

CUBESAT E NANOSATELLITI, NUOVE PROSPETTIVE DI SVILUPPO

autori: Stefano Coltellacci, Cristina Vittucci, Giuseppina De Felice Proia
dal Workshop 13 Dicembre 2019 presso Scuola di Ingegneria Aerospaziale - Via Salaria 851
organizzato da Commissione Aerospazio - Ordine Ingegneri Provincia di Roma

Generalità

Le piattaforme cubesat, e nanosatelliti in generale, sono nate da una felice intuizione destinata a progetti educativi, per portare studenti universitari a contatto con il mondo delle missioni spaziali. L'idea di base era che una piattaforma di volo standardizzata avrebbe ridotto notevolmente la complessità delle procedure di assemblaggio, integrazione e testing, tempi e costi di sviluppo; secondo questa filosofia anche il modulo payload sarebbe risultato molto semplificato, ma questo non avrebbe pregiudicato lo scopo principale, anzi la possibilità di ampliare l'accesso al mondo spaziale avrebbe moltiplicato il numero dei potenziali realizzatori a tal punto da generare una "fioritura" di idee e progetti potenzialmente prodigiosa. La mancanza di logiche commerciali obbiettivi di natura in campo governativo/difesa avrebbe inoltre reso "accettabile" il numero di failure nelle missioni; i costi peraltro sarebbero stati compensati dalla logica educativa di allargare enormemente il numero dei tecnici e scienziati potenzialmente in grado di progettare o comunque partecipare ad una missione spaziale. I grandi sviluppi nella connettività mondiale dei primi anni 2000, degli applicativi software e dei social network hanno facilitato questa tipologia di missioni, facendo partecipare studenti di piccole università, scuole tecniche secondarie e spin-off universitari che fino a pochi anni prima non avrebbero avuto risorse per accedere. Una grande novità degli ultimi anni è il cosiddetto New Space (Nuovi soggetti che costruiscono e finanziano missioni spaziali, Nuove tecnologie emergenti applicabili, Nuovi utenti che richiedono Nuovi servizi); in questo nuovo contesto le piattaforme Cubesat e nanosatelliti, oramai giunte a maturità tecnologica, possono trovare uno sviluppo, inizialmente impreveduto, e diventare strumento per missioni spaziali pienamente operative anche in ambito commerciale o governativo/difesa. Il presente articolo si propone di analizzare il panorama italiano e internazionale di queste piattaforme, gli sviluppi e le nuove prospettive di utilizzo nei vari segmenti che caratterizzano una missione spaziale come segmento di terra, lanciatore, payload e ambiente spaziale, visto come vero e proprio "spazio da condividere" in modo consapevole e regolamentato.

1.2 GLI ESORDI

Lo standard CubeSat, creato da California Polytechnic State University, San Luis Obispo e da Space Systems Development Lab della Stanford University nel 1999 per facilitare l'accesso allo spazio per gli studenti universitari.

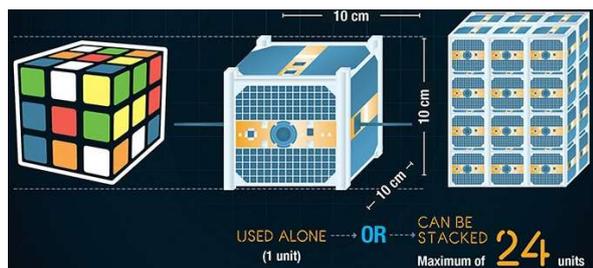


Figura 1: Schema di una piattaforma cubesat

I suoi inventori sono **Robert J. "Bob" Twiggs**, professore allo Space Systems Development della Stanford University Laboratory (SSDL), attualmente professore di astronautica e scienze spaziali alla Morehead State University e **Jordi Puig-Suari**, professore di progettazione di veicoli spaziali, dinamica e controllo di veicoli spaziali e meccanica orbitale alla California Polytechnic State University, è il co-fondatore della Tyvak Nano-Satellite.

Al di fuori del mondo universitario le reazioni furono poco incoraggianti, le grandi agenzie spaziali e centri di ricerca governativi erano dubbiosi sull'effettiva efficacia dei payload dei cubesat mentre il mondo industriale non vedeva di buon occhio la totale mancanza di affidabilità

connessa alla semplificata filosofia di AIT. I creatori non si persero d'animo e continuarono nel loro percorso fidando anche sul fatto che il mancato supporto (e quindi stretta connessione e influenza) di tali soggetti sarebbe stato solo un vantaggio potendo godere di una libertà di creatività molto superiore.



Figura 2 Robert J. "Bob" Twiggs e Jordi Puig-Suari

Dopo 20 anni i numeri hanno dato ragione a questa scelta con quasi 1200 cubesat lanciati (per un circa 2500U con data 12-2019). La maturità della piattaforma e delle procedure di AIT hanno portato alla nascita di decine di piccole aziende operanti nella costruzione e nei servizi di questi nano satelliti convincendo, anche i soggetti più settici, a fare entrare a pieno titolo queste piattaforme satellitari nel mondo delle missioni spaziali applicative.

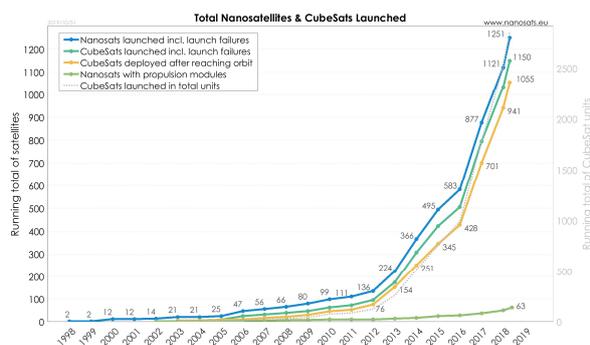


Figura 3 : Numero totale di cubesats, nanosats e unità lanciate (dati 12-2019)

1.3 PROSPETTIVE DI RICERCA E EDUCAZIONALI

Lo spazio sta entrando ormai nelle nostre aule per cambiare il modo di insegnare e apprendere le materie tecnico-scientifiche conosciute come materie STEM, acronimo di Science, Technology, Engineering and Maths. Pur non essendo in sé disciplina di insegnamento, lo Spazio è divenuto un nuovo ambiente di apprendimento basato sull'hands-on experience che mette a disposizione modelli reali di metodologia scientifica, collaborazione, accesso a dati scientifici e a strutture e ruoli professionali. Ciò è reso possibile anche grazie al sostegno delle stesse agenzie spaziali di tutto il mondo. Si pensi alla NASA, all'ESA, e per l'Italia all'ASI. Il principale progetto europeo nell'educazione spaziale è l'ESERO, attivo dal 2006 e coordinato dall'ESA e dalle agenzie nazionali. Il progetto si rivolge alla scuola primaria e secondaria di I e II grado e mira allo sviluppo negli studenti di conoscenze e tecnologie, con particolare attenzione allo Spazio, proponendosi anche di formare comunità di docenti attraverso eventi di formazione interamente gratuiti. Allo scopo di raggiungere tali obiettivi, ESERO organizza ogni anno delle straordinarie competizioni nazionali e internazionali. Per la scuola secondaria di II grado le più famose coinvolgono la progettazione e la simulazione di nanosatelliti e sono rappresentate da CANSAT e ZERO ROBOTICS, quest'ultima sostituita, a partire dal corrente anno scolastico, da ASTROBEE. Attraverso questi concorsi a supporto dell'educazione spaziale vengono sollecitati negli studenti la motivazione, l'innovazione, il lavoro di squadra e il pensiero critico, in un'ottica interdisciplinare, progettuale e inclusiva.

Nel contesto dell'Osservazione della Terra da Satellite, possiamo pensare di suddividere le diverse tipologie di missioni e conseguentemente le corrispondenti tipologie di satelliti che le costituiscono in base ai diversi obiettivi di missione, e alla loro storia, e alle dimensioni del payload, partendo da quelli le cui tecnologie sono ormai consolidate. Troviamo quindi Satelliti a scopi scientifici, sviluppati in programmi di missioni innovative a carattere prettamente scientifico; satelliti meteorologici, di carattere più puramente operativo, che svolgono il ruolo di monitoraggio meteo; satelliti da agenzie spaziali nazionali, che possono avere obiettivi scientifici così come

governativi/difesa e commerciali e satelliti di operatori satellitari privati a scopi principalmente commerciali.

In questo scenario, due importanti innovazioni risiedono nella implementazione di grandi missioni satellitari, del Programma Copernicus della Comunità Europea, a carattere puramente operativo ma in ambiti differenti da quello classicamente associato alla meteorologia e la nascita di missioni basate su costellazioni di mini-satelliti, attualmente operate enti privati. Ancora più recentemente le tecnologie di miniaturizzazione, che ha portato ad esempio alla definizione della piattaforma CubeSat, sono arrivate ad un sufficiente livello di maturità da stimolare l'attivazione di programmi di finanziamento per lo sviluppo di nuove possibili missioni da parte di agenzie spaziali sovranazionali come l'ESA. Lo schema generale appena introdotto ha solo finalità descrittive e il trend nello sviluppo delle applicazioni scientifiche e di altra tipologia prevede ormai una sempre più completa integrazione delle diverse tipologie di dati acquisite dai satelliti delle differenti categorie. L'integrazione delle diverse tipologie di dati, va a costituire quello che viene definito come l'Earth Observation Data Cube (Fig. 4), che rappresenta l'insieme multidimensionale di informazioni raccolte su scala geospaziale e alle diverse lunghezze d'onda di acquisizione (dall'ultravioletto alle microonde) al variare del tempo. L'analisi di questa enorme quantità di informazioni viene sempre più affrontata con tecniche di Big Data dando spunto a un nuovo settore scientifico ed applicativo chiamato Eo Data Cube Analytics, ad elevato impatto in campi di ricerca interdisciplinari. In questo ambito lo sviluppo di nuove missioni di nanosatelliti contribuirà sempre più ad aumentare la risoluzione spaziale e quella temporale dell'EO Data Cube.

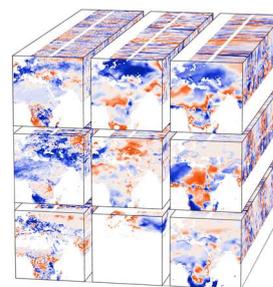


Figura 4 Rappresentazione grafica dell'EO Data Cube

1.4 SCUOLE SECONDARIE E UNIVERSITÀ

L'ITIS "Enrico Fermi" di Roma partecipa da diversi anni alla competizione CANSAT organizzata da ESERO, una simulazione di satelliti reali integrati all'interno del volume di una lattina per le bevande. La sfida per gli studenti consiste nell'inserimento nel Cansat di un sistema di comunicazione che trasmetta a terra i dati e dei sensori finalizzati alla realizzazione della missione scelta, diversa per ogni squadra. Il team LASER dell'ITIS "Enrico Fermi" si è formato nel 2018 e ha visto protagonisti dei giovanissimi e brillanti studenti delle classi seconde e terze dell'Istituto per la partecipazione alla competizione

indetta per l'a.s. 2018/2019. Le loro creative conoscenze tecniche si sono riversate sui seguenti compiti: Sviluppo e Software, Antenna-Trasmissione e Ricezione dati, Elettronica e Meccanica. Come da regolamento, CANSAT ha previsto una Missione Primaria comune a tutte le squadre, basata sulla rilevazione dei dati standard di temperatura, umidità e pressione, a cui sono state aggiunti altre rilevazioni in telemetria, come altitudine, campo magnetico, accelerazione e coordinate geografiche. Al fine di garantire la trasmissione e la fruibilità dei dati online, è stata prevista una postazione a terra in grado di comunicare con la pagina web del sito dell'Istituto, permettendo così la visione e l'ascolto in tempo reale durante l'esecuzione della missione. La disponibilità dei dati in audio è stata resa possibile da un sistema in modalità fonica disponibile in diverse lingue. I dati sono stati trasmessi anche in codice Morse, percepibili quindi mediante le vibrazioni dei dispositivi mobili. È stata così realizzata la Missione Secondaria, che caratterizza esclusivamente il progetto del Laser Team: permettere agli ipovedenti di poter seguire tutte le fasi della gara. Il team ha garantito la sicurezza e la manovrabilità della sonda in fase di discesa grazie a un dispositivo con autogiro composto da pale attaccate a un primo piatto mediante molle di torsione e tre servo motori utilizzati per regolare l'inclinazione (Fig. 5). Il tutto è stato realizzato in nylon con stampante 3D. Per assicurare una maggiore manovrabilità il CanSat è stato dotato anche di un paracadute.



Figura 5: Cansat, piatto e pale.

La raccolta dati provenienti dai sensori e memorizzati sul computer di bordo è avvenuta mediante la comunicazione tra due antenne: un'antenna trasmittente (433 MHz) montata sul Cansat per inviare i dati e un'antenna ricevente montata sulla postazione terra. Nella pagina web <https://cansat.sciencewatching.com/> che gli studenti hanno appositamente realizzato è resa disponibile la visualizzazione 3D del CanSat nella fase di discesa, la posizione dello stesso sulla mappa geografica e i grafici delle grandezze misurate. Con il loro progetto il Laser Team si è aggiudicato il secondo posto nella finale svoltasi a Modena nel mese di aprile del 2019.

La Scuola di Ingegneria Aerospaziale fu istituita nel 1926, agli albori dell'aeronautica, come Scuola di Ingegneria Aeronautica. Con il Preside Gaetano Arturo Crocco ha seguito, in stretta collaborazione con il Centro Studi ed

Esperienze di Guidonia, l'evoluzione della tecnologia Aeronautica Italiana dai primi palloni e dirigibili all'aeroplano. Negli anni '60 la Scuola è stata rinominata Scuola di Ingegneria Aerospaziale ed è stata subito protagonista dell'era spaziale grazie al progetto San Marco di Luigi Broglio, pioniere e fondatore dello spazio in Italia. La Scuola di Ingegneria Aerospaziale di Roma è un ente di formazione di livello universitario con rango di Facoltà istituito nel 1926 per rispondere alle esigenze di una formazione di stampo sistemistico e multidisciplinare necessaria nello sviluppo dell'ingegneria aerospaziale e aeronautica. La Scuola di Ingegneria Aerospaziale ha svolto un importante ruolo pionieristico nello sviluppo dell'ingegneria e della tecnologia Aeronautica e Aerospaziale in Italia; tramite collaborazioni con l'Aeronautica Italiana e le industrie di settore per lo sviluppo della tecnologia aeronautica in Italia sia tramite Progetto San Marco, che ha portato alla nascita della tecnologia spaziale in Italia, permettendo all'Italia di essere il terzo paese nella storia dopo USA e URSS a realizzare e lanciare un proprio satellite nel 1964, sono poi seguiti altri 4 lanci fino al satellite San Marco 5 nel 1988.



Figura 6: progetto San Marco, fasi di AIT e lancio da Malindi

Attualmente la Scuola è attiva nel campo spaziale con numerosi indirizzi, fra i più importanti ricordiamo:

- Sviluppo materiali compositi nanostrutturati
- Monitoraggio di Debris Spaziale
- Stazione di Telemetria SPIV
- Progetto Unisat
- Progetto Edusat
- Progetto Tigrisat

In particolare il progetto Unisat lanciato dall'allora preside, Prof. Filippo Graziani, prevede il lancio in orbita di microsatelliti interamente progettati, costruiti e gestiti in orbita dagli studenti. È questo un progetto pionieristico: la Scuola infatti è stata la prima Facoltà in Europa a lanciare un satellite realizzato dai propri studenti con Unisat 1 il 26 settembre 2000. Il progetto procede con un discreto successo mantenendo una cadenza di lancio biennale con Unisat 2 lanciato il 20 dicembre 2002, Unisat 3 il 29 giugno 2004, Unisat 4 il 26 luglio 2006 e Unicubesat GG nel 2012.

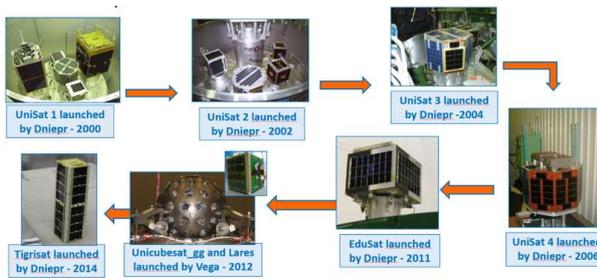


Figura 7: Timeline di sviluppo e lancio delle varie missioni universitarie realizzate dalla Scuola di Ingegneria Aerospaziale.

Un discorso a parte è il Progetto Tigrisat, lanciato nel 2014, esso è stato costruito dalla Scuola di Ingegneria Aerospaziale con il contributo di studenti iracheni presenti nella Scuola di Ingegneria Aerospaziale grazie ad un progetto di interscambio culturale universitario volto a formare una futura classe di ingegneri aerospaziali in IRAQ dopo molti anni di guerra che hanno sensibilmente degradato le capacità industriali del paese.

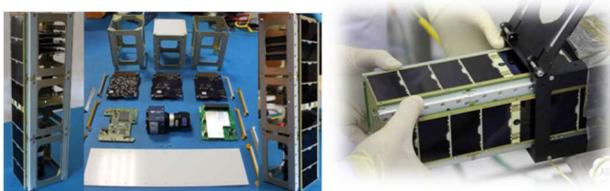


Figura 8: Tigrisat, fasi di realizzazione e AIT

1.5 RICERCA E SVILUPPO DI PAYLOAD INNOVATIVI

La ricerca nell'ambito dei Nano Satelliti interessa diversi settori, che vanno dalla progettazione dell'avionica e dei sensori fino alla progettazione di specifiche applicazioni e missioni. Senza pretesa di essere esaustivi, data la vastità e l'interdisciplinarietà degli argomenti, si può fornire una schematizzazione di massima dei settori di ricerca e sviluppo legati alla progettazione di una missione satellitare basata su tecnologie di mini-satelliti e nano-satellite. Partendo dal livello più basso, temi di ricerca sono legati alla progettazione del vettore satellitare (avionica e comunicazioni) e del payload (sensori di differenti tipologie), ad un livello più alto la ricerca si concentra su tecniche di signal processing e di on-board processing per ottimizzare le vari fasi di acquisizione dell'informazione e di produzione di dati, successivamente si collocano gli studi per l'utilizzo delle nuove categorie di dati forniti da queste tecnologie satellitari e infine sulla loro integrazione con altre sorgenti informative per la soluzione di problemi più complessi.

Un settore già abbastanza avanzato nella ricerca in ambito Cubesat e nanosatelliti si è sviluppato nel campo delle telecomunicazioni. In questo contesto infatti si collocano le applicazioni primari dei payload che costituiscono il requisito primari di ogni missione satellitare, ovvero quello di poter comunicare i dati.

Per i primi 10 anni gli ambiti coinvolti furono subito quello dell'educazione e il payload doveva soltanto eseguire operazioni molto semplici quali:

- trasmissione di un radiofaro, memorizzazione di dati o trasmissione di dati raccolti da semplici sensori a velocità di trasmissione molto bassa (1 to 9.6kbps)
- utilizzo di frequenze amatoriali all'UHF
- standard AX.25 per le comunicazioni

Diverse missioni sono state sviluppate negli ultimi 10 anni ma solo durante l'ultimo quinquennio si è avuto un incremento di questi studi, collegato a diverse tipologie di missioni applicative e di test che hanno avuto come oggetto da applicazioni di monitoraggio sino a applicazioni di telecomunicazioni. Per queste varie missioni, sono state impiegate di verse tecnologie di payload relativo alla comunicazione dei dati e operanti a differenti bande. Queste tipologie di studi hanno portato ad uno scenario abbastanza consolidato in cui la tecnologia Cubesat viene impiegata nel settore delle telecomunicazioni a supporto dell'infrastruttura esistente per assolvere a funzionalità quali:

- L'estensione della copertura Internet a scala globale
- La distribuzione di dati attraverso tecniche di broadcasting
- L'implementazione delle tecnologie Internet of Things (IoT) e di paradigmi Machine-to-Machine (M2M)

In figura 9 sono riportate le costellazioni di nanosatelliti impiegate a supporto dell'infrastruttura di telecomunicazioni.

Name of satellite	Iridium Next SensorPOD	Tintin	Astrocast	Fleet	I	KIPP
Form factor	3-4U	Not a CubeSat	3U	1.5U, 3U, 12U	3U	
Company, country	Iridium, U.S.	SpaceX, U.S.	ELSE, Switzerland	Fleet, Australia	Kepler, Canada	
Purpose	Sensing and communication	Broadband network	IoT and M2M	IoT	Satellite backhaul	
Inter-satellite link capability	Only to host Iridium NEXT satellites	Yes	Yes	n/a	Yes	
Deployment time	Since 2015	Trials started in 2015	2018	2018	2018	
Orbit altitude	780 km	340 and 1200 km	450-600 km	580 km	500-650 km	
Number of satellites	66	11,943	64	100	140	
Weight	4-5 kg	100-500 kg	4 kg	n/a	5 kg	
Frequency	L- (1-2 GHz) and Ka-bands (26-40 GHz)	Ku- (12-18 GHz), Ka- (27-40 GHz), and V-bands (40-75 GHz), >10 THz (ISL)	L-band (1-2 GHz)	n/a	Ku- (12-18 GHz), and Ka-bands (27-40 GHz)	
Self-sustained	No	Yes	Yes	Yes	Yes	

Note: "n/a" implies that the parameter is not available in published sources.

Figura 9 Costellazioni di nanosatelliti già in orbita o prossime al lancio per l'erogazione di servizi IoT e broadband.

Una ulteriore applicazione di notevole rilievo sviluppata a partire dalle ricerche condotte sui payload e sui protocolli di comunicazione nell'ambito dei Cubesat è stata la missione MarCO (implementata con tecnologia 6U Cubesat) che ha contribuito alle funzioni di comunicazione tra la Terra, lo spacecraft InSight e il rover, nella sua missione su Marte (Fig. 10). La tecnologia impiegata ha permesso di affrontare i problemi della discontinuità di connessione end-to-end e ha sperimentato di nuove architetture con protocolli di comunicazione DTN.

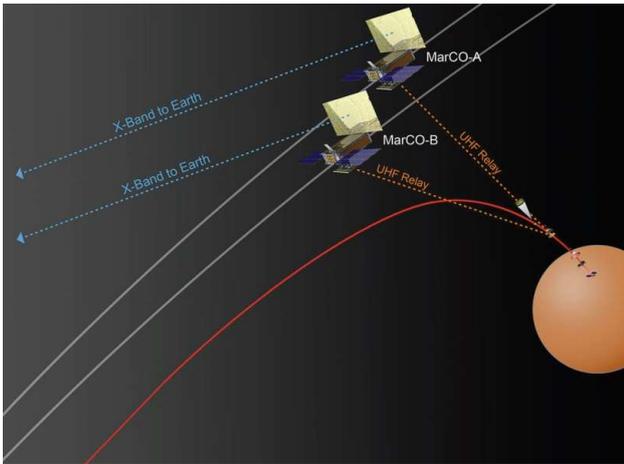


Figura 10 Rappresentazione delle modalità di comunicazione tra i CubSat MarCO, lo spacecraft InSight e il rover su Marte.

L'impiego della tecnologia CubeSat e dei payload e protocolli di comunicazioni in un contesto come quello di una missione spaziale, apre possibili scenari futuri in cui queste tecnologie potranno trovare impiego nel garantire una infrastruttura di telecomunicazione a per comunicazioni spaziali tra la Terra e le missioni nel Sistema Solare. Queste ipotesi potranno fare da leva a nuovi lavori di ricerca per il raggiungimento di requisiti ancora non attuabili. Si ipotizza infatti un necessario aumento del data rate, dagli attuali 9600 kbps a frequenza dell'ordine dei Gbps, nonché un elevato grado di flessibilità caratterizzato dalla possibilità di stabilire intersatellite links e connessioni con differenti stazioni di ricezione (operanti in condizioni anche molto diverse). Infine sarà richiesta una maggiore capacità di comunicazione dei satelliti a livello di costellazione, possibilmente integrando architetture di tipo 5G e DTN-based. Parte di questi requisiti, come vedremo, sono già affrontati in temi di ricerca. In particolare i payload relativi alla comunicazione negli ultimi anni hanno subito una notevole evoluzione tecnologica, passando dai primi sistemi operanti a bande UHF/VHF con data rate di 9600 bps, ai sistemi operanti in bande S (per la telemetria) e X, come quelli utilizzati nelle missioni RAX e GOMX-3, con data rate fino a 1 Mbps, e arrivando alla tecnologia più recentemente sviluppata per i nanosatelliti, con antenne di tipo Reflector e Reflectorarray, nelle bande Ku, K e Ka e con data rate fino a 100 Mbps.

Ulteriori studi stanno evolvendo o potranno evolvere verso l'impiego di altre frequenze con le bande Q e V che sono state valutate positivamente per implementare connessioni intrasatellitari (anche fra satelliti in orbite differenti, come GEO, MEO e LEO) o per downlink da orbite basse Very Low Earth Orbit (VLEO). Tecnologia a V band è stata ad esempio impiegata nel progetto Starlink con unità in orbita VLEO. Anche la banda W potrebbe trovare impiego, come dimostra il recente progetto ESA W-Cube, costituito da un CubeSat con un trasmettitore in banda W impiegato per misure di propagazione a quelle lunghezze d'onda. Ulteriori studi si stanno concentrando sulle possibilità di utilizzare comunicazioni a lunghezze d'onda ottiche anche su nanosatelliti. Questo approccio

garantirebbe elevati data rate, fino a 10 Gbps ma con consumi dell'ordine dei 50W e non è ancora evidente un trend evolutivo.

In ogni caso sono già stati sviluppati dei test per la comunicazione intersatellitare e a scopo di studio anche con stazioni di ricezione a terra "ottiche". Queste ultime sono però limitate ad operare in assenza di nubi meteo, per cui sono prevedibili sviluppi ibridi di tipo RF/optical (ad esempio affiancando i trasmettitori ottici con sistemi operanti in banda X). Una ulteriore tecnologia emergente, che consentirà differenti vantaggi applicativi, è costituita dai cosiddetti Software Defined Radio payloads (SDR).

Alcuni esempi di applicazione su grandi satelliti hanno dimostrato l'efficacia della tecnologia e l'impiego in sistemi basati su nanosatelliti non è precluso da particolari limitazioni. In particolare l'adozione di payload di tipo SDR consentirebbe lo sfruttamento ottimale delle risorse consentendo un adattamento veloce ai requisiti di missione per le telecomunicazioni. Infatti la programmabilità di questi sistemi abilita al supporto di segnali multipli, l'incremento del data rate su canali affidabili e l'ottimizzazione nello sfruttamento dello spettro elettromagnetico destinato alla telecomunicazioni.

Ancora pochi payload SDR sono già stati impiegati in piccoli satelliti e altri sono in fase di sviluppo, come ad esempio AstroSDR, NanoDock SDR, GAMALINK e STI-PRX-01. L'utilizzo di questa tecnologia potrà portare a sviluppi futuri per l'implementazione del concetto di Software Defined Networking, ovvero di reti, altamente configurabili, costituite da diverse tipologie di link tra vari satelliti e stazioni a terra. In un simile scenario l'introduzione di costellazioni di CubeSat abiliterà alla attuazione di link intersatellitari sempre più performanti e configurabili, ad esempio con connessioni tra satelliti GEO, MEO, LEO (o HAPS) e ground stations.

Il progetto ARAMIS sviluppato dalla società ItalSpazio punta allo studio, al progetto e alla futura implementazione e verifica di tecnologie spaziali avanzate per CubeSat, e alla realizzazione di una costellazione satellitare Low-Cost basata su CubeSat (nanosatelliti da 12U) in comunicazione tra loro via ISL LEO-LEO in banda V e capaci di cooperare con il satellite geostazionario Athena-Fidus tramite ISL in banda Ka ad alta capacità.

ARAMIS costituisce una risposta flessibile e a costi contenuti per aumentare la capacità trasmissiva di satelliti tipo cubesat e complementare e/o potenziare servizi già offerti da altri segmenti spaziali attraverso il suo impiego cooperativo e garantendo totale accessibilità ed esclusività dei servizi e maggiore disponibilità del servizio nelle regioni di interesse. ARAMIS prevede diversi tipi di applicazioni/payload:

- Situational Awareness;
- AIS/ADS Satellitare;
- Estensione copertura di AF per controllo di UAV;
- Applicazioni tipo PTT (Push-toTalk);

- Applicazioni di tipo ELINT (ELectronic-sIGNALS INTelligence o "spionaggio di segnali elettronici").

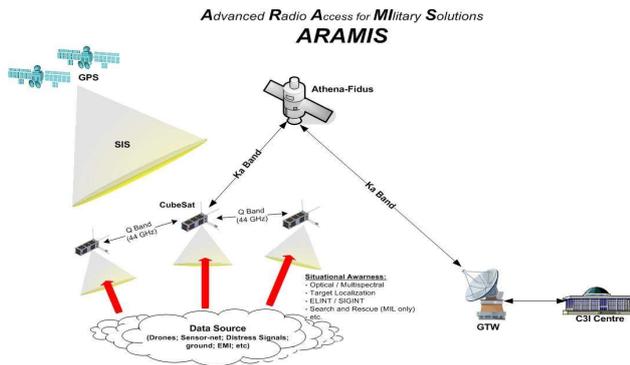


Figura 11 Progetto ARAMIS

Il sistema è caratterizzato dai seguenti sottoassiemi:

- Antenna "deployabile" in banda Ka per la comunicazione tra Cubesat e AF;
- Sistema di antenne Patch in banda Q per la comunicazione ISL tra Cubesat e Cubesat;
- Front RF/Transponder in banda Ka e in banda Q per i due sistemi di comunicazione;
- Modem SDR
- Payload



Figura 12: antenna deployable in banda Ka per ISL LEO-GEO

Una particolare attenzione è rivolta allo sviluppo del Modem SDR, che sarà realizzato appunto in tecnologia SDR-FPGA. Librerie Open-Source saranno impiegate per gli algoritmi di recupero del sincronismo di frequenza, fase e simboli. Il linguaggio VHDL sarà utilizzato per la fase di sviluppo FPGA. La scelta del HW FPGA verrà effettuata tra i prodotti COTS disponibili.

Il payload di Situational Awareness ARAMIS potrebbe essere basato su un design SDR molto flessibile in grado di far fronte agli standard attuali che operano nella larghezza di banda UHF (400-3000 MHz). In particolare, LoRa-E è specificamente focalizzato per la sua capacità di operare con SNR molto bassi, permettendo così una lunga resilienza, una bassa rilevabilità e un basso consumo energetico delle batterie dei terminali di terra. Un'antenna UHF dispiegabile con guadagno di 6 dBi raccoglierà i dati di terra, mentre l'implementazione di un trasmettitore in banda S può costituire una buona opzione

per comandare i terminali di terra. I dati raccolti verranno archiviati nella memoria di massa cubesat per essere inviati via ISL alla stazione di terra dopo la formattazione e la crittografia.

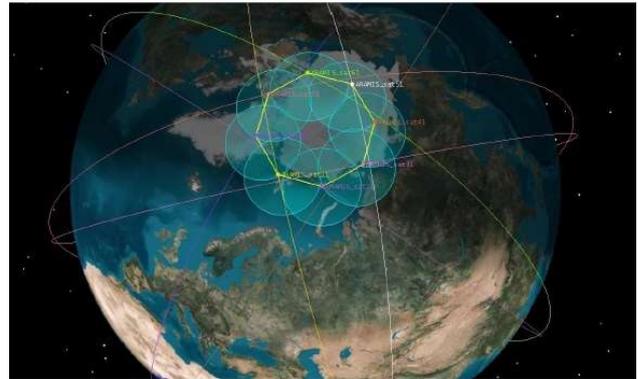


Figura 13: Geometria di interscambio dati ai poli per la mission di Situational Awareness

Per applicazioni ELINT, l'attività consiste nella ricezione di dati relativi a sorgenti di trasmissione, in particolare delle emissioni dei vari tipi di radar. Le intercettazioni possono essere effettuate da stazioni ELINT poste a terra nella prossimità dei confini dell'avversario, su Navi e/o Aerei specificamente equipaggiati o su satelliti artificiali (CubeSat – ARAMIS). Il payload dell'applicazione ELINT, operante secondo un approccio TDOA/FDOA, è basato su una formazione di tre satelliti ciascuno con un payload di acquisizione del segnale BW ampio e include due ampie antenne dispiegabili BW, seguite da catene di ricevitori innovative. La configurazione della formazione prevede due satelliti sullo stesso piano orbitale e un terzo in volo. Le posizioni relative vengono calcolate elaborando gli osservabili potenti ricevitori EGNSS. La trasformazione dei dati e la localizzazione e l'analisi della fonte terrestre vengono eseguite a terra nel centro di elaborazione.

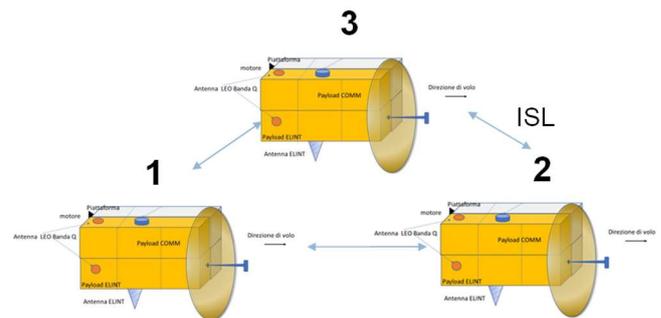


Figura 14: Geometria della configurazione ELINT per ottimizzare le tecniche di localizzazione sorgenti EM

1.6 PROSPETTIVE INDUSTRIALI

La caratterizzazione fortemente innovativa dello sviluppo tecnologiche delle piattaforme CubeSat e nanosatellitari fa sì che spesso ci sia una continuità piuttosto marcata tra il settore della ricerca a vari livelli e il settore industriale. Di questa continuità di approccio ne è un tipico esempio il progetto U-DRAGON (Unified Distributed Advanced Global Operative Network for nano and micro satellite operations), implementato da Telespazio. Progetto stanziato dal Ministero della Ricerca e Sviluppo

(MISE) nel 2016 relativo all' "Agenda Digitale", per il quale Telespazio ha proposto lo sviluppo di una network di stazioni a terra geograficamente distribuita e integrata, chiamata U-DRAGON, per la fornitura di servizi di Ground as a Services (GaaS) commerciali, riguardanti il mercato dei cubesat/nanosatelliti.

Questo settore di mercato coinvolge centri di ricerca universitari che utilizzano questi satelliti per dimostrazioni e validazioni di tecnologie in ambito spaziale sviluppando inoltre piccole stazioni di terra ad hoc, con limitazioni riguardanti le opportunità di accesso al satellite, e li mette direttamente in contatto con il settore industriale costituito da Telespazio e dalle suo Partecipate.

In particolare, Telespazio sta sviluppando il progetto U-Dragon relativo al Ground Segment per CubeSat e nanosat nell'ambito del quale si utilizzano delle funzionalità sviluppate ad hoc per le contrains del progetto, quali:

- • Software di Scheduling - Telespazio UK
- • Progettazione del Ground Segment e dell'infrastruttura - Telespazio Italia
- • Sviluppo di SDR per applicazioni Low/Medium data rate - Telespazio Italia
- • Monitor and Control, Networking, Protocol adapting - Telespazio Italia
- • Satellite Control Center per il software del centro di controllo satellite - Telespazio Italia
- • User Interface con la collaborazione di aziende italiane del settore spazio (GEM del gruppo Sistematica)
- • Studio per l'ottimizzazione e la prototipazione di antenne operanti nelle bande di frequenza del progetto in collaborazione con
- l'Università Federico II di Napoli tramite il consorzio NITEL.
- • SpaceTwitter scheda di volo realizzazione del prototipo (Euro Soft)
- Per ulteriori dettagli riguardo alla implementazione del progetto U-Dragon si rimanda al paragrafo 3.3.

1.7 SERVIZI DI LANCIO

Uno dei punti di maggiore criticità per la diffusione iniziale dei cubesat è stata la non volontà di ospitare questi oggetti "estranei" a bordo di lanci commerciali da centinaia di milioni di dollari. La mancanza di criteri di AIT consolidati poneva un rischio per ogni occupante del lanciatore (che oltretutto paga un prezzo molto alto per usufruire di esso), inoltre i costruttori di cubesat non erano in grado di pagare alti costi per la messa in orbita. I primissimi lanciatori sono stati ex-ICBM sovietici riconvertiti che avevano requisiti di sicurezza molto più rilassati e offrivano costi molto bassi. L'italiana AVIO è stata la prima a progettare e costruire ex novo un lanciatore dedicato a piccoli satelliti, con in mente già la filosofia di espandere la sua offerta ai nano satelliti, il

VEGA. Il lanciatore della ditta di Colferro è in grado di mettere circa 1800 Kg di carico utile (anche in configurazione dual payload) in orbita polare a 600 Km di quota e di recente ha proposto una gamma di configurazioni molto flessibile dedicate al trasporto di mini, micro e nano satelliti.

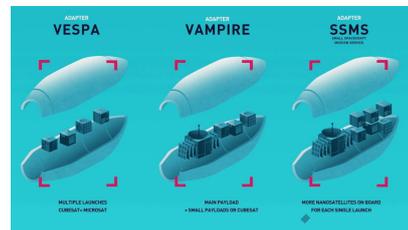


Figura 15: configurazioni del lanciatore VEGA dedicate ai piccolo satelliti

Una caratteristica innovativa di questi servizi di lancio è quella di predisporre un servizio di gestione delle "prenotazione" molto più agile e tailorizzato sulle esigenze di questi nuovi attori del panorama spaziale, i costruttori di nanosatelliti, molto reattivi, elastici, proattivi e di grandi aspettative, ma sicuramente molto meno soggetti ad esigenze di mercato o di operatività che è richiesta alle missioni di taglia superiore. Inoltre il numero elevato di soggetti partecipanti ad un unico lancio pone dei requisiti innovativi da soddisfare nella realizzazione di aree di integrazione che riescano a ospitare in modo efficace una variegata platea di soggetti.

1.8 "AMBIENTE" SPAZIALE

Nella fase iniziale dell'esplorazione spaziale l'ambiente esterno alla Terra è stato considerato essenzialmente come un ambiente a capacità di sopportazione di "pressioni" infinite. In esso sono stati riversati ogni tipo di materiali non più necessari alle missioni spaziali oltre alle piattaforme orbitali non più operative. Ad esso si sono sommati elementi dovuti al degrado di elementi presenti a bordo che hanno portato a esplosioni o comunque frammentazioni dei satelliti o moduli di lancio che li ospitavano (fluidi o composti presenti in batterie e serbatoi).



Figura 10: Rappresentazione (non in scala) della popolazione di oggetti orbitanti attorno alla Terra

Adesso è presente una normativa di riferimento sull'argomento (EOL Disposal Guidelines, ESA/ADMIN/IPOL(2014)2 -Space Debris Mitigation - Policy for Agency Projects e ECSS-U-AS-10C Adoption Notice della norma ISO 24113: Space Debris Mitigation Requirements), per l'orbita bassa, ad esempio, è

specificato che ogni oggetto immesso deve rientrare entro 25 anni dalla fine della sua missione e requisiti volti a diminuire il rischio di ulteriore frammentazione degli oggetti orbitanti. Finalmente si è introdotto il concetto di “ambiente spaziale” che come ogni altra matrice ambientale è capace di sopportare “pressioni inquinanti” fino ad un certo limite oltre il quale viene meno la sua capacità di fruizione “salutare”. Tale idea è partita dalla iniziale considerazione che l’arco geostazionario è una risorsa molto redditizia ma limitata, inoltre ad oggi non è possibile spostare satelliti non più operativi in esso presenti che rappresentano, oltre ad uno spreco di risorse “di posizione” un potenziale pericolo per possibili drift che impattino il servizio di altri satelliti vicini. Per le orbite basse il problema è sorto agli onori della cronaca quando un satellite sovietico non più operativo è entrato in collisione con un satellite da telecomunicazioni della costellazione Iridium, oltre alla perdita di operatività che ha sofferto la costellazione Iridium si è generato uno sciame di detriti che solo parzialmente è rientrato in atmosfera. A peggiorare le cose USA e Cina hanno condotto dei test di intercettazione missilistica di satelliti in orbita bassa che hanno anche loro generato sciami di detriti, solo essi parzialmente rientrati in atmosfera. Questi sciami in orbita si sommano a migliaia di oggetti già presenti che costituiscono micidiali impattori ad altissima velocità (a circa 7 Km/s anche frammenti di pochi grammi sono letali) in grado di inattivare un satellite o addirittura danneggiare la Stazione Spaziale Internazionale. Maggiori sono gli impatti, maggiore il numero di detriti che si formano e il limite è la totale preclusione dell’orbita bassa, oramai saturata, questa è descritta come la cosiddetta Sindrome di Kessler, un vero incubo capace di precludere la presenza e anche ogni tipo di accesso allo spazio esterno dalla Terra (anche ai lanciatori). I cubesat, con il loro basso costo e la facilità di messa in orbita, possono costituire un elemento aggravante della popolazione di oggetti orbitanti senza controllo.



Figura 16: serbatoio di satellite rientrato in atmosfera e caduto al suolo

Una soluzione è portata dalla ditta italiana D-ORBIT che propone di montare su ogni satellite un piccolo sistema, totalmente autonomo dalla piattaforma su cui è imbarcato (che può essere anche senza controllo, oltre che senza carburante), in grado di deorbitare con precisione il satellite a fine vita tramite un motore a razzo. Infatti i satelliti che rientrano in atmosfera hanno dei componenti che possono resistere al calore del rientro, ponendo un elevato rischio se non indirizzati verso zone

disabitate.



Figura 17: soluzione D-ORBIT per rientro sicuro e controllato di satelliti in orbita

1.9 SEGMENTO DI TERRA

I settori della ricerca e quello industriale sono attivi nello studio e nell’implementazione del segmento di terra, realizzando le specifiche e i requisiti specificatamente individuati nel contesto delle tecnologie CubeSat e nanosat. Lo scenario italiano vede la sperimentazione di diversi temi di ricerca con consorzi di ricerca e Università, nonché una rilevante attività industriale. Come già accennato, il progetto U-Dragon, guidato da Telespazio si prefigge l’obiettivo di realizzare una network di stazioni a terra geograficamente distribuita e integrata. Gli obiettivi del progetto sono:

- Facilitare l’accesso alle operazioni satellitari per i proprietari di nano/microsatelliti, con un approccio plug and play alla rete di ground stations distribuita, con accesso fruibile tramite internet e la virtualizzazione delle ground station.
- Incrementare la visibilità dei satelliti tramite la distribuzione geografica delle ground station e alla facilità di accesso, pianificando una gestione real time delle risorse disponibili, semplicemente richiedendo un servizio invece di installazione e manutenzione di stazioni a terra.
- Realizzare un prototipo di volo in grado di inviare a stazioni di terra la posizione orbitale del satellite in modalità totalmente autonoma, in modo da permettere la localizzazione del satellite senza ricorrere a mezzi o sistemi altrui (SpaceTwitter).

La metodologia adottata da Telespazio nella realizzazione del progetto e resa cortesemente disponibile fornisce un’ottima opportunità di approfondimento relativamente agli aspetti critici da considerare nella progettazione di una infrastruttura del segmento di terra.

Dovendo realizzare un Ground Segment in grado di interfacciare il maggior numero di cubesat/nanosatelliti eterogenei, nel progetto U-DRAGON si è proceduto con l’analisi delle tecnologie adottate nelle missioni varie missioni in termini di:

- - Orbite utilizzabili
- - Link Space to Ground

- - Link Ground to Space
- - Tipologia di missione (earth observation, sperimentazioni, telecomunicazioni, ecc.)

Partendo dall'analisi delle tecnologie adottate nelle missioni cubesat/nanosatelliti e dagli sviluppi delle tecnologie inerenti ai sistemi di comunicazione, sono risultate maggiormente utilizzate le seguenti bande di frequenza nel campo amatoriale e/o commerciale:

- - VHF
- - UHF
- - S band
- - X band (implementabile in una seconda fase nel network U-DRAGON)

Le prime due bande di frequenza vengono utilizzate prevalentemente per il loro basso costo implementativo, che però ha una scarsa efficienza in termini di velocità di trasmissione implementabile. Mentre la S band richiede un onere maggiore rispetto alle altre bande di frequenza più basse (in termini economici), ma raggiunge un buon compromesso nel rapporto costi/prestazioni, con prestazioni decisamente maggiori, lo stesso vale per la X band (poco utilizzata per i cubesat, e più largamente utilizzata per i nanosatelliti), il cui onere riguarda soprattutto i sistemi demodulazione. La X band è utilizzata prevalentemente per i sistemi di telemetry downloading. Definite le bande è stato quindi affrontato il problema di gestione e condivisione delle risorse, arrivando a definire i componenti del sistema (riportati in figura 18).

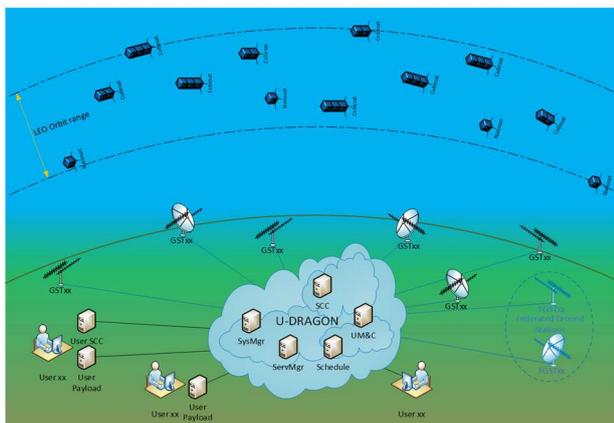


Figura 18 Architettura del sistema U-DRAGON

Il progetto U-DRAGON si compone dei seguenti sottosistemi:

- SysMgr raccoglie al suo interno tutti gli elementi necessari al controllo e alla gestione operativa del progetto questo è composto a sua volta da:
 - Network Protocol Management (NPM)
 - Network Management System NMS)
 - ServMgr rappresenta l'interfaccia utente in relazione alle richieste di attivazione dei servizi e di scambio della reportistica

- U-DRAGON Monitor and Control (UMC) il braccio esecutivo del sistema in grado di interfacciare e controllare tutti i sistemi facenti parte della network U-DRAGON
- Scheduler (SCH) sottosistema di pianificazione delle risorse in grado di ottimizzare l'utilizzo delle ground station
- Ground Station Tracking Antennas (GST) antenne dotate di sistema di tracking
- Satellite Control Centre (SCC) sistema di gestione TT&C per satelliti

Inoltre è di interesse considerare le policy di gestione dei componenti di Ground Segment (figura 19) che permette di operare con satelliti multi missioni e multi utenti attivando i collegamenti tra le Ground Station e i centri di controllo e di TT&C e TM acquisition dell'utente, adattando i protocolli di comunicazione in maniera automatizzata.

Gli elementi aggiuntivi necessari alla gestione del GS includono anche servizi a valore aggiunto quali:

- SCC service (Satellite Control Center), servizio per il controllo del satellite tramite piattaforma dedicata controllata dal GS
- Storage TM data and Delivery, sistema di storage della TM ricevuta e offline delivery

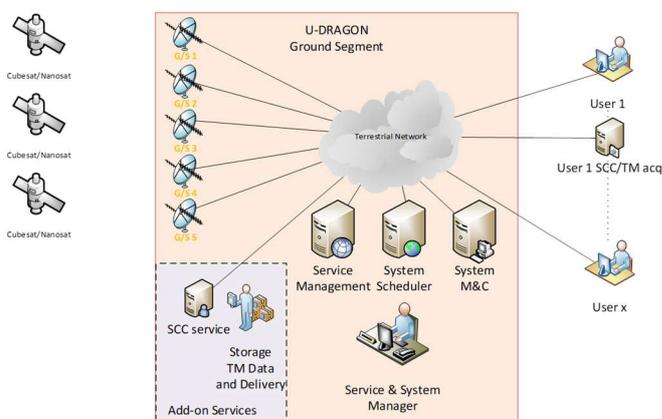


Figura 19 Componenti di Gestione del Ground Segment

Un altro importante attore dello scenario italiano per i servizi del Segmento di Terra è la NEXT Ingegneria dei Sistemi che propone un sistema di gestione di costellazioni di piccoli satelliti molto evoluto denominato NCS che si propone, come obiettivo primario, di fornire un segmento di controllo validato in orbita per i sistemi a nanosatellite caratterizzati da gestione simultanea multi-costellazione, gestione autonoma delle operazioni di routine e gestione del controllo orbitale autonomo multi-missione; infine, come obiettivo finale, la fornitura di un servizio di gestione operativa dei nanosatelliti aggiungendo funzionalità avanzate (ad es. Gestione degli sciami, voli di formazione cooperativa) e firmando accordi commerciali con gli attuali operatori dei fornitori di servizi

di TT&C (e i fornitori di servizi dell'utente finale per favorire l'approvvigionamento di servizi). Un grande risultato è stato soddisfare i requisiti di MOIMS compliance, l'obiettivo dell'area dei servizi di gestione delle informazioni e delle operazioni di missione (MOIMS) è quella di affrontare tutte le applicazioni della fase di esecuzione del volo necessarie per far funzionare il veicolo spaziale e il suo sistema di terra in risposta agli obiettivi della missione e il loro standard e processi di gestione delle informazioni dettagliate associate.

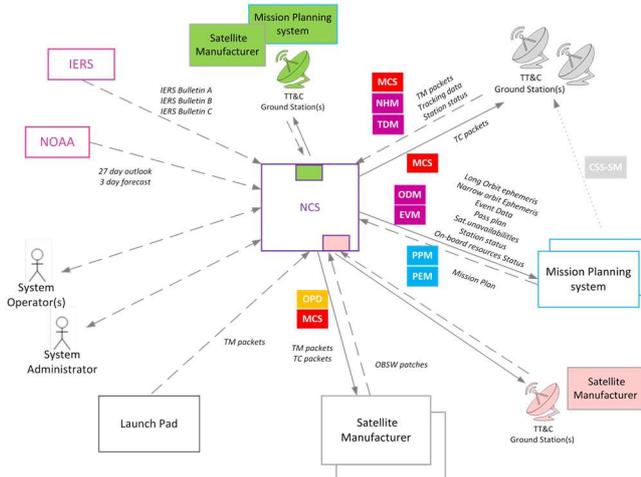


Figura 20: schema del sistema di gestione satellite NCS

1.10 REGOLAMENTAZIONE SULLE FREQUENZE

La comunità dei produttori e operatori dei piccoli satelliti è interessata ad una esemplificazione delle procedure previste dai Radio Regolamenti al fine di facilitare lo spiegamento delle reti satellitari NGSO in quanto la loro richiesta è in continua crescita. Tra le ragioni principali si ricorda che i cubesat e i piccoli satelliti in generale sono un mezzo molto utile per testare nuove tecnologie emergenti e offrono l'opportunità a nuovi operatori di inserirsi nel mercato satellitare altrimenti proibitivo per i costi eccessivi delle reti GEO. Inoltre si ricorda che come imposto dai regolamenti le piattaforme orbitali trasmettenti dovranno essere controllate da sistemi in grado di far cessare immediatamente ogni emissione radio che dovesse causare interferenza nociva ad altri servizi.

La Risoluzione 659 del WRC-2015 ha invitato la ITU a studiare la possibilità di assegnare nuove bande di frequenza per le operazioni di TT&C delle reti satellitari NGSO a breve durata in considerazione della recente proliferazione di tali costellazioni. Nei Radio Regolamenti ITU non esiste la definizione cubesat o piccoli satelliti ma la definizione pico e nanosatelliti (tra 0.1 e 1 Kg e 1 e 10 Kg rispettivamente) quindi i cubesat possono essere definiti nanosatelliti fino a 10U o picosatelliti da 1U. I requisiti spettrali sono specificati di queste classi di satelliti nel Report ITU-R SA.2312 mentre le procedure di notifica nel ITU-R SA.2348. Durante il WRC 2019 la Risoluzione COM5/5 ha affrontato la tematica in generale delle frequenze dei sistemi NGSO LEO, i punti salienti sono stati:

- Le missioni avranno breve durata inferiore ai 3 anni (dopo i quali verrà cancellata senza possibilità di ripetizione l'assegnazione di frequenza)
- Il numero di satelliti non potrà essere superiore a 10
- Si può utilizzare spettro di frequenza assegnato ai servizi radio amatoriali via satellite (vedi figura 21)
- In caso di interferenza nociva deve interrompere subito il servizio

Bande di Frequenza (MHz)	Servizio	Simbolo	Tipo di allocazione
401 - 403	EESS (E-S)	EW	Primario
401 - 402	SOS (S-E)	ET	Primario
449.75 - 450.25	sos (E-S) srs (E-S)	ET EH	No.5.286- Soggetta No.9.21 (No.4.4)
1215 - 1300	EISS (active), SRS	Ex, EH	Nos. 5.330-5.335A protezione RNSS e RL
1427 - 1429	SOS (E-S)	ET	Primario
2025 - 2110	EISS (E-S, S-S) SOS (S-E, S-S) SRS (E-S, S-S)	EW ET EH	Primario
2200 - 2290	EISS(S-E, S-S) SOS(S-E, S-S) SRS (S-E, S-S)	EW ET EH	Primario
2290 - 2300	SRS (S-E) (deep space)	EH	Primario

Bande di Frequenza	Servizio	Simbolo	Tipo di allocazione
8 025 – 8 400 MHz	EISS (S-E)	EW	Primario
8 400 – 8 500 MHz	FX, MOB, SRS (S-E)	EH	Primario
8 550 – 8 650 MHz	(EISS), (SRS) (active)	Ex, EH	Primario
9 300 – 9 800 MHz	(EISS), (SRS) (active)	Ex, EH	Primario
9 800 – 9 900 MHz	(eess) (active), (srs) (active)	Ex , EH	secondary
10.6 – 10.7 GHz	(EISS), (SRS) (passive)	Ex, EH	Primario
13.25 – 13.75 GHz	(EISS), (SRS) (active)	Ex, EH	Primario
22.21 – 22.5 GHz	(EISS), (SRS) (passive)	Ex, EH	Primario
22.55 - 23.15 GHz	(ISS), (SRS) (E-S)	ES, EH	Primario (No.5.338A)
23.6 – 24 GHz	(EISS), (SRS) (passive)	Ex, EH	Primario

Figura 21: Bande di frequenza allocate per i piccoli satelliti su NGSO

Per le costellazioni consolidate che non rientrano nei casi sopra descritti vi sono delle regole per il dispiegamento della costellazione secondo 3 fasi: il 10% entro i primi due anni, il 50% entro 5 anno e il 100% entro 7 anni. Il Sistema di coordinamento centrale di queste costellazioni di piccolo satelliti è molto complicato e può essere riassunto nella figura 22 che indica il documento di riferimento per ogni ramo della comunicazione di un Sistema satellitare NGSO.



Figura 22: Disposizioni per il coordinamento di sistemi spaziali di telecomunicazione NGSO

E molto interessante notare che molto prima della sensibilità sull' "ambiente" spaziale prima citata (che è fruibile se non "inquinato" fatalmente da detriti spaziali) si è sviluppata molto presto e molto dettagliatamente una sensibilità molto elevata ed ammirevole, per precisione e disciplina, sull' "ambiente elettromagnetico" spaziale che, come il precedente, è un ecosistema molto delicato e fruibile da tutti solo se adeguatamente disciplinato e tutelato.