

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

**SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA**

**CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE**

Classe: LM-20

Sede di Forlì

TESI DI LAUREA

In Dinamica e controllo d'assetto LM

**SOFTWARE DI GESTIONE E PROVE AMBIENTALI DEL
SENSORE DI SOLE DEL MICROSATELLITE ALMASAT-EO**

CANDIDATO

Andrea Ubaldini

RELATORE

Prof. Paolo Tortora

CORRELATORE

Ing. Claudio Bianchi

Anno Accademico 2011/2012

Sessione I

INDICE DEI CONTENUTI

INDICE DEI CONTENUTI	iii
INDICE DELLE FIGURE	v
INDICE DELLE TABELLE.....	vii
ELENCO DEGLI ACRONIMI	viii
1 INTRODUZIONE	9
2 I SENSORI DI SOLE NELLA DETERMINAZIONE DELL'ASSETTO DI UN SATELLITE	11
2.1 IL PROBLEMA DELLA DETERMINAZIONE D'ASSETTO	11
2.2 I SENSORI	13
3 IL SENSORE DI SOLE DI ALMASAT-EO	15
3.1 IL SATELLITE ALMASat-EO	15
3.2 IL SENSORE DI SOLE A BORDO DI ALMASAT-EO	18
3.2.1 STRUTTURA MECCANICA DEL SENSORE DI SOLE	18
3.2.2 LA COMPONENTE ELETTRONICA ANALOGICA	20
3.2.3 LA COMPONENTE ELETTRONICA DIGITALE	24
3.2.3.1 STADIO DI ALIMENTAZIONE	25
3.2.3.2 MICROCONTROLLORE	32
3.2.3.3 STADI DI TRASLAZIONE DEI SEGNALI.....	33
4 SOFTWARE DI GESTIONE DEL SENSORE DI SOLE.....	34
4.1 DESCRIZIONE DEL SOFTWARE	35
4.1.1 SOFTWARE DI BASSO LIVELLO	37
4.1.1.1 CONFIGURAZIONE DELL'INTERFACCIA SPI	37
4.1.1.2 FASE D'ACQUISIZIONE	38
4.1.2 SOFTWARE D'ALTO LIVELLO	41
4.1.2.1 FASE D'ELABORAZIONE	41
4.1.2.2 FAULT DETECTION	41
4.1.2.3 FUSIONE DEI DATI	42
4.1.2.4 CALCOLO DELLE COORDINATE DEL PUNTO LUCE.....	44
4.1.2.5 CALCOLO DI AZIMUTH E COELEVAZIONE DEL SOLE	45
4.1.2.6 IL VERSORE FINALE	46
4.2 PROCEDURA DI CALIBRAZIONE.....	47
4.2.1 DISASSAMENTO OTTICO DELLALENTE	47

4.2.2	CORREZIONE DISTORSIONI OBIETTIVO	52
4.3	RISULTATI DELLA CAMPAGNA DI TEST	57
5	PROVE AMBIENTALI.....	68
5.1	TEST TERMICI.....	68
5.2	TEST VIBRAZIONALI	74
5.2.1	SWEEP IN FREQUENZA.....	76
5.2.2	VIBRAZIONI RANDOM.....	78
5.2.3	SHOCK.....	80
5.2.4	CONCLUSIONI	83
6	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	84
7	BIBLIOGRAFIA.....	86

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Raffigurazione di due terne cartesiane con diverso orientamento.....	11
Figura 2 - Struttura del microsatellite ALMASat-EO.....	16
Figura 3 - Sensore di Sole del microsatellite ALMASat-EO.....	18
Figura 4 - struttura meccanica del sensore.....	19
Figura 5 - Lente Fujinon FE185C057HA-1.....	19
Figura 6 - PCB della componente analogica.....	20
Figura 7 - Schema a blocchi della componente analogica del sensore.....	21
Figura 8 - Sensore PSD Hamamatsu S5991-01.....	22
Figura 9 - Struttura di un PSD tipo Pin-CushionType.....	22
Figura 10 - PCB della componente digitale del sensore in fase di debug.....	24
Figura 11 - Schema a blocchi della componente digitale del sensore.....	25
Figura 12 - Schema a blocchi dello stadio di alimentazione.....	26
Figura 13 - Tensione a 28V in ingresso al convertitore di tensione DC-DC.....	29
Figura 14 - tensione a 5.28 V in uscita dal convertitore di tensione DC-DC.....	30
Figura 15 - tensione a 5.28 V in uscita dal convertitore switching di tensione DC-DC.....	30
Figura 16 - Tensione a 5V in uscita dal regolatore di tensione lineare per la componente analogica.....	31
Figura 17 - Tensione a 3.3V in uscita dal regolatore di tensione lineare per la componente digitale.....	32
Figura 18 - Microprocessore Cortex-M3.....	32
Figura 19 - Schema a blocchi del funzionamento del software di gestione del sensore di Sole.....	36
Figura 20 - Comunicazione su bus seriale tra dispositivo master e slave.....	37
Figura 21 - Timing di trasmissione dell'ADC (timing a 32 bit).....	40
Figura 22 Rappresentazione degli angoli caratteristici Az CoEL.....	45
Figura 23 - Piattaforma di calibrazione.....	48
Figura 24 - Estrapolazione della circonferenza dall'immagine acquisita del singolo spot luminoso.....	50
Figura 25 - Disposizione delle acquisizioni alla fine di una prova.....	51
Figura 26 - Disposizione delle acquisizioni nelle diverse prove a diversi angoli di coelevazione.....	52
Figura 27 - Polinomiale di interpolazione.....	55
Figura 28 - Andamento della deviazione standard dell'errore con il grado del polinomio.....	56
Figura 29 - tabella dei coefficienti.....	56
Figura 30 - Il sensore collegato al JTAG, l'interfaccia seriale e i quattro potenziometri.....	57
Figura 31 - Acquisizioni delle tensioni dai quattro canali di un ADC.....	58
Figura 32 - Andamento della differenza tra le medie.....	59
Figura 33 - Andamento della tensione nel primo canale.....	60
Figura 34 - Andamento della tensione nel secondo canale.....	61
Figura 35 - Andamento della tensione nel terzo canale.....	61

Figura 36 - Andamento della tensione nel quarto canale	62
Figura 37 - Andamento delle acquisizioni dopo l'elaborazione.....	63
Figura 38 - Valori finali mediati ogni 50 acquisizioni	64
Figura 39 – Evoluzione della posizione del punto luce e rappresentazione sulla scheda PSD	65
Figura 40 – Ingrandimento illustrante la distribuzione dei punti luce	65
Figura 41 - Componenti del vettore finale	66
Figura 42 – Le tre componenti del vettore	67
Figura 43 - Camera Termo-vuoto (UNIBO)	68
Figura 44 – Andamento della tensione sul primo canale alle diverse temperature	69
Figura 45 - Andamento della tensione sul secondo canale alle diverse temperature	69
Figura 46 - Andamento della tensione sul terzo canale alle diverse temperature	70
Figura 47 - Andamento della tensione sul quarto canale alle diverse temperature	70
Figura 48 - Variazione del valore medio del voltaggio sui singoli canali al variare della temperatura	71
Figura 49 - Variazione della deviazione standard del segnale sui singoli canali al variare della temperatura	72
Figura 50 - Variazione del valore medio delle tre componenti del vettore al variare della temperatura	73
Figura 51 - Schema di uno shaker elettromagnetico.....	74
Figura 52 - Struttura sottoposta ai test vibrazionali.....	75
Figura 53 - Installazione dell'ottica sulla piastra di interfaccia con lo shaker	76
Figura 54 - Prova di sweep delle frequenze. La misura sullo shaker (in alto) e la risposta dell'ottica (in basso)	77
Figura 55 - Profilo PSD di VEGA	79
Figura 56 - Prova PSD effettuata dallo shaker	79
Figura 57 - Risposta dell'ottica alla prova PSD	80
Figura 58 - Profilo SRS di VEGA.....	81
Figura 59 - Prova di shock con misurazione sullo shaker (in verde) e sull'ottica (in rosso).....	82
Figura 60 - Risposta in frequenza alla prova di shock	82

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Potenze elettriche relative al convertitore principale DC-DC.....	27
Tabella 2 - Potenze elettriche relative ai regolatori lineari collegati al convertitore DC-DC.....	27
Tabella 3 – Potenze dei due regolatori lineari.....	28
Tabella 4 - tabella dei rendimenti	28
Tabella 5 - Configurazione dell'interfaccia SPI	38
Tabella 6 - Bit di controllo dell'ADC.....	39
Tabella 7 - Logica di funzionamento.....	43
Tabella 8 - Caratteristiche dei segnali	58
Tabella 9 - Caratteristiche dei segnali	63
Tabella 10 - Caratteristiche dei segnali	64
Tabella 11 - Variazione con la temperatura	71
Tabella 12 - Variazione della deviazione standard con la temperatura	72
Tabella 13 - Variazione delle componenti del vettore con la temperature	73
Tabella 14 - PSD di VEGA - Qualifica.....	78
Tabella 15 - caratteristiche dei segnali al procedere dell'elaborazione	84

ELENCO DEGLI ACRONIMI

ADC	Analog-to-Digital Converter
ADCS	Attitude Determination & Control System
ALMASat-EO	Alma Mater Satellite-Earth Observation
CAN	Controller Area Network
DC	Direct Current
ELV	European Launch Vehicle
ESA	European Space Agency
LEO	Low Earth Orbit
MIUR	Ministero dell'Università e della Ricerca
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PCB	Printed Circuit Board
PSD	Power Spectral Density
PSD	Position Sensitive Detector
SRS	Shock Response Spectrum
STD	Standard Deviation
VEGA	Vettore Europeo di Generazione Avanzata
VERTA	VEGA Research and Technology Accompaniment

1 INTRODUZIONE

Nel presente elaborato è descritto il lavoro di tesi finalizzato alla realizzazione del software di gestione del sensore di Sole del satellite ALMASat-EO, microsatellite in fase di progettazione presso il Laboratorio di Microsatelliti e Microsistemi Spaziali della Seconda Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna, sede di Forlì.

A partire dalla funzione del sensore di Sole nella determinazione d'assetto del satellite si approfondirà in seguito con una descrizione delle sue componenti hardware. L'argomento principale dell'elaborato sarà la descrizione degli algoritmi usati dal software di gestione e la catena di acquisizione che porta ad ottenere il dato ultimo della direzione della radiazione luminosa del sole rispetto al satellite. Infine verranno descritte le tecniche di calibrazione per correggere errori di montaggio e deformazioni ottiche introdotte dalla lente.

L'ultima parte riguarderà la descrizione delle prove ambientali rappresentate da un test allo shaker per la struttura metallica e la lente e prove in camera termo vuoto per la parte elettronica.

2 I SENSORI DI SOLE NELLA DETERMINAZIONE DELL'ASSETTO DI UN SATELLITE

2.1 IL PROBLEMA DELLA DETERMINAZIONE D'ASSETTO

Determinare l'assetto di un satellite in orbita significa conoscerne l'orientamento rispetto ad una terna d'assi di riferimento.

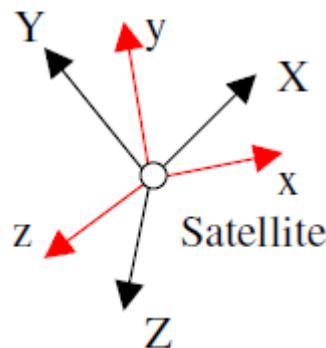


Figura 1 - Rappresentazione di due terne cartesiane con diverso orientamento

Data una terna X, Y, Z di riferimento e una terna x, y, z che rappresenta il sistema d'assi principali del satellite, gli assi di quest'ultima possono essere rappresentati nel sistema di riferimento inerziale di interesse attraverso i rispettivi coseni direttori u, v, w .

Si può quindi definire una matrice di nove componenti, chiamata matrice d'assetto, nella quale ogni riga rappresenta le tre componenti del versore su ogni asse del sistema di riferimento.

$$A = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{bmatrix}$$

La matrice A è rappresentata da nove elementi, ma di questi solo tre sono indipendenti data la proprietà di ortonormalità di cui gode la matrice d'assetto espressa nella forma $A^T = A^{-1}$.

Dato quindi un generico vettore colonna \vec{a} nel sistema di riferimento inerziale le sue componenti espresse nel sistema di riferimento assi corpo saranno $\vec{a}_{xyz} = A \cdot \vec{a}_{XYZ}$.

Esistono inoltre altri modi di rappresentare l'assetto attraverso la matrice A , ad esempio usando la parametrizzazione attraverso l'asse ed angolo di Eulero, basata sul principio che ogni rotazione di un corpo rigido in uno spazio tridimensionale è equivalente a una rotazione intorno a un singolo asse, detto asse d'istantanea rotazione o di Eulero, la quale utilizza solamente quattro elementi rispetto ai nove appena visti.

Un problema con questo tipo di rappresentazione è dovuto però alla presenza di una singolarità nel caso che l'angolo di Eulero sia di 180° , nel qual caso non si è in grado di calcolare l'asse di Eulero.

Una diversa rappresentazione si ha attraverso l'uso dei quaternioni, cioè vettori algebrici di quattro elementi, che permettono di superare le singolarità che possono verificarsi con la rappresentazione precedente, avendo inoltre il vantaggio di ridurre il numero di operazione per rappresentare rotazioni in successione, anche se non permettono una immediata visualizzazione fisica della rotazione.

Un'ultima parametrizzazione è quella attraverso gli angoli di Eulero che si basa sul fatto che qualsiasi rotazione tra due terne può essere espressa attraverso tre rotazioni rispetto ai tre assi.

La determinazione d'assetto può essere di tipo deterministico quando le informazioni sull'orientazione del satellite sono fornite esclusivamente da sensori presenti a bordo considerando ogni istante di tempo come scollegato dal precedente, mentre i metodi ricorsivi si avvalgono di filtri di stima per poter ricostruire l'assetto di un satellite facendo uso di un vettore di stato derivante dalle letture dei sensori (osservazioni).

I dati dei sensori si rendono indispensabili per integrare le equazioni che descrivono la dinamica del satellite a causa degli inevitabili errori dovuti ad imprecisioni nel calcolo della matrice d'inerzia o delle condizioni iniziali o per la difficoltà di modellizzare le coppie esterne di disturbo.

2.2 I SENSORI

I sensori sono quindi una componente fondamentale del sistema di determinazione d'assetto e ne esistono differenti tipologie a seconda del tipo di satellite e dalla missione che deve effettuare.

I Sensori d'orizzonte : Per un satellite in orbita bassa la Terra, grazie alla sua luminosità e calore rappresenta un eccellente riferimento rispetto al quale determinare l'orientamento di un satellite.

Generalmente questi sensori hanno precisioni nell'ordine di 0.5-1 gradi.

Sensori di campo magnetico : i magnetometri sono utilizzati nella determinazione d'assetto e sono in grado di fornire informazioni sia di tipo scalare come l'intensità del campo magnetico, sia di tipo vettoriale come la sua direzione. Sono sensori relativamente economici, semplici e leggeri, ma non hanno una grande precisione a causa della difficoltà di modellizzare il campo magnetico terrestre ed inoltre a causa dell'attenuazione dello stesso sono utilizzabili solo in orbita bassa.

Sensori di stelle : questi sensori comparano un' immagine dello spazio profondo acquisita a bordo del satellite con una presente in un catalogo presente in memoria. Dalla corrispondenza tra le due mappe stellari il sensore è in grado di stabilire l'assetto del satellite. Sono tra i sensori più precisi ma anche i più costosi e pesanti, richiedendo più potenza e maggiore capacità di calcolo ai sistemi di bordo.

I sensori di Sole sono tra le tipologie di sensori di assetto quella più utilizzata a causa di diversi fattori tra cui semplicità funzionale, semplicità costruttiva e costo rispetto ad altre tipologia.

I sensori di sole si possono dividere in due macrofamiglie :

- **Sensori analogici** la cui uscita è una funzione continua rispetto all'angolo di vista del Sole, generalmente sono composti da stadi di condizionamento del segnale proveniente dal sensore attivo montato a bordo.
- **Sensori digitali** che forniscono un'uscita discreta ad una certa frequenza funzione dell'angolo di vista del Sole. L'elettronica di bordo è basata generalmente su un microprocessore o microcontrollore e comunicano con il bus del satellite attraverso interfacce di tipo digitale [1].

3 IL SENSORE DI SOLE DI ALMASAT-EO

3.1 IL SATELLITE ALMASat-EO

ALMASat-EO è un microsatellite concepito e prodotto congiuntamente da ALMASpace S.r.l. ed il Laboratorio di Microsatelliti e Microsistemi Spaziali dell'Università di Bologna, progetto approvato e finanziato dal 2007 dal Ministero dell'Università e della Ricerca.

I microsatelliti sono satelliti classificati nella fascia di peso tra i 10 e i 100 kg, la cui diffusione è dovuta principalmente ai grandi progressi nel campo della miniaturizzazione dell'elettronica degli ultimi 20 anni che ha permesso la realizzazione di piattaforme satellitari più piccole e a costi ridotti rispetto ai satelliti convenzionali.

Lo scopo di ALMASat-EO è quello di effettuare immagini della Terra tramite una camera multispettrale.

La struttura di ALMASat-EO è divisa in due parti principali.

Una prima parte ospitante i sistemi propri del satellite, atti a garantirne il corretto funzionamento in orbita, è costruita con un approccio modulare.

Si basa infatti su sei cassette a base quadrata di lato 30 cm ed altezza variabile, in base al sottosistema contenuto. I cassette sono realizzati in lega di alluminio 6061 e impilati l'uno sull'altro. La configurazione modulare di questa parte permette di aggiungere o sostituire più componenti di un singolo sistema senza dover riprogettare o intervenire sull'intera struttura, oltre a permettere in fase di progettazione di sviluppare e testare i singoli elementi in maniera indipendente.

La seconda parte del satellite è invece il *payload module* costituito da una struttura in materiale ibrido alluminio-fibra di carbonio honeycomb, che

oltre ad ospitare il payload costituito dalla camera multispettrale, ospita anche il serbatoio dell'azoto per il sistema di micropropulsione.

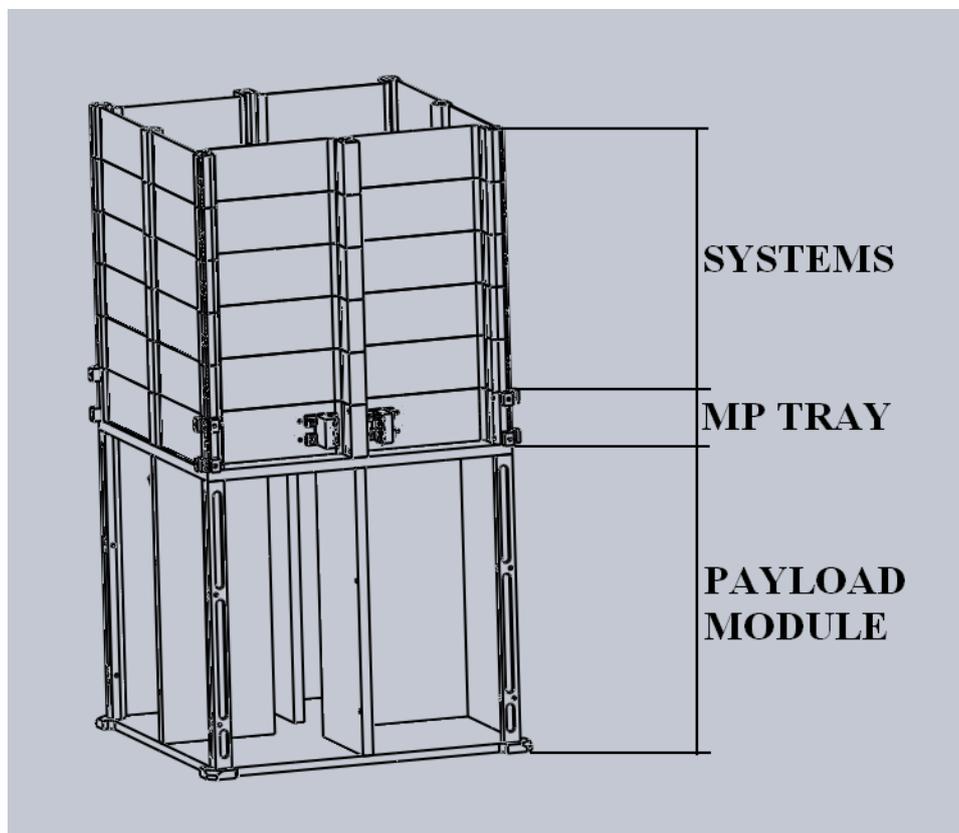


Figura 2 - Struttura del microsatellite ALMASat-EO

Per effettuare la sua missione al satellite è richiesta una precisione di puntamento di 0.1° e la capacità di effettuare puntamento off-nadir di 10° in ogni direzione

Il sistema di attuatori dedicati al controllo d'assetto e comandate dall'attitude, determination and control system (ACDS) è costituito da ruote di momento, ruote di reazione, bobine magnetiche e da un sistema di propulsione a gas.

Per la determinazione di assetto ALMASat-EO è equipaggiato magnetometri, un sensore di terra, un GPS e il sensore di Sole descritto più accuratamente nel paragrafo seguente ed argomento di questo elaborato.

L'orbita di ALMASat-EO sarà un'orbita bassa eliosincrona, con inclinazione di 98° e semiasse maggiore di 6978 km (circa 600 km di quota, in orbita circolare), la quale permette di sorvolare ogni dato punto della superficie terrestre sempre alla stessa ora solare locale, avendo sempre la stessa illuminazione solare sulla superficie terrestre ad ogni rivoluzione, cosa che aiuta l'osservazione avendo condizioni di luce invariate ad ogni orbita.

Il satellite sarà lanciato dal vettore VEGA (Veicolo Europeo di Generazione Avanzata), sviluppato in collaborazione dall'Agenzia Spaziale Italiana e l'Agenzia Spaziale Europea, con l'Italia come maggior finanziatore del programma con una quota del 65%, all'interno del programma VERTA (VEga Research and Technology Accompaniment) volto a convincere i potenziali utenti della validità del vettore. Il razzo è progettato per il trasporto in orbita di piccoli carichi, tra i 300 e i 2000 kg, in orbite basse, ed è in grado di sganciare due o più satelliti su orbite diverse.

3.2 IL SENSORE DI SOLE A BORDO DI ALMASAT-EO



Figura 3 - Sensore di Sole del microsatellite ALMASat-EO

Il sensore di Sole progettato per Almasat-EO è costituito da tre componenti principali : una parte meccanica ospitante l'elettronica e su cui è montata la lente fish-eye, una componente elettronica analogica e una digitale separate e installate su due diverse PCB.

3.2.1 STRUTTURA MECCANICA DEL SENSORE DI SOLE

La meccanica del sensore si compone di un case metallico in alluminio anticorrosivo 6000 nella cui parte superiore è installato il PCB della parte elettronica digitale e all'interno della base si trova il PCB della componente elettronica analogica. Il case presenta un foro nella parte centrale per l'alloggiamento dell'ottica.



Figura 4 - struttura meccanica del sensore

Sulla sommità si trova l'ottica che è una lente fish-eye della Fujinon con FOV di 185 gradi con lunghezza focale di 1.8 mm. Il grande campo visivo della lente ha permesso di utilizzare un singolo sensore per coprire l'intero emisfero superiore.

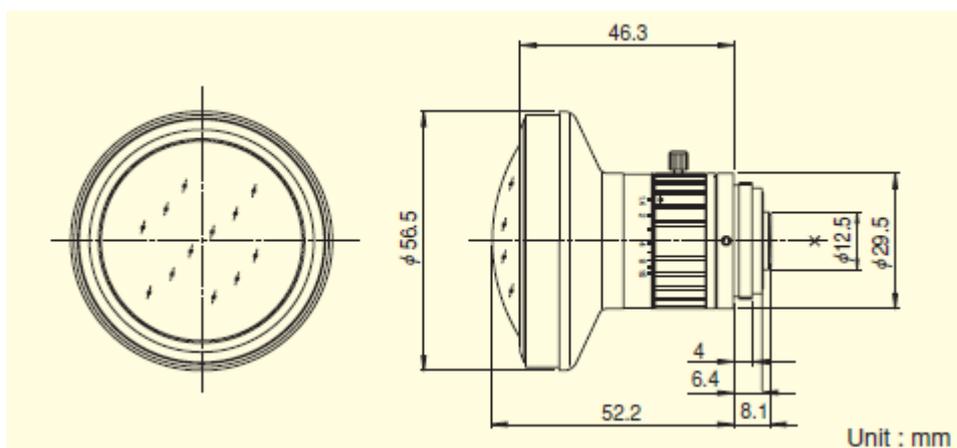


Figura 5 - Lente Fujinon FE185C057HA-1

Il sensore sarà installato internamente alla parte superiore del satellite lasciando solamente la lente a sporgere esternamente [3]

3.2.2 LA COMPONENTE ELETTRONICA ANALOGICA

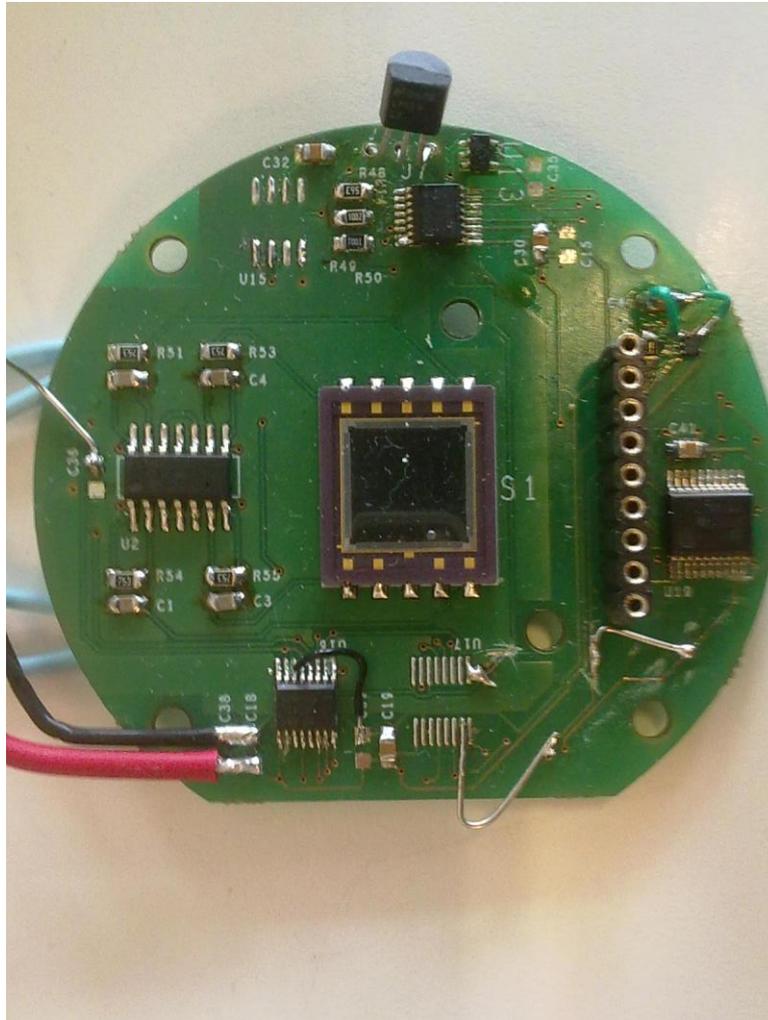


Figura 6 - PCB della componente analogica

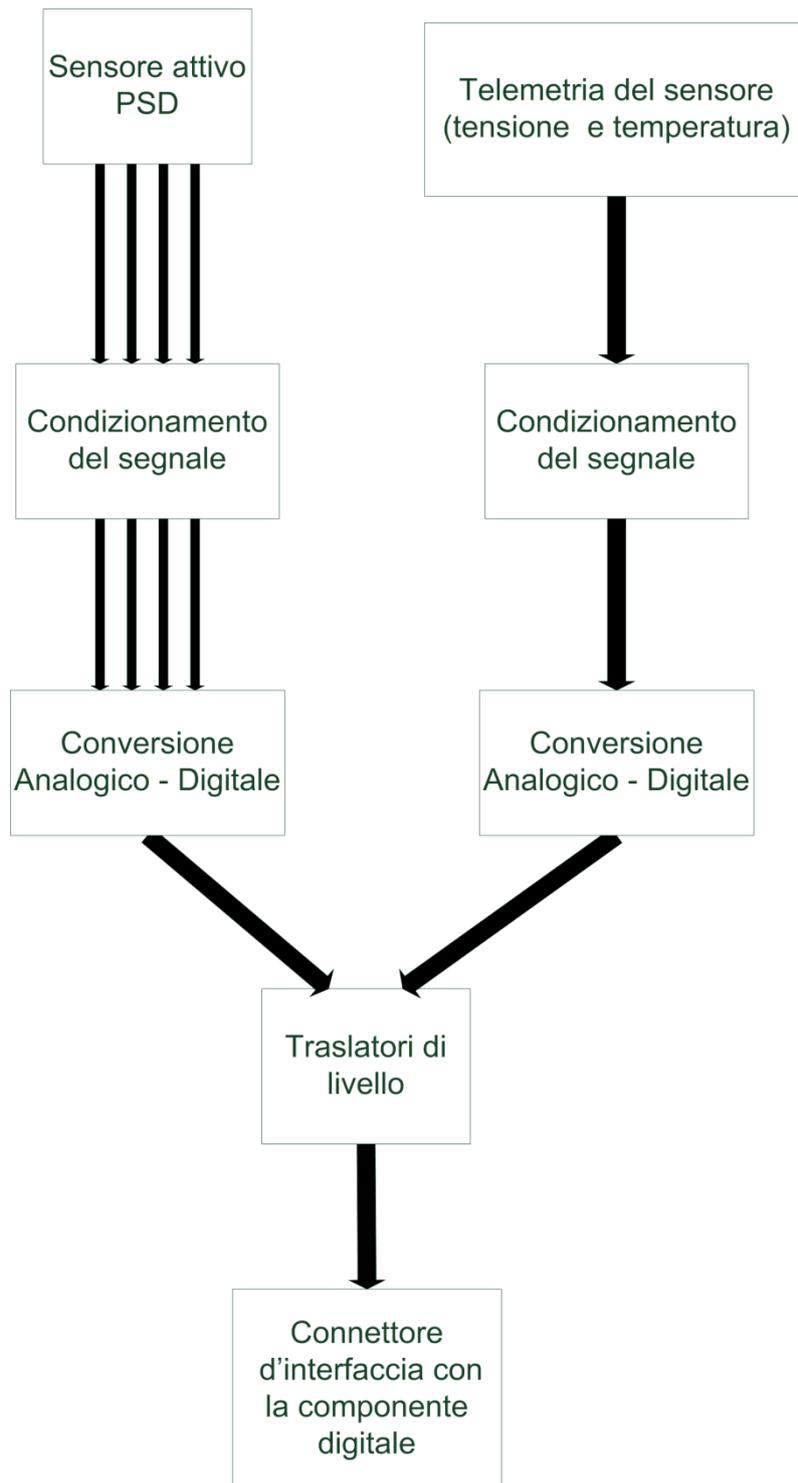


Figura 7 - Schema a blocchi della componente analogica del sensore

L'elemento principale della parte analogica è il sensore PSD (Position Sensing Detector) della Hamamatsu modello S5991 – 01 costituito da una superficie foto-sensibile al silicio di 9x9 mm.

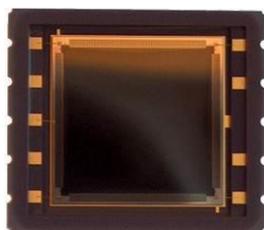


Figura 8 - Sensore PSD Hamamatsu S5991-01

La superficie del sensore PSD se illuminato da un punto luce, genera una corrente proporzionale all'intensità luminosa ed alla distanza del punto stesso dagli elettrodi. Il sensore PSD ha quattro elettrodi sistemati ai quattro spigoli del dispositivo (Pin-Cushion Type) .

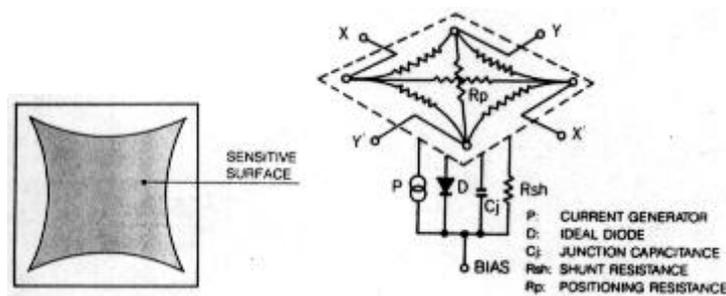


Figura 9 - Struttura di un PSD tipo Pin-CushionType

Il sensore PSD utilizzato è un sensore bidimensionale le cui formule per il calcolo delle coordinate della posizione di un punto luce incidente nella superficie sensibile sono le seguenti:

$$\frac{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = \frac{2x}{L}$$

$$\frac{(I_2 + I_4) - (I_1 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = \frac{2y}{L}$$

Dove L è il lato del sensore in mm, I sono le correnti uscenti dai quattro pin posti agli angoli e x ed y sono le due coordinate parallele ai lati del sensore, con origine degli assi nel suo centro espresse nella stessa unità di misura di L [4].

Le correnti in uscita vengono convertite in tensioni da un amplificatore operazionale che provvede anche a condizionare il segnale per portarlo nell'intervallo di valori di 0-5V compatibile con gli ingressi degli ADC.

Gli ADC convertono il segnale analogico in un dato digitale che verrà elaborato dal microcontrollore digitale, il modello utilizzato è il Texas Instruments ADS8341, un ADC a quattro canali, con una risoluzione di 16 bit con uscita seriale alimentata da una tensione di 5V [5].

Per avere un sistema di acquisizione robusto e ridondante ci sono installati due ADC responsabili della conversione del dato sulla posizione del punto luce, mentre un terzo acquisisce informazioni di telemetria su voltaggi e temperature.

Infine sono presenti due traslatori di livello per permettere la comunicazione tra le due PCB alimentate con differenti livelli di tensione (5V la parte analogica, 3.3V quella digitale).

3.2.3 LA COMPONENTE ELETTRONICA DIGITALE

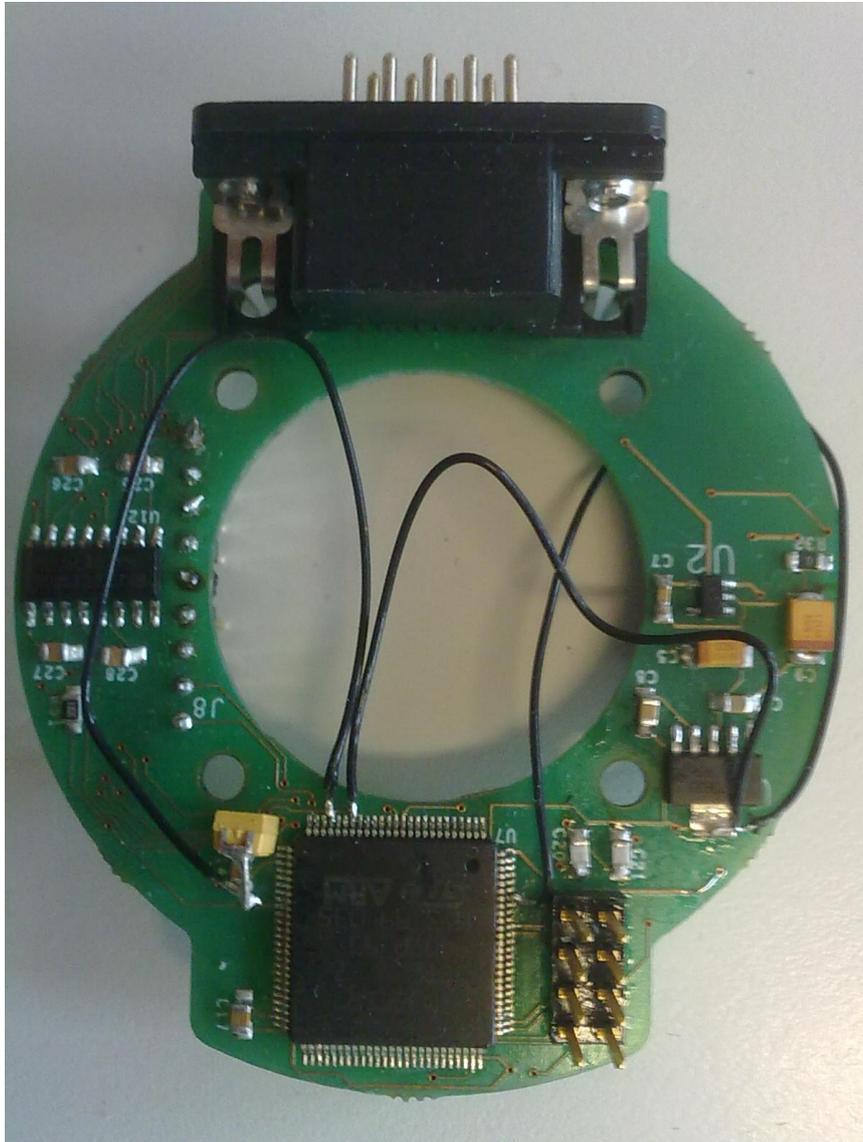


Figura 10 - PCB della componente digitale del sensore in fase di debug

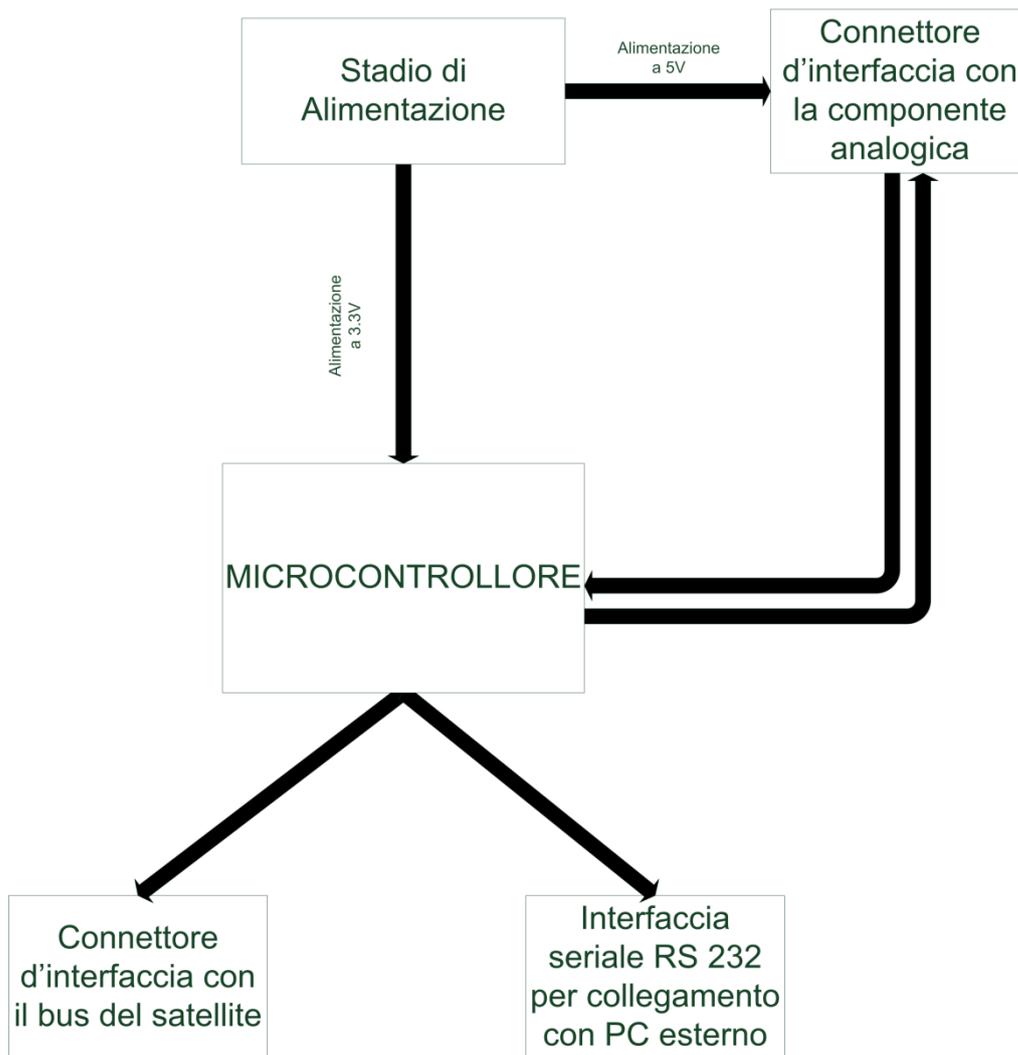


Figura 11 - Schema a blocchi della componente digitale del sensore

Il PCB della parte digitale è costituito principalmente da uno stadio d'alimentazione, tre stadi di traslazione di livelli logici e da un microcontrollore.

3.2.3.1 STADIO DI ALIMENTAZIONE

Lo stadio d'alimentazione ha il compito di stabilizzare l'alimentazione a 28V proveniente dal bus del satellite a tensioni di alimentazioni più basse relative alle componenti analogiche e digitali, rispettivamente di

5V e 3.3V.

Ciò si ottiene con un convertitore switching DC-DC e due regolatori lineari a bassa caduta di tensione.

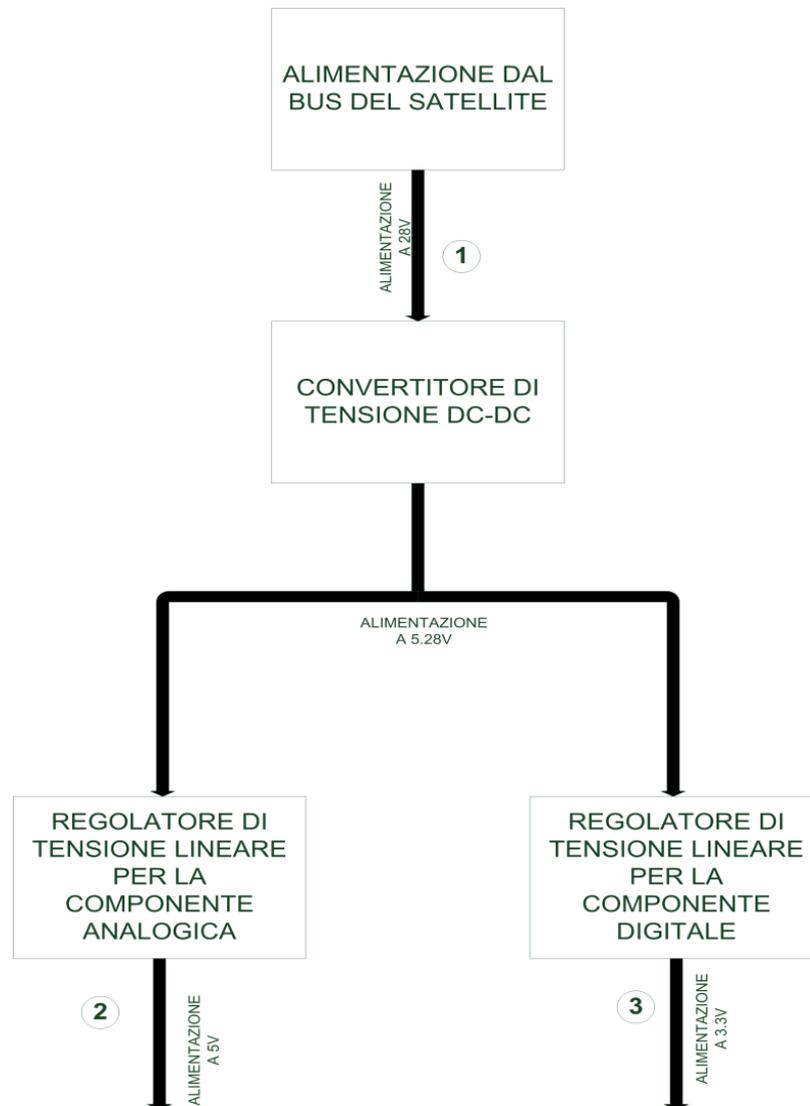


Figura 12 - Schema a blocchi dello stadio di alimentazione

Le potenze utilizzate dai vari stadi di alimentazione sono illustrate nella seguente tabella.

La Tabella 1 si riferisce alla potenza, ricavata nel punto 1 del grafico (Figura 12 - Schema a blocchi dello stadio di alimentazione), del convertitore DC-DC rispettivamente nella condizione a vuoto, e con

collegati il regolatore per la parte digitale e il regolatore per la parte analogica con un carico costituito da una resistenza equivalente di 72.8 Ω

	Corrente	Tensione	Potenza
Convertitore principale	0.280 mA	28 V	8 mW
Convertitore principale collegato al regolatore lineare per la componente analogica	17.2 mA	28 V	481 mW
Convertitore principale collegato al regolatore lineare per la componente digitale	12.45 mA	28 V	348.6 mW

Tabella 1 - Potenze elettriche relative al convertitore principale DC-DC

La Tabella 2 si riferisce invece alle potenze in uscita dagli stadi di regolazione rilevate nei punti 2 e 3 dello schema (Figura 11)

	Corrente	Tensione	Potenza
Uscita dal regolatore lineare per la componente analogica	66.1 mA	5 V	330.5 mW
Uscita dal regolatore lineare per la componente digitale	44.4 mA	3.3 V	146.5 mW

Tabella 2 - Potenze elettriche relative ai regolatori lineari collegati al convertitore DC-DC

Allo stato attuale le potenze assorbite e dissipate termicamente relative ai due rami di alimentazione (DC-DC switching con in cascata i regolatori lineari) sono illustrati nella tabella seguente

	Potenza
regolatore lineare per la componente analogica	151 mW
regolatore lineare per la componente digitale	202 mW

Tabella 3 – Potenze dei due regolatori lineari

Come ultimo dato ci sono i rendimenti della catena composta dal regolatore DC-DC e i regolatori lineari.

	Rendimento
Convertitore principale con regolatore lineare per la componente analogica	0.68
Convertitore principale con regolatore lineare per la componente digitale	0.41

Tabella 4 - tabella dei rendimenti

Di seguito sono illustrati i grafici che riprendono l'andamento delle tensioni nei vari stadi di alimentazione.

Il primo grafico (Figura 13 – Tensione a 28V in ingresso al convertitore di tensione DC-DC) illustra l'andamento della tensione d'ingresso al primo stadio di alimentazione del sensore di Sole. L'ampiezza tra i picchi della tensione in uscita all'alimentatore da banco usato per simulare il bus del satellite è di circa 23 mV.

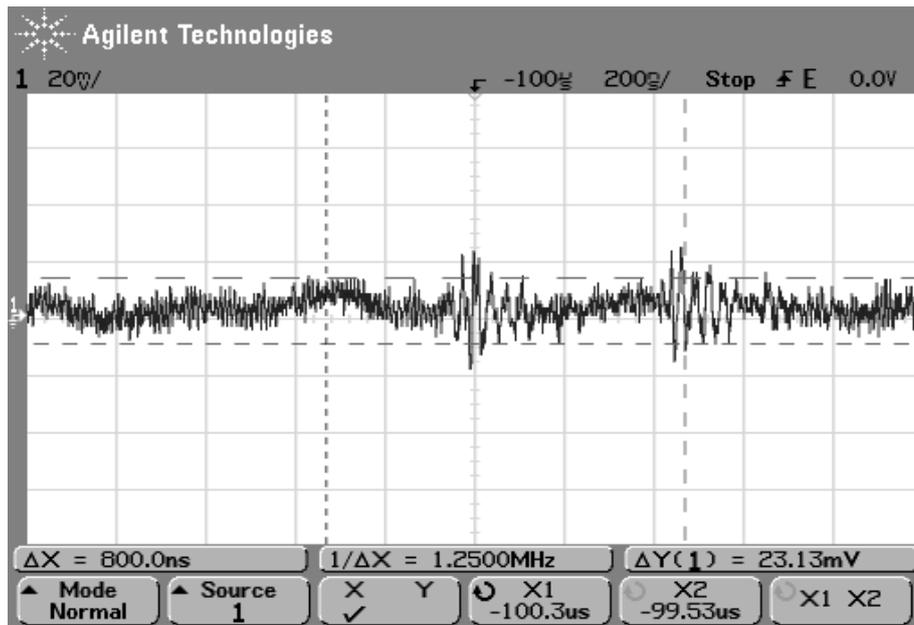


Figura 13 – Tensione a 28V in ingresso al convertitore di tensione DC-DC

In Figura 14 è mostrata la tensione a 5.28 V in uscita dal convertitore switching DC-DC del primo stadio in cui si rilevano picchi di ampiezza di 240mV con frequenza di 16 kHz . Questo è dovuto al sistema di stabilizzazione switching che ha come pregio quello di abbassare la tensione con dei buoni rendimenti ma introduce molto rumore a valle. Questo rumore elettronico e la frequenza dello stesso sono causati dall'oscillatore interno del sistema DC DC switching.

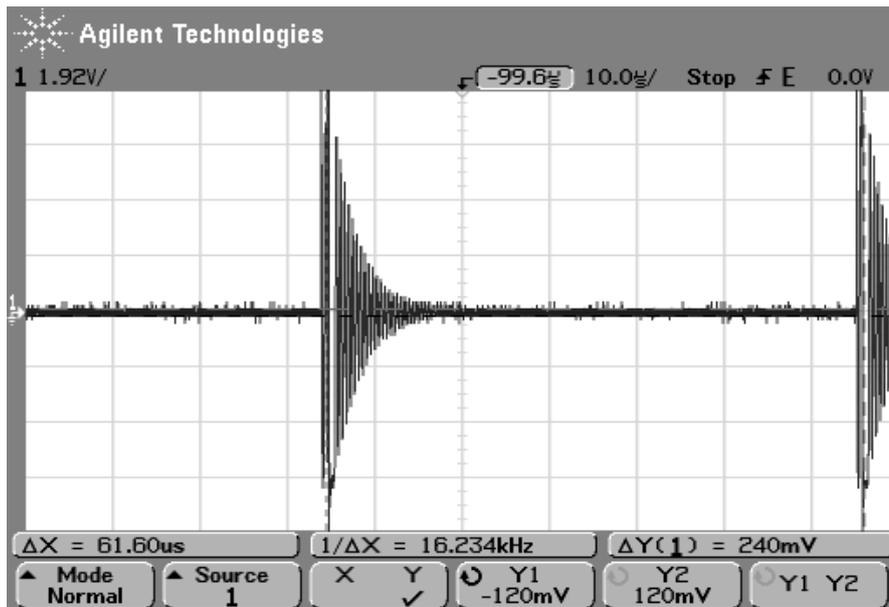


Figura 14 - tensione a 5.28 V in uscita dal convertitore di tensione DC-DC

Di seguito viene mostrato un ingrandimento della parte più stabile del segnale a 5.28 V che mostra un rumore nell'intorno del valor medio di ampiezza 13.7 mV.

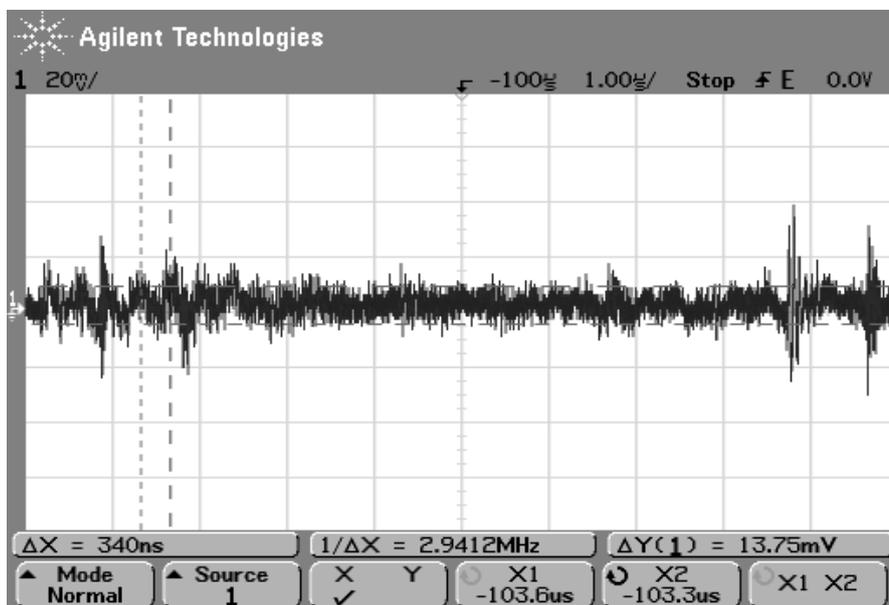


Figura 15 - tensione a 5.28 V in uscita dal convertitore switching di tensione DC-DC

Passando ai regolatori di tensione lineari viene visualizzata l'uscita a 5 V per l'alimentazione della componente analogica con evidenziato un ΔV di 12.5 mV. I convertitori DC-DC lineari sono molto meno prestanti in termini di rapporto tra ΔV (tra ingresso e uscita) e rendimento in potenza ma le uscite degli stadi sono molto pulite.

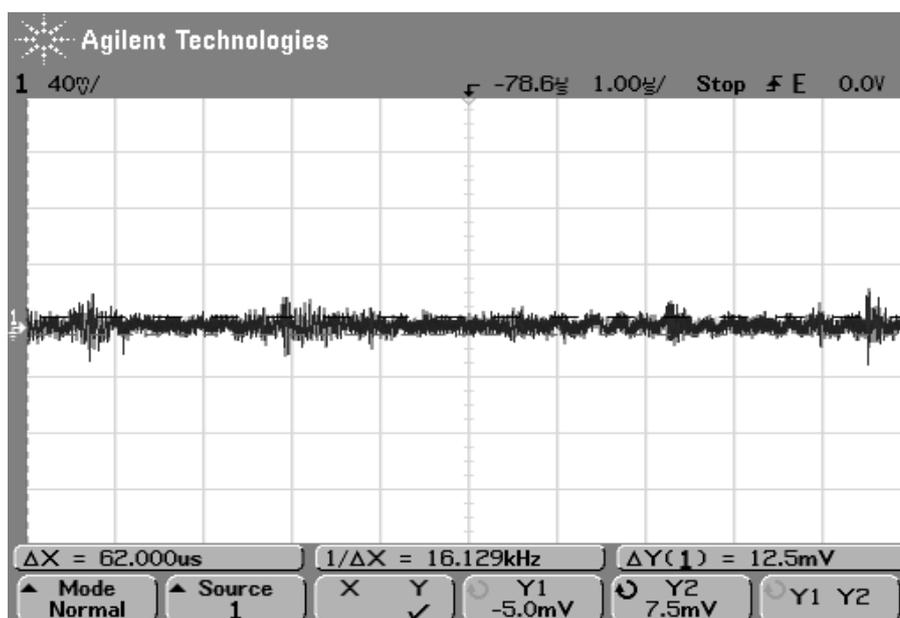


Figura 16 - Tensione a 5V in uscita dal regolatore di tensione lineare per la componente analogica

L'ultimo grafico (Figura 17) illustra la tensione all'uscita del regolatore di tensione lineare a 3.3V, e mostra un ΔV di 23mV intorno al valore medio.

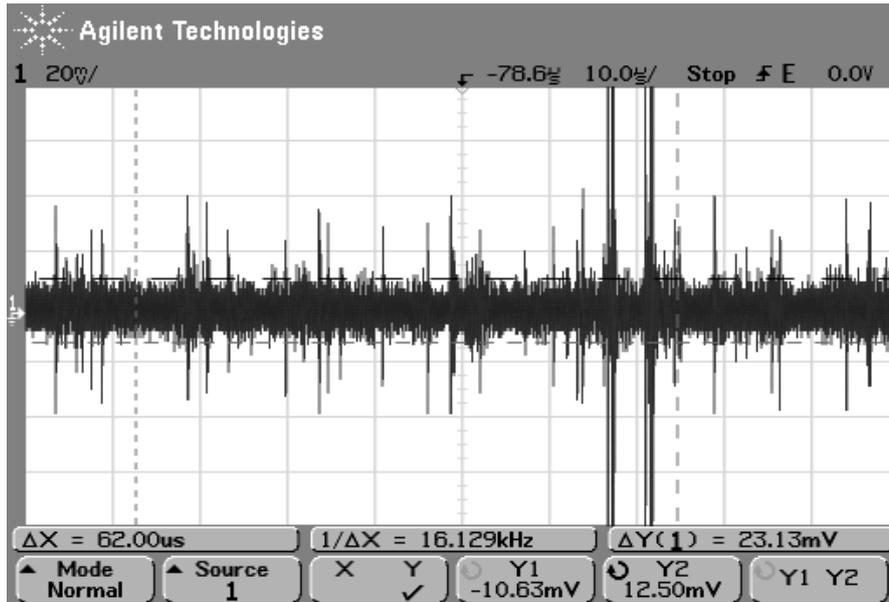


Figura 17 - Tensione a 3.3V in uscita dal regolatore di tensione lineare per la componente digitale

3.2.3.2 MICROCONTROLLORE

Il microcontrollore usato per il sensore di sole di ALMASat-EO è un STMicroelectronics STM32F107 basato su un processore ARM Cortex M3 a 32 bit operante ad una frequenza massima di 72 MHz [6].



Figura 18 - Microprocessore Cortex-M3

Il suo compito è di gestire l'intero sensore. Il microcontrollore acquisisce i dati dagli ADC, li elaborare e fornisce tramite le interfacce

di comunicazione il dato finale sulla direzione del sole rispetto al satellite al sistema di determinazione di assetto di ALMASat-EO.

3.2.3.3 STADI DI TRASLAZIONE DEI SEGNALI

Per comunicare con il bus dati principale del satellite e quindi con il sistema di controllo e determinazione d'assetto si utilizza l'interfaccia CAN, per questo sono presenti due CAN transceiver con velocità di trasmissione massima di 1 Mbps, il cui compito è di traslare i livelli logici in uscita dal microcontrollore in un canale differenziale compatibile con lo standard CAN.

Un altro traslatore di livello si utilizza invece per l'interfaccia con il PC in fase di debug, per adattare i livelli logici in uscita dal microcontrollore (0-3.3V) ai livelli logici compatibile con lo standard RS232 di un PC (+/-12V) [2].

4 SOFTWARE DI GESTIONE DEL SENSORE DI SOLE

Il software di gestione del sensore di Sole è stato scritto in codice ANSI C usando IAR Embedded Workbench, un software di tipo IDE (Integrated Development Environment) che permette, attraverso un programmatore JTAG, la programmazione direttamente sul microcontrollore.

Il software è diviso in una parte iniziale in cui sono stati realizzati i driver di basso livello per la comunicazione con il sensore e una parte ad alto livello responsabile per l'elaborazione dei dati ricevuti alla fine di dare in uscita tre valori corrispondenti alle componenti di un vettore illustrante la posizione del Sole rispetto al sistema di coordinate del sensore PSD.

4.1 DESCRIZIONE DEL SOFTWARE

Il software si sviluppa nelle seguenti fasi

- Acquisizione
- Elaborazione
- Fault Detection
- Fusione dei dati
- Calcolo del punto luce e correzione dell'errore di offset
- Calcolo di azimuth e coelevazione e correzione della deformazione introdotta dall'ottica
- Scrittura del versore di posizione del Sole nella terna assi corpo

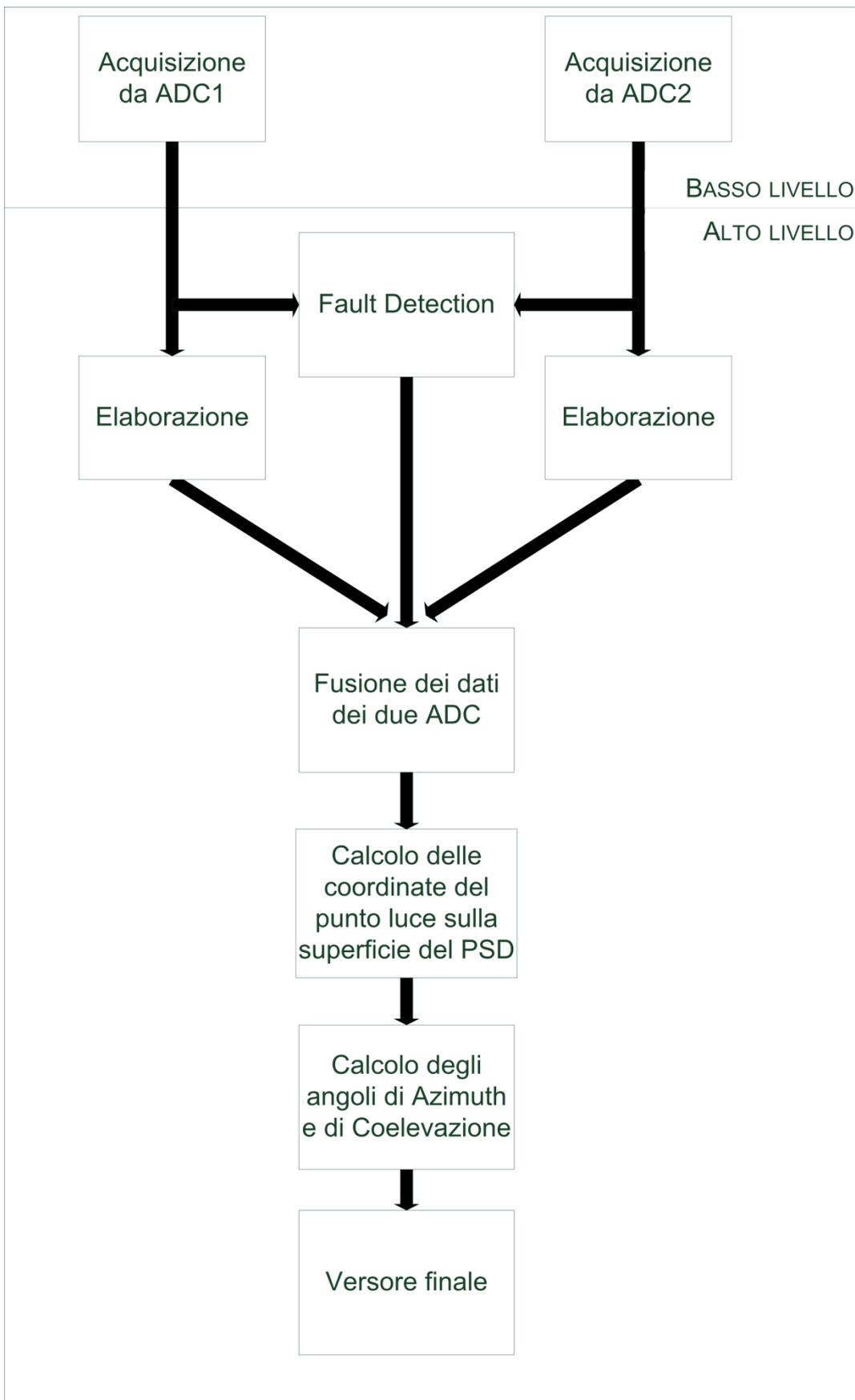


Figura 19 - Schema a blocchi del funzionamento del software di gestione del sensore di Sole

4.1.1 SOFTWARE DI BASSO LIVELLO

La parte di basso livello del software si occupa della configurazione dell'interfaccia seriale per comunicare con gli ADC, della ricezione dei dati e della loro gestione prima di inviarli alla fase di elaborazione di alto livello.

4.1.1.1 CONFIGURAZIONE DELL'INTERFACCIA SPI

La prima parte del software si occupa della configurazione dell'interfaccia SPI con cui gli ADC comunicano con il microcontrollore.

Tramite il bus SPI (Serial Peripheral Interface) si ha una comunicazione di tipo seriale (le informazioni sono comunicate una di seguito all'altra e vengono ricevute in maniera sequenziale nello stesso ordine in cui sono state trasmesse), sincrona e “*full-duplex*” (la comunicazione può avvenire in contemporanea nelle due direzioni).

La sua architettura si basa su un dispositivo “master”, che decide quando iniziare la comunicazione e che controlla la trasmissione, uno o più dispositivi slave, e quattro segnali:

- Clock
- MOSI (Master Output Slave Input)
- MISO (Master Input Slave Output)
- SS (Slave Select)

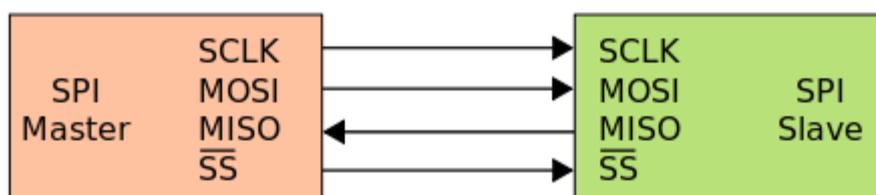


Figura 20 - Comunicazione su bus seriale tra dispositivo master e slave

In dettaglio il segnale di clock è fornito dal master e serve a sincronizzare il dispositivo trasmittente con il ricevente oltre a determinare la velocità di trasmissione.

Il MISO è la linea su cui il dispositivo master riceve il dato seriale dal dispositivo slave.

Il MOSI è la linea su cui il dispositivo slave riceve il dato seriale dal dispositivo master

Lo SS, “*Slave Select*”, è il segnale che dato dal master, in presenza di più slave, determina con quale dispositivo comunicare.

La configurazione adottata è riportata nella seguente tabella

Direzione	Full-duplex
Data-size	8 bit
CPOL	0
CPHA	1
Baud Rate	1MHz
Primo bit	MSB

Tabella 5 - Configurazione dell'interfaccia SPI

4.1.1.2 FASE D'ACQUISIZIONE

La fase d'acquisizione consiste nel ricevere i dati provenienti dagli ADC.

Come scritto in precedenza la comunicazione digitale tra il microcontrollore e l'ADC avviene a pacchetti di 8 bit. Per avere una

conversione completa di un singolo valore in ingresso ad un canale sono necessari quattro pacchetti seriali per un totale di 32 cicli di clock.

I primi otto bit del protocollo sono bit di controllo per inizializzare l'ADC nella modalità desiderata e per avviare la conversione vera e propria.

BIT	Nome	Descrizione
7	S	bit d'inizio, indica l'inizio della stringa di controllo e deve essere alto perché gli ingressi al pin DIN non vengano ignorati
6 - 4	A2 - A0	Bit di selezione dei canali, controllano insieme al bit SGL/DIF su quali canali avverrà la trasmissione/ricezione
2	SGL/DIF	Bit di selezione Single-Ended/Differential, permette di scegliere se l'ingresso è di tipo differenziale o singolo
1 - 0	PD1 - PD0	Bit di selezione Power -Down, decidono se il dispositivo debba rimanere attivo tra una conversione e la successiva

Tabella 6 - Bit di controllo dell'ADC

Una volta che l'ADC ha ricevuto dal microcontrollore il byte di controllo, entra in modalità di acquisizione, e per i successivi 24 colpi di clock vengono trasmessi al microcontrollore i bit risultanti dal processo di conversione.

Alla fine del byte di controllo il bit BUSY va alto per un periodo di clock, dopo di che, entrato l'ADC in modalità acquisizione, i 16 bit che

compongono il segnale vengono inviati nei successivi 16 colpi di clock. Di conseguenza occorrono complessivamente 25 cicli di clock per ultimare la trasmissione. Poiché la comunicazione avviene a pacchetti di 8 bit sono quindi necessari 32 cicli di clock, con gli ultimi sette bit posti a zero [5].

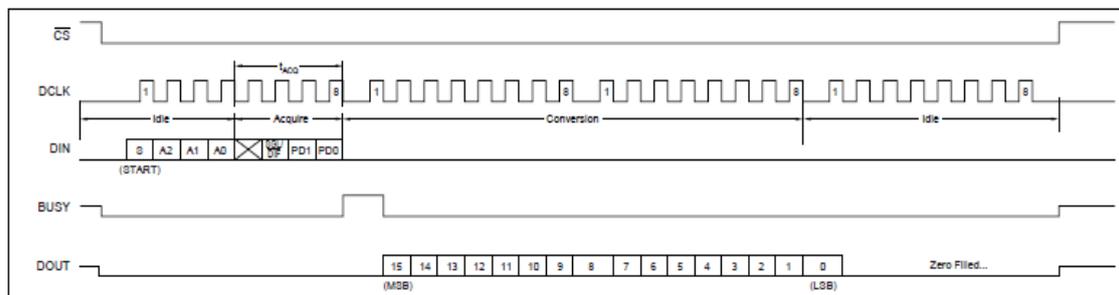


Figura 21 - Timing di trasmissione dell'ADC (timing a 32 bit)

La funzione “Select_ADC_and_canale_send_read” si occupa di effettuare la trasmissione di byte agli ADC. Questi byte possono essere byte di controllo o byte fittizi per poter ricevere il dato. Dopo la trasmissione del byte di controllo l'ADC si aspetta i successivi colpi di clock per poter trasmettere a sua volta il valore acquisito. Tramite il nostro microcontrollore il sistema usato per generare questi colpi di clock è la trasmissione di byte fittizi i quali non avranno nessun effetto sul dispositivo di ricezione se non quello di generare sul canale CLK il clock necessario alla trasmissione del valore da parte dell'ADC. Essendo il dato ricevuto con più trasmissioni, la funzione si occupa anche della ricostruzione del dato in un singolo valore e della sua conversione dal valore binario a quello decimale attraverso la formula

$$valore\ dec = valore\ bin * V_{ref} / 65536$$

V_{ref} è la tensione di riferimento dell'ADC di 5 Volts.

La funzione viene usata all'interno della funzione "Acquisizioniutili" . La funzione "Acquisizioniutili" restituisce un vettore con le varie acquisizioni ottenute per ogni canale di ogni ADC. Il numero di acquisizioni ritenuto ottimale è illustrato nel cap. 4.3

4.1.2 SOFTWARE D'ALTO LIVELLO

La parte del software di alto livello si occupa di elaborare i dati acquisiti tramite le funzioni che verranno illustrate in seguito, fino ad ottenere in uscita il risultato richiesto.

4.1.2.1 FASE D'ELABORAZIONE

La fase di elaborazione consiste nel trattamento dei dati ricevuti da ogni canale di ogni ADC per produrre i valori finali che saranno effettivamente utilizzati nel calcolo della posizione del punto luce sul sensore PSD

Essa consiste nell'omonima funzione "elaborazione".

A questa funzione entrano come ingresso le acquisizioni ottenute da ciascuno degli otto canali, (quattro per ogni ADC), e procede ad eliminare i dati con il valore più alto e quello più basso.

Il numero dei valori scelti per l'eliminazione dipende da una analisi dei dati che mostra come circa un terzo dei valori acquisiti siano oltre la deviazione standard (vedi cap. 4.3).

Una volta rimossi i minimi e i massimi si effettua la media dei valori rimanenti e il valore ottenuto per ognuno dei canali è l' output di questa funzione.

4.1.2.2 FAULT DETECTION

La fase di fault detection si occupa di verificare se il sensore si stia comportando nominalmente o se sono presenti eventuali anomalie in modo

da escludere dall'analisi finale i valori provenienti dai canali o dagli ADC ritenuti difettosi.

Nel dettaglio la funzione "Fault_detect_result" riceve in ingresso i valori in uscita dalla fase di acquisizione e identifica un problema ad un canale nel caso risulti:

- Tutti i valori acquisiti sono nulli
- Tutti i valori sono uguali
- Sono presenti valori oltre il range ammissibile dell'ADC

La presenza di tutti i valori nulli suppone infatti una avaria del canale in questione che non è più in grado di trasmettere i dati dell'ADC, o un avaria al sensore PSD, mentre la presenza di una serie di valori costanti fa presumere un avaria dell'ADC nella gestione di quel canale che porta a ricevere sempre lo stesso dato.

Finito il controllo la funzione restituisce quattro vettori dove nei primi due sono riportati i valori mediati dei quattro canali di ogni ADC mentre negli ultimi due sono riportati i canali in cui è stato riscontrato un problema.

Nel dettaglio i vettori "ADC1_Fail" e "ADC2_Fail" sono vettori di quattro elementi, in cui ogni elemento rappresenta lo stato operativo di un canale.

Se il canale è funzionante il valore è "0", se è guasto a causa di valori nulli "1", se per valori costanti "2", in caso di valori inammissibili "3".

4.1.2.3 FUSIONE DEI DATI

La fase di fusione dei dati consiste nell'integrazione dei dati provenienti dai due ADC in funzione del responso dell'analisi precedente.

I risultati della fault detection vengono quindi elaborati dalla funzione "Merge_valori_finali" che decide quali canali devono essere considerati e quali no nell'ottenimento del valore finale.

Le azioni intraprese dalla funzione vengono riassunte nella seguente tabella.

Canale ADC1	Canale ADC2	
0	0	Media i valori dei due canali
0	1	Usa il valore di ADC1
1	0	Usa il valore di ADC2
1	1	FAIL

Tabella 7 - Logica di funzionamento

La funzione quindi come illustrato provvede a mediare il risultato degli stessi canali dei due ADC o a ignorare uno dei due valori in caso venga registrato un problema.

La funzione restituisce anche un vettore chiamato “FLAG_SENSOR_FAIL” che illustra lo stato operativo del sensore.

Questo vettore è composto da tre elementi che possono valere rispettivamente “1” o “0” : i primi due illustrano se è presente un problema su uno o più canali di uno dei due ADC mentre il terzo raffigura lo stato complessivo del sensore, se funzionante o in avaria.

E’ infatti possibile che sebbene siano rilevati dei problemi su uno o più canali di entrambi gli ADC, il software sia ancora in grado, sfruttando i canali funzionanti rimanenti, di fornire i dati richiesti.

Le possibili configurazioni che può assumere il vettore sono illustrate di seguito

	ADC1	ADC2	Sensore
Gli ADC e il sensore, funzionano nominalmente	0	0	0
Esiste un avaria nel primo ADC ma il secondo funziona nominalmente	1	0	0
Esiste un avaria nel secondo ADC ma il primo funziona nominalmente	0	1	0
Esiste un avaria in entrambi gli ADC ma il sensore è ancora in grado di funzionare	1	1	0
Entrambi gli ADC sono in avaria e il sensore non è più in grado di funzionare	1	1	1

Nel caso di avaria completa del sensore il software termina con questa fase e non procede ulteriormente nel calcolo del punto luce.

La fault detection rimane comunque sempre attiva continuando a valutare le acquisizioni anche in presenza di un problema, permettendo così al sensore, nel caso si tratti di un avaria momentanea, di riprendere il suo corretto funzionamento.

4.1.2.4 CALCOLO DELLE COORDINATE DEL PUNTO LUCE

Per il calcolo della posizione del punto luce si utilizzano due funzioni :
 “Posizione_X_Punto_Luce” per la coordinata X e
 “Posizione_Y_Punto_Luce” per la coordinata Y.

Le due funzioni usano in ingresso il vettore di quattro elementi in uscita della fault detection e restituiscono, usando le formule già riportate nel

capitolo 4.2.2, i valori delle coordinate del punto luce sulla superficie del PSD [4]:

$$\frac{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = \frac{2x}{L} \qquad \frac{(I_2 + I_4) - (I_1 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = \frac{2y}{L}$$

Dove in questo caso I_1, I_2, I_3, I_4 sono i quattro elementi del vettore sopracitato.

4.1.2.5 CALCOLO DI AZIMUTH E COELEVAZIONE DEL SOLE

Gli angoli di azimuth e di coelevazione sono illustrati nella Figura 22, dove il centro del sistema di coordinate è il centro del PSD.

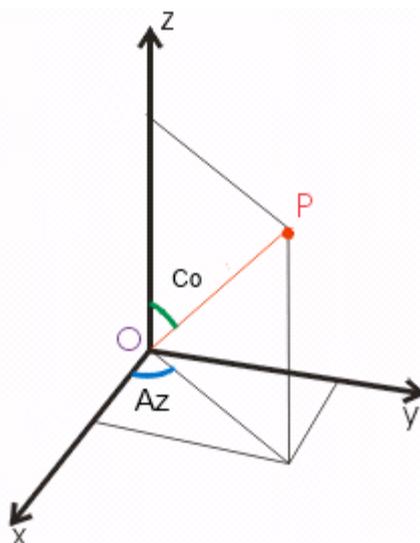


Figura 22 Rappresentazione degli angoli caratteristici Az CoEL

Per il calcolo dell'azimuth si usa la seguente formula

$$Az = atan2(Y, X)$$

La funzione atan2 è una variazione dell'arcotangente che restituisce un angolo, espresso in radianti su di un piano, compreso tra l'asse positivo delle X e un punto di coordinate (x,y), con segno positivo in caso di angolo antiorario o negativo se antiorario

Per quanto riguarda la coelevazione è stata utilizzata una curva polinomiale ricavata dal procedimento di calibrazione (vedi cap 5.3) che lega il modulo

della posizione del punto luce rispetto al centro del PSD con l'angolo di coelevazione espresso in gradi.

4.1.2.6 IL VERSORE FINALE

Il dato finale che viene trasmesso al sistema di determinazione dell'assetto è un versore indicante la posizione del Sole nel sistema di riferimento del PSD, come illustrato nella Figura 22.

La funzione dedicata a fornire le tre componenti del versore ha in ingresso i due angoli ottenuti dalla fase precedente, espressi in radianti.

Le equazioni utilizzate sono le seguenti:

$$X = \sin(\text{coel}) * \cos(Az)$$

$$Y = \sin(\text{coel}) * \sin(Az)$$

$$Z = \cos(\text{coel})$$

4.2 PROCEDURA DI CALIBRAZIONE

Esistono diversi disturbi che possono agire sulla misura finale riguardante la posizione del Sole.

La non perfetta realizzazione degli elementi meccanici costituenti il sensore, o il loro non corretto montaggio, può ad esempio portare ad un disallineamento tra l'asse ottico della lente e la scheda PSD fotosensibile.

Inoltre la lente introduce delle distorsioni e riflessi che devono essere individuati e quindi corretti attraverso una opportuna procedura di calibrazione.

4.2.1 DISASSAMENTO OTTICO DELLALENTE

L'eventuale disassamento dell'asse ottico della lente con il centro del sensore PSD può essere corretto in maniera software introducendo nella procedura di calcolo del punto luce un offset. Tale offset serve per allineare il centro del PSD con la verticale dell'asse ottico della lente.

Per conoscere l'offset presente e di conseguenza la correzione da applicare occorre procedere per via sperimentalmente con una procedura di calibrazione.

La piattaforma di calibrazione usata è costituita da una superficie circolare ruotante sull'asse verticale movimentata da un motore elettrico passo-passo con un rapporto di trasmissione di 80:1.

La sua velocità massima è di 2 rpm con una precisione di posizionamento di 0.01°. La piattaforma è munita di un encoder assoluto a 16bit per la determinazione esatta della propria posizione angolare.



Figura 23 - Piattaforma di calibrazione

La procedura di calibrazione è la seguente [7]:

1. Il sensore di sole viene installato tramite viti nel centro della piattaforma con il piano ottico parallelo alla piattaforma.
2. Una volta verificato l'allineamento tra la piattaforma e la lente, si procede ad illuminare quest'ultima posizionando una sorgente luminosa all'interno del suo campo di vista.
3. Verificato che l'unica fonte luminosa individuata dal sensore sia quella di test, viene messa in movimento la piattaforma per effettuare una rotazione completa di 360°
4. Durante la rotazione si effettua l'acquisizione dei punti luce a intervalli di 10°

Le acquisizioni restituiranno quindi una serie di punti disposti circolarmente rispetto al centro ottico della lente.

Individuato il centro ottico, l'offset cercato è rappresentato dalla differenza, nei due assi, tra la sua posizione e il centro del PSD.

Essendo il sensore in fase di sviluppo non è stato possibile impiegare direttamente il sensore PSD, ma si è fatto uso di una camera CCD sistemata sul fondo dell'ottica.

La camera CCD ha permesso un facile interfacciamento con il software Matlab utilizzato durante il test di calibrazione sia per la gestione della movimentazione della piattaforma, sia nella raccolta delle immagini ottenute e la loro elaborazione.

Diversamente dall'utilizzo del sensore PSD, non si ottengono direttamente, durante la calibrazione con la camera CCD, le coordinate del punto luce, ma un'immagine che, a seconda dell'inclinazione del raggio luminoso, è più o meno simile ad una circonferenza.

Per ricondurci ad un punto viene, via software, individuato il contorno dell'immagine ricevuta da cui si estrapola la circonferenza che meglio soddisfa la distribuzione dei punti di contorno; la posizione del suo centro è il punto luce.

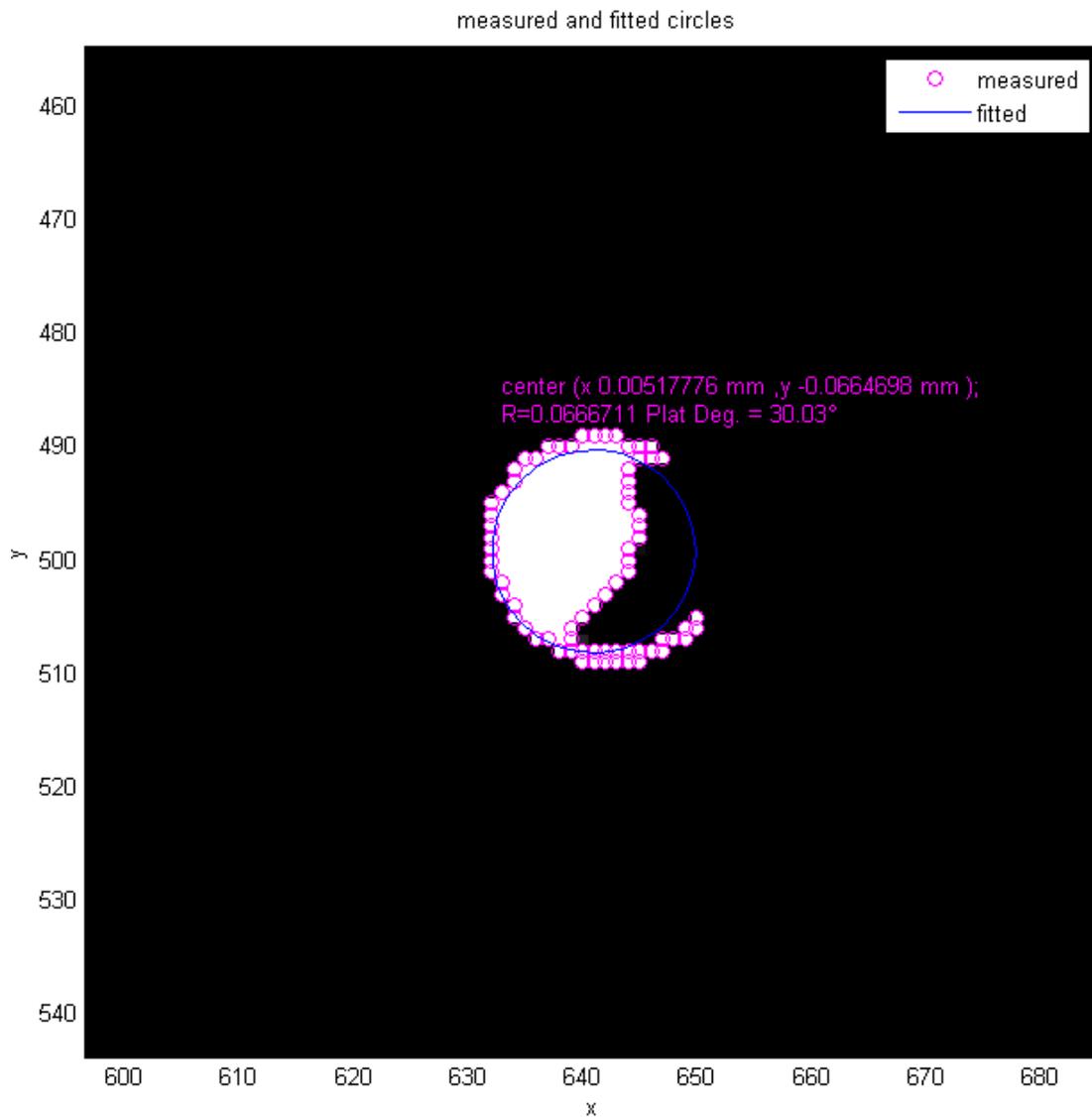


Figura 24 - Estrapolazione della circonferenza dall'immagine acquisita del singolo spot luminoso

La distribuzione circolare delle acquisizioni effettuate durante una prova è illustrata in Figura 25

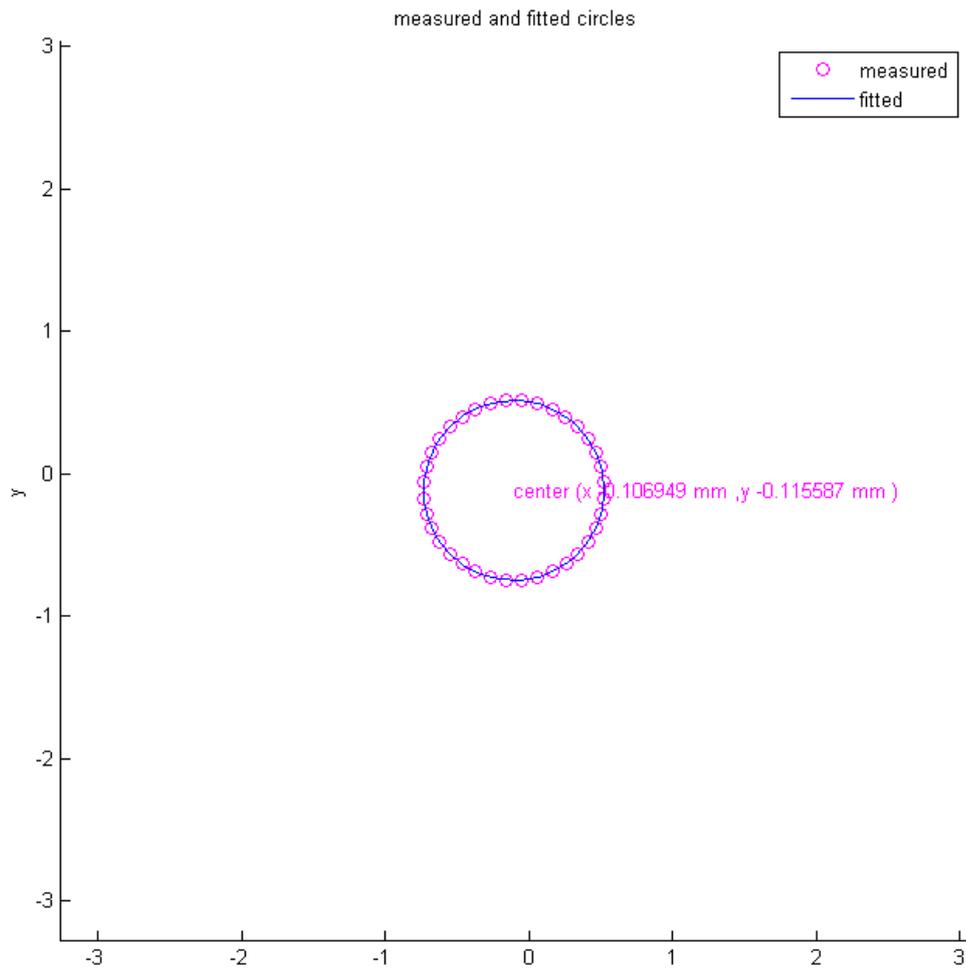


Figura 25 - Disposizione delle acquisizioni alla fine di una prova

Sono state effettuate diverse misurazioni facendo variare la posizione della sorgente luminosa, ottenendo così circonferenze di varia lunghezza, e il risultato trovato è il seguente:

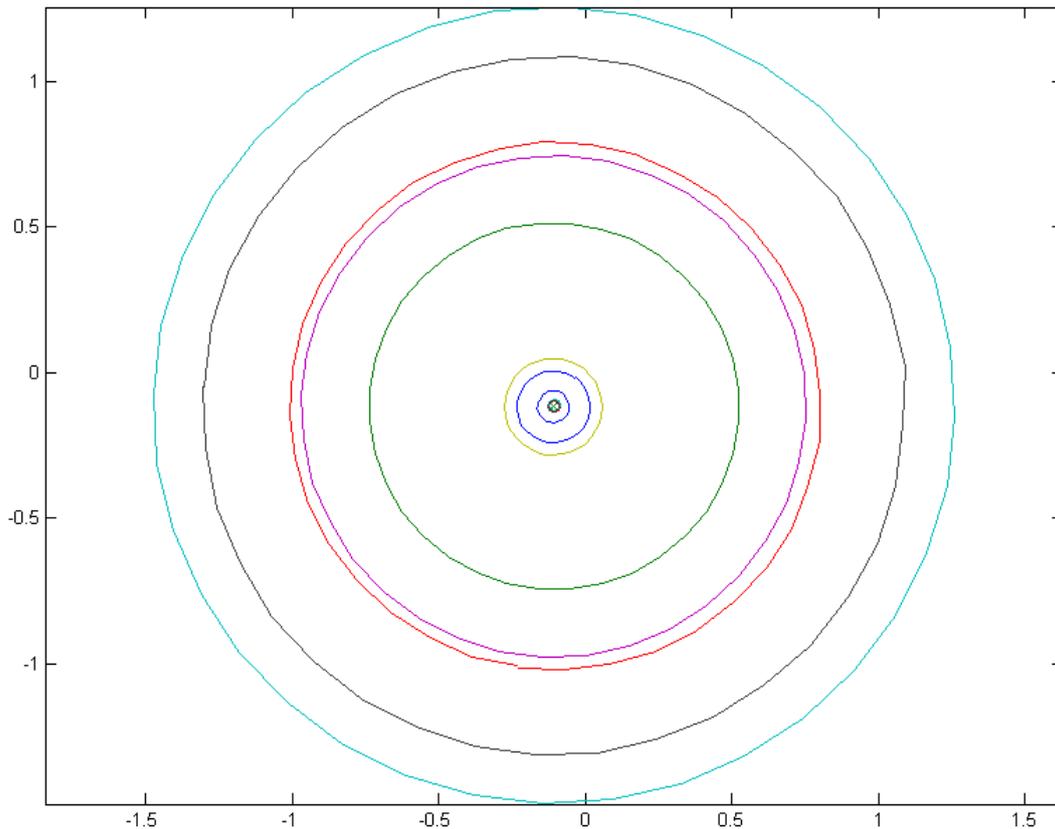


Figura 26 - Disposizione delle acquisizioni nelle diverse prove a diversi angoli di coelevazione

Il risultato finale in questo caso ottenuto mediando i risultati delle otto prove è:

$$\text{Offset} = [-0.107 X, -0.115 Y]$$

4.2.2 CORREZIONE DISTORSIONI OBIETTIVO

La luce che attraversa la lente del sensore viene deviata, in maniera non lineare, a seconda dell'angolo d'incidenza tra il raggio luminoso e il piano della lente, a causa del differente indice di rifrazione tra i vari strati dell'ottica e l'aria.

Per questo, a spostamenti angolari costanti della fonte luminosa, non corrispondono spostamenti costanti del punto luce sul piano del PSD.

E' necessario quindi verificare sperimentalmente la relazione tra posizione del punto luce proiettato sulla superficie del PSD e la coelevazione del raggio luminoso.

Per effettuare le prove si è utilizzata la stessa piattaforma di calibrazione usata per i test di disassamento disponendo in maniera differente il sensore. La lente viene infatti posizionata ruotata di 90° rispetto alla situazione precedente in modo da avere l'asse ottico disposto perpendicolarmente con l'asse di rotazione della piattaforma.

In questo modo durante la calibrazione la lente ruoterà rispetto alla sorgente luminosa attorno all'angolo di coelevazione e non più, come nella calibrazione dell'offset, lungo l'angolo di azimut. In questo modo si riesce a correlare spostamenti angolari reali del sensore con spostamenti lineari del punto luce sulla superficie del PSD

La procedura per il test è analoga alla precedente tranne le seguenti differenze

1. E' necessario che la sorgente luminosa sia allineata con il centro della lente
2. La rotazione effettuata è di 100° oltrepassati i quali la sorgente luminosa esce dal campo di vista della lente.
3. Le acquisizioni vengono effettuate ad intervalli di 1°.

Una volta ottenuti i punti di interesse si è provveduto ad interpolare i risultati tramite un'approssimazione ai minimi quadrati utilizzando i polinomi di Chebyshev .

I polinomi di Chebyshev sono le componenti di una successione polinomiale ricavata dalla seguente formula ricorsiva:

$$T_0(x) = 1$$

$$T_1(x) = x$$

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x)$$

Essi costituiscono una successione di polinomi ortogonali rispetto alla funzione peso $(1 - x^2)^{-1/2}$ sull'intervallo $[-1,1]$.

Per poter effettuare una interpolazione su un intervallo arbitrario $[a,b]$ occorre eseguire un cambio di variabile nel modo seguente:

$$x_c = \frac{2x - (b - a)}{b - a}$$

Ogni data funzione $f(x)$ può essere approssimata con un'espansione in serie di grado n dei polinomi di Chebyshev nella forma:

$$y(x) = \sum_{n=0}^N a_n T_n(x)$$

Si ottiene quindi un sistema nella forma [8].

$$\begin{bmatrix} T_0(a) & T_1(a) & T_2(a) & \cdots & T_N(a) \\ T_0(x_1) & T_1(x_1) & T_2(x_1) & \cdots & T_N(x_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_0(b) & T_1(b) & T_2(b) & \cdots & T_N(b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p(a) \\ p(x_1) \\ \vdots \\ p(b) \end{bmatrix}$$

Dove p_i è l'approssimazione al valore y_i .

Applicando poi il metodo dei minimi quadrati che individua il polinomio che rende minima la somma pesata dei quadrati dei residui, cioè minimizza

$$\sum_{i=1}^n (p_i - y_i)^2$$

Il valore dei coefficienti a_i si trova allora come :

$$a = (T^t T)^{-1} T^t p$$

La curva interpolante è rappresentata nel grafico in Figura 27 dove sull'asse delle ascisse è riportato il modulo della posizione del punto luce $\sqrt{x^2 + y^2}$.

Sono state effettuate tredici prove e il risultato finale è la media dei risultati pesata rispetto all'errore nel centraggio della sorgente luminosa.

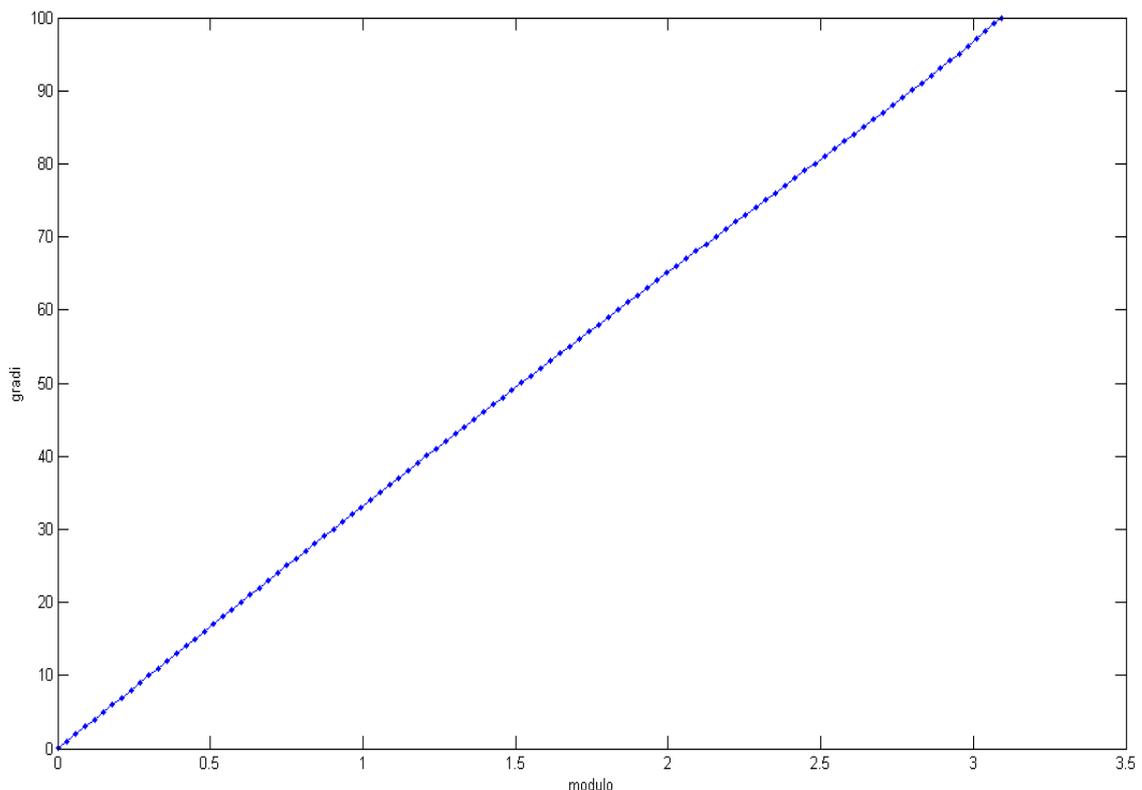


Figura 27 - Polinomiale di interpolazione

L'andamento della deviazione standard dell'errore con il grado del polinomio ha mostrato che all'aumentare del grado la deviazione standard diminuisce e la curva interpreta meglio i dati sperimentali. Si è visto anche che oltre al sesto grado la diminuzione della deviazione standard non è più

significativa e non giustifica l'aumento del grado del polinomio. Per questo motivo si è scelto come grado per la polinomiale di interpolazione il sesto.

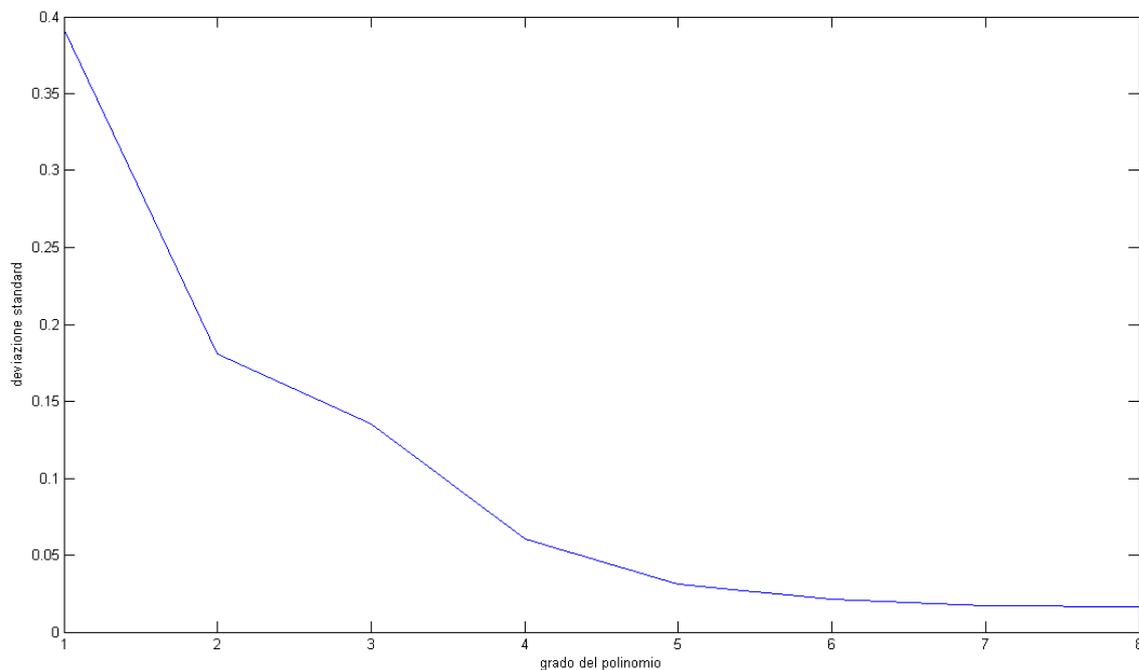


Figura 28 - Andamento della deviazione standard dell'errore con il grado del polinomio

I coefficienti utilizzati per definire la polinomiale sono tabellati in funzione del grado del polinomio:

Grado polinomio	1	2	3	4	5	6	7	8	Std Errore
1	50.3624	49.5236							0.3920
2	50.1906	49.5298	-0.5616						0.1810
3	50.1872	49.6278	-0.5634	0.1892					0.1356
4	50.2247	49.6218	-0.4742	0.1878	0.1888				0.0604
5	50.2236	49.6482	-0.4765	0.2227	0.1883	0.0794			0.0311
6	50.2280	49.6475	-0.4668	0.2218	0.2023	0.0793	0.0338		0.0217
7	50.2278	49.6515	-0.4672	0.2267	0.2018	0.0869	0.0338	0.0195	0.0174

Figura 29 - tabella dei coefficienti

4.3 RISULTATI DELLA CAMPAGNA DI TEST

Le prove con il sensore di Sole sono state effettuate simulando il funzionamento del sensore PSD utilizzando quattro potenziometri che fornivano le tensioni in ingresso agli ADC.

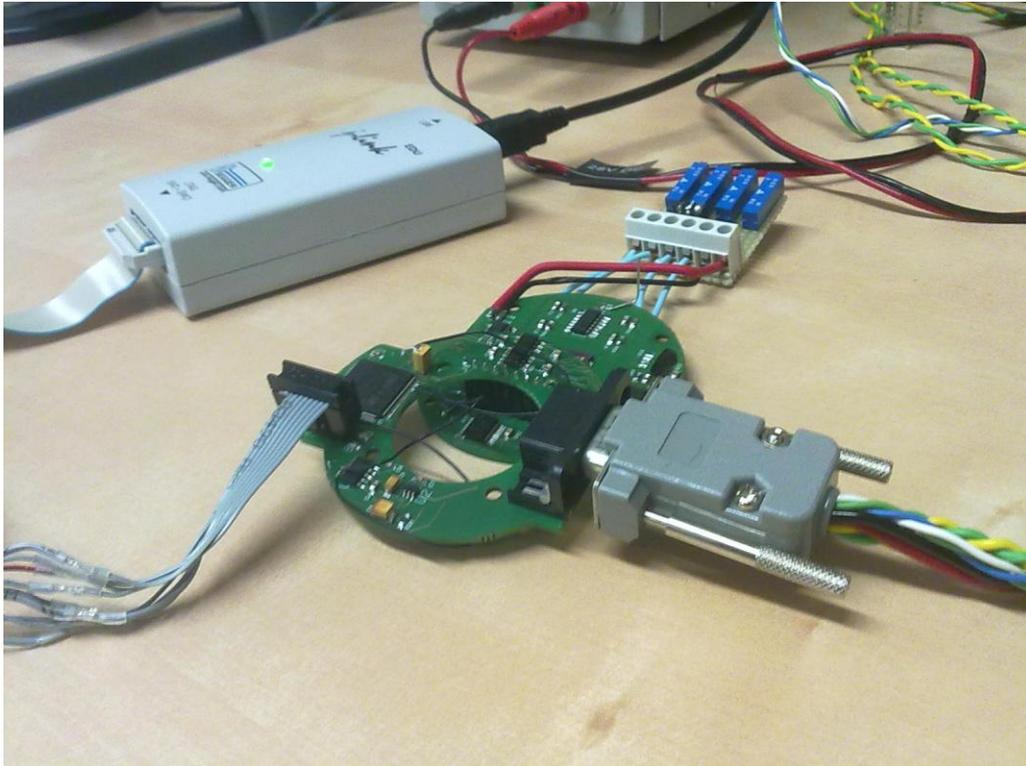


Figura 30 - Il sensore collegato al JTAG, l'interfaccia seriale e i quattro potenziometri

Come detto in precedenza non si è potuto utilizzare un sensore PSD vero e proprio in quanto il sensore di sole è ad uno stadio prototipale iniziale.

Sono stati quindi utilizzati quattro potenziometri per simulare le tensioni in ingresso ai due ADC responsabili dell'acquisizione dei dati sulla posizione del punto luce.

Le tensioni fornite dai potenziometri sono state decise in maniera arbitraria intorno ai 1,2,3,4 Volts per ogni canale.

I risultati seguenti si riferiscono a circa 4000 acquisizioni per ogni canale con voltaggio costante.

Il grafico in Figura 31 illustra gli andamenti delle tensioni acquisite sui quattro canali di prova provenienti dai potenziometri senza nessun algoritmo di filtraggio.

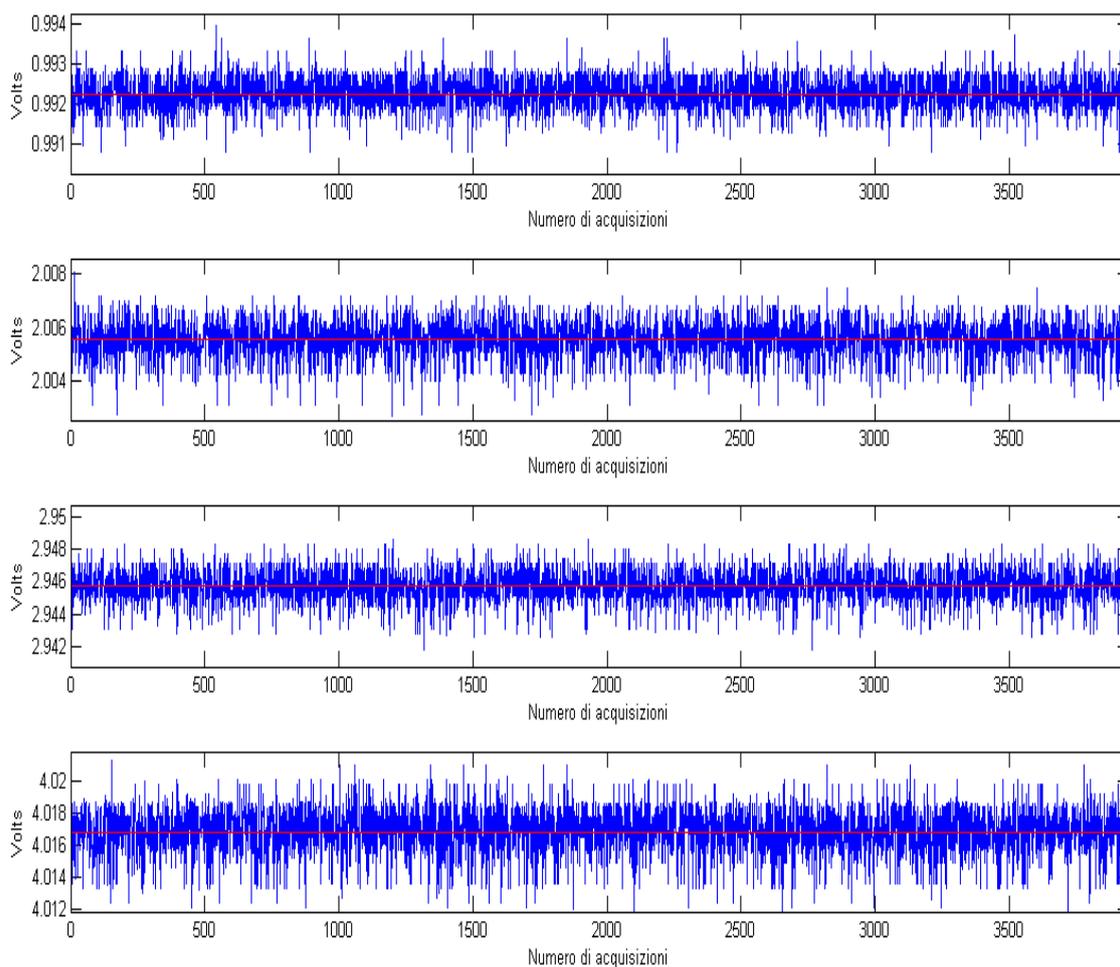


Figura 31 - Acquisizioni delle tensione dai quattro canali di un ADC

	Media	Std	Max	Min
Canale 1	0.9923	0.0004	0.9940	0.9908
Canale 2	2.0056	0.0007	2.0081	2.0027
Canale 3	2.9457	0.0010	2.9486	2.9418
Canale 4	4.0168	0.0015	4.0213	4.0112

Tabella 8 - Caratteristiche dei segnali

Durante la successiva fase di elaborazione vengono elaborati un certo numero di valori per ogni canale di cui una frazione rappresentanti i valori massimi e minimi viene eliminata, mentre il valore dei restanti punti viene mediato.

Si è scelto di effettuare 50 acquisizioni per ogni canale a causa della necessità di aver il maggior numero possibile di acquisizioni da elaborare per ottenere il valore finale non scendendo sotto la frequenza di 10 Hz, valore d'aggiornamento del sistema di determinazione d'assetto.

Nella Figura 32 è mostrata la differenza tra la media totale per ogni canale di tutte le acquisizioni effettuate (circa 4000 valori) e il valore finale risultante dalla procedura di elaborazione all'aumentare delle acquisizioni. Si vede come già con le prime 50 acquisizioni la massima differenza è nell'ordine di $6 \cdot 10^{-4}$.

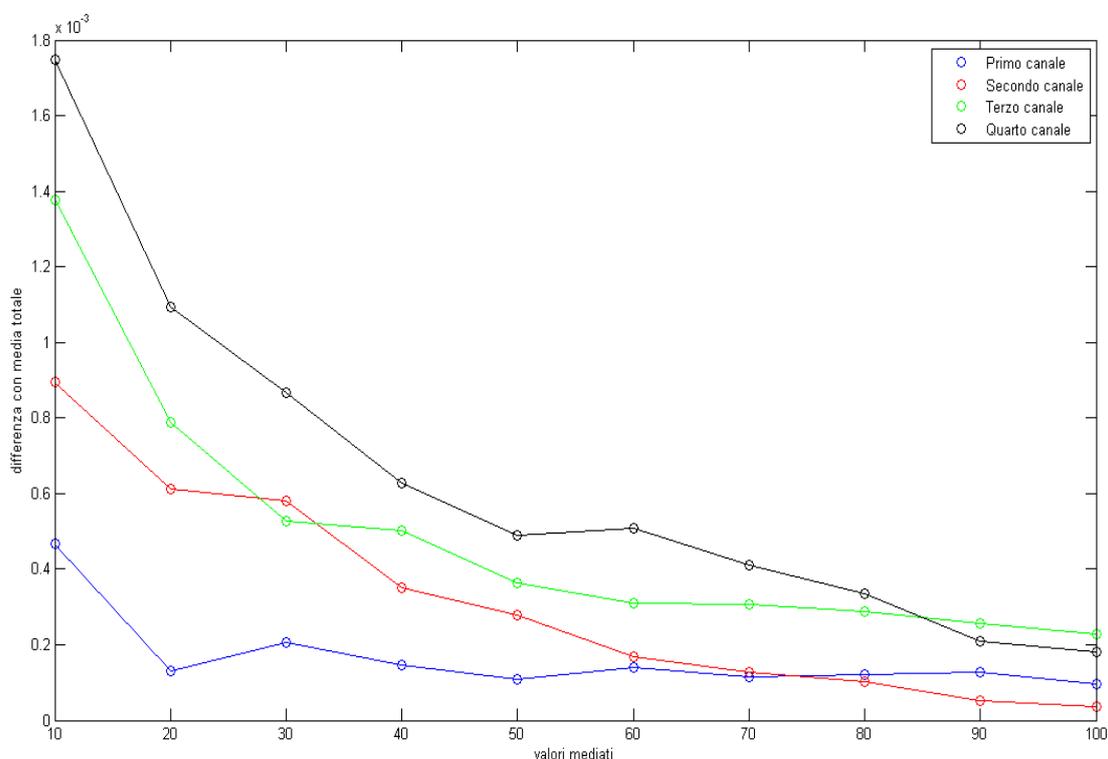


Figura 32 - Andamento della differenza tra le medie

Come spiegato nel cap.4.1.2.1 di questi 50 valori, ne vengono eliminati un terzo tra i minimi e i massimi. I grafici seguenti mostrano il segnale con riportati in rosso il valore medio e la deviazione standard $\pm\sigma$ con evidenziati i valori al di fuori dell'intervallo che risultano essere circa un terzo del totale (Per rendere più chiara la visualizzazione dei grafici sono state riportate solo le prime 750 acquisizioni).

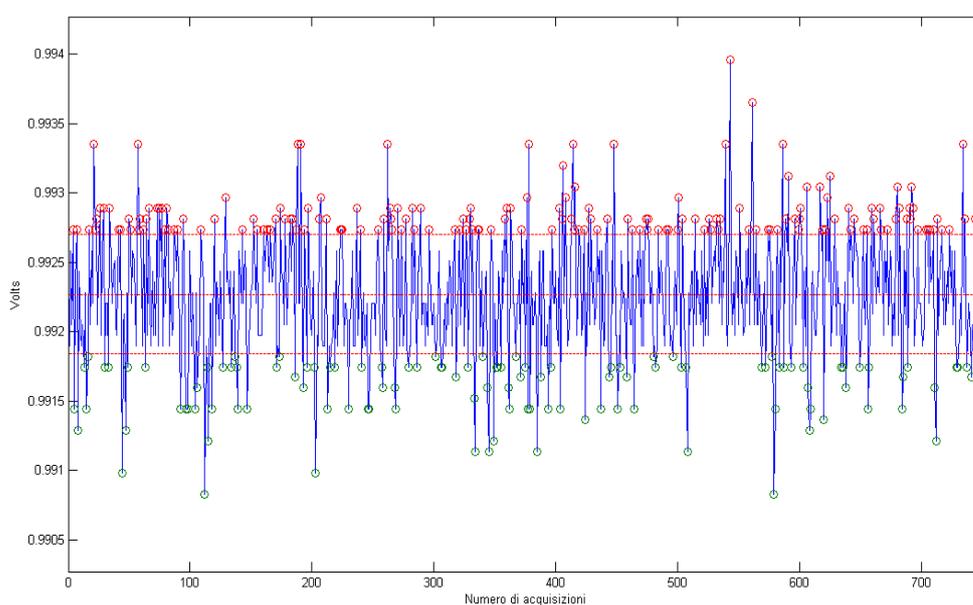


Figura 33 - Andamento della tensione nel primo canale

Sul primo canale si hanno 1464 valori in eccesso su 3944

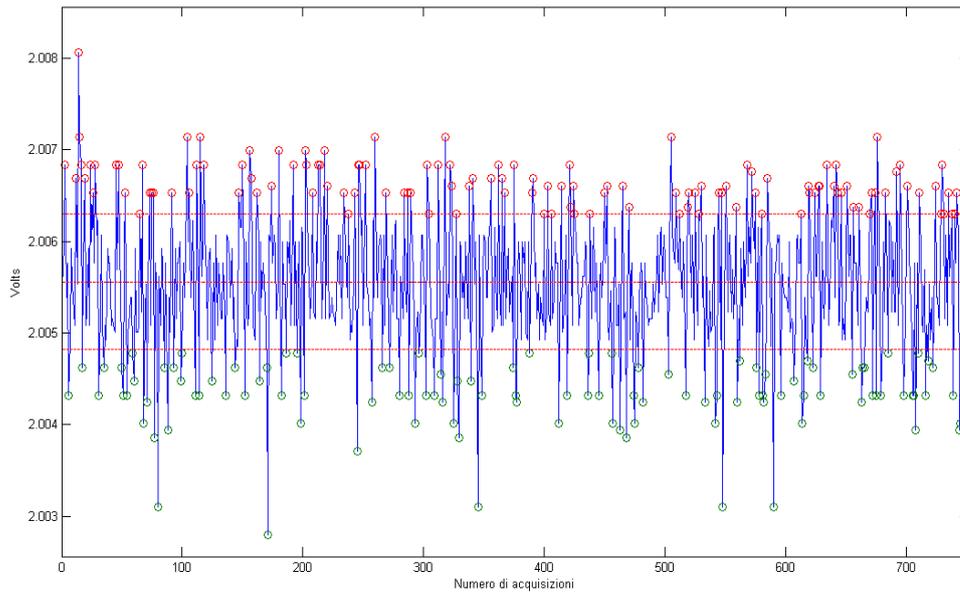


Figura 34 - Andamento della tensione nel secondo canale

Sul secondo canale si hanno 1139 valori in eccesso su 3944

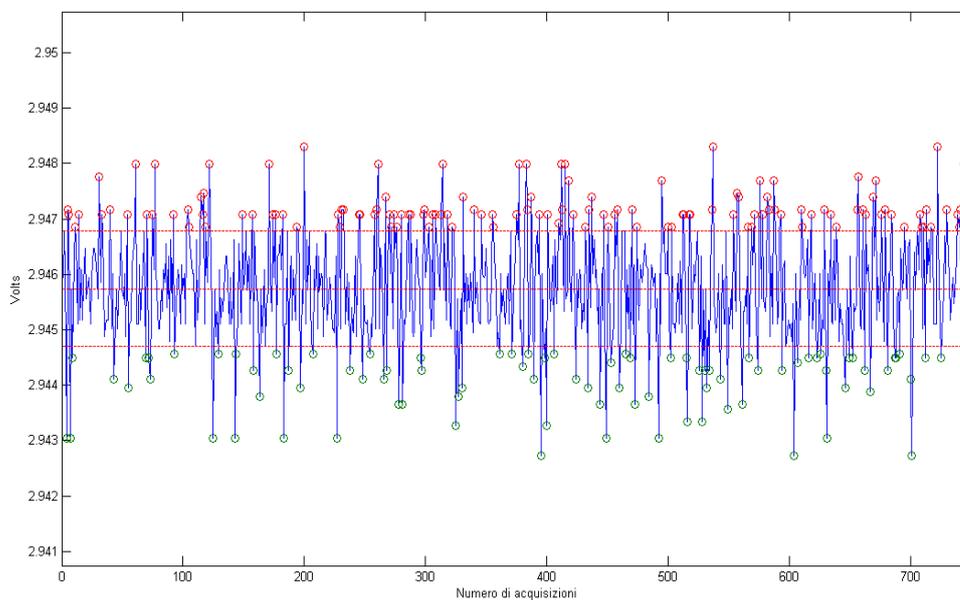


Figura 35 - Andamento della tensione nel terzo canale

Sul terzo canale si hanno 1225 valori in eccesso su 3944

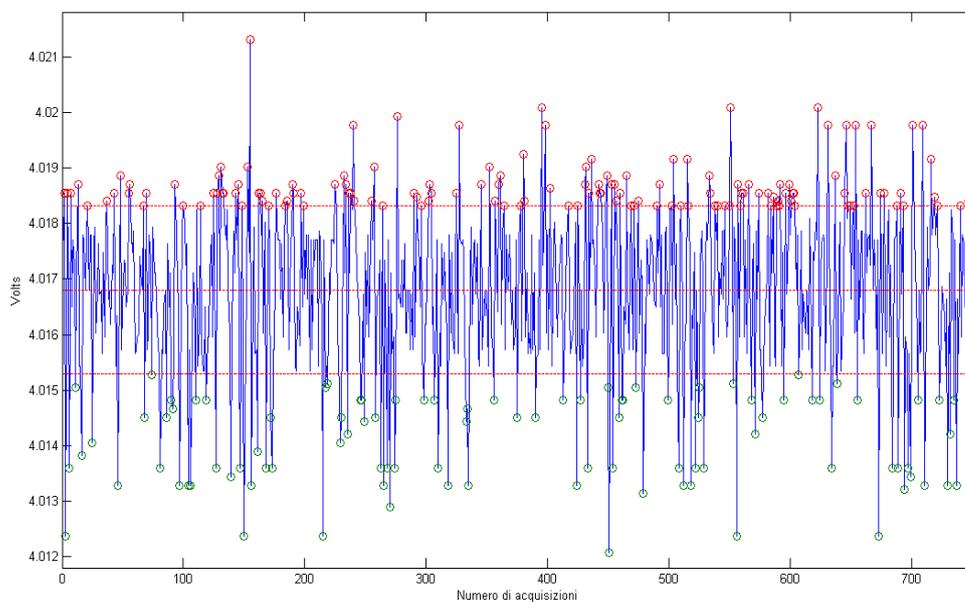


Figura 36 - Andamento della tensione nel quarto canale

Sul quarto canale si hanno 1285 valori in eccesso su 3944.

La Figura 37 illustra quindi i valori ottenuti dopo rimozione, per ogni gruppo di cinquanta acquisizioni, di un terzo dei valori massimi e minimi.

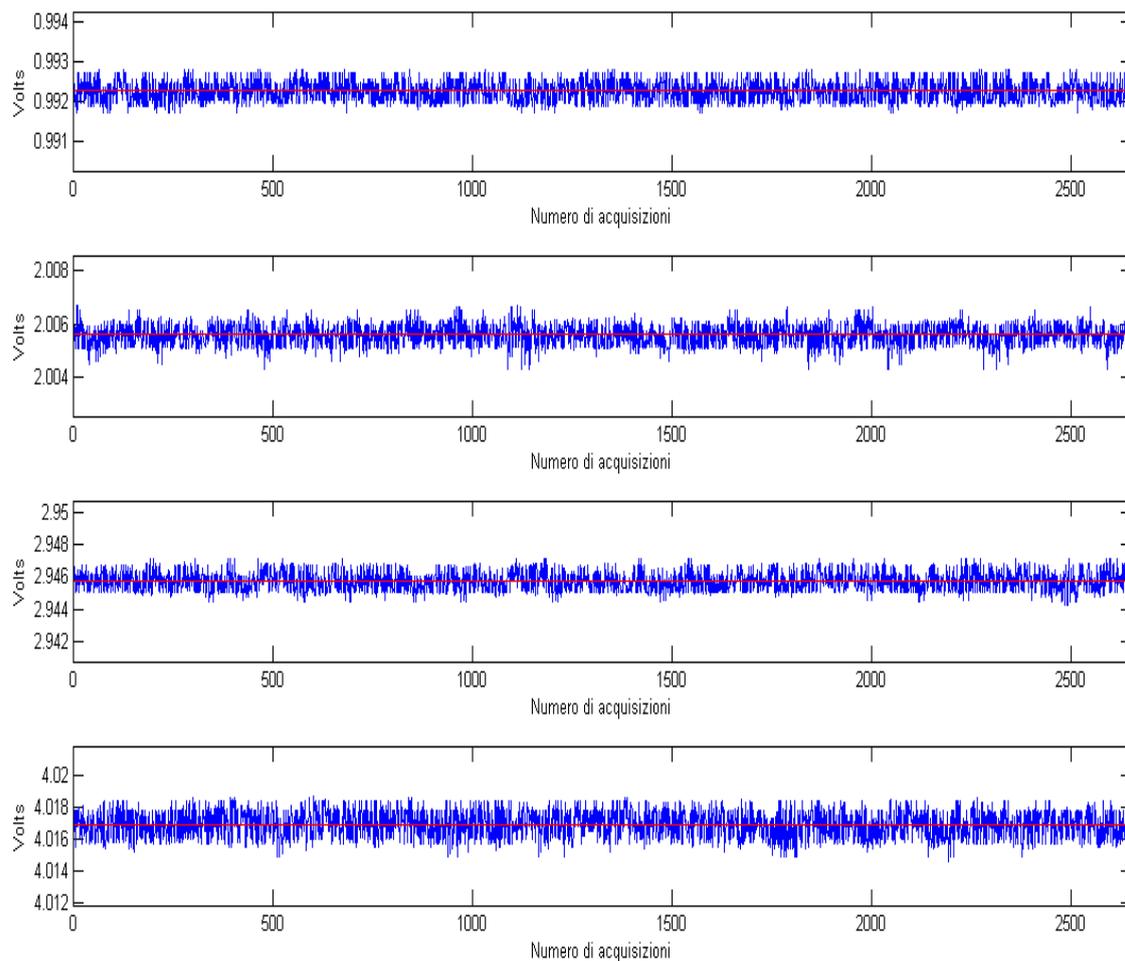


Figura 37 - Andamento delle acquisizioni dopo l'elaborazione

	Media [V]	Std	Max [V]	Min [V]
Canale 1	0.9923	$0.2749 \cdot 10^{-3}$	0.9928	0.9917
Canale 2	2.0056	$0.4130 \cdot 10^{-3}$	2.0067	2.0043
Canale 3	2.9458	$0.5996 \cdot 10^{-3}$	2.9472	2.9443
Canale 4	4.0169	$0.8641 \cdot 10^{-3}$	4.0186	4.0145

Tabella 9 - Caratteristiche dei segnali

Di ogni gruppo di 50 acquisizioni i valori rimanenti dopo la rimozione precedente vengono mediati con i risultati illustrati in Figura 38

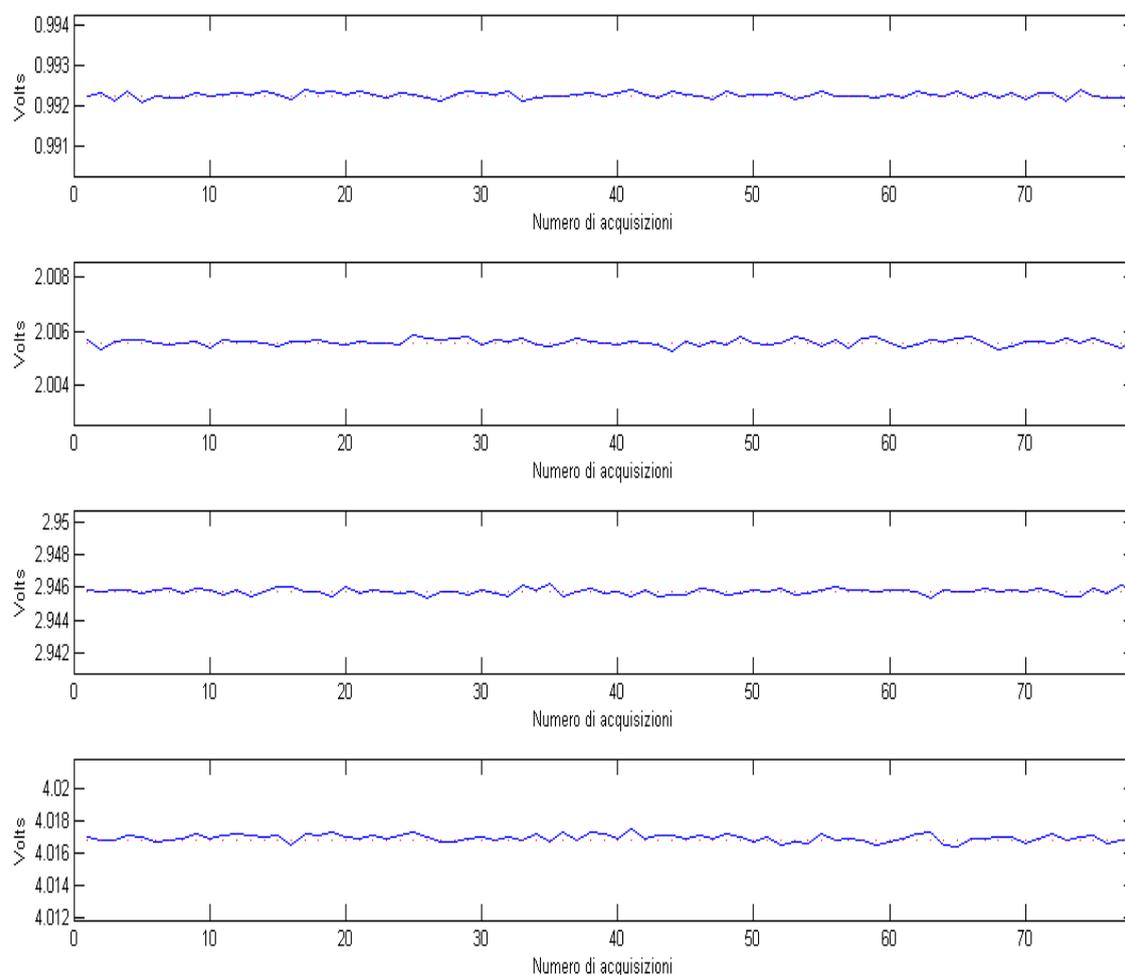


Figura 38 - Valori finali mediati ogni 50 acquisizioni

	Media [V]	Std	Max [V]	Min [V]
Canale 1	0.9923	$0.0736 \cdot 10^{-3}$	0.9924	0.9921
Canale 2	2.0056	$0.1242 \cdot 10^{-3}$	2.0058	2.0053
Canale 3	2.9458	$0.1845 \cdot 10^{-3}$	2.9462	2.9454
Canale 4	4.0169	$0.2278 \cdot 10^{-3}$	4.0175	4.0164

Tabella 10 - Caratteristiche dei segnali

I valori delle tensioni vengono infine ricondotti alle coordinate x,y rappresentative della posizione del punto luce

La Figura 39 illustra l'incertezza sulla posizione del punto luce durante la prova.

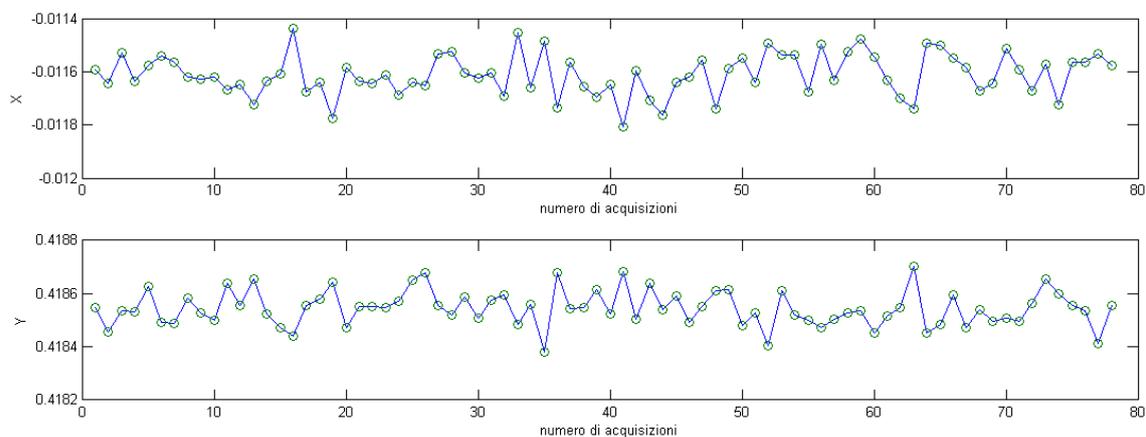


Figura 39 – Evoluzione della posizione del punto luce e rappresentazione sulla scheda PSD

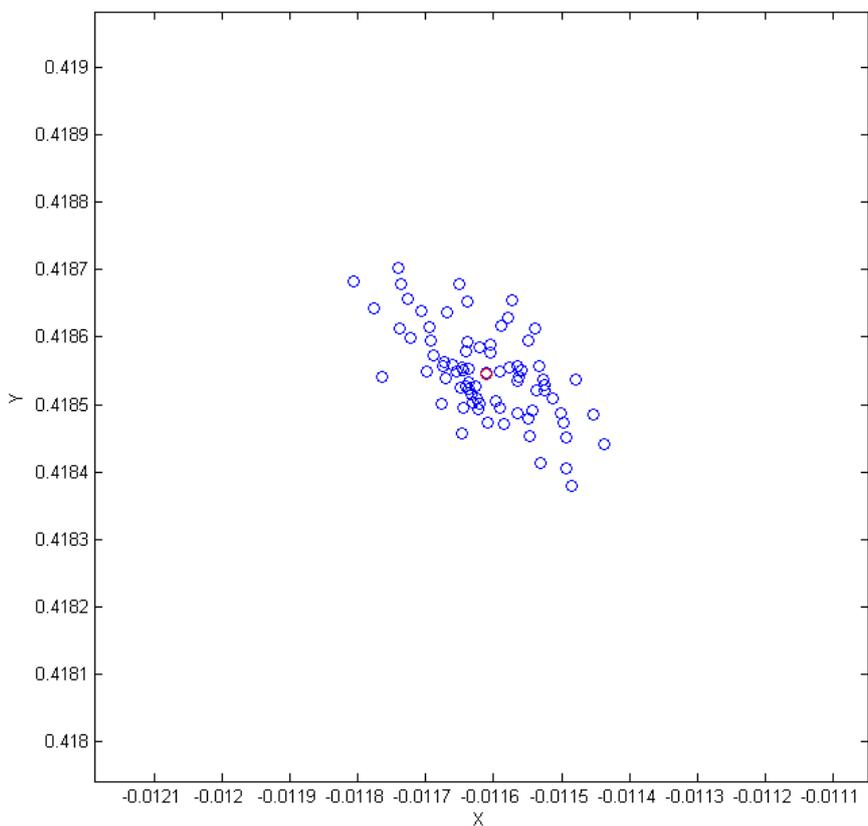


Figura 40 – Ingrandimento illustrante la distribuzione dei punti luce

	Media [mm]	Stddev	Δ [mm]
X	-0.0116	$0.78 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Y	0.4185	$0.67 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$

Si nota come il valore massimo dell'incertezza nella posizione ($4 \cdot 10^{-4}$) sia di quasi un ordine di grandezza inferiore rispetto all'errore massimo sulle tensioni pari a $1 \cdot 10^{-3}$ (corrispondente al quarto canale).

Procedendo infine al calcolo del versore si nota come l'errore in X e Y sulla superficie del PSD (nell'ordine del 10^{-4}) si mantenga anche nelle tre componenti del versore di posizione (con la componente Z che risulta la più costante).

L'andamento è illustrato in Figura 41

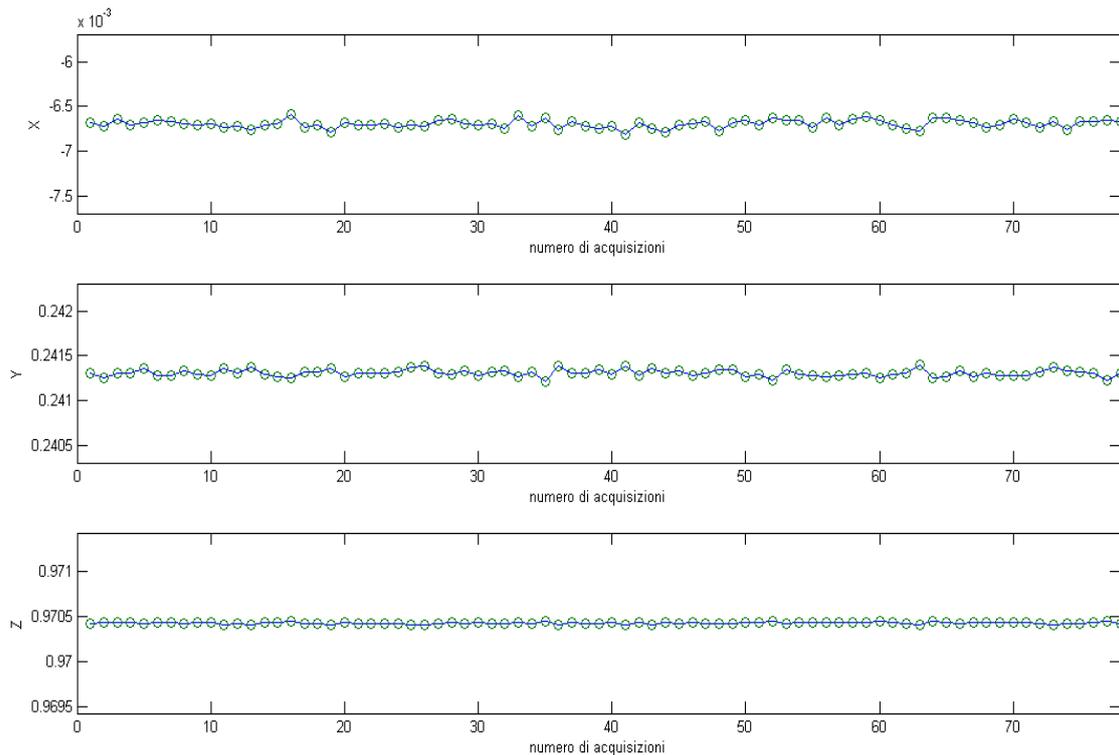


Figura 41 - Componenti del versore finale

	Media [mm]	Std	Max [mm]	Min [mm]
X	-0.0066	$0.449 \cdot 10^{-4}$	-0.0065	-0.0068

Y	0.2413	$0.379 \cdot 10^{-4}$	0.2414	0.2412
Z	0.9704	$0.096 \cdot 10^{-4}$	0.9705	0.9704

Figura 42 – Le tre componenti del versore

5 PROVE AMBIENTALI

Sono stati effettuati due campagne di test sul sensore di Sole: una verifica termica in camera termo-vuoto e una campagna di test di vibrazione sullo shaker per quanto riguarda la struttura e l'ottica.

5.1 TEST TERMICI

Lo scopo dei test termici è quello di verificare il funzionamento delle componenti elettroniche del sensore sottoposte ad un stress termico con temperature prossime a quelle massime ammissibili pari a circa 85°C

Il test è consistito nel portare l'elettronica del sensore dalla temperatura ambiente di 21 °C a 70 °C all'interno di una camera termo-vuoto, analizzando il suo funzionamento ad intervalli di 10 °C.

I potenziometri che alimentano il sensore sono stati tenuti fuori dalla camera per non influire sui risultati della prova.



Figura 43 - Camera Termo-vuoto (UNIBO)

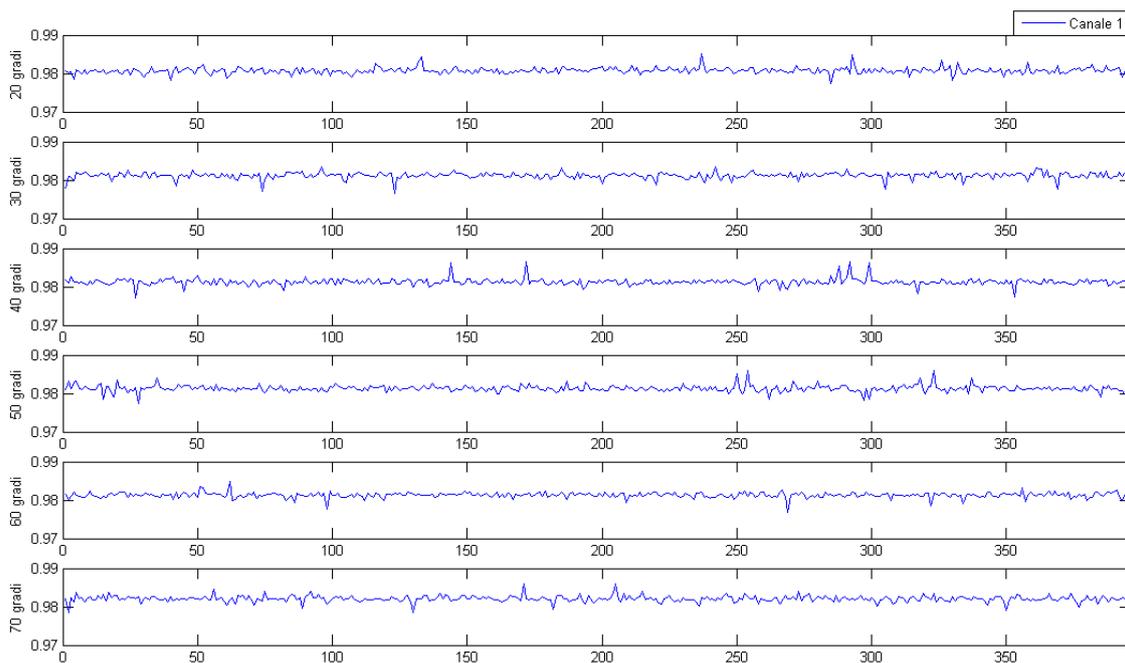


Figura 44 – Andamento della tensione sul primo canale alle diverse temperature

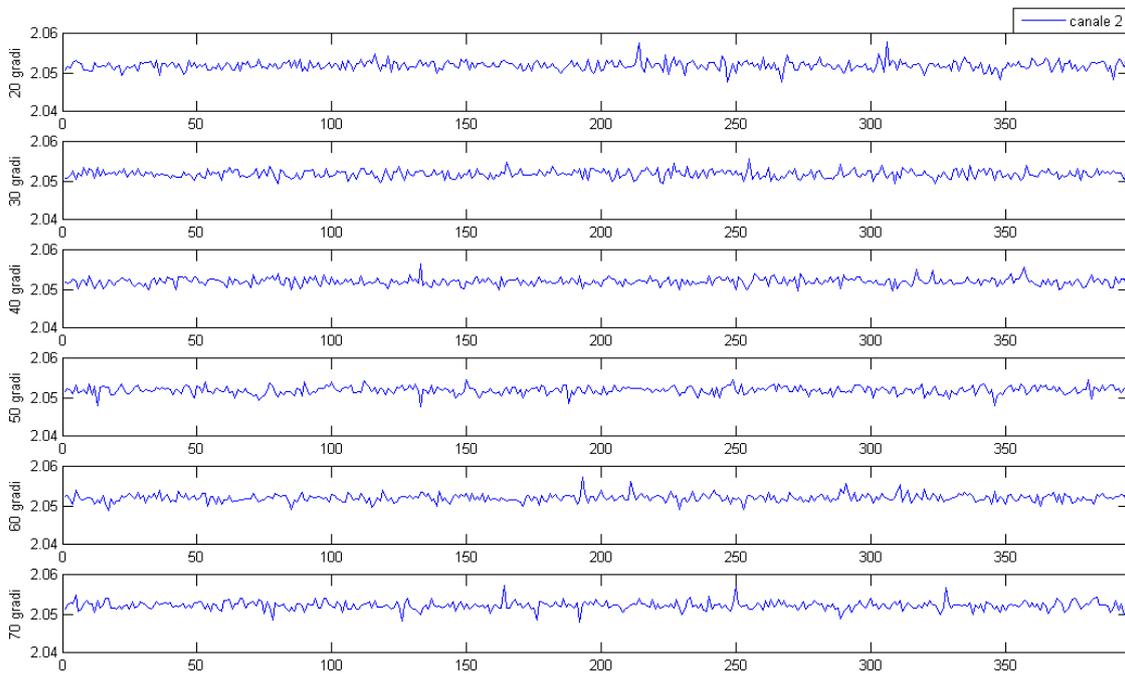


Figura 45 - Andamento della tensione sul secondo canale alle diverse temperature

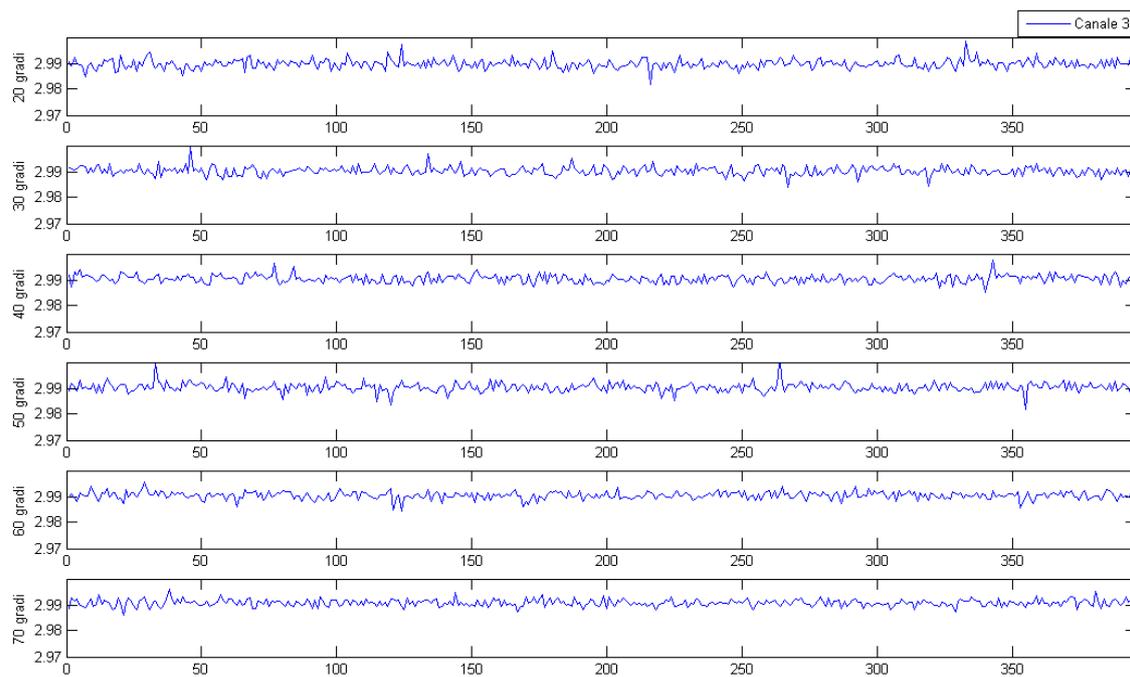


Figura 46 - Andamento della tensione sul terzo canale alle diverse temperature

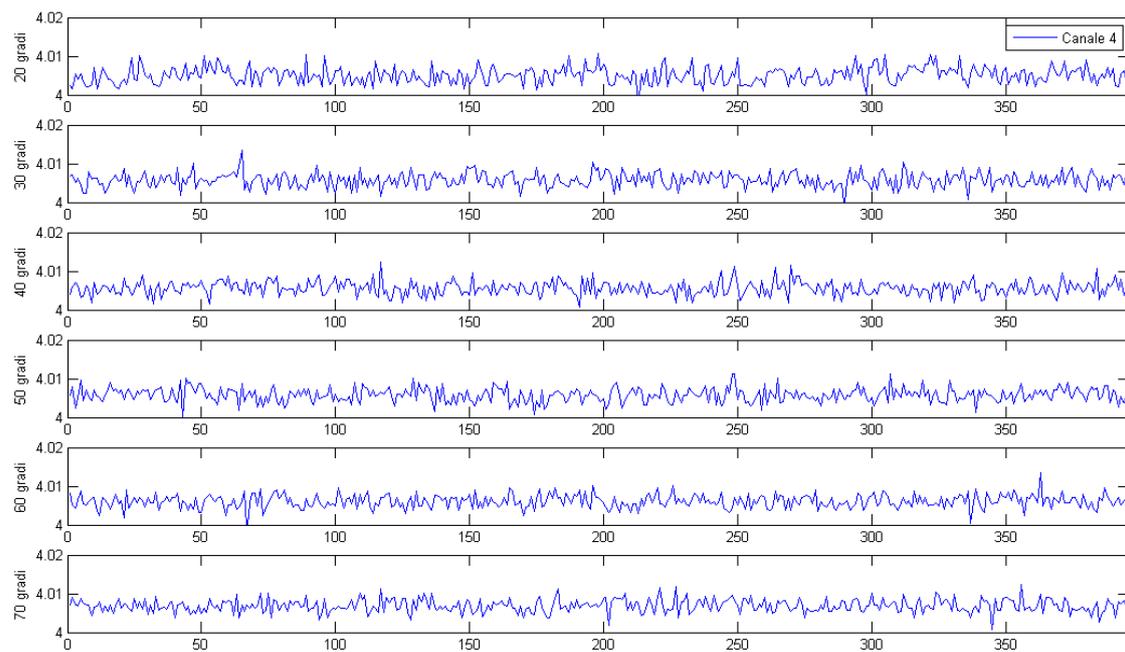


Figura 47 - Andamento della tensione sul quarto canale alle diverse temperature

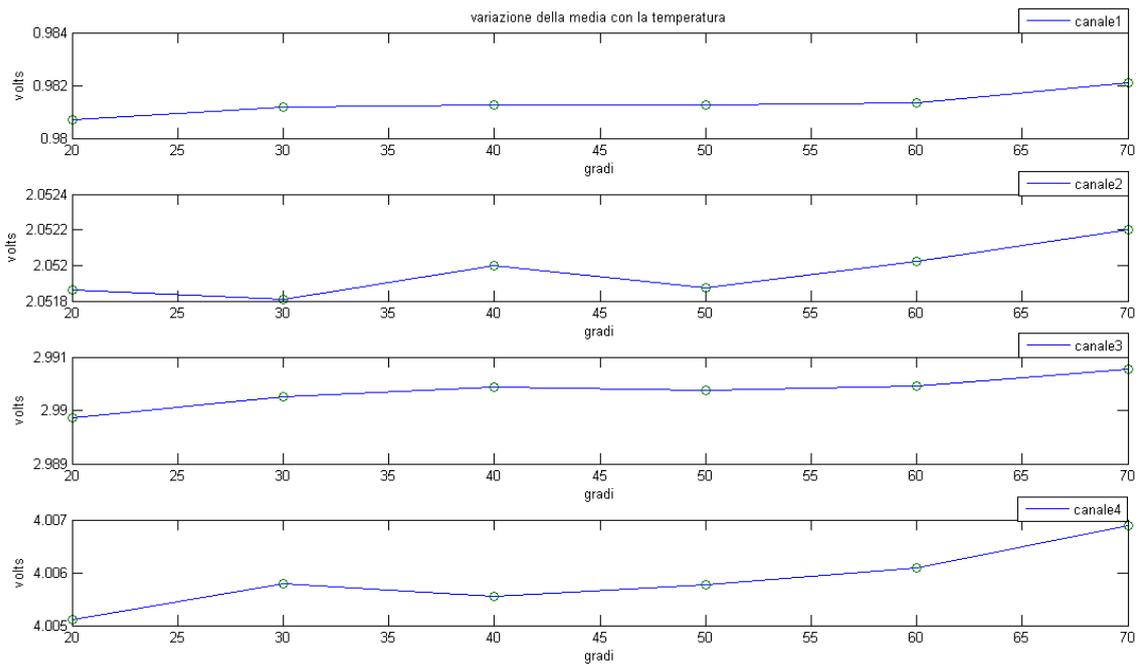


Figura 48 - Variazione del valore medio del voltaggio sui singoli canali al variare della temperatura

temperatura	Media Canale1 [V]	Media Canale2 [V]	Media Canale3 [V]	Media Canale4 [V]
20°	0.9807	2.0519	2.9899	4.0051
30°	0.9812	2.0518	2.9903	4.0058
40°	0.9813	2.0520	2.9904	4.0056
50°	0.9813	2.0519	2.9904	4.0058
60°	0.9813	2.0520	2.9905	4.0061
70°	0.9821	2.0522	2.9908	4.0069

Tabella 11 - Variazione con la temperatura

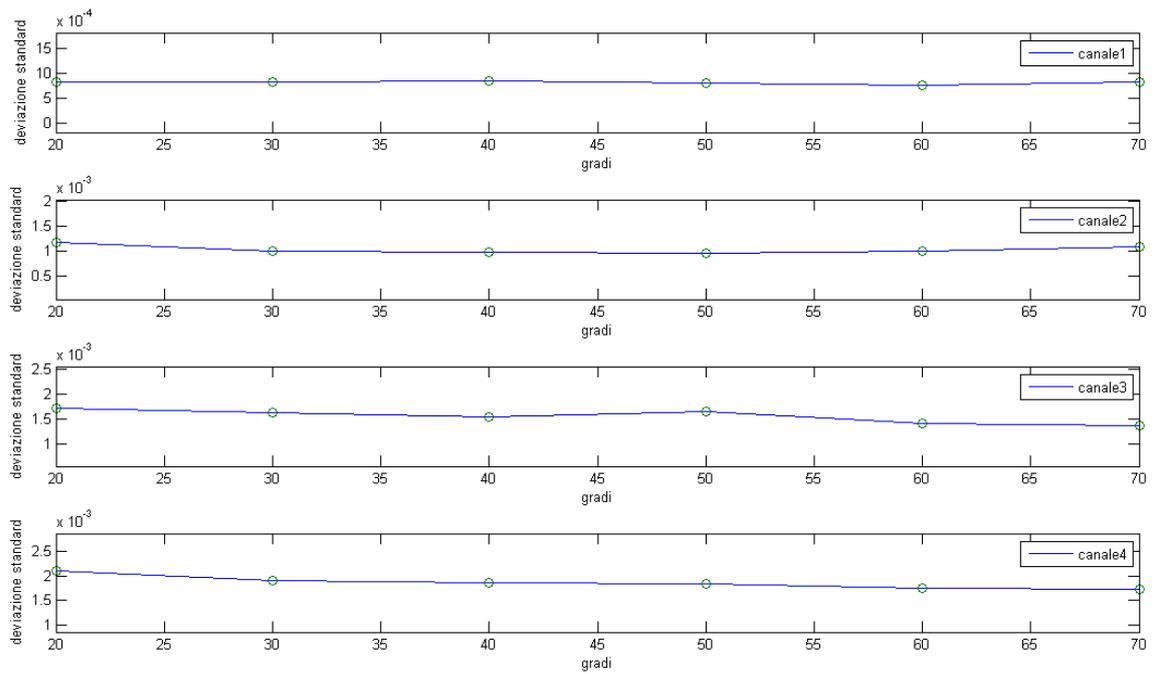


Figura 49 - Variazione della deviazione standard del segnale sui singoli canali al variare della temperatura

temperatura	Stddev Canale1	Stddev Canale2	Stddev Canale3	Stddev Canale4
20°	0.00082	0.0012	0.0017	0.0021
30°	0.00082	0.0010	0.0016	0.0019
40°	0.00085	0.0010	0.0015	0.0019
50°	0.00080	0.0010	0.0017	0.0018
60°	0.00075	0.0010	0.0014	0.0017
70°	0.00082	0.0011	0.0014	0.0017

Tabella 12 - Variazione della deviazione standard con la temperatura

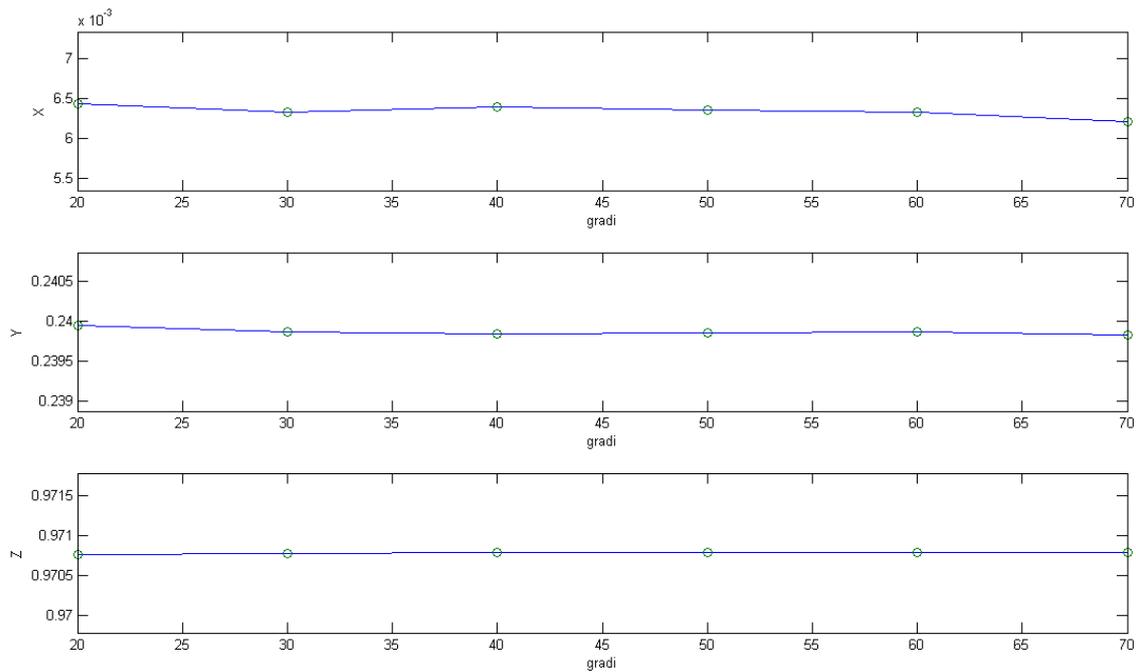


Figura 50 - Variazione del valore medio delle tre componenti del vettore al variare della temperatura

temperatura	Media X [mm]	Media Y [mm]	Media Z [mm]
20°	0.00643	0.23995	0.97076
30°	0.00632	0.23987	0.97078
40°	0.00639	0.23984	0.97089
50°	0.00635	0.23985	0.97079
60°	0.00633	0.23987	0.97078
70°	0.00620	0.23982	0.97079

Tabella 13 - Variazione delle componenti del vettore con la temperature

Si nota come l'aumentare della temperatura non introduca evidenti disturbi sulla misura, come si vede dall'andamento della deviazione standard sui singoli canali, la quale si mantiene sostanzialmente costante. All'aumentare della temperatura si vede un leggero aumento nel valore medio delle tensioni nei singoli canali, aumento che però, a causa delle relazioni differenziali con cui viene calcolata la posizione del punto luce, modifica in maniera trascurabile il valore delle componenti del vettore finale.

5.2 TEST VIBRAZIONALI

Come ultimo test sono state effettuate una serie di prove di vibrazione, riguardanti la struttura con lente, utilizzando uno shaker elettrodinamico, ad un singolo grado di libertà.

Uno shaker è un attuatore il cui compito è di sollecitare la struttura sottoposta a test con i profili di sollecitazione desiderati.

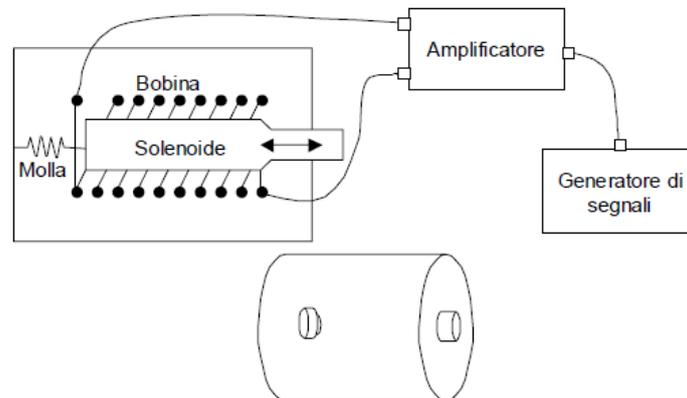


Figura 51 - Schema di uno shaker elettromagnetico

Nello shaker elettromagnetico un generatore di segnali fornisce il profilo di sollecitazione voluto, in base al quale un amplificatore fornisce corrente ad un solenoide elasticamente vincolato al telaio allo shaker. L'intensità della corrente, responsabile del movimento della piastra di ancoraggio per le strutture da testare, è funzione della forza che si intende applicare alla struttura [9].

Lo shaker ha però delle limitazioni dovute alla dinamica del sistema molla-solenoide che impedisce di sviluppare forzanti con contenuti di frequenza troppo elevati; inoltre, una volta caricato della struttura da testare la sua inerzia aumenta diminuendone le prestazioni in termini di accelerazioni imponibili sulla struttura stessa.

Per questi motivi e per verificare che il segnale di comando e le accelerazioni fornite siano concordi si utilizza almeno un accelerometro di controllo.

Il soggetto del test è stata la struttura meccanica del sensore con la lente montata superiormente, mentre le due PCB non sono state testate poiché, a causa dello stato prototipale del sensore, non erano in grado di sottoporsi al test. Il peso della nostra struttura comprensiva di ottica da far vibrare è pari a 289.5 g a cui si aggiunge la piastra d'interfaccia pesante 700 g.

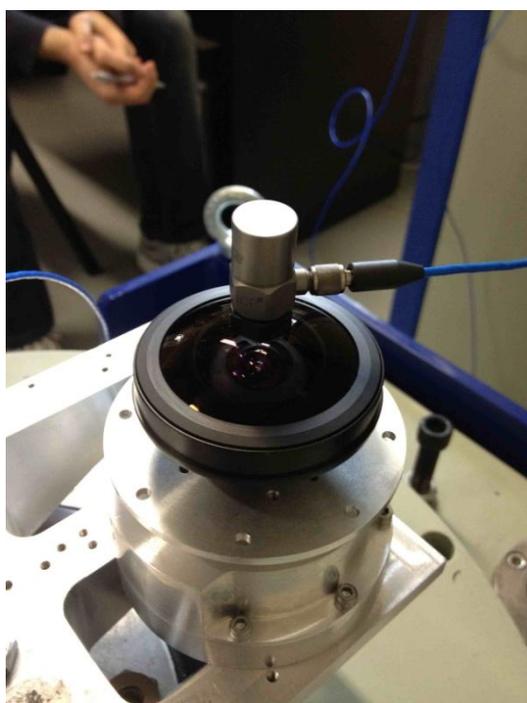


Figura 52 - Struttura sottoposta ai test vibrazionali

Sono state effettuate tre diverse tipologie di prove utilizzando lo shaker:

- Sweep in frequenza
- Vibrazione random
- Shock

Le prove di vibrazione tendono a verificare la risposta della struttura alle sollecitazioni che questa incontrerà una volta installata sul satellite e durante la fase di lancio del vettore VEGA.

Per la misura, durante le diverse prove sono stati utilizzati due accelerometri, uno per il controllo, installato sulla testa dello shaker, all'interfaccia con la struttura da testare, ed uno montato direttamente sulla lente, come sensore di misura.

Questi accelerometri sono del tipo mono-assiale ed hanno una sensibilità rispettivamente di 10.09 e 20.19 mV/g.

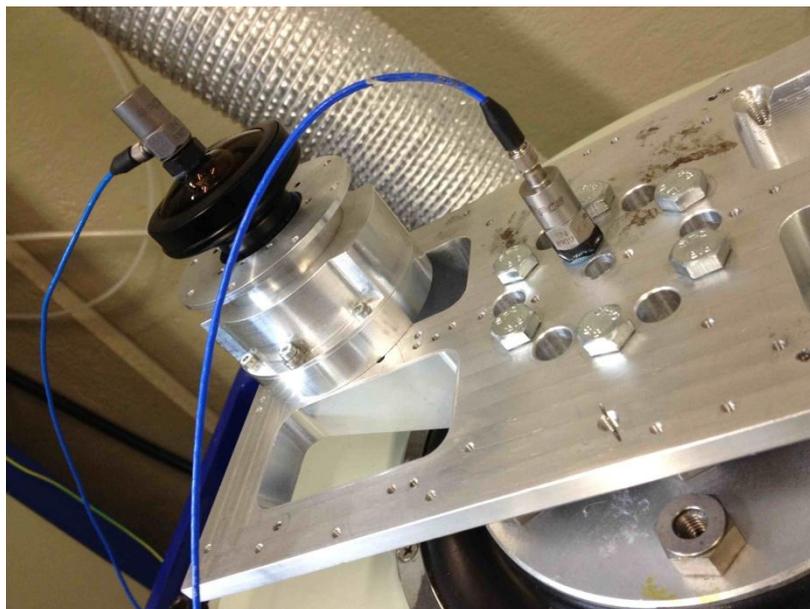


Figura 53 - Installazione dell'ottica sulla piastra di interfaccia con lo shaker

5.2.1 SWEEP IN FREQUENZA

Questa prova tende a verificare quale sia la prima frequenza propria (di risonanza) della struttura, e che questa si trovi a valori sufficientemente alti, lontani dalle frequenze di risonanza del satellite e del lanciatore.

Durante il test la frequenza del segnale viene incrementata su scala logaritmica da 5Hz a 2000Hz.

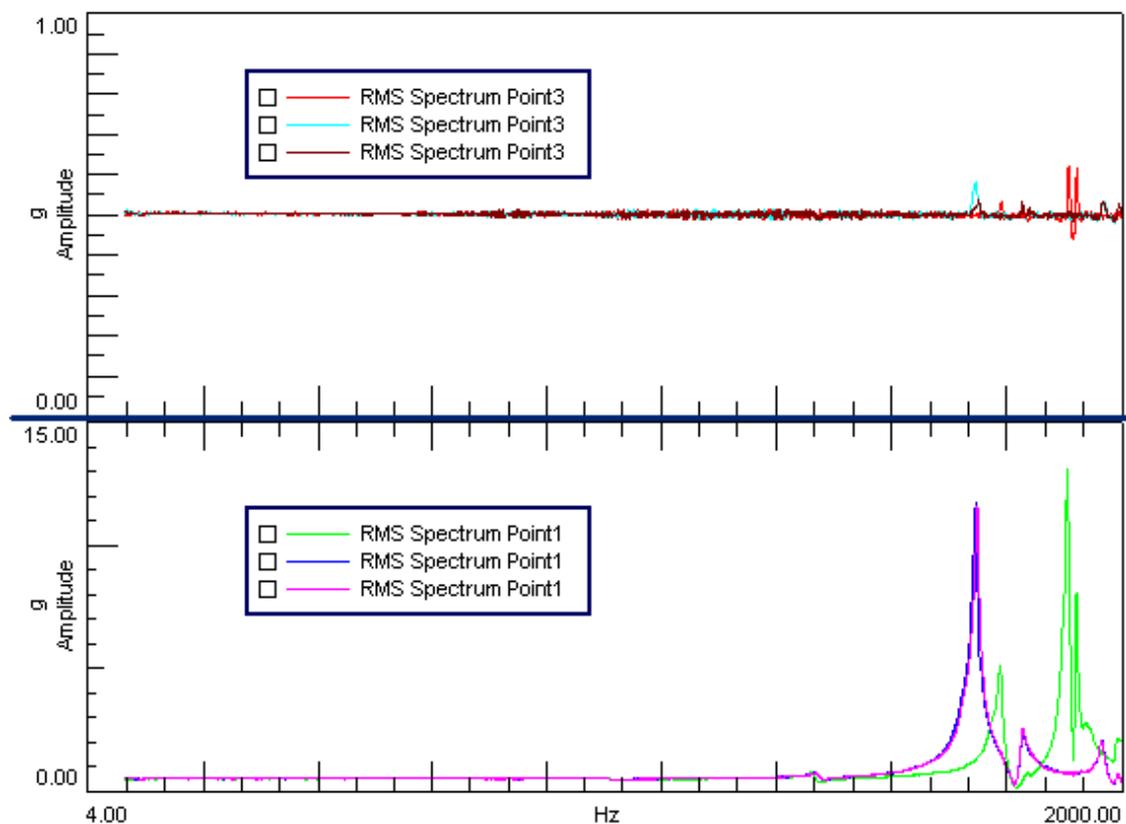


Figura 54 - Prova di sweep delle frequenze. La misura sullo shaker (in alto) e la risposta dell'ottica (in basso)

Il test viene ripetuto anche dopo le prove di vibrazione random e di shock per verificare eventuale cambiamenti nella frequenza propria di risonanza dopo le varie sollecitazioni.

Il picco che si vede all'approssimarsi dei 2000Hz è dovuto alla testa dello shaker, su cui è stato posto un vertical expander con una propria frequenza di risonanza, per aumentare la superficie di interfaccia con la struttura, com'è visibile dall'andamento dell'accelerometro di controllo nel grafico superiore.

La frequenza propria di risonanza della struttura non viene rilevata trovandosi oltre la banda di frequenze del test.

5.2.2 VIBRAZIONI RANDOM

Nella fase di propulsione, durante il lancio, un satellite viene sottoposto ad un elevato carico di natura non stazionaria agente in uno spettro di frequenze dipendenti dal lanciatore.

Queste accelerazioni possono essere studiate attraverso metodologie stocastiche ed espresse sotto forma di profili di densità di potenza spettrale (PSD, *power spectral density*).

Generato un segnale di natura randomica e caratterizzato dalla densità di potenza spettrale richiesta, ricostruibile in un determinato intervallo di frequenze, è possibile ricostruire in che direzione e con quanta potenza esso si possa manifestare al variare della frequenza.

La distribuzione di potenza utilizzata è quella imposta per la qualifica sul lanciatore VEGA riportata in tabella [10].

Freq. [Hz]	(g²/Hz)
20	0.0727
60	0.0727
70	0.1
200	0.1
300	0.2
700	0.2
2000	0.02
Durata	2.5 min

Tabella 14 - PSD di VEGA - Qualifica

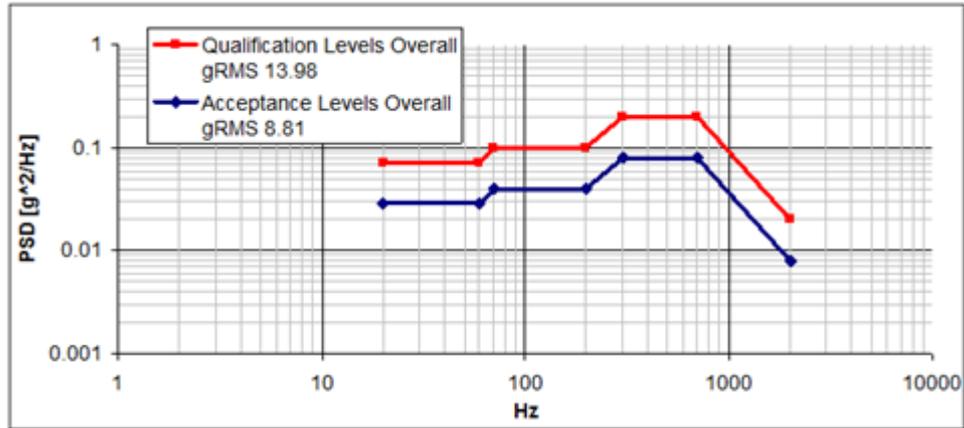


Figura 55 - Profilo PSD di VEGA

Di seguito sono riportati i grafici della prova in cui sono illustrati la ripetizione del profilo PSD da parte dello shaker e la risposta dell'ottica in cui si nota in picco sui 1680 Hz come già rilevato nello sweep di frequenze

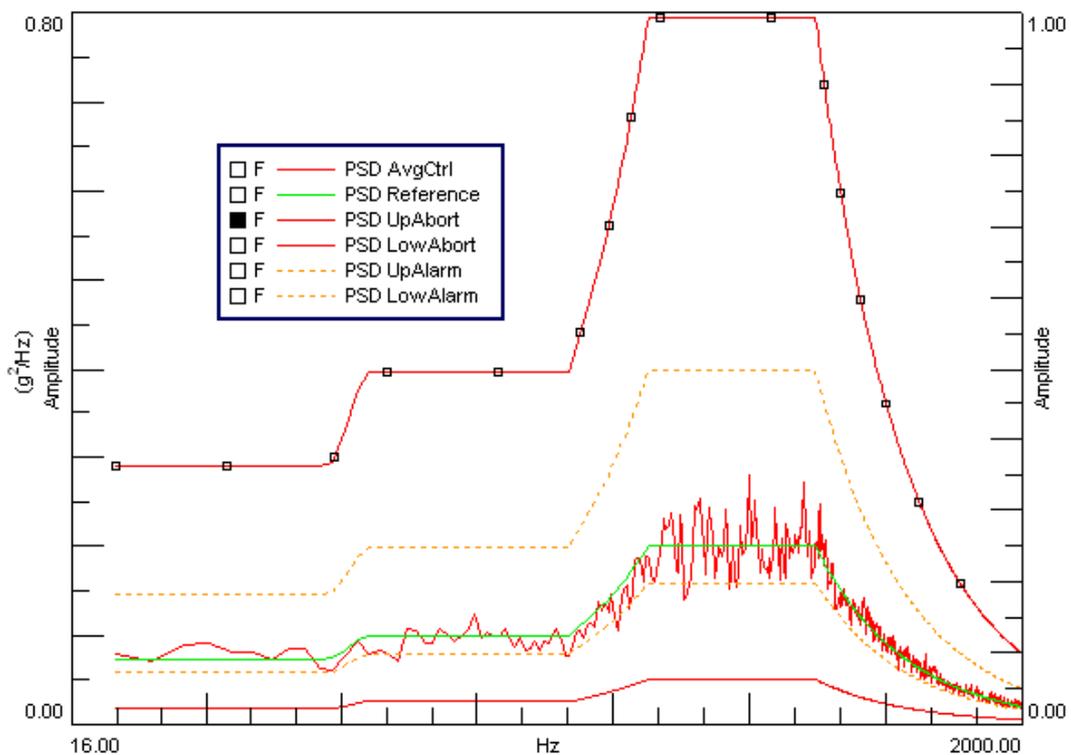


Figura 56 - Prova PSD effettuata dallo shaker

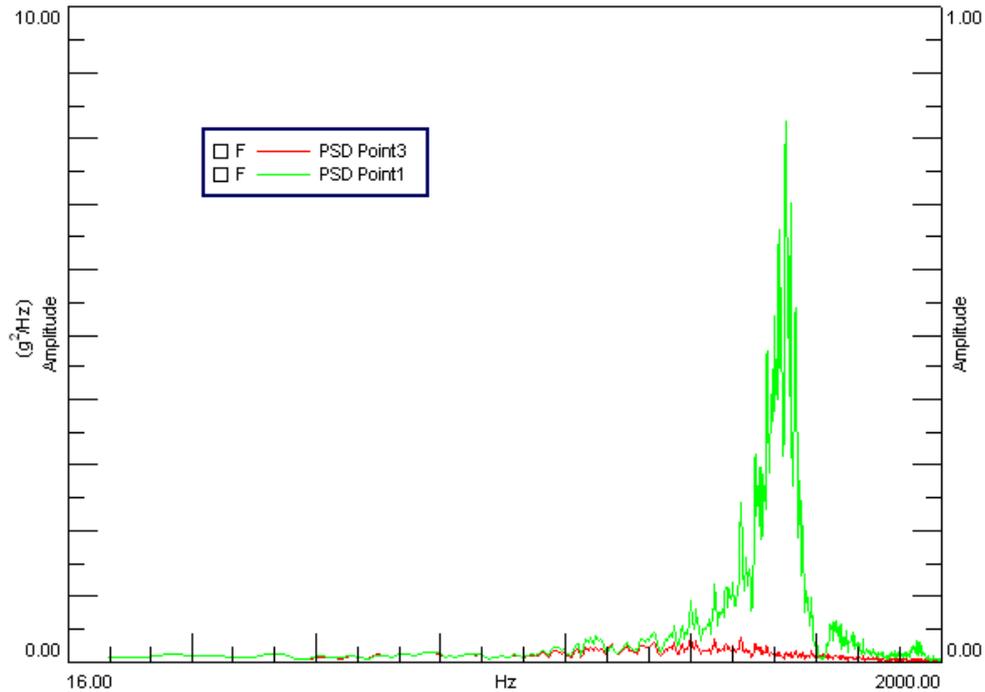


Figura 57 - Risposta dell'ottica alla prova PSD

5.2.3 SHOCK

La prova di shock riguarda la fase di sgancio e di separazione del fairing e dei payload del vettore VEGA. Questa prova è detta di shock perché caratterizzata da elevate accelerazioni della durata di millisecondi.

Il contenuto energetico, in funzione della frequenza, dell'impulso di shock è riportato nello *shock response spectrum* (SRS). Anche per questa prova si è utilizzato il profilo fornito per il lanciatore VEGA [10].

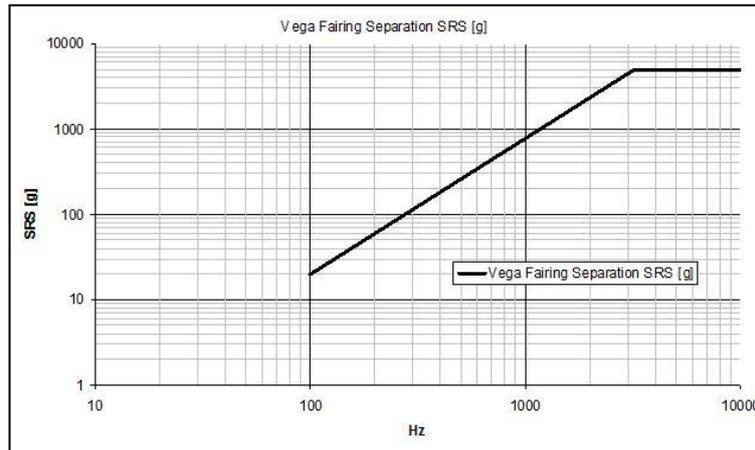


Figura 58 - Profilo SRS di VEGA

Lo shaker utilizzato nel test non è in grado di raggiungere le prestazioni impulsive richieste di 2000g in 0.5 ms: per simulare lo shock ricorre quindi ad una accelerazione di 70g distribuita per 40 ms come illustrato dal grafico sottostante che mostra anche la risposta dell'ottica. Pur variando intensità e durata dell'impulso, rimane immutato il contenuto energetico dello stesso, permettendo quindi di ottenere una prova comunque rappresentativa in rispetto dei requisiti imposti: questa procedura è stata già verificata ed approvata per la qualifica al volo sul lanciatore VEGA, come nel caso del microsatellite ALMASat-1.

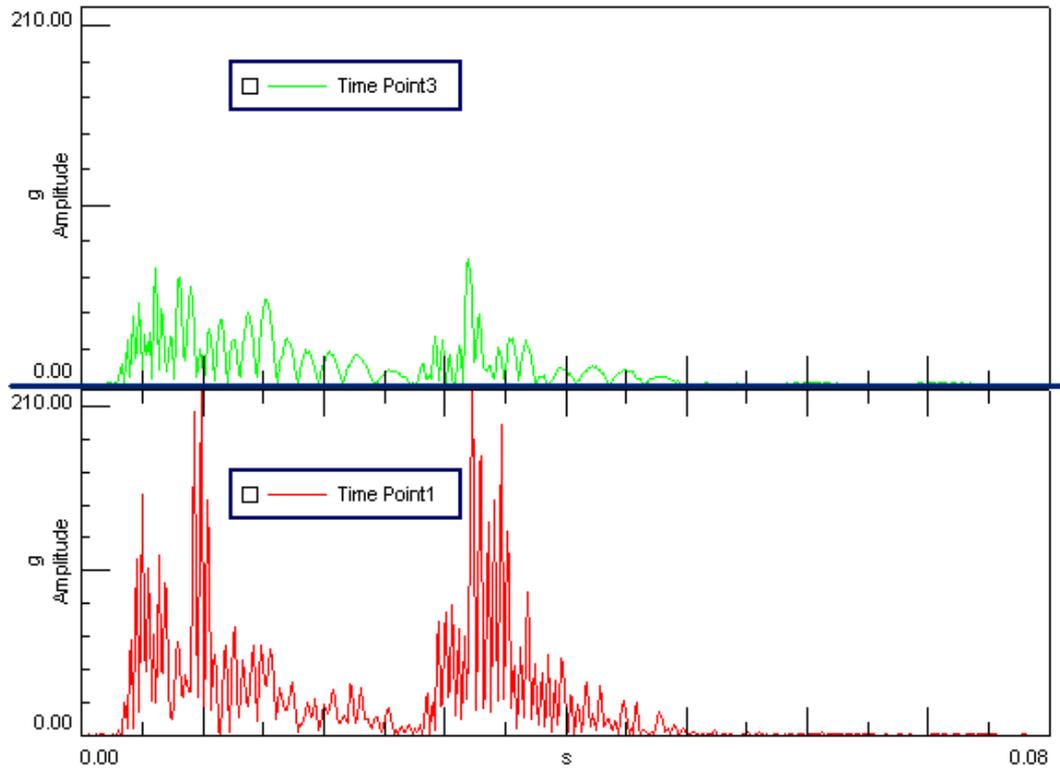


Figura 59 - Prova di shock con misurazione sullo shaker (in verde) e sull'ottica (in rosso)

Nel grafico seguente è mostrata invece la risposta in frequenza.

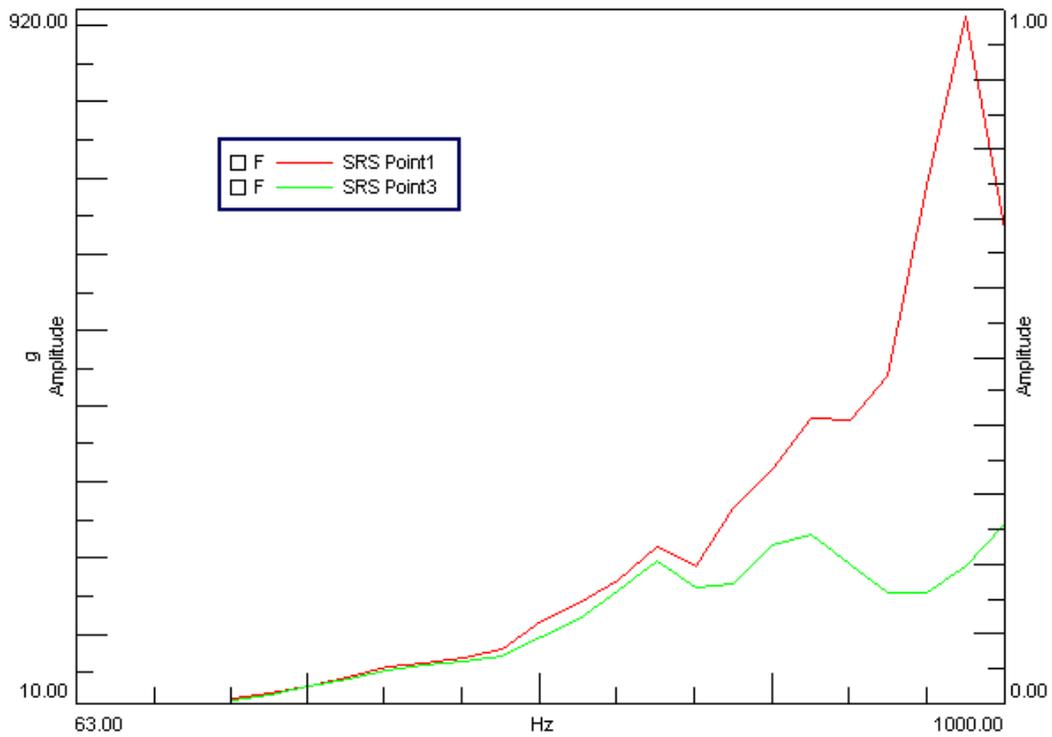


Figura 60 - Risposta in frequenza alla prova di shock

5.2.4 CONCLUSIONI

I test vibrazionali si sono conclusi positivamente, la struttura infatti non presenta frequenze di risonanza nella banda di frequenze richiesta per il test, inoltre le prove random e di shock hanno mostrato come essa sia in grado di sopportare le sollecitazioni volute senza danneggiamenti.

6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo elaborato si è descritto il funzionamento del software di gestione del sensore di Sole illustrandone le varie funzioni a partire dalla scrittura dei driver di basso livello per la comunicazione seriale con gli ADC per finire con l'elaborazione dei dati per poter ottenere il vettore di posizione richiesto dall'ADCS. Si è proceduto poi a illustrare la procedura di calibrazione per correggere gli errori di disassamento dell'ottica e quelli dovuti all'indice di rifrazione per poi mostrarne i risultati. Infine si è mostrato il funzionamento del sensore utilizzando come input, al posto delle correnti fornite dal PSD non disponibile in questa fase ancora prototipale, tensioni fornite da quattro potenziometri.

Dai risultati dei test si vede il miglioramento delle caratteristiche del segnale con l'introduzione degli algoritmi di filtraggio nella parte di elaborazione. Nella tabella sono mostrati i risultati mediati su tutti canali della deviazione standard dell'errore e della differenza tra massimi e minimi ad ogni passo dell'elaborazione (dall'acquisizione alla rimozione dei massimi e minimi per finire con la media dei valori restanti).

	Media stddev	Media ΔV
1 Acquisizione	$0.9304 \cdot 10^{-3}$	0.0064 V
2 Rimozione dei massimi e minimi	$0.5379 \cdot 10^{-3}$	0.0026 V
3 Operazione di media	$0.1525 \cdot 10^{-3}$	0.0007 V

Tabella 15 - caratteristiche dei segnali al procedere dell'elaborazione

Si vede come la deviazione standard quasi si dimezzi per poi diventare un sesto di quella del segnale originale, mentre il ΔV si riduce quasi di un ordine di grandezza rispetto alla differenza iniziale. Questo porta ad un

incertezza in sulla posizione del punto luce nell'ordine di $3 \cdot 10^{-4}$ mm, $4 \cdot 10^{-4}$ mm che si rispecchia anche nella composizione del vettore finale.

I test ambientali hanno poi mostrato il buon comportamento del sensore al variare della temperatura con la deviazione standard dell'errore che non presenta cambiamenti significativi, mentre l'aumento del voltaggio rilevato nei quattro canali è molto modesto (il valore massimo è $2 \cdot 10^{-3}$ V nel quarto canale) e non comporta sostanziali variazioni nel calcolo del vettore finale (nell'ordine dell' $1 \cdot 10^{-4}$ mm) a causa delle relazioni differenziali con cui viene calcolata la posizione del punto luce ; mentre per le prove vibrazionali si è visto come la struttura oggetto del test non abbia incontrato problemi nel corso della varie tipologie di prove, non mostrando risonanze dannose all'interno della banda di frequenze di interesse e superando senza subire danneggiamenti le prove random e di shock.

In futuro si provvederà a sostituire i PCB del prototipo con le versioni definitive dove il PSD sarà connesso all'elettronica e si potranno effettuare le prime acquisizioni reali del Sole. Si dovrà inoltre ripetere la calibrazione qui effettuata tramite camera CCD utilizzando il PSD per verificare la correttezza dei test effettuati.

Con i PCB definitivi si dovranno inoltre effettuare le prove vibrazionali sul sensore completo per verificare eventuali differenze rispetto alle prove sulla sola parte meccanica e ottica fin qui effettuate.

7 BIBLIOGRAFIA

1. Wertz, J. R. “*Spacecraft Attitude Determination and Control*”, Microcosm, Torrance, California, U.S.A.
2. Ubaldini, A. “*Studio dell’ambiente di sviluppo e dell’architettura software del sensore di sole del micro satellite ALMASat-EO*” Elaborato di preparazione alla tesi, II Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, A.A. 2010-2011
3. Bianchi, C. “*Subsystem Design Project: ALMASat-EO SunSensor EO*”.
4. Hamamatsu Corporation “*Hamamatsu - Large-Area PSD Series*”
<http://www-cdr.stanford.edu/MADEFEST/catalogs/hamamatsu/psd-principle.html>
5. Texas Instruments “*16-Bit, 4-Channel Serial Output Sampling ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER*”. <http://www.ti.com/lit/ds/sbas183c/sbas183c.pdf> , Aprile 2003.
6. STMicroelectronics “*Connectivity line, ARM-based 32-bit MCU with 64/256 KB Flash, USB,OTG, Ethernet, 10 timers, 2 CANs, 2 ADCs, 14 communication interfaces*”, Maggio 2010.
7. Bianchi, C. “*Sun Sensor Progetto: ALMASat-1*”, Febbraio 2012.
8. Newhall, X.X. “*Numerical representation of planetary ephemerides*”
Jet Propulsion Laboratory
9. Rinchi, M. (internet) “*Dispense di Complementi di Meccanica delle Vibrazioni*”.[http://mapp1.de.unifi.it/corsi/Rinchi/MeccVibr/Complementi_Meccanica_Vibrazioni\(Mecc\).pdf](http://mapp1.de.unifi.it/corsi/Rinchi/MeccVibr/Complementi_Meccanica_Vibrazioni(Mecc).pdf)
10. D.Bruzzi, A.Corbelli, A.Rivola, P.Tortora, G.Camauli “*Test di vibrazione condotti sul microsatellite ALMASat-1*”.
<http://www.affidabilita.eu/tuttomisure/articolo.aspx?idArt=234>.

