
Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Approccio di protezione agli effetti ambientali

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

L'ambiente spaziale ha una forte influenza sulle prestazioni di un Satellite. Le possibili degradazioni sono spesso dovute alle radiazioni che raggiungono i componenti elettronici.

Una buona valutazione dei potenziali effetti è una parte essenziale del processo d'ingegnerizzazione per la realizzazione di ogni elemento del satellite.

E' importante quindi che questa valutazione venga fatta nelle fasi iniziali della progettazione quando vengono definiti i budget di satellite e la selezionati i componenti.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Le domande che generalmente si pone un progettista di apparati per satelliti sono:

- quale componente posso utilizzare
- dove posso posizionarlo
- per quanto tempo deve lavorare

L'ambiente spaziale influenza fortemente la risposta a tutte queste domande.

Lo studio approfondito dell'ambiente mostra che un buon progetto bilanciato con una attenta scelta delle varie tecnologie può assicurare la sopravvivenza del satellite.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

L'ambiente spaziale (1/2)

L'ambiente naturale di un satellite è costituito principalmente da :

- Elettroni di energia di qualche MeV e protoni di diverse centinaia di MeV intrappolati magneticamente nelle fasce di Van Allen poste attorno alla terra.
- Particelle energetiche solari prodotte dalle eruzioni solari i cui flussi variano in entità durante il ciclo solare di 11 anni (7 anni di minimo solare e quattro di massimo solare).
- Raggi cosmici costituiti da ioni il cui flusso è basso ma sono altamente energetici e possono depositare una grande quantità di energia nel volume sensibile. e così causare problemi.
- Radiazioni secondarie generate dall'interazione delle particelle con i materiali del satellite.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

L'ambiente spaziale (2/2)

Per ogni missione satellitare viene valutato l'ambiente poiché esso varia a causa della:

- orbita : altitudine ed inclinazione
- durata della missione.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Esame degli effetti (1/3)

- Le particelle energetiche, particolarmente quelle delle fasce di Van Allen e degli eventi solari causano danneggiamenti sui componenti elettronici. Queste radiazioni possono penetrare le pareti del satellite e depositare una dose considerevole durante la missione.



Valutazione della Dose Cumulata

- Gli ioni energetici, principalmente quelli derivanti dai Raggi cosmici e dagli eventi solari, perdono rapidamente energia nei materiali attraverso ionizzazione. Questa energia trasferita può corrompere o danneggiare elementi di memoria determinando SEU (Single Event Upset) del componente. SEU possono anche essere causati da interazione nucleare tra protoni intrappolati molto

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Esame degli effetti (2/3)

energetici e l'area sensibile del componente. Quindi il protone rompe il nucleo e i frammenti causano una alta ionizzazione locale



Valutazione dei Single Event Phenomena

- Elettroni energetici possono penetrare schermi e depositare cariche in materiali interni dielettrici come cavi o altri isolanti, e su parti metalliche non messe a massa. Queste possono successivamente creare una scarica generando interferenze elettromagnetiche e non degradazioni del componente.



Valutazione del Caricamento Superficiale

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Esame degli effetti (3/3)

- Oltre che per la dose ionizzante, le particelle possono perdere energia attraverso interazione non-ionizzante, “displacement damage” o danneggiamento del volume, dove gli atomi vengono spostati dalla loro posizione originale. Questo può alterare le proprietà elettriche, meccaniche o ottiche dei materiali ed è un importante meccanismo di danneggiamento per i componenti optoelettronici (celle solari, optocoupler, etc) o rivelatori come CCDs.



Valutazione del Displacement Damage

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Quantificazione degli effetti

Diversi modelli per la definizione dell'ambiente sono stati sviluppati e sono utilizzati per supportare la scelta dell'orbita, la selezione dei componenti e l'ottimizzazione degli schermi.

Nel progettare un satellite in grado di operare in un ambiente spaziale è necessario relazionare l'ambiente alle degradazioni del sistema quantitativamente. Questo richiede quindi di definire i componenti da utilizzare e di verificare che questi possono garantire le prestazioni richieste in presenza dell'ambiente spaziale.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Parametri per la quantificazione degli effetti delle radiazioni sui componenti elettronici

Effetto

Degradazione dei componenti elettronici

Single Event Phenomena

Degradazione dei componenti optoelettronici

Parametro

Dose Ionizzante assorbita

Spettro dell'energia trasferita dagli ioni nel componente (LET)

Spettro dell'energia dei protoni

Frequenza dei SEU/SEL del componente

Dose Non Ionizzante trasferita (NIEL)

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Conseguenza delle radiazioni:

Per considerare gli effetti delle degradazioni dovute alle radiazioni sui componenti elettronici è necessario quindi considerare che:

- La degradazione può essere causata sia da ionizzazione che da displacement atomico.
- Gli effetti possono essere accumulati nella vita o transitori.

L'effetto dipende dal tipo di radiazione che si va a considerare.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Ionizzazione

L'ambiente dovuto alla dose ionizzante è rappresentato dalla Dose Depth curve . Essa fornisce la dose totale in funzione dello spessore dello schermo normalmente rapportato alla densità dell'alluminio.

Buona parte delle radiazioni presenti nell'ambiente spaziale viene assorbita dagli schermi interposti tra lo spazio ed i componenti. Pertanto per valutare l'effettiva dose di radiazioni che incide sui componenti occorre esaminare gli effetti dello schermo.

Tutte le masse che circondano il componente possono essere una protezione

Lo schermo ha un'efficacia che dipende dalla densità del materiale che lo costituisce, tanto più il materiale è denso, tanto più lo schermo è efficiente.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Regole di progettazione:

- la predizione delle degradazioni deve essere calcolata in tempo per influenzare il progetto elettrico e meccanico (layout)
- la selezione dei componenti può aumentare la vita del satellite (p.e. non aumentare il peso degli schermi o la complessità)
 - ❑ Evitare di mettere componenti sensibili su carte che guardano l'esterno del satellite
 - ❑ Posizionare i componenti sensibili vicini tra loro per avere una mutua protezione e posizionare l'unità che li contiene vicino ad elementi strutturali
 - ❑ Il minimo peso di schermi è ottenuto da piccoli schermi locali con alta densità(per esempio angolo solido largo sotteso da una piccola superficie di massaridotta)

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Trade off fra peso dello schermo e livello di resistenza alle radiazioni (1/2)

Per missioni geostazionarie di periodo maggiore ai 10 anni il controllo del livello di tolleranza alle radiazioni dei componenti è molto critico

⇒ **Requisito : Livello minimo di resistenza alle radiazioni**

Per componenti con un livello di resistenza alle radiazioni minore ai 10 Krads è impossibile definire uno schermo sufficiente per permettergli di sopravvivere per la missione desiderata.

Anche con uno schermo spesso è difficile raggiungere livelli di dose accettabili. Un componente con un livello di resistenza alle radiazioni più elevato può sopravvivere nell'ambiente spaziale ed il suo maggior costo può essere bilanciato da quello dovuto alla riduzione del peso e/o quindi del raggiungimento della vita in orbita.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Trade off fra peso dello schermo e livello di resistenza alle radiazioni)

(2/2)

Le misure alternative che possono essere intraprese per permettere ai componenti elettronici di sopravvivere la missione in orbita sono:

- Special siting
- Special shielding
- Special procurement

Quello che lascia la massima flessibilità nel progetto è ovviamente lo 'special procurement'. In questo caso la risoluzione del problema è delegata al componente stesso ma costringe spesso ad utilizzare un particolare costruttore limitando quindi la possibilità di comprare il componente nei tempi e nei costi richiesti.

La definizione del progetto è quindi basata sul trade-off delle tre possibili soluzioni, valutando gli impatti sui tempi, costi e prestazione.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Single Event Phenomena (1/2)

L'interazione degli ioni e/o dei protoni energetici con i componenti sensibili può causare diversi tipi di fenomeni:

- SEU = Disturbo di un micrologico, la risposta può essere un soft error cioè un cambiamento di un bit \Rightarrow l'effetto è transitorio non distruttivo
- SEL = fenomeno che avviene nei componenti CMOS BULK O EPI \Rightarrow l'effetto è distruttivo
- SEB = fenomeno che avviene nei transistori Power MOSFET , canale N. \Rightarrow l'effetto è distruttivo
- SEGR = fenomeno che avviene nei transistori Power MOSFET. \Rightarrow l'effetto è distruttivo
- SET = fenomeno che avviene nei circuiti integrati bipolari lineari \Rightarrow l'effetto è transitorio, non distruttivo

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Single Event Phenomena (2/2)

- SEU/SET : non essendo un effetto distruttivo viene richiesto di analizzarne l'effetto e di calcolare la frequenza di occorrenza il cui impatto comunque deve essere valutato sulle prestazioni richieste all'unità.
- SEL : essendo un evento distruttivo i componenti utilizzati devono essere insensibili a questo evento almeno fino alla energia richiesta dai requisiti di programma.
- SEB : stesso requisito del SEL, in questo caso comunque applicare una condizione di polarizzazione adeguata ($V_{ds} < 50\%$ del valore massimo) garantisce la non occorrenza del fenomeno.
- SEGR : stesso requisito del SEL, in questo caso comunque applicare una condizione di polarizzazione adeguata ($V_g < 0$ V per MOSFET canale P e $V_g > 0$ per canale N) garantisce la non occorrenza del fenomeno.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Displacement Damage

Un semiconduttore esposto a radiazioni è soggetto a danni dovuti a dislocazioni nel volume, legati al flusso sia di protoni che di elettroni. Quindi va valutato se i componenti sono in grado di sopravvivere al flusso delle particelle durante tutta la missione. I componenti sensibili sono essenzialmente i componenti Bipolari e Optoelettronici. Per i componenti MOS questo effetto può essere ignorato perché la soglia di sensibilità è molto alta. La degradazione dei parametri elettrici dovuti al Displacement viene quindi aggiunta alla degradazione dovuta alla Dose totale.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Degradazioni principali per tipologie di componenti

Le tipologie di componenti più sensibili alle radiazioni sono:

- Transistori (Bipolari e FET)
- Power MOSFET
- Diodi
- Micrologici Digitali
- Micrologici Lineari

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Transistor

La variazione del guadagno del transistor è l'effetto principale delle radiazioni sui transistor bipolari. Una causa della degradazione del guadagno è il displacement atomico nel volume (bulk) del semiconduttore. Questo danneggiamento facilita il processo di ricombinazione delle cariche libere e quindi riduce la vita delle cariche minoritarie. L'altra causa della degradazione del guadagno è la ionizzazione nello strato di ossido che copre la regione della giunzione emettitore – base. Un aumento nella velocità di ricombinazione delle cariche minoritarie riduce il guadagno. Altri effetti permanenti sono l'aumento delle correnti di leakage ed un aumento della V_{cesat} .

I transistor di tecnologia FET hanno mostrato che tale tecnologia è maggiormente resistente alle radiazioni, eventuali degradazioni si hanno per flussi di maggiore entità.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Power MOSFET

Il principale effetto delle radiazioni ionizzanti è quello di degradare la tensione di soglia, La tensione di soglia diminuisce nel caso di MOSFET a canale-N ed aumenta per quelli a canale-P.

Diodi

Il comportamento del diodo verso le radiazioni è generalmente molto meno critico dei transistor. Anche i diodi possono essere soggetti ad effetti di degradazione superficiale, applicata alla giunzione p-n, dovute alla ionizzazione con aumento delle correnti di leakage, questa degradazione è comunque poco sensibile alla dose assorbita.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Microcircuiti digitali

I circuiti integrati non sono soggetti a danni di volume ma la loro causa principale di danno è la ionizzazione superficiale . L'effetto delle radiazioni ionizzanti sui componenti digitali che usano tecnologia MOS è quello di degradare la tensione di soglia. La tensione di soglia diminuisce nel caso di MOSFET a canale-N ed aumenta per quelli a canale - P.

Microcircuiti Lineari

L'effetto delle radiazioni determina un aumento sia della tensione di offset ($V_{in\ offset}$) che della corrente di offset (I_{inoff}) che della corrente di bias (I_{inbias}).

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Politica di Radiation Assurance

Alenia Spazio attua la seguente politica di Radiation Assurance

Selezione dei componenti

1. Caratterizzazione verso :
 - Total Dose ,
 - Displacement Damage,
 - Single Event Phenomena
2. Analisi dei dati di radiazione
3. Verifica congruenza con livelli di resistenza alle radiazioni di programma.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Valutazione dell' hardness alla dose ionizzante

1. Esame dei test disponibili

1. I test debbono essere fatti in accordo con le normative Europee o USA
2. i componenti testati sono costruiti con la stessa tecnologia dei componenti utilizzati nelle unità flight
3. i componenti testati devono avere un date code o diffusion lot in accordo al criterio riportato nella tabella 1 definita in base alla sensibilità alle radiazioni della tipologia dei componenti ed alla variazione di risposta da un lotto ad un altro
4. Le condizioni di test devono essere peggiori o uguali a quelle dell'applicazione
5. Il test è eseguito almeno fino al livello della dose ricevuta all'interno del satellite nella posizione peggiore.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Device Category (MOS/CMOS)	Test Criteria	Dose Rate	Device Category (BIPOLAR)	Test Criteria	Dose Rate	Sample Size
Transistors	1	Low or High	Transistors	10	Low or High	5
Analog Ics	1	Low or High	Analog Ics P W M	All / 1 4	Low	5
Logic Ics	4	Low or High	Logic Ics	6	Low	5
RAMS, PROMS, FPGAs, ASICs Microprocessors	10	Low or High	RAMS, PROMS, FPGAs, ASICs Microprocessors	10	Low	2-3
CCD	All	Low or High	CCD	All	Low	3
Optoelectronic	4	Low or High	Optoelectronic	4	Low	3

TABLE 1: Device Category with Test Criteria

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Valutazione dell' effetto della dose assorbita

1. Identificazione della sensibilità del componente
2. calcolo della dose
3. Analisi circuitale nelle condizioni peggiori
4. studio delle azioni correttive

I componenti possono essere utilizzati dopo la verifica che la dose ricevuta è inferiore a quella accettabile dall'applicazione circuitale.

L'analisi circuitale nelle condizioni peggiori (Worst Case Analysis) deve tener conto degli effetti dovuti alla degradazione dovuta alle radiazioni usando i drift misurati durante i test.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Valutazione dell' hardness al Displacement Damage

1. Esame dei test disponibili

1. I test debbono essere fatti in accordo con le normative Europee o USA
2. i componenti testati sono costruiti con la stessa tecnologia dei componenti utilizzati nelle unità flight
3. Le condizioni di test devono essere peggiori o uguali a quelle dell'applicazione
4. Il test è eseguito almeno fino alla rottura del componente o al livello della dose ricevuta all'interno del satellite nella posizione peggiore.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Valutazione dell' effetto del Displacement Damage

1. Identificazione della sensibilità
2. Calcolo della dose
3. Analisi circuitale nelle condizioni peggiori
4. studio delle azioni correttive

I componenti possono essere utilizzati dopo la verifica che la degradazione dovuta alla dose non ionizzante trasferita ricevuta è inferiore a quella accettabile dall'applicazione circuitale.

L'analisi circuitale nelle condizioni peggiori (Worst Case Analysis) deve tener conto oltre che degli effetti dovuti alla degradazione dovuta alla dose totale anche quella dovuta al displacement.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Valutazione dell' hardness al SEP

1. Esame dei test disponibili

1. I test debbono essere fatti in accordo con le normative Europee o USA
2. i componenti testati sono costruiti con la stessa tecnologia dei componenti utilizzati nelle unità flight
3. Le condizioni di test devono essere peggiori o uguali a quelle dell'applicazione
4. Il test è eseguito almeno fino alla rottura del componente o al livello della dose ricevuta all'interno del satellite nella posizione peggiore.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Valutazione dell' effetto del SEP

1. Identificazione della sensibilità
2. Calcolo della frequenza di occorrenza dell'evento
3. Analisi dell'effetto del SEP sulla funzionalità dell'unità
4. studio delle azioni correttive

I componenti possono essere utilizzati dopo la verifica dei criteri definiti per tipologia di fenomeno.

Componenti elettronici per apparecchiature spaziali

Conclusione

E' stato presentato l'approccio definito da Alenia Spazio per consentire ai componenti elettronici per apparecchiature spaziali di sopravvivere all'ambiente spaziale.

A seguito della valutazione della fisica dei problemi dovuti alle particelle e l'analisi degli effetti indotti, è stata definita una politica di Radiation Assurance che fornisce sia requisiti quantitativi (livello minimo di resistenza ai fenomeni) che criteri di progettazione (protezioni meccaniche ed elettriche). Inoltre viene definita anche il processo di valutazione dell'ambiente spaziale per supportare la progettazione del satellite