima probabilità di presenza di inclusioni e bolle, basso costo. Le lenti correttive esterne hanno anche funzione di protezione e stabilizzazione termica.

La superficie posteriore del primo gruppo di lenti correttive è utilizzata come specchio secondario, con gli evidenti benefici di costruzione e di prestazioni derivanti dall'assenza delle razze di sostegno. La figura 1 riporta in assonometria la sezione parziale dello schema ottico.

Il progetto tiene conto dell'intenzione di costruire i componenti artigianalmente, senza ricorrere ad officine ottiche specializzate. Allo scopo si sono evitate superfici molto curve: tutti i raggi di curvatura sono lunghi per evitare criticità di costruzione e di posizionamento e ridurre il costo di realizzazione. I raggi di curvatura leggermente diversi sono stati accomunati a uno stesso valore per minimizzare il numero di attrezzature necessarie alla costruzione. Le prime due lenti sono poggiate tra loro sulla parte esterna smerigliata senza interposizione di distanziatori, riducendo il numero di possibili sorgenti di errori.

Il progetto delle schermature, tuttora in corso, insieme ad un adeguato disegno delle superfici interne del telescopio e a trattamenti antiriflettenti a larga banda, mira a ridurre ad intensità minime la *straylight* che raggiungerà i sensori.

Cambio della configurazione di utilizzo

Allo stato attuale del progetto si stanno valutando diverse alternative per ottenere il cambiamento di configurazione, tra le quali una basata su un movimento traslazionale di una slitta porta-CCD ed una basata su movimenti rotazionali. Secondo quest'ultima alternativa realizzativa il cambiamento di configurazione avviene facendo ruotare una piastra su cui sono sistemati due CCD identici, ma a cui perviene luce filtrata in diverse lunghezze d'onda, sino a portarli sull'asse del sistema ottico. La rotazione avviene attorno a

un asse parallelo all'asse del telescopio ma scostato da esso di 70 mm.

I due CCD sono del tipo *full transfer* e *front-illuminated*. La superficie utile dei CCD è funzionalmente utilizzata in modo tale che una percentuale, generalmente la zona periferica del CCD, sia dedicata alla funzione di misura della variazione istantanea del puntamento dell'asse ottico in tre dimensioni per confronto tra le immagini teoriche di stelle note – da un catalogo di stelle – e le immagini effettive delle stelle proiettate sul piano focale. Utilizzare il telescopio per la misura dell'assetto istantaneo del satellite consente di ottenere prestazioni elevate evitando il ricorso all'impiego di un costoso sensore stellare dedicato. La determinazione 'fine' dell'assetto del satellite viene poi perfezionata con altre misure ottenute con sensori d'assetto meno precisi, particolarmente utili durante l'esecuzione di altre modalità operative del nanosatellite.

Nel caso di utilizzo come spettrometro, invece, la luce proveniente dalla stella di cui si vuole ottenere lo spettro di emissione viene selezionata da un piccolo foro (*pin hole*) praticato sul piano focale con la funzione di filtro spaziale. Quando viene posizionato lungo l'asse ottico, il foro scopre alla luce proveniente dalla stella il cammino attraverso lo spettrometro.

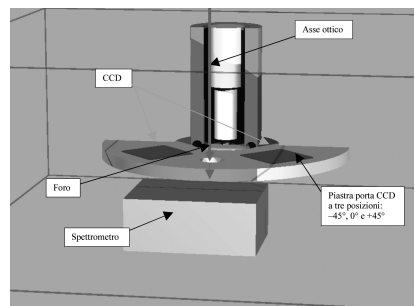


Figura 2. Vista della zona del piano focale di FLAVIO con il meccanismo per il cambio di configurazione che permette la rotazione della piastra su cui sono alloggiati le CCD ed il foro per la funzione di spettrometro.

La figura 2 mostra la zona del piano focale con FLAVIO configurato in modalità di spettrometro.

Il telescopio

Il progetto di un sistema ottico funzionante in ambiente spaziale deve tener conto di una serie di precauzioni e limitazioni. Solo per citare alcuni problemi, basta ricordare che la struttura deve resistere senza deformazioni permanenti alle sollecitazioni dovute al lancio; che si possono utilizzare solo vetri che non tendono ad opacizzare se sottoposti alle radiazioni presenti al di fuori dell'at-

mosfera; che la presenza di gradienti termici rischia di compromettere la qualità delle immagini acquisite. Alcuni requisiti, come robustezza e leggerezza, buona conduzione termica e necessità di isolamento, sono antitetici. Per questi motivi lo studio del telescopio, specialmente della parte termica e meccanica, dei materiali, ma anche del sistema di schermatura da abbagliamenti indesiderati, è di fondamentale importanza ed è tuttora in corso.

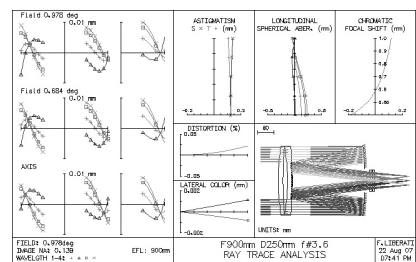


Figura 3. Prestazioni del sistema ottico. Nella colonna di sinistra sono riportati per tre angoli di vista corrispondenti al centro dell'immagine (*axis*), ad una zona intermedia e al bordo dell'immagine, la quota di intersezione sul piano focale dei raggi tracciati in funzione dell'altezza di incidenza sulla pupilla; il tracciamento è effettuato a 4 lunghezze d'onda significative, mentre la zona centrale in cui il grafico è interrotto è quella che corrisponde alla presenza dell'ostruzione dovuta allo specchio secondario. Negli altri riquadri sono riportate alcune aberrazioni e la sezione dello schema ottico.

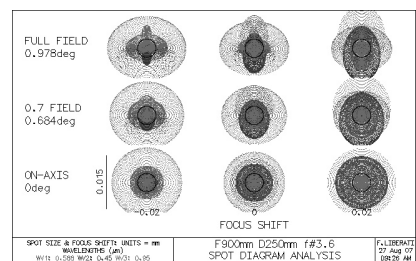


Figura 4. Spot diagram per i tre angoli di vista nella posizione di miglior fuoco e con uno spostamento fuori fuoco di $\pm 20 \mu\text{m}$. Il tracciamento è effettuato alle lunghezze d'onda 450, 587.56 e 950 nm mentre la scala è di $15 \mu\text{m}$ e corrisponde alle dimensioni di un pixel. Viene riportato per confronto il diametro del disco di Airy al primo minimo per la lunghezza d'onda 587.56 nm (riga "d" di emissione dell'elio).

Le principali prestazioni del sistema ottico progettato sono riassunte nella figura 3. Dai diagrammi di sinistra si vede che le aberrazioni sono dell'ordine della dimensione del pixel e che non variano in maniera significativa su tutta la superficie dell'immagine. La figura 4 riporta gli *spot diagrams* confrontati con le dimensioni dei pixel ed il diametro del disco di Airy. In virtù delle aberrazioni contenute, l'MTF si mantiene elevata e praticamen-

te uniforme su tutto il campo di vista del telescopio, come mostra la figura 5, fornendo un contrasto elevato e costante su tutta l'inquadratura.

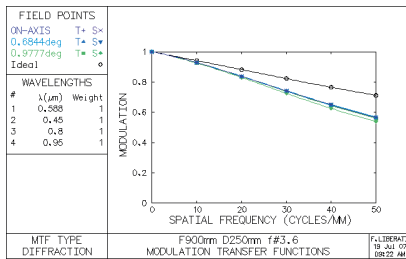


Figura 5. Modulation Transfer Function (MTF) in funzione della frequenza spaziale sul piano focale. La curva nera si riferisce al sistema ideale con le stesse caratteristiche di distanza focale, apertura e banda spettrale, mentre le curve colorate si riferiscono al sistema progettato e sono relative a diverse zone della CCD.

Tabella 1. Caratteristiche principali del telescopio.

Diametro utile	250 mm
Distanza focale equivalente	900 mm
f#	3.6
Numero di elementi	2 riflettivi, 4 rifrattivi
Ostruzione	45% lineare (20% di superficie)
T#	4
Banda spettrale	da 400 a 1900 nm
MTF @ frequenza di Nyquist (33.33 lp/mm)	70%
Massa delle lenti	5.5 kg

Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche principali del sistema ottico del telescopio.

Lo spettrometro

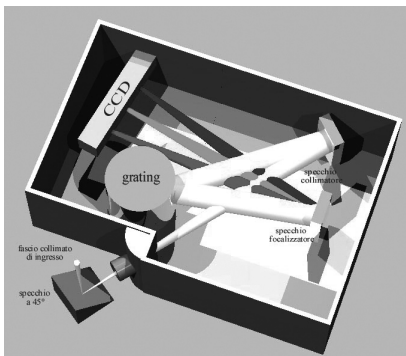


Figura 6. Componenti ottiche che costituiscono lo spettrometro.

Una volta individuata una stella ritenuta di interesse durante l'osservazione, per ottenerne lo spettro di emissione occorre orientare l'assetto del telescopio sino a portarne l'immagine esattamente al cen-

tro della CCD. Quindi si ruota la piastra tramite il meccanismo di cambiamento di configurazione per far assumere al foro la posizione precedentemente occupata dai pixel centrali della CCD. In questa condizione l'immagine della stella selezionata cade all'interno del foro e la relativa energia può essere analizzata dallo spettrometro posto immediatamente dietro e allineato per questa condizione di funzionamento.

Lo spettrometro è costituito da un reticolo di diffrazione, da alcuni elementi ottici di manipolazione dell'energia raccolta e da una CCD lineare di 2000 pixel. La Figura 6 mostra una vista dell'interno di un tipico mini-spettrometro commerciale che, seguendo l'approccio COTS (*Commercial-Off-The-Shelf*) oggi molto seguito per le piccole missioni scientifiche, si pensa di utilizzare per realizzare questa funzionalità. La figura 6 illustra bene lo sfruttamento del volume interno per realizzare in modo compatto i percorsi ottici tra i vari componenti dello spettrometro. Inoltre, per ridurre l'ingombro nella direzione dell'asse longitudinale del telescopio, un primo specchio posto a 45° subito sotto il foro riflette il fascio di luce in modo da permettere uno sviluppo del cammino ottico nel piano ortogonale all'asse ottico. La banda spettrale analizzata, la cui larghezza si estende da 400 a 1900 nm, viene campionata alla risoluzione nominale di 0.3 nm/pixel.

Il radiometro

La funzione di radiometro si ottiene ruotando la piastra sino ad allineare lungo l'asse ottico la seconda CCD. Anche in questo caso la banda spettrale va da 400 a 1900 nm.

L'elettronica

La componente elettronica del telescopio, in via di definizione, ha un'architettura multifunzionale ed è fisicamente distribuita in vari sottosistemi. Più precisamente:

- la funzione elaborazione dei segnali generati dai CCD per la misura dell'assetto istantaneo dell'asse ottico, è realizzata e gestita nel sottosistema Controllo d'Assetto del microsatellite;
- il controllo termico di tutto il telescopio, sia come elaborazione dei dati sensoriali che come pilotaggio degli elementi attivi di Controllo Termico, è effettuato anch'esso dal computer di bordo che gestisce la maggior parte dei *software* 'eseguibili';
- la gestione dei dati telemetrici e dei comandi di configurazione e attivazione

delle modalità operative del sottosistema 'telescopio' è a carico del computer di bordo, che a sua volta si avvale del canale radio bidirezionale in UHF tra il nanosatellite e terra durante i periodi di mutua visibilità;

- la lettura, la formattazione, le operazioni di media sui dati, di filtraggio digitale ed eventualmente di compressione dei dati generati dai CCD nei tre modi operativi è effettuata in modo decentrato da parte di una elettronica parzialmente integrata con i CCD ma comunque facente logicamente parte del sottosistema 'telescopio'

- La memorizzazione temporanea dei dati è, invece, a carico di una memoria di massa, dell'ordine di 4 Gbit, che a sua volta è gestita dal computer di bordo;

- il *downloading* dei dati scientifici memorizzati, è anch'esso gestito dal computer di bordo indipendentemente dalla operatività del telescopio.

Sono previste ridondanze.

La valutazione di 4 Gbit per la memoria di massa tiene conto delle stime iniziali sui tempi di osservazione previsti per gli esperimenti, e degli intervalli di tempo utili per scaricare le memorie stesse durante i passaggi del nanosatellite in visibilità della / delle stazioni di terra. La capacità della memoria potrebbe tuttavia aumentare, in funzione delle richieste di accesso all'osservatorio FLAVIO da parte di utilizzatori anche non nazionali.

Conclusioni

I risultati del progetto preliminare dell'osservatorio FLAVIO sono positivi e pongono aspettative interessanti per lo sviluppo di una piattaforma di costo accessibile e disponibile ad un gran numero di utenti a vario livello. Sono allo studio accorgimenti atti a garantire l'ingegnerizzazione dello strumento ed il mantenimento delle prestazioni teoricamente attese.

Bibliografia

- [1] Holst G.C., *CCD arrays cameras and displays*, SPIE - International Society for Optical Engineering, 1998.
- [2] Smith W.J., *Modern Optical Engineering*, McGraw-Hill, New York, 2000.
- [3] Grocott S.C.O., *Exploring the Mysteries of the Cosmos on the MOST Microsatellite Mission*. Proc. 18th AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, UT, USA, 11-14 agosto 2003.