



**UNIVERSITÀ
DI PARMA**

**Conferimento della Laurea ad honorem
in “Communication engineering”
a Riccardo De Gaudenzi**

Lectio Magistralis

**“L’evoluzione delle telecomunicazioni via satellite:
passato, presente e futuro”**

Riccardo De Gaudenzi

Aula Magna della Sede Centrale
Parma

13 ottobre 2021

Tavola dei contenuti:

1 BREVE STORIA DELLE COMUNICAZIONI VIA SATELLITE	3
1.1 Da Sir A. C. Clark allo Sputnik alla formazione di ESA, Intelsat e Eutelsat.....	3
1.2 Il ruolo dell'Italia nell' esplorazione delle alte frequenze	6
1.3 Il boom del broadcasting via satellite e i pionieri delle onde millimetriche	7
1.4 La prima generazione delle costellazioni globali – ascesa, declino e resurrezione....	9
1.5 Il broadcasting per mezzi mobili via satellite	12
1.6 Il digital divide e l'emergenza dei sistemi a banda larga via satellite	15
2 IL RUOLO DEL SATELLITE NEL CONTESTO DEL MERCATO DELLE TELECOMUNICAZIONI GLOBALI.....	19
2.1 La nicchia del satellite nel mercato globale delle telecomunicazioni	19
2.2 La crescita dei sistemi di posizionamento via satellite nel mercato di massa	20
2.3 L' emergenza di Galileo il sistema di posizionamento globale Europeo	22
2.4 La sfida delle megacostellazioni	25
2.5 Declino o momentaneo arresto per il mercato dei satelliti geostazionari?.....	27
3 RECENTI TENDENZE DELLE TECNOLOGIE SATELLITARI	28
3.1 I megatrends emergenti globali	28
3.2 I megatrends specifici ai satelliti	30
3.3 Ricerca applicata: una prospettiva personale.....	35
3.4 Da radioamatore ad amatore delle radio comunicazioni.....	35
3.5 L' importanza dell'incontro tra ingegneri e i ricercatori puri	35
3.6 Considerazioni personali sulla ricerca applicata	36
3.7 Lavorare in un'organizzazione tecnica internazionale	42
4 LE SFIDE CHE CI ASPETTANO PER MANTENERE IL RUOLO DEL SATELLITE NELL' ERA DEL 5G E OLTRE	43
4.1 La necessità di una visione di sistema e analisi dei costi benefici delle tecnologie...43	
4.2 Il problema dei volumi ridotti per mantenere costi accettabili.....	43
4.3 Software defined satellites – da sogno a realtà	44
4.4 Le megacostellazioni, nuovi modi di produrre i satelliti.....	47
4.5 Il segmento utente – chiave di accesso al mercato di massa	47
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	50

1 BREVE STORIA DELLE COMUNICAZIONI VIA SATELLITE

1.1 Da Sir A. C. Clark allo Sputnik alla formazione di ESA, Intelsat e Eutelsat

Tutto è cominciato da un articolo di sir Arthur Charles Clarke intitolato “Extra-Terrestrial Relays —Can Rocket Stations Give Worldwide Radio Coverage?” [1] del 1945 dove l’autore preconizzava l’uso di satellite geostazionari per permettere comunicazioni globali sulla terra (vedi Figura 1).

October 1945 **Wireless World** 305

EXTRA-TERRESTRIAL RELAYS

Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage?

By ARTHUR C. CLARKE

It is possible, by a suitable choice of frequency and system, to provide long-range circuits between any two parts of the earth, independent of the curvature of the atmosphere, and there are many instances where they have been proposed. A two-terminal system, giving constant strength of all times over the globe, would be invaluable, and is not impossible, in a "world-wide" system.

Theoretical study of the capacity and inherent problems in the use of satellites in the form of television or radio stations, since long-range transmission cannot be interrupted at all. The service area of a television station, even on a very good site, is very much limited in extent. To cover a small country such as Great Britain would require a network of transmitters, connected by suitable lines, equipped with VHF relay links. A more theoretical study shows that such a system would require a great number of relay stations of one, or more, types, to provide television coverage of a very considerable area, even the whole of a small country. It would be out of the question to provide a large constant with such a service, and only the main centres of population could be included in the service.

The problem is equally serious where an attempt is made to link television services in different parts of the globe. A relay chain would require a large number of cost stations, and transmitters of great power would be required. It is not possible to provide a service such as high speed terrestrial which can be used for long distances, to the ultra-high frequency.

Many may consider the solution proposed in this discussion for the world to be a very simple one, such as a satellite in orbit, which can be used to relay signals in any direction, and which can be used to relay signals in any direction, and which can be used to relay signals in any direction.

the atmosphere and will be limited to a few miles. However, a satellite in orbit will be able to make signals in any direction, and will be able to make signals in any direction. There are no definite number of possible stable orbits, circular and elliptical, in which a rocket would remain if the initial conditions were correct. The velocity of 8 km/sec. applies only to the case of a circular orbit, and not to the case of an elliptical orbit. The period of revolution would be about 100 minutes. As the radius of the orbit increases the velocity decreases, there being a direct relation and less centrifugal force is required to balance it. Fig. 1 shows this graphically. The moon, of course, is a natural case and would be as the curve in Fig. 1 if it were projected. The proposed German space-station

Fig. 1. Variation of orbital period and velocity with distance from the centre of the earth.

The German space-station rocket would have a period of about three hours and a velocity of about 7 km/sec. It will be possible in a few years to build a satellite system of rockets which can be placed into orbit with a velocity of about 8 km/sec. A body in such an orbit, if it were projected with that of the

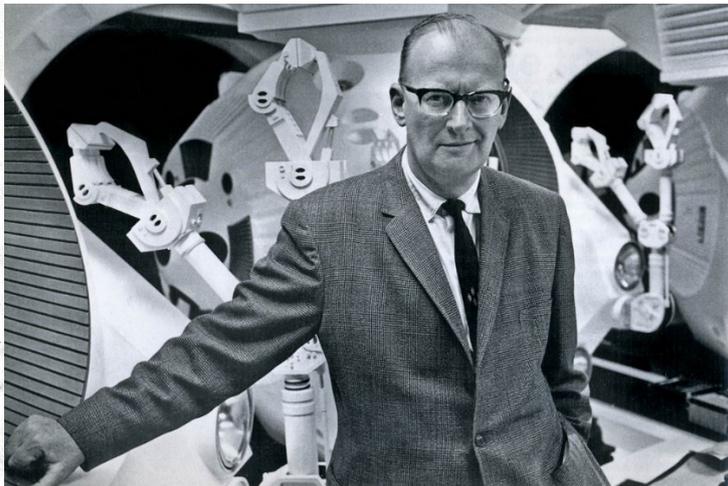


Figura 1: L’articolo Extra-Terrestrial relays di Sir Arthur Charles Clarke.

Si sono dovuti attendere gli anni 60 perché la sua intuizione divenisse realtà con il lancio del satellite Syncom 2 della NASA (1963). Ma la corsa allo spazio era iniziata nel 1957 con il lancio dello Sputnik che sorprese il mondo occidentale diventando il primo satellite artificiale in orbita intorno alla terra e capace di emettere un semplice segnale radio modulato. In realtà il primo vero satellite di comunicazione non geostazionario fu il Telstar lanciato da AT&T nel 1962 per permettere comunicazioni televisive, telefoniche e fax attraverso l’atlantico.

Pochi giorni prima dello sbarco dell'uomo sulla luna, Intelsat fu in grado di completare la visione di Sir. A. C. Clarke con la messa in operazioni del terzo satellite geostazionario (Intelsat III) permettendo così a 500 milioni di spettatori in tutto il mondo di seguire in diretta le immagini di Neil Amstrong che poneva per la prima volta i piedi sul suolo lunare il 20/07/69 (vedi Figura 2).



Figura 2: Immagine dell'allunaggio dell'Apollo 11 (sinistra) e di coloro che hanno permesso la diretta mondiale.

Il ruolo del satellite nelle comunicazioni globali era così diventato una realtà commerciale. Intelsat fu la prima organizzazione intergovernativa dedicata alle comunicazioni satellitari fondata nel 1964 con 7 paesi membri che divennero 81 nel 1973. Nel 1977 fu creata con la partecipazione di 17 stati Europei un'altra organizzazione intergovernativa chiamata Eutelsat (European Telecommunication Satellite Organisation), con lo scopo di sviluppare e operare una infrastruttura di telecomunicazione satellitare per l'Europa. Nel 1979 venne creata una terza organizzazione intergovernativa chiamata Inmarsat, che raggruppava 28 nazioni, per supportare comunicazioni satellitari mobili inizialmente per navi e in una seconda fase anche per gli aerei.

Tutte queste organizzazioni hanno svolto un ruolo molto importante nello sviluppo delle comunicazioni satellitari a livello globale ed Europeo mettendo in orbita ed operando un numero di satelliti geostazionari.

Eutelsat e Inmarsat sono state supportate negli sviluppi dei loro primi satelliti dall' Agenzia Spaziale Europea (ESA) fondata nel 1975 grazie alla fusione di due precedenti organizzazioni Europee, ELDO (European Launch Development Organization) e ESRO (European Space Research Organisation) con 10 stati membri iniziali tra cui l' Italia. Oggi l'ESA, di cui faccio parte, è composta da 22 stati membri e copre tutti i campi di attività spaziale per scopi pacifici.

Poco dopo la sua creazione, l'ESA prese in carico il progetto e lo sviluppo dei primi satelliti sperimentali di telecomunicazione per Eutelsat (Orbital Test Satellite 1978 predecessore del satellite Eutelsat I F-1, anche noto come European Communications Satellite 1 (ECS-1)) e della serie di satelliti MARECS per comunicazioni mobili per conto di Inmarsat (il primo dei quali fu lanciato nel 1981). Superata la fase pionieristica delle comunicazioni satellitari, Intelsat, Eutelsat e Inmarsat sono divenute delle organizzazioni private a scopo commerciale rispettivamente nel 2000, 2001 e 1998.

Il successo commerciale delle comunicazioni via satellite è stato possibile grazie a numerosi sviluppi tecnologici sia a livello piattaforma che di *payload*¹ satellitare permettendo un notevole incremento della capacità di ciascun satellite e del conseguente profitto economico. L'ESA ha svolto un ruolo importante per l'industria Europea nello sviluppo delle tecnologie satellitari. Tale ruolo continua ad essere svolto ancora oggi attraverso i vari programmi tecnologici che coprono orizzonti sia di lungo che di medio e breve termine.

¹ Per *payload* si intendono gli apparati a bordo del satellite che permettono la ricezione/trasmisione dei segnali trasmessi/ricevuti dalle stazioni di terra (comunemente chiamate gateways) e la loro trasmissione/ricezione verso gli utenti.

1.2 Il ruolo dell'Italia nell' esplorazione delle alte frequenze

A questo punto è doveroso ricordare il ruolo chiave svolto dall' Italia nell' utilizzazione delle frequenze più elevate dello spettro radio anticipando i trend commerciali, grazie alla visione e perseveranza di persone come il Prof. Francesco Carassa e il Prof. Aldo Paraboni. Nel 1977 venne lanciato dall' Italia in orbita geostazionaria il satellite Sirio I [2] (Satellite Italiano Ricerca Industriale Orientata). Sirio I (vedi Figura 3) costruito per studiare la propagazione delle onde radio ad alte frequenze, tra i 12 e i 18 GHz, al fine di sviluppare nuove possibilità per le comunicazioni telefoniche e televisive via satellite. Sirio I venne posizionato in un punto sovrastante le isole Canarie e la costa africana e lì rimase per 5 anni, fino al 1983. Sfortunatamente il lancio del successore Sirio II, realizzato in collaborazione con l'ESA, fallì.



Figura 3: Il satellite Sirio 1.

L'Italia ebbe anche un ruolo importante nello sviluppo del satellite Olympus dell'ESA che apriva l'era della trasmissione televisiva per utenti domestici (Direct to Home broadcasting²). L'uso di piccole antenne per la ricezione dei programmi televisivi è stato possibile grazie all'uso delle bande di frequenza elevate (18/12 GHz) esplorate da Sirio I. Olympus portava a bordo anche un pionieristico *payload* per le telecomunicazioni a 30/20 GHz realizzato dall'industria italiana. Olympus venne lanciato nel 1989 dal vettore Europeo Ariane e controllato dalle stazioni e il centro di controllo di Telespazio.



Figura 4: Il satellite ESA Olympus.

1.3 Il boom del broadcasting via satellite e i pionieri delle onde millimetriche

I precursori del Direct-To-Home (DTH) broadcasting come Olympus, hanno creato un mercato commerciale di tutto rispetto che ha permesso ad organizzazioni come Eutelsat di diventare operatori commerciali di grande successo. E tutto ciò è stato possibile grazie alla combinazione dell'intuizione di Sir A. C. Clarke sui satelliti geostazionari, la visione pionieristica del possibile uso delle nuove frequenze radio, lo sviluppo tecnologico degli

² Per DTH broadcasting si intende la diffusione di programmi televisivi e radio che possono essere ricevuti direttamente dall'utente a livello domestico purché sia equipaggiato di una antenna parabolica di 45-60 cm di diametro puntata sul satellite geostazionario e un ricevitore satellitare.

apparati di bordo e di terra, lo sviluppo di standard mondiali per video broadcasting e il supporto di organizzazioni internazionali e nazionali ai programmi di ricerca e sviluppo. Oggi il mercato del broadcasting televisivo via satellite rappresenta il 76% del mercato delle telecomunicazioni satellitari e raggiungeva 379 milioni di utenze nel 2016 (430 milioni previste nel 2021).

Il successo del DTH usando le onde millimetriche sulla scia di Sirio I non arrestò le ambizioni italiane nel campo delle telecomunicazioni satellitari. Grazie al supporto dell'Agencia Spaziale Italiana (ASI creata nel 1988) alle proposte del Prof. Carassa fu iniziato lo studio di un satellite chiamato Italsat capace di rigenerare a bordo i segnali terrestri e capace di funzionare come un centralino nello spazio utilizzando antenne multifascio molto avanzate. Il progetto implementativo di Italsat fu affidato da ASI a Alenia Spazio nel 1990. Nonostante fosse il progetto di satellite per telecomunicazioni più avanzato in quegli anni, il 60% dei componenti di Italsat erano di provenienza nazionale a dimostrazione del livello di eccellenza tecnologica raggiunto dall'industria aerospaziale italiana in quegli anni. Il *payload* di Italsat permetteva di gestire con commutazione a bordo 12 mila canali telefonici con tecnica di accesso multiplo molto avanzata operante a 20-30 GHz. Un secondo *payload* permetteva connessioni digitali tra computer a velocità di decine di Megabits al secondo decisamente elevate per quel tempo. Inoltre un terzo *payload* sperimentale permetteva di continuare a studiare i fenomeni di propagazione nelle bande ancora più alte (40-50 GHz) che stanno diventando una realtà commerciale solo ai giorni nostri. Lanciato nel 1991 è stato seguito nel 1996 dal lancio di Italsat 2 che conteneva anche un *payload* sviluppato dall'ESA per le comunicazioni mobili in banda L.

Infine, il satellite Alphasat realizzato da ESA per Inmarsat e lanciato nel 2013, porta a bordo un *payload* sperimentale finanziato da ASI intitolato ad Aldo Paraboni per lo studio della propagazione e comunicazioni nelle bande millimetriche a 40/50 GHz [3]. Come vedremo più

avanti, queste frequenze, pur essendo più soggette ad attenuazione a causa di fenomeni atmosferici come nubi e pioggia, sono di largo interesse per i sistemi di accesso a banda larga che sono discussi nella sezione 1.6.

1.4 La prima generazione delle costellazioni globali – ascesa, declino e resurrezione

Il successo del DTH ormai acclarato negli anni 90 spinse ad affrontare nuove frontiere nelle comunicazioni satellitari. L'assenza in questi anni di uno standard globale di comunicazione per terminali cellulari standard di telefonia mobile rendeva difficile per uomini di affari di rimanere in contatto durante i viaggi in altri paesi. Questo perché la telefonia mobile di prima generazione si era sviluppata con soluzioni che erano supportate da operatori a livello nazionale o tutt'al più regionale. Questo spinse dei consorzi industriali privati a proporre dei sistemi globali di comunicazione mobile per telefoni portatili basati su costellazioni di satelliti in orbita bassa (ossia inferiore a 1500 km). In particolare, delle molte proposte avanzate sulla carta, due sistemi hanno raggiunto il pieno sviluppo commerciale alla fine degli anni 90 ossia Iridium [4] (composto da 66 satelliti orbitanti a 781 km, proposto da Motorola nel 1987 e operativo dal 1998) e Globalstar [5] (composto da 48 satelliti orbitanti a 1400 km, proposto da Loral Corporation e Qualcomm nel 1991 e operativo dal 2000 al cui sviluppo ho avuto la fortuna di partecipare). Anche se con centro di gravità negli Stati Uniti, tutti e due i sistemi hanno visto una notevole partecipazione di industrie Europee e Italiane. In particolare, il sistema Iridium utilizza concetti di rigenerazione e commutazione a bordo concettualmente simili a quelli introdotti anni prima in Italsat, e collegamenti a radiofrequenza tra i vari satelliti per ridurre il numero di gateways richieste per il suo funzionamento. Invece Globalstar è caratterizzato da una architettura trasparente più convenzionale, senza rigenerazione a bordo con ma con metodo di accesso innovativo³ basato su Code Division

³ Da notare che in dal 1990 Europa l'ESA aveva svolto con un notevole contributo personale, un ruolo pionieristico nel campo del CDMA per applicazioni satellitari per utenti fissi in banda Ku (12-

Multiple Access (CDMA) derivato dallo standard cellulare americano IS-95 (vedi Figura 5). L'aver messo in piedi in tempi brevi catene di produzione in serie dei satelliti ha rappresentato una notevole innovazione nel campo dell'industria aerospaziale. La produzione in serie dei satelliti della costellazione di Globalstar è avvenuta in Europa da parte di Thales Alenia Space negli stabilimenti di Roma e Tolosa. Ancora più sorprendente la capacità mostrata da Motorola di produrre in meno di un anno i satelliti della costellazione senza possedere una precedente esperienza nel campo satellitare.

Purtroppo malgrado gli entusiasmi iniziali e il massiccio sforzo industriale per sviluppare il segmento spaziale e terrestre in tempi record, il lancio commerciale di questi sistemi globali non ha dato i frutti sperati. Questo perché nel frattempo lo standard cellulare digitale di seconda generazione Europeo chiamato GSM (Group Special Mobile) ha avuto un successo inatteso non solo in Europa ma nel mondo intero affiancato da standard americani come il citato IS-95 e lo IS-136. Lo sviluppo di un mercato di massa di apparati mobili di piccola dimensione interoperabili in Europa ma anche in vari continenti, ha reso rapidamente obsolete le costellazioni globali satellitari, decisamente più costose e meno attraenti in termini di ergonomia dei terminali delle reti cellulari terrestri. Così Iridium nel 2002, e Globalstar nel 2001, hanno dovuto appellarsi al Capitolo 11 del US bankruptcy code per proteggersi dai creditori prima di dichiarare bancarotta. L'insufficienza della domanda, ridottasi a mercati di nicchia molto inferiori a quelli preconizzati pochi anni prima, ha causato due delle maggiori bancarotte negli Stati Uniti di quell'epoca. Malgrado la difficile situazione finanziaria che ha richiesto l'azzeramento dei debiti contratti, entrambe le costellazioni sono riemerse dalla bancarotta. Questo è stato possibile anche grazie anche al supporto di nuovi investitori. In particolare grazie all'aiuto del Dipartimento della difesa americano per Iridium e l'aprirsi di nuovi mercati come Internet delle cose per Globalstar. L'uscita dalla bancarotta

14 GHz) e mobili in banda L (1.5-1.6 GHz) [22]. Questi sistemi sono stati sviluppati industrialmente e utilizzati da operatori come Eutelsat nonché dall'esercito spagnolo.

ha permesso di continuare ad operare la costellazione e addirittura di ordinare e poi lanciare una seconda generazione di satelliti (Iridium 2017-2019, Globalstar 2010-2013) (vedi Figura 6).



Figura 5: La costellazione Globalstar e prima e seconda generazione di telefoni mobili.

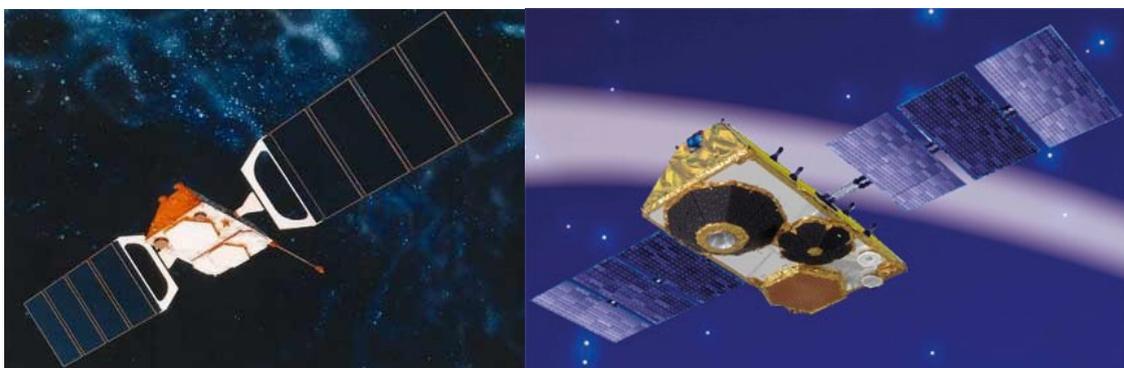


Figura 6: I satelliti di Globalstar di prima e seconda generazione.

1.5 Il broadcasting per mezzi mobili via satellite

L'Europa è stata pure protagonista nello sviluppo di tecnologie per broadcasting audio e in seguito video ai mezzi mobili (automobili). Purtroppo i tentativi supportati da ESA di sviluppare un sistema Europeo di Digital Audio Broadcasting (DAB) via satellite con una mini costellazione di satelliti in orbita ellittica completata da una rete di ripetitori terrestri chiamato Archimedes [6] non è riuscito ad essere finanziato. Questo soprattutto a causa delle incerte prospettive economiche del sistema vista la molteplicità di lingue usate in Europa che richiedevano un aumento notevole dei canali radio da trasmettere simultaneamente. Nonostante le difficoltà incontrate in Europa, i concetti e le tecnologie sviluppate per Archimedes in Europa hanno permesso agli Stati Uniti di mettere rapidamente in piedi due sistemi satellitari DAB con copertura nazionale chiamati XM [7] e Sirius [8] lanciati rispettivamente nel 2000 e 2001. Nel 2007 i due sistemi si sono uniti come Sirius XM [9] e rappresentano un indubbio successo commerciale con 31 milioni di utenti nel 2016 e presenti nel 60% delle nuove autovetture in USA, malgrado gli elevati costi di produzione dei canali radio tematici che vengono offerti agli utenti (vedi Figura 7).



Figura 7: Il Sistema di digital audio broadcasting SiriusXM, uno dei satelliti e ricevitore veicolare.

Nonostante gli insuccessi di Archimedes nel campo del DAB, nel 2006 Eutelsat e SES hanno proposto e poi creato nel 2008 una società Solaris Mobile con lo scopo di commercializzare

un sistema di broadcasting video/audio digitale per l'Europa basato su un satellite geostazionario e una rete complementare di ripetitori terrestri utilizzando delle nuove frequenze intorno alla banda della terza generazione mobile terrestre dei 2 GHz (denominata banda S con licenza ottenuta dalla Commissione Europea nel 2009). L'idea era di portare servizi multimediali alle automobili con possibilità di un canale di ritorno che permettesse la telemetria del veicolo e messaggi di emergenza. La copertura pan-Europea del satellite sarebbe stata integrata da una rete di ripetitori terrestri in aree urbane per garantire una alta qualità di servizio (vedi Figura 8). L'ESA ha supportato la concezione tecnica, lo sviluppo, i test e la standardizzazione (DVB-SH e ETSI S-MIM) del sistema [10], [11]. Il satellite Eutelsat W2A lanciato nel 2009 conteneva un *payload* in banda S caratterizzato da una antenna con un riflettore di larghe dimensioni (12 m vedi Figura 9). Tale *payload* era stato progettato per supportare il servizio di multimedia mobile broadcasting con 5 fasci linguistici. Purtroppo una volta in orbita, il riflettore non si è dispiegato correttamente causando una considerevole riduzione delle prestazioni del *payload* per servizi mobili in banda S. Malgrado il malfunzionamento del riflettore, la tecnologia DVB-SH e ETSI S-MIM è stata dimostrata funzionare egregiamente grazie all'ampia sperimentazione in Europa (2009-2011) e con reti terrestri nell'area urbana di Parigi, Barcellona e Pisa (vedi Figura 10). Però non è stato possibile iniziare un servizio operativo a causa del malfunzionamento dell'antenna che limitava la copertura del servizio in Europa. Così nel 2014 EchoStar (US) ha rilevato Solaris Mobile e la relativa licenza per l'uso della banda S con ripetitori terrestri in Europa. Al momento non sono chiare le prospettive commerciali del sistema Europeo controllato da Echostar anche se servizi mobili in banda S che utilizzano terminali Hughes sono stati annunciati nel 2019.

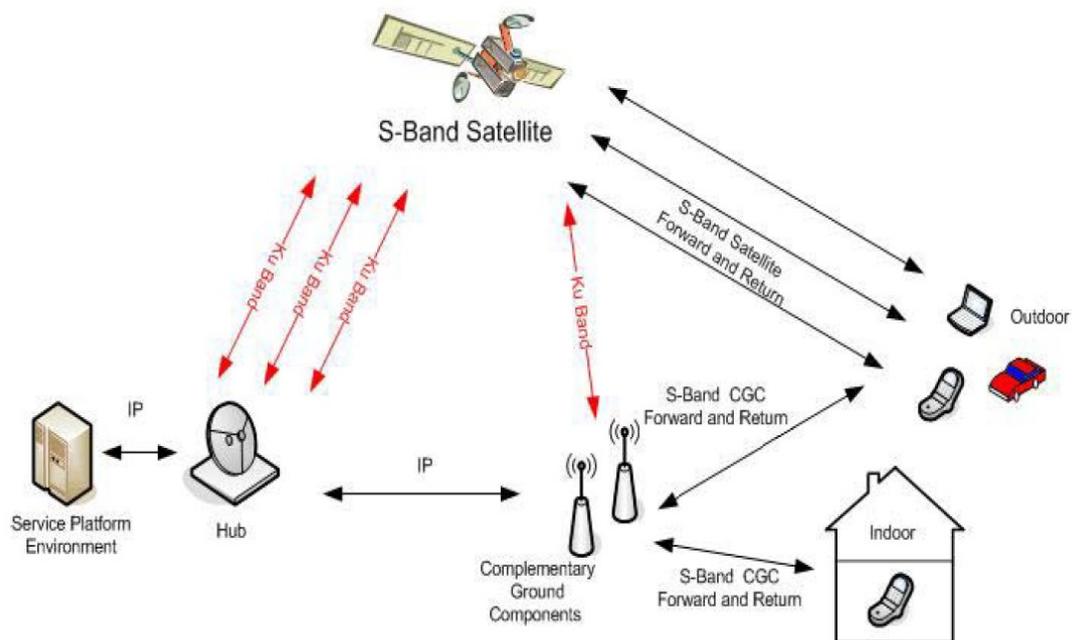
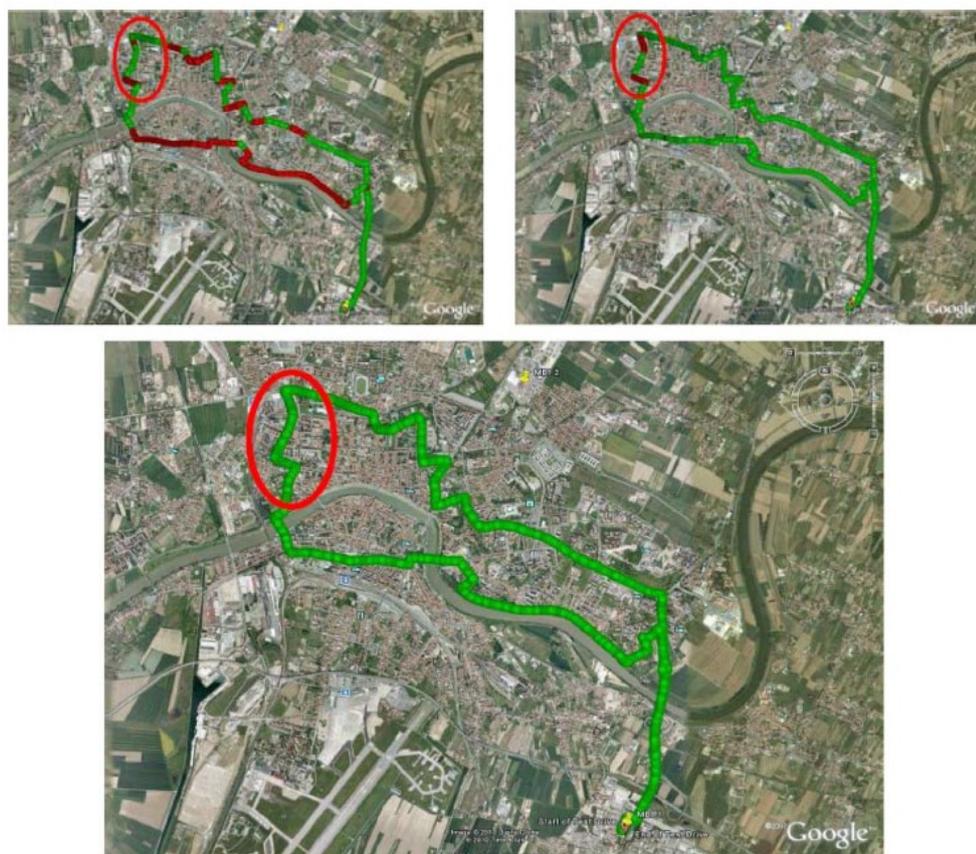


Figura 8: Il sistema S-MIM di broadcasting multimediale interattivo.



Figura 9: Il satellite Eutelsat W2A con il riflettore da 12 m per la banda S.



SH-B8 on Route 1—Satellite-only (upper left), Terrestrial-only (upper right) and Code-combining (below).

Figura 10: Esempi di risultati delle campagne di test dello standard DVB-SH a Pisa.

1.6 Il digital divide e l'emergenza dei sistemi a banda larga via satellite

Il vorticoso sviluppo di Internet negli anni 90 ha creato degli squilibri nell'accesso alla rete a larga banda da parte dei cittadini. Infatti, molti territori in vari paesi sono rimasti limitati nella velocità di accesso soprattutto in aree scarsamente popolate o a basso reddito dove non è conveniente per gli operatori terrestri dispiegare costose infrastrutture di telecomunicazione. Questo ha creato il fenomeno del cosiddetto *digital divide* che seppure più evidente in paesi come gli Africa, Sud America, India, Cina, Medio Oriente si osserva anche in parte negli Stati Uniti, in Russia ma anche alcune zone dell'Europa (vedi Figura 11).

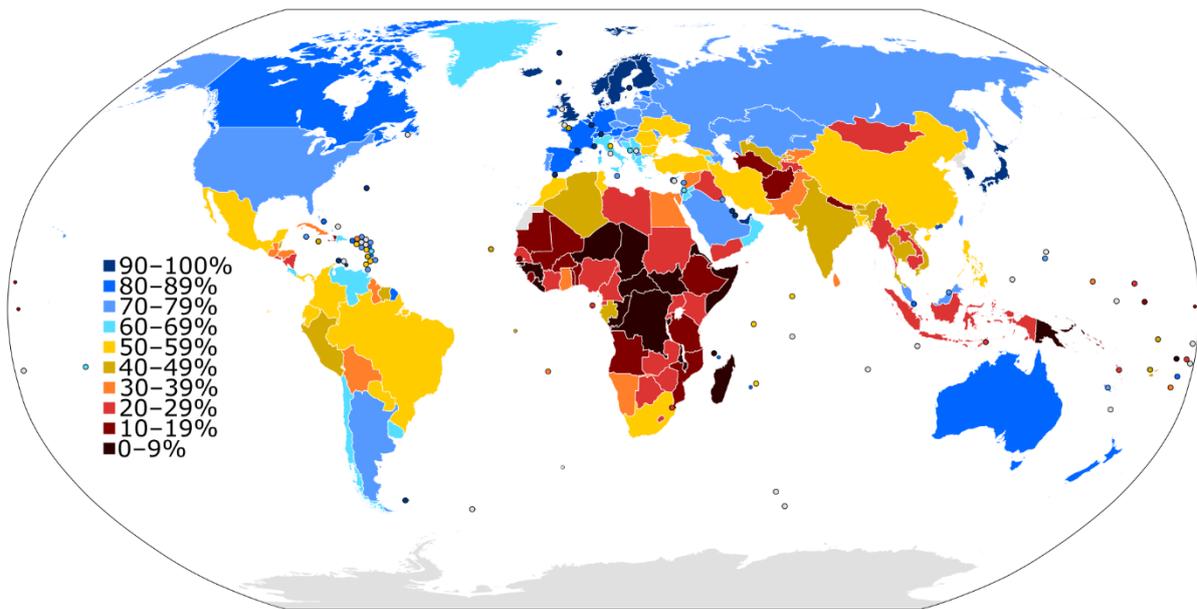


Figura 11: Utenti Internet nel 2015 come percentuale della popolazione del paese [12].

L'agenda digitale europea adottata nel 2010 ha fissato tre obiettivi connessi alla banda larga: (1) portare la "banda larga di base" a tutti gli europei entro il 2013; (2) accesso a velocità "a banda larga veloci" superiori a 30 Mbps (megabit al secondo) per tutti gli europei entro il 2020; (3) connessioni a "banda larga ultraveloce" superiori a 100 Mbps per almeno il 50% delle famiglie europee entro il 2020. Anche se in Europa il divario digitale è stato sostanzialmente ridotto nell'ultimo decennio, esso rimane tutt'altro che eliminato. Secondo il quadro di valutazione del 2015 da parte dell'Agenda della Commissione Europea, due obiettivi correlati sono già stati raggiunti (tutte le famiglie dell'UE possono accedere alla banda larga di base e il 75% di tutti gli europei è un normale utente di Internet). Tuttavia, esiste il pericolo che gli obiettivi relativi alla banda larga a velocità elevata e ultraveloce non siano raggiunti, soprattutto nelle zone rurali.

In Europa gli operatori satellitari come Eutelsat hanno collaborato alla riduzione del digital divide grazie alla messa in orbita del satellite Ka-sat nel 2010 (vedi Figura 12) che utilizza per usi commerciali tecnologia multifascio e frequenze di 20-30 GHz preconizzate dai satelliti

come Olympus e Italsat lanciati decenni prima. Piccole antenne di diametro di 60 cm o meno, (vedi Figura 12) permettono al singolo utente di accedere a Internet a banda larga ad un costo comparabile alle reti terrestri.



Figura 12: Il satellite HTS Eutelsat Ka-sat e il terminale utente tooway.

Dopo Ka-sat altri satelliti capaci di dare accesso a banda larga alle zone non servite dalle reti terrestri sono stati lanciati o stanno per essere lanciati da operatori come Eutelsat (Konnect, Konnect VHTS), SES, Intelsat, Viasat (Viasat 1, 2, 3). Uno dei problemi principali nel supportare con costi accettabili il servizio a banda larga via satellite è legato alle dimensioni delle “celle” satellitari che non permettono un riuso così elevato delle frequenze come nei sistemi terrestri. Questo fatto è legato alla dimensione dell’antenna di bordo e alla complessità del *payload* nonché dalla limitazione delle bande di frequenze per servizi satellitari. Un altro problema è costituito dalla non uniformità spaziale e temporale del traffico (vedi Figura 13) che richiedono satelliti con una corrispondente forte flessibilità nell’uso delle risorse di bordo.

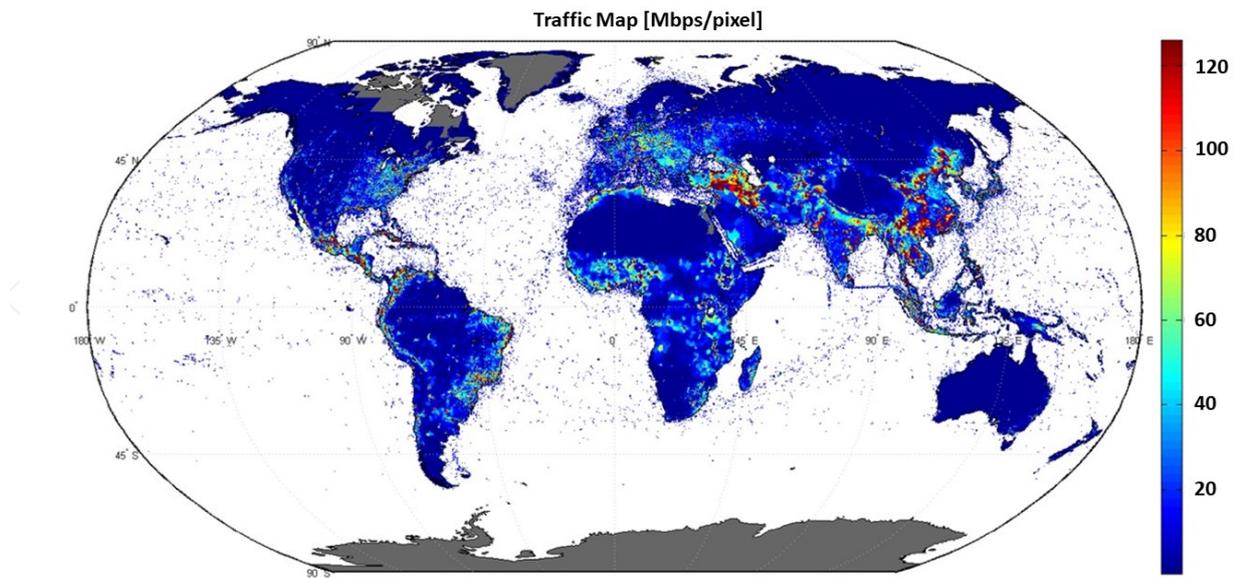


Figura 13: Stima della distribuzione del traffico satellitare per accesso a banda larga [13].

L'uso delle frequenze più elevate come i 20-30 GHz e i 40-50 GHz ha sicuramente contribuito ad aumentare l'efficienza del segmento spaziale di un singolo satellite geostazionario permettendo di passare da capacità di qualche Gigabit al secondo a un Terabit al secondo e oltre nel prossimo futuro. Ma al tempo stesso le velocità e la quantità di dati richiesti dal singolo utente, a parità di costo del servizio crescono rapidamente. Mentre nel caso del DTH o DAB la stessa informazione viene simultaneamente trasmessa a milioni di utenti, nel caso dell'accesso a banda larga le comunicazioni sono del tipo punto a punto e non più punto multi-punto. Questa differenza di base rende il *business case* satellitare molto più arduo da soddisfare. Vedremo cosa si può fare per alleviare questo problema nel seguito.

A parte la mitigazione del fenomeno del digital divide per gli utenti fissi, il satellite svolge un ruolo importante nel garantire la continuità di accesso alla banda larga per utenti che viaggiano su aerei e navi e in qualche caso anche sui treni in zone non coperte dalle reti

terrestri. Oggi siamo talmente abituati ad essere connessi che anche durante un viaggio in aereo o nave, ci attendiamo che il nostro telefono o computer abbia accesso ubiquo. In questo caso vari operatori come Inmarsat, Intelsat, SES e altri si sono specializzati nel creare reti globali che permettano di installare stazioni base all' interno degli aerei, navi e treni estendendo virtualmente le reti terrestri grazie all' uso del satellite che funge il ruolo di "ponte radio" spaziale. In questo caso, le soluzioni utilizzate attualmente vanno dai più classici satellite geostazionari (Inmarsat GX e Inmarsat 6 di prossimo lancio) a costellazioni in orbita equatoriale media (8000 km) come O3B. O3B significa "gli altri 3 miliardi" intendendo la quantità di popolazione che non ha accesso ad Internet. La costellazione attuale O3B utilizza satelliti ciascuno equipaggiato con 12 antenne meccanicamente orientabili sull' utente (esempio una nave) ma anche su un ufficio garantendo accesso a banda larga per comunità fisse e mobili. La prossima generazione di satelliti chiamata M-power (2021) avrà fino a 30000 (!!) fasci di antenna orientabili elettronicamente quindi capace di servire un numero molto più elevato di utenti.

2 IL RUOLO DEL SATELLITE NEL CONTESTO DEL MERCATO DELLE TELECOMUNICAZIONI GLOBALI

2.1 La nicchia del satellite nel mercato globale delle telecomunicazioni

Quando arrivai al centro Tecnologico dell'ESA nel 1988 e cominciai ad interessarmi alle comunicazioni satellitari mi fu detto che avevano poco futuro in quanto la fibra ottica le avrebbe soppiantate nel giro di pochi anni. Anche se è indubbio che le reti terrestri fisse e mobili hanno fatto passi da gigante, come si è visto, il ruolo complementare del satellite non è svanito ma deve fare fronte a continue nuove sfide per rimanere competitivo.

Se nel contesto globale delle telecomunicazioni, valutato in 5 migliaia di miliardi di dollari nel 2013 il settore spaziale rappresentava il 6% del totale, nel 2016 il mercato satellitare ammontava a 260 miliardi di dollari (vedi Figura 14). Il dato interessante è che la parte dominante dei ricavi viene dal settore dei servizi (49%) e del segmento terrestre (43.5%).

Invece i settori più tecnologicamente rischiosi e richiedenti una quantità elevata di investimenti come la costruzione dei satelliti e dei lanciatori portano un contributo tutto sommato limitato al mercato con il 5.1% e 2.1% rispettivamente. Questo spiega il bisogno di un supporto istituzionale a questi due settori strategici. Sempre con riferimento alla Figura 14 si nota come i servizi *consumer* via satellite per utente (e.g. DTH) siano dominanti.

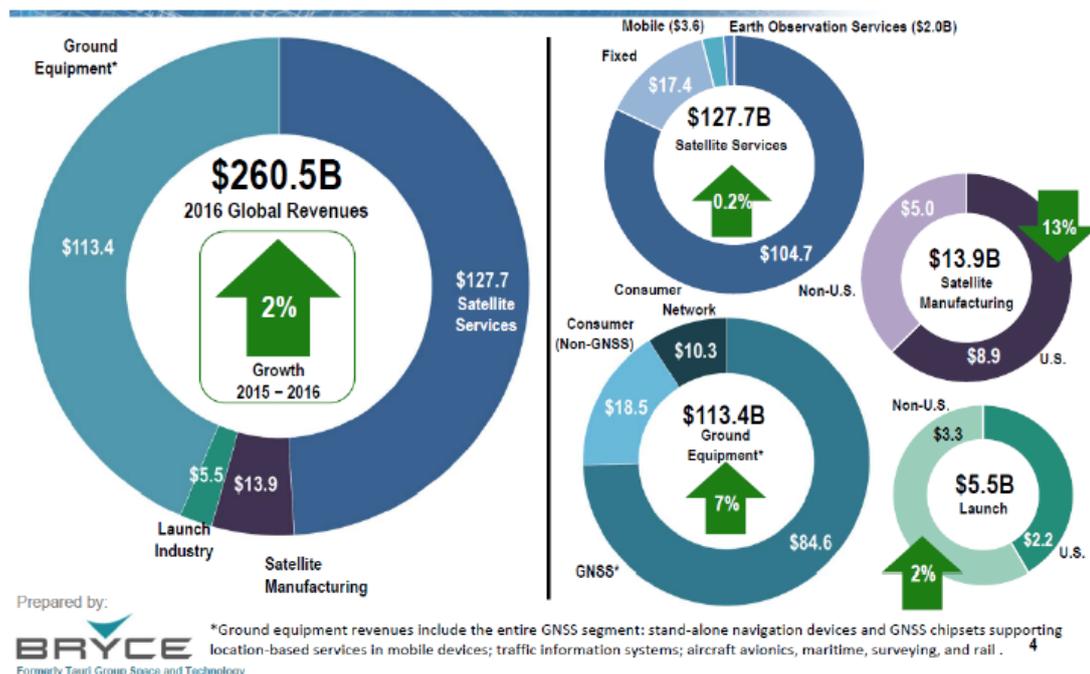


Figura 14: Il mercato satellitare nel 2016 [14].

2.2 La crescita dei sistemi di posizionamento via satellite nel mercato di massa

Osservando la distribuzione dei ricavi del segmento terrestre si nota come il segmento relativo al posizionamento satellitare basato su Global Navigation Satellite Systems (GNSS) come GPS, Galileo, Glonass e Beidou nel 2016 ricopriva il 74.6% delle vendite e continua a crescere (vedi Figura 14). Infatti, a partire dagli anni 2000, si è osservata una esplosione dell'uso di tecnologie GNSS satellitari per il determinare il posizionamento di automezzi e poi persone grazie all'integrazione del GNSS nei telefoni mobili (vedi Figura 15). Oltre alla sua

forte integrazione con i sistemi di comunicazione mobile il GNSS ha molti aspetti tecnologici in comune con i sistemi di comunicazione satellitare.

Inizialmente i sistemi di posizionamento basati sul GNSS, sono stati dominati dall' americano GPS, poi integrato dal sistema russo GLONASS e dal cinese Beidou. L'ultima costellazione arrivata ad essere operativa, ossia quella Europea chiamata Galileo, sta dimostrando di potere dare le migliori prestazioni anche se, per molte applicazioni, l'uso di molteplici costellazioni è divenuto essenziale a garantire la qualità e la disponibilità del servizio.

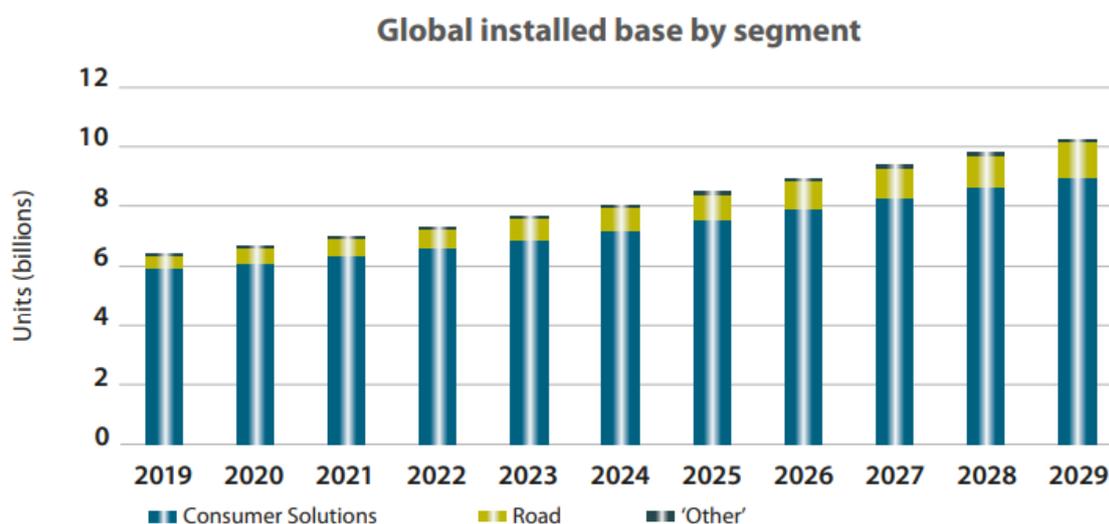


Figura 15: Unità GNSS installate per segmenti di utente [15].

I ricavi del mercato globale a valle del GNSS da dispositivi e servizi cresceranno da € 150 miliardi nel 2019 a € 325 miliardi nel 2029 con un tasso di crescita composto annuo dell'8%. La crescita è dovuta principalmente ai ricavi del mercato di massa e dei dispositivi di fascia media (<€ 150) e dai servizi di aumento dell'accuratezza come quelli forniti da EGNOS⁴.

⁴ EGNOS è l'acronimo di European Geostationary Navigation Overlay System, ovvero sistema geostazionario europeo di navigazione di sovrapposizione ed è un sistema sviluppato dall'Agenzia Spaziale Europea, dalla Commissione Europea e da EUROCONTROL, costituito da una rete di satelliti e basi terrestri, per incrementare l'accuratezza e l'integrità dei dati del sistema GPS per applicazioni critiche come l'aeronavigazione o la navigazione attraverso strette zone di mare.

I ricevitori di fascia bassa registreranno una crescita molto sostenuta del 16% per anno tra il 2019 e il 2029, mentre i ricavi dei servizi di tipo EGNOS aumenteranno costantemente da € 23 miliardi a quasi € 65 miliardi in 10 anni. Oggi il GNSS rappresenta l'applicazione satellitare che ha la maggiore penetrazione commerciale al mondo con quasi 6 miliardi di unità installate nel 2019. Pur non essendo un puro sistema di comunicazione, in pratica il GNSS può essere visto come un sistema di broadcasting digitale di un riferimento di tempo e delle informazioni ausiliarie per il suo funzionamento. Il suo sviluppo nel mercato di massa delle telecomunicazioni è stato favorito da diversi fattori tra cui la miniaturizzazione dei ricevitori (vedi Figura 16), l'uso delle reti cellulari terrestri per aiutare l'acquisizione e il processamento dei segnali GNSS, oltre alla messa in operazione di altre costellazioni complementari al GPS.



Figura 16: L'evoluzione della tecnologia dei ricevitori GPS: a sinistra primo ricevitore GPS aeronautico (1977), a destra il primo chip con doppia banda di ricezione multi-costellazione GNSS (2017) per applicazione al mercato di massa (e.g. telefoni cellulari).

2.3 L'emergenza di Galileo il sistema di posizionamento globale Europeo

È a questo punto doveroso menzionare lo sforzo Europeo per la realizzazione del sistema di navigazione satellitare chiamato Galileo in onore al celebre astronomo e fisico italiano. Dopo le prime fasi di studio e sviluppi tecnologici fatti dall'ESA negli anni 90 nell'ambito del programma di Telecomunicazioni e Navigazione ARTES, nel 1999, i diversi concetti sviluppati

dall'industria dei tre principali contributori dell'ESA (Germania, Francia e Italia) per Galileo sono stati confrontati e ridotti a uno da un team industriale congiunto. La prima fase del programma Galileo è stata concordata ufficialmente il 26 maggio 2003 dall'Unione europea e dall'ESA. Il sistema è destinato principalmente all'uso civile, a differenza dei sistemi più orientati al militare di Stati Uniti (GPS), Russia (GLONASS) e Cina (BeiDou-1/2). Galileo è entrato in funzione nel 2016, per volere dell'Unione Europea (UE) che ha dato l'incarico della sua realizzazione all'ESA che ha il ruolo di progettare e realizzare il sistema insieme all'Agenzia Europea per il GNSS (GSA) che ne cura le operazioni e l'utilizzazione. Il sistema è dotato di due centri operativi a terra, Oberpfaffenhofen vicino a Monaco di Baviera in Germania e al Fucino in Italia e di varie stazioni di misura dei segnali e telemetria, tracking e control (TT&C) sparse per tutto il mondo. Il progetto da 10 miliardi di EURO serve a fornire un sistema di posizionamento globale autonomo ad alta precisione in modo che le nazioni siano indipendenti dal sistema americano GPS o dal sistema russo GLONASS, che potrebbero essere disabilitati o degradati dai loro operatori in qualsiasi momento. L'uso dei servizi di base di Galileo (di precisione superiore agli altri sistemi grazie alla qualità degli orologi atomici e la trasmissione di segnali di posizionamento a banda larga in 3 frequenze diverse) è gratuito e aperto a tutti. Le funzionalità di alta precisione (*High Accuracy Service – HAS*) e criptati e autenticati (*Public Regulated Services – PRS*) sono invece disponibili solo agli utenti autorizzati. Galileo fornisce misurazioni della posizione orizzontale e verticale con una precisione migliore degli altri sistemi di posizionamento. Inoltre, Galileo fornisce una nuova funzione globale di ricerca e salvataggio (SAR) nell'ambito del sistema multi-costellazione MEOSAR.

Il primo satellite Europeo per GNSS pre-operativo Galileo, chiamato GIOVE-A, è stato lanciato il 28 dicembre 2005 con lo scopo di garantire l'assegnazione delle frequenze e provare le nuove tecnologie come gli orologi atomici e l'antenna in ambito spaziale. Un secondo satellite sperimentale Giove-B è stato lanciato dall'ESA nel 2009 e ha funzionato per quattro

anni. Il primo satellite a far parte del sistema operativo di Galileo è stato lanciato il 21 ottobre 2011. A luglio 2021, 26 dei 30 satelliti attivi previsti sono in orbita (22 al momento disponibili operativamente) e 2 nuovi satelliti verranno lanciati a Novembre 2021. Galileo ha iniziato a offrire capacità operativa precoce (COE) il 15 dicembre 2016, fornendo servizi iniziali con una costellazione incompleta, e raggiungerà la piena capacità operativa (FOC) nel prossimo futuro con a 30 satelliti (24 operativi e 6 ricambi attivi). A fine 2020, la costellazione Galileo, anche se meno nota del GPS, è presente in più di due miliardi di telefoni e apparati mobili nel mondo

(<https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/smartphone-users-put-their-trust-galileo-2-billion-galileo-enabled-devices-sold>).

La seconda generazione dei satelliti di Galileo dotati di nuove funzionalità a livello di sistema, capaci un alto livello di flessibilità nella generazione dei segnali, maggiore potenza irradiata, riconfigurazione dell'antenna e basati su propulsione elettrica comincerà ad essere lanciata a fine del 2024. Due contratti industriali per la realizzazione dei primi 6+6 satelliti della seconda generazione sono stati recentemente firmati da ESA con Thales Italia e Airbus per 1.5 miliardi ciascuno.

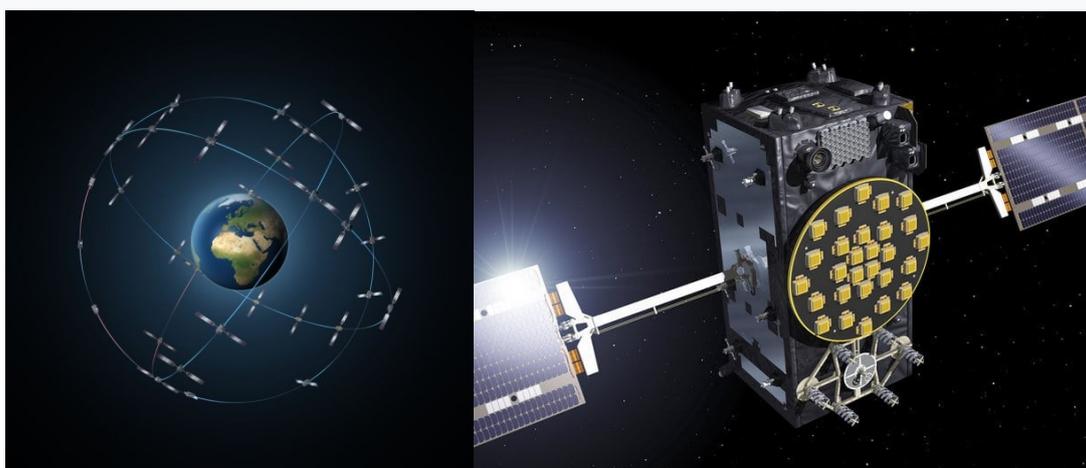


Figura 17: La costellazione di Galileo (sinistra) e uno dei satelliti della costellazione attuale (destra).



Figura 18: Uno dei due centri di controllo di Galileo (Fucino) e una delle stazioni di TT&C (Kiruna, Svezia).

2.4 La sfida delle megacostellazioni

Nonostante i risultati non brillanti delle prime costellazioni globali per le telecomunicazioni come Iridium e Globalstar, in questo decennio alcuni investitori privati hanno riaperto la corsa all'uso delle costellazioni per dare una risposta al problema del digital divide. Ma questa volta le costellazioni proposte sono di dimensioni di almeno un ordine di grandezza superiori alla prima generazione con un numero di satelliti che può anche raggiungere le migliaia di unità. Questo approccio iniziato negli Stati Uniti con OneWeb composto da 648 satelliti (Virgin e Qualcomm -2015) e poi seguito da StarLink con 12000 satelliti (Space-X), TelesatLEO con 117/512 satelliti (Telesat - 2016) e Kuiper con 3236 satelliti (Amazon - 2019). Le sfide poste da queste megacostellazioni sono molteplici: la riduzione dei costi di produzione e lancio dei satelliti; la produzione automatizzata per tagliare i tempi di realizzazione; aspetti regolamentari (interferenze); la gestione delle risorse di bordo; dimensione e minimizzazione del costo del segmento terrestre; la gestione dei detriti

spaziali; la tecnologia e il costo dei terminali utente. Anche se alcune sfide sono affrontate con approcci totalmente nuovi per il settore spaziale, come la produzione automatizzata di satelliti (vedi Figura 19) o il lancio multiplo di 60 satelliti (vedi Figura 20) oggi, o addirittura di centinaia nel futuro prossimo, non ritengo che la sfida sia stata ancora vinta. Sicuramente gli investitori privati, entrati pesantemente in questo settore, stanno sfidando gli operatori incumbenti e l'industria aerospaziale. Anche se rimangono forti dubbi sulla solidità del business case delle megacostellazioni, è possibile che la prospettiva di dare accesso alla banda larga ovunque nel mondo sia una attrattiva sufficiente a mantenere l'interesse degli investitori (Amazon) anche a costo di perdite finanziarie non trascurabili nella fase iniziale [16].



Figura 19: La fabbrica per la produzione in serie dei satelliti OneWeb (sinistra) e la linea di produzione di OneWeb presso Airbus Tolosa (destra).



Figura 20: I 60 satelliti di StarLink pronti per essere lanciati dal Falcon 9 e prima del rilascio nello spazio.

2.5 Declino o momentaneo arresto per il mercato dei satelliti geostazionari?

L'inaspettata insorgenza delle megacostellazioni ha creato, come riflesso, un momento di seria riflessione degli operatori tradizionali che stavano cercando di far evolvere le loro flotte da servizi fissi per DTH e professionale punto-punto alla banda larga ma usando piattaforme geostazionarie. La conseguenza del lento declino del mercato del *broadcasting* via satellite e l'emergere di nuovi approcci alla banda larga ha ridotto il numero degli ordini di satelliti geostazionari per telecomunicazioni con conseguente impatto nell'industria aerospaziale (vedi Figura 21).

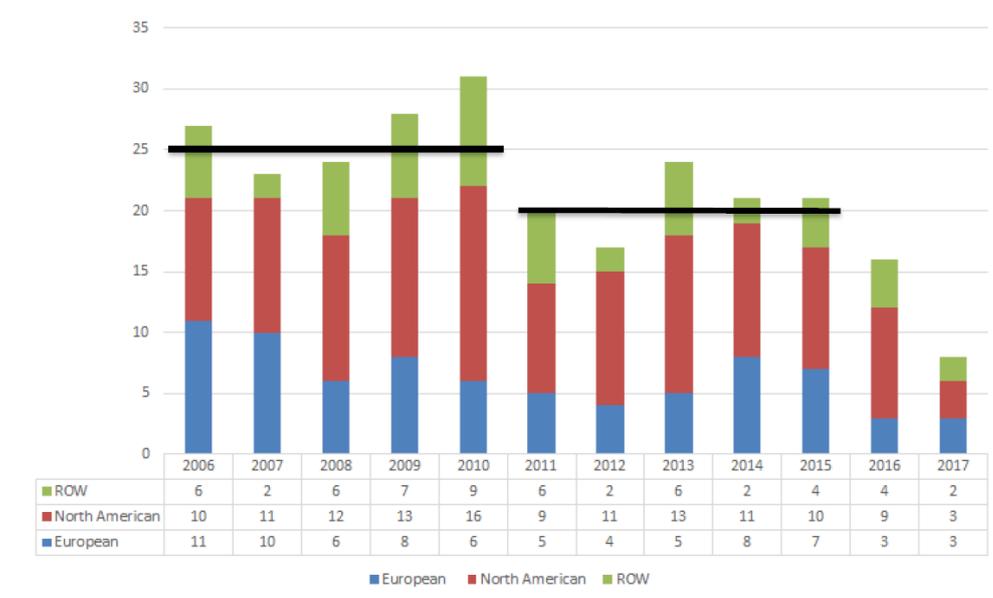


Figura 21: Numero di satellite GEO per telecomunicazioni ordinate dal 2006 al 2017.

Anche se si parla di una modesta ripresa del mercato GEO negli anni a venire per sostituire i satelliti a fine vita e la richiesta di nuovi satelliti GEO per accesso a banda larga, il futuro rimane incerto e la riduzione del mercato dei satelliti geostazionari sta creando problemi di sovraccapacità da parte dell'industria spaziale.

3 RECENTI TENDENZE DELLE TECNOLOGIE SATELLITARI

3.1 I megatrends emergenti globali

A questo punto ritengo utile accennare ad alcuni *megatrends* emergenti che hanno un impatto diretto o indiretto sui sistemi satellitari:

- Big data
- Intelligenza artificiale
- Digitalizzazione
- Cybersecurity

Il fenomeno del *big data*, permesso dalla disponibilità di calcolatori molto potenti a cui si collega l'intelligenza artificiale, vede un contributo importante dei satelliti. Nella generazione dei dati, i satelliti europei (EU/ESA) per l'osservazione della Terra Copernicus⁵ sono i maggiori contributori mondiali di big data (120 Petabyte di dati scaricati dal pubblico). Nella diffusione dei dati per applicazioni broadcasting su vaste aree il satellite rimane imbattibile. La disponibilità di una enorme quantità di dati permette l'uso di tecniche di intelligenza artificiale (IA) per estrarre informazioni utili all'utente in tempi brevi. Inoltre l'IA sta diventando una realtà per aumentare le capacità di decisione a bordo per la gestione dei satelliti, per ottimizzare l'uso delle risorse nelle reti di telecomunicazione satellitare che utilizzano satellite geostazionari con *payload* flessibili e ancora di più nella gestione di sistemi complessi come le megaconstellazioni.

La digitalizzazione dell'industria globale si sta rapidamente estendendo anche al settore spaziale per renderla più competitiva ed efficiente riducendo i tempi e costi di produzione (vedi Figura 22) tramite l'uso di modelli digitali interconnessi con progettazione virtuale del prodotto e della sua simulazione.

⁵ Il Global Monitoring for Environment and Security (GMES) ora ribattezzato Copernicus è un'iniziativa dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e della Commissione europea creata nel 2001 durante l'incontro di Göteborg e finalizzata a fornire entro il 2021 la capacità all'Unione europea di agire autonomamente nel settore della sicurezza e dell'ambiente tramite le rilevazioni satellitari.

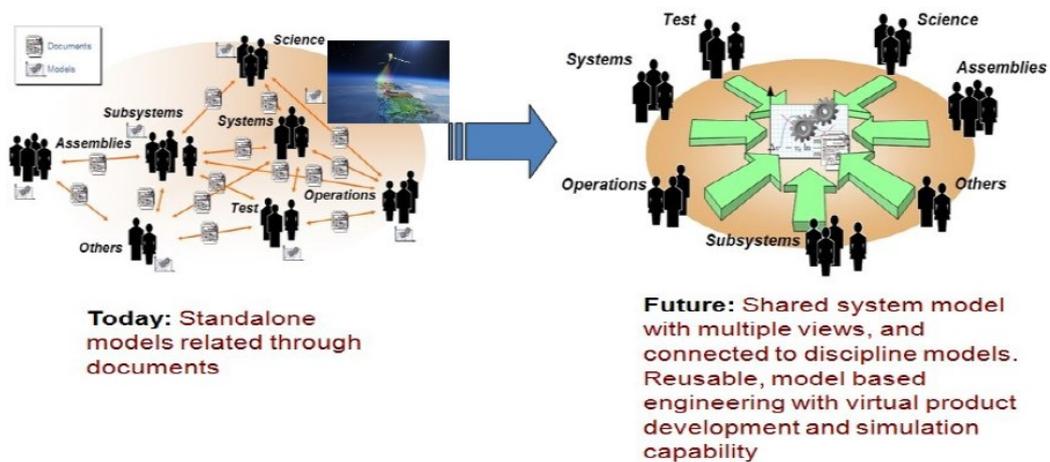


Figura 22: La trasformazione dell'industria digitale.

Infine la cybersecurity: gli attacchi informatici sono considerati il crimine in più rapida crescita negli Stati Uniti e stanno aumentando di dimensioni, raffinatezza e costi. Le risorse spaziali devono essere protette e questo richiede:

- L' implementazione economica dei singoli meccanismi di sicurezza attraverso la standardizzazione e la validazione dei protocolli di sicurezza.
- L' individuazione e implementazione di architetture di riferimento per sistemi di elaborazione dei dati spaziali e terrestri che includono flessibilità e sicurezza in base alla progettazione.
- L' integrazione della sicurezza nel processo di ingegneria del sistema.

3.2 I megatrends specifici ai satelliti

Altri aspetti più specificatamente legati alle telecomunicazioni spaziali sono:

- Flessibilità e capacità del *payload* del satellite per essere a prova di futuro.
- Integrazione nelle reti terrestri.
- La riduzione dei costi di produzione e lancio.
- Il problema dello spazio pulito.

Come vedremo anche in seguito, le tecnologie spaziali hanno difficoltà ad evolvere rapidamente per motivi legati alla specificità dell'ambiente spaziale e i volumi di mercato limitati. Quindi è importante progettare sistemi che abbiano capacità di evolvere. Mentre questo è relativamente semplice per il segmento terrestre, lo è meno per il segmento spaziale che spesso ha una vita di 15 anni o più. La riconfigurabilità del payload di bordo dopo il lancio fino a pochi anni fa era considerata poco interessante dagli operatori che potevano contare su un mercato solido e piuttosto statico. Oggi, con il declino del DTH in certi mercati e il suo sviluppo in nuove aree geografiche, l'emergere dell'accesso a banda larga e l'evoluzione rapida dei mercati la riconfigurabilità è diventata una richiesta crescente da parte degli operatori. Soluzioni commerciali sono in fase avanzata di sviluppo ma molto ancora deve essere fatto per rendere il *software defined payload* per satellite una realtà diffusa. In particolare, la disponibilità di antenne attive di larghe dimensioni operanti in bande di frequenza elevate è una sfida da vincere nel breve/medio termine con l'utilizzo di un mix di tecnologie analogiche, digitali e ottiche (vedi esempio in Figura 23).

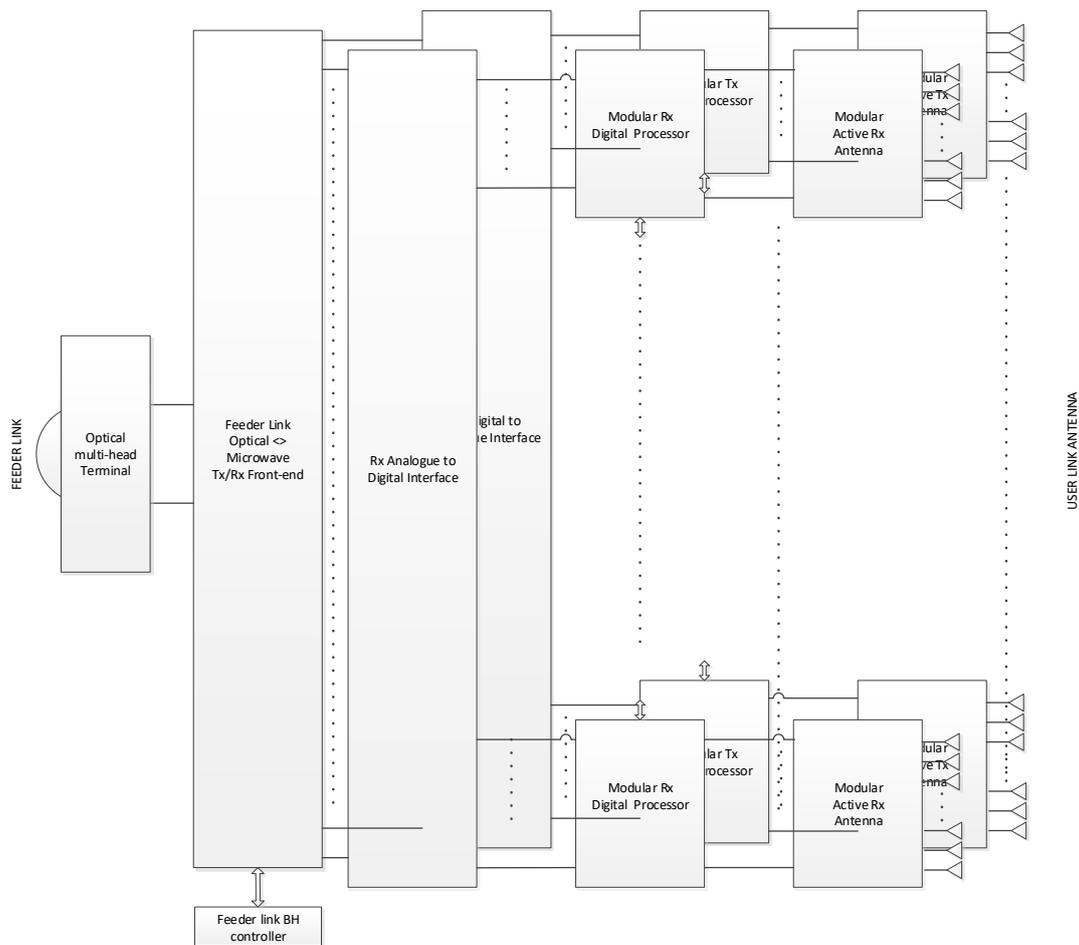


Figura 23: Esempio di *software defined payload* di future generazione [13].

Un altro aspetto rilevante è assicurarsi l'integrazione delle reti satellitari in quelle terrestri. Lo sforzo attuale supportato dall'industria Europea e dall'ESA di aggiungere una componente non terrestre (detta NTN ossia *Non Terrestrial Networks*) nell'ambito della standardizzazione del 5G rappresenta sicuramente un elemento di rilievo da perseguire anche nel dopo 5G. Si stanno attualmente valutando, con il contributo di varie università tra cui quella di Parma, gli adattamenti degli standard di comunicazione 5G terrestri per essere utilizzati via satellite. Ovviamente la minimizzazione degli adattamenti degli standard terrestri per utilizzo satellitari rappresenta una importante facilitazione per la riduzione dei costi delle tecnologie satellitari. Rimane però un notevole gap tecnologico a livello segmento

spaziale per potere offrire un servizio di comunicazioni satellitari mobili 4G / 5G a costi accettabili per *smartphones* usati comunemente nelle reti terrestri. Il problema principale consiste nelle limitazioni di prestazioni dell'antenna del satellite. Recentemente una azienda americana (AST Space Mobile) ha proposto una costellazione di satelliti in orbita bassa (720 km) con antenne attive di dimensioni di circa 10 x 10 m mai realizzate prima (vedi Figura 24).

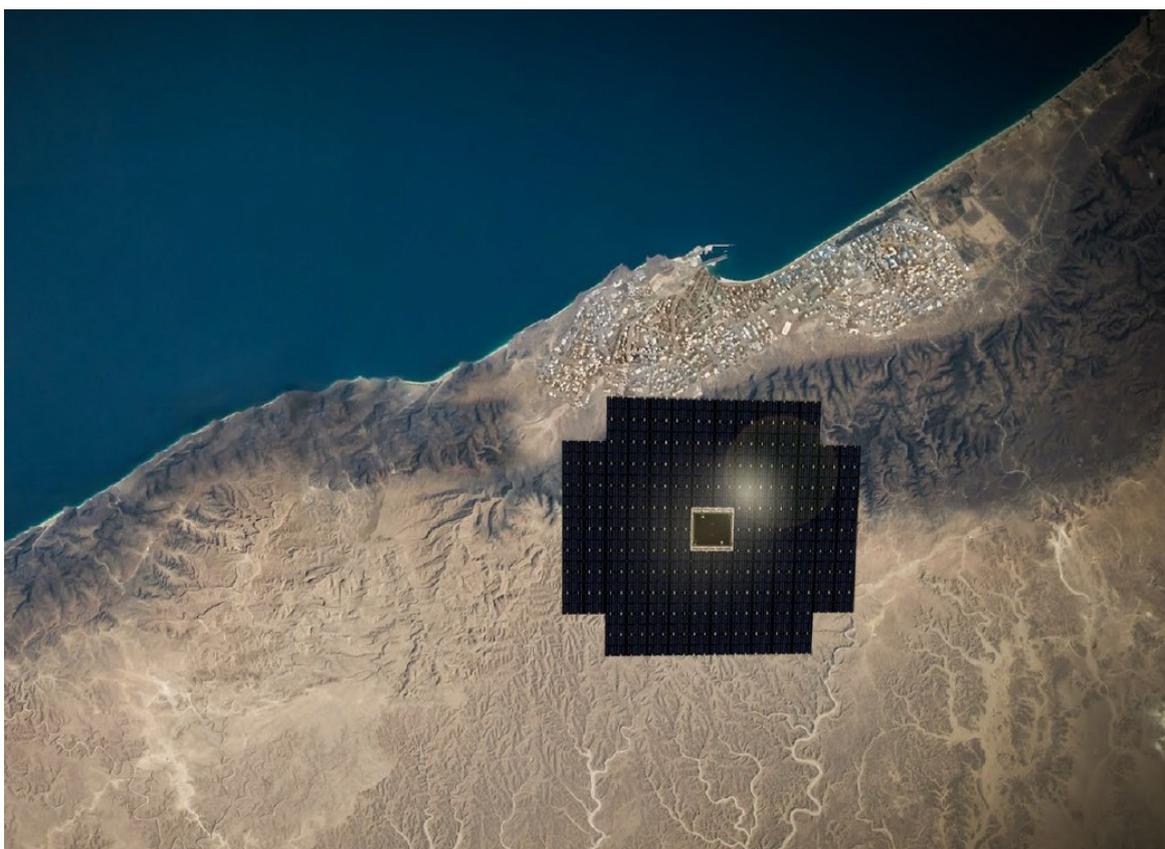


Figura 24: Impressione artistica di uno dei satelliti per 4G/5G di AST Space Mobile.

L'Europa, e in particolare l'ESA, ha avuto un ruolo di grande rilievo per garantire l'accesso autonomo allo spazio con lo sviluppo della famiglia di lanciatori Ariane e Vega che hanno goduto di un notevole successo commerciale. La nascita di SpaceX in USA ha avuto un impatto importante e inatteso sul settore dei lanciatori con una crescita importante della

sua fetta di mercato a discapito degli attori incombenti come si vede chiaramente dal grafico della Figura 25. In particolare, il paradigma della riduzione del costo del lancio anche grazie al riutilizzo dei lanciatori messo in atto da SpaceX sta mettendo sotto pressione Arianespace che con Ariane 6 in fase di avanzato sviluppo in cooperazione con ESA ha l'obiettivo di ridurre in maniera significativa il costo del lancio. Altre iniziative per sviluppare lanciatori riutilizzabili e nuove tecnologie per i lanciatori sono supportate da programmi finanziati da ESA.

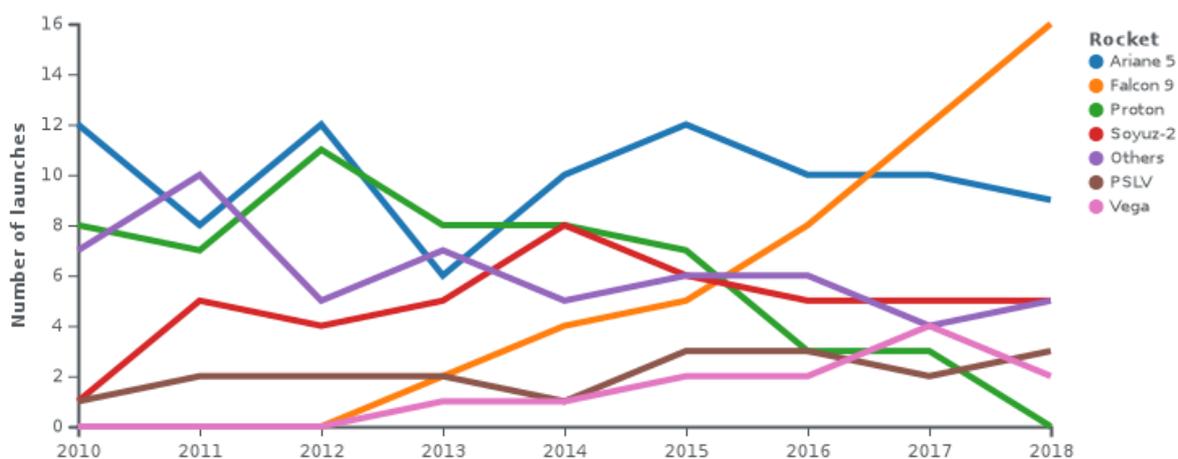


Figura 25: Evoluzione del numero di lanci per i vari lanciatori nel periodo 2010-2018.

Se da un lato l'accesso allo spazio da parte di molti paesi e privati rappresenta un fattore positivo per lo sviluppo dell'industria aerospaziale, è anche una fonte di possibili problemi. Infatti, la crescente quantità di satelliti orbitanti intorno alla terra richiede una attenzione crescente nella gestione e preservazione dell'ambiente spaziale. Le costellazioni in generale, ed in particolare le megacostellazioni possono creare dannosi detriti spaziali. Per questo l'ESA sviluppa tecnologie per garantire il futuro delle attività spaziali proteggendo l'ambiente. Vengono perseguite diverse linee d'azione: Eco-design, Cleansat e rimozione dei detriti attivi.

3.3 Ricerca applicata: una prospettiva personale

3.4 Da radioamatore ad amatore delle radio comunicazioni

La mia passione per i sistemi di telecomunicazione radio è cominciata grazie ad un amico che mi prestò un libro chiamato “Primo avviamento alla conoscenza della Radio” di D. E. Ravalico edito da Hoepli. Da lì la costruzione casalinga delle prime radio a galena, poi a transistor e a valvole, l’esperienza della *Citizen Band* fino a diventare radioamatore patentato a 16 anni e realizzare una stazione radio per traffico via satellite amatoriale quando ero studente liceale. In seguito, ho iniziato a seguire i corsi universitari in ingegneria elettronica che mi hanno dato l’opportunità di apprezzare un approccio più matematico e teorico alle telecomunicazioni complementare alle mie iniziali cognizioni sperimentali.

3.5 L’importanza dell’incontro tra ingegneri e i ricercatori puri

Anche nel corso del mio lavoro ho avuto la possibilità, e la fortuna, di combinare aspetti più teorici a quelli più pratici lavorando con eccellenti ricercatori universitari ed ingegneri delle industrie spaziali europee. Ritengo che essere cresciuto professionalmente in mezzo ai due mondi mi abbia dato modo di apprezzarne le qualità specifiche ma anche la loro complementarità. Nel corso degli anni mi sono sempre più convinto che nel campo della ricerca applicata sia fondamentale fare lavorare assieme ricercatori dotati di talento teorico e immaginativo ed ingegneri con un profilo più applicativo. Nel realizzare questo, l’importante è di focalizzare l’attenzione su problemi concreti, suggerendo possibili soluzioni talvolta non convenzionali, ma sempre confrontando i risultati con le soluzioni esistenti non solo dal punto di vista delle prestazioni ma anche dal punto di vista della loro fattibilità e costo. Questo approccio viene a volte considerato troppo limitativo dai ricercatori più teorici che si sentono costretti nella loro libertà di azione dai “paletti” del mondo reale. Al tempo stesso, una visione più teorica di certi fenomeni con una appropriata modellizzazione matematica aiutata dai *tool* di simulazione permette di sviscerarne gli aspetti meno comprensibili dall’approccio più pratico. A mio avviso l’importante è di essere sempre molto

critici sul lavoro fatto, verificarne ogni dettaglio con un lavoro di tipo artigianale nella fase di progettazione. Se questo lavoro riesce a generare un impatto pratico coronato da pubblicazioni di tipo scientifico, si ottiene il massimo beneficio per le due comunità che hanno di base fini diversi.

3.6 Considerazioni personali sulla ricerca applicata

Grazie a una *fellowship* dell'ESA ho potuto far parte del *system engineering team* alla Qualcomm dedicato allo sviluppo del sistema di comunicazione Globalstar. Vivendo per qualche tempo nella *wireless valley* a San Diego, California, ho avuto la possibilità di osservare (e forse assimilare almeno in parte) il modo di lavorare dell'industria *high-tech* americana alla fine degli anni 90. In Qualcomm, pur impiegando eccellenti ingegneri e PhD provenienti dalle migliori università americane, si tendeva a un approccio molto pragmatico usando le loro conoscenze teoriche per risolvere problemi pratici. Questo metodo contrastava con la tendenza di noi Europei ad ottimizzazioni estensive, spesso di impatto secondario. Nelle riunioni, le opzioni tecniche venivano ridotte rapidamente di numero invece di aumentarle come spesso accade in Europa. Inoltre la documentazione tecnica era chiara, concisa, aggiornata senza troppi documenti di supporto fatta per essere utile, di facile consultazione e gestione. Invece nei progetti europei si tende a creare una massa molto elevata di documenti che poi richiedono molto tempo per essere mantenuti. Questo massiccio sforzo di documentazione va a discapito del tempo disponibile per fare il vero lavoro e tecnico.

Inoltre, posso dire che nella mia limitata esperienza in USA ho notato come si valorizzano manager molto competenti e focalizzati su aspetti puramente tecnici, capaci di capire rapidamente i punti salienti di un problema complesso. Questo corpo di *senior technical managers*, spesso senza responsabilità amministrative, permette di seguire molto da vicino i progetti e di dare le giuste indicazioni per indirizzare meglio il lavoro del team di progetto.

Le revisioni tecniche dei progetti sono molto efficaci, guidate da profili senior con molta esperienza specifica, capaci di identificare i punti critici con un processo decisamente meno burocratico del nostro e forse più efficiente. Ovviamente anche queste società *high-tech* non sono esenti da decisioni errate ma gli errori vengono tipicamente corretti in tempi piuttosto rapidi anche con gestione molto dinamica del personale supportata da *360 degrees assessment* semestrali.

Per meglio esemplificare la mia visione di ricerca applicata, mi permetto nel seguito di dare alcuni esempi che ho vissuto nel corso della mia esperienza professionale.

Lo standard DVB-S2: Agli inizi degli anni 2000 il gruppo Digital Video Broadcasting (DVB) decise di riaprire lo standard satellitare DVB-S, ampiamente utilizzato per applicazioni DTH e professionali via satellite, per renderlo più efficiente ed adatto a supportare la televisione ad alta definizione. Gli obiettivi iniziali del nuovo standard chiamato DVB-S2 [17], spinti da operatori americani erano comunque abbastanza limitati nello scopo (come ad esempio l'aggiunta di nuovi formati di modulazione e codifica a livello fisico). Fortunatamente l'ESA che da alcuni anni aveva cominciato a studiare, prima internamente e poi con l'aiuto di noti gruppi di ricerca Europei, codifiche e modulazioni più avanzate per applicazioni satellitari, si trovò in una buona posizione per contribuire direttamente alla standardizzazione. Tuttavia, mentre per gli aspetti di modulazione fummo praticamente i soli contributori ed avemmo un impatto rilevante sul nuovo standard⁶, per la codifica le cose non andarono come previsto. Infatti, essendoci diverse proposte di soluzioni tecniche, il gruppo DVB decise di fare una competizione basata su un protocollo di valutazione che tenesse conto delle prestazioni ma anche della complessità realizzativa del decodificatore. E qui malgrado gli sforzi fatti da ESA e altre istituzioni Europee nella ricerca di codici efficienti, sulle prestazioni fummo battuti

⁶ In particolare aggiungendo nuovi formati di modulazione e funzionalità di adattività della modulazione in funzione della qualità del canale. Le soluzioni proposte si sono rivelate molto utili per lavorare sulle frequenze Ka e oltre.

dagli americani che avevano trovato un modo ingegnoso di combinare le prestazioni ad una complessità più ridotta. Questo approccio fu recepito da una delle nostre università che riuscì a sviluppare una soluzione più efficiente per la realizzazione del decodificatore. Questa soluzione è arrivata troppo tardi per la competizione del DVB-S2 ma il lavoro svolto con l'apporto dell'Università di Parma è stato scelto per uno standard mondiale del *Consultative Committee for Space Data Systems* con il nome di *Serial Concatenated Coding Scheme (SCCC)* per applicazioni di trasmissioni di dati delle cariche utili per satelliti di osservazione della terra (come i nuovi *Copernicus Sentinel Expansion Missions* in fase di sviluppo da ESA e EC) e scientifici [18].

Oggi lo standard DVB-S2 è presente in ogni moderno televisore e largamente utilizzato per applicazioni satellitari a banda larga, nonché per applicazioni satellitari professionali (vedi Figura 26). Più recentemente lo standard DVB-S2 è stato aggiornato ed ampliato con il nome di DVB-S2X [19] per meglio supportare le esigenze satellitari per applicazioni di broadcasting, di accesso a banda larga e per usi professionali con rilevanti contributi tecnici dell'Università di Parma che sta pure lavorando ad evoluzioni future del medesimo standard.



Figura 27: Lo standard DVB-S2 e suoi impatti commerciali.

Internet delle cose via satellite: Un altro esempio a cui voglio accennare è legato all' "Internet delle cose", che rappresenta una applicazione di crescente interesse commerciale anche per il campo satellitare. Quando Eutelsat e SES con Solaris Mobile iniziarono lo sviluppo del sistema di broadcasting digitale in banda S (vedi Sezione 1.5), chiesero all' ESA di sviluppare un metodo di accesso efficiente via satellite per permettere a milioni di utenti di mandare brevi messaggi dalla autovettura per riportare problemi o allarmi. In breve tempo, riuscimmo a trovare una soluzione tecnica molto valida, con efficienza che risultò essere di 3 ordini di grandezza superiore alle soluzioni preesistenti. In questo caso, è stata molto importante una modellizzazione accurata sia a livello analitico che simulativo del sistema di comunicazione ad accesso multiplo per potere capire fenomeni chiave del suo funzionamento. Con l'aiuto di alcune industrie Europee e finanziamenti sia pubblici che privati siamo riusciti a realizzarla praticamente, standardizzarla e dimostrarla su satelliti esistenti in tempi relativamente rapidi. Questo risultato insieme ad altre soluzioni alternative ha permesso di rendere pubblico un approccio nuovo di interesse anche per applicazioni terrestri, creando un notevole impatto nel campo della ricerca universitaria.



Figura 27: IoT via satellite - dal concetto al prodotto.

Il segnale di Galileo: Un'altra esperienza, per certi versi amara, è stata la definizione del segnale del sistema GNSS Europeo Galileo di cui ho parlato prima. A tale proposito, malgrado l'ESA avesse il ruolo di architetto di sistema, per gli aspetti di segnale l'unione Europea aveva formato un gruppo indipendente di esperti che dovevano assicurare che il segnale di Galileo fosse compatibile ed interoperabile con gli altri sistemi GNSS con cui EU doveva negoziare. L'ESA con attività di ricerca aveva sviluppato un concetto di segnale e messaggi per GNSS piuttosto avanzato per l'epoca utilizzando le competenze acquisite nel campo di comunicazioni mobili via satellite. La proposta tecnica dell'ESA conteneva elementi innovativi rispetto al GPS come segnali a banda limitata per ottimizzare l'uso delle bande di frequenza e minimizzare l'interferenza con altri sistemi, uso di segnali "pilota" per permettere una acquisizione e sincronizzazione del segnale robusta, messaggi ottimizzati per acquisizione veloce, codifica e interlacciamento a livello fisico insieme a diversità spaziale per migliorare la qualità ricezione dei messaggi di navigazione. Inoltre, la proposta era supportata dallo sviluppo di un complesso dimostratore di laboratorio che aveva permesso di validare le prestazioni del sistema. Purtroppo, la task force Europea non apprezzò appieno

alcune delle proposte fatte dall'ESA, probabilmente perché derivate dal campo delle telecomunicazioni e quindi poco note in questa comunità. Questo episodio rinforza la necessità di maggiori scambi tra esperti di campi distinti ma tecnicamente adiacenti come telecomunicazioni e radionavigazione. Inoltre, a differenza di quanto avviene nella standardizzazione per i sistemi di telecomunicazione (vedi Digital Video Broadcasting), dove nei comitati siedono rappresentanti delle varie categorie (operatori, industria da infrastruttura ai chip, centri di ricerca, università), nel caso di Galileo, nel comitato mancavano esperti con familiarità negli aspetti pratici della realizzazione del sistema sia a livello di segmento spaziale che del lato apparati dell'utente per il mercato di massa.

Le comunicazioni ottiche satellite-terra: Un ultimo esempio che vorrei dare è legato alle comunicazioni ottiche via satellite. Sicuramente le comunicazioni ottiche oggi così avanzate nel campo terrestre rappresentano un interessante spin-in nello spazio dove link ottici inter satellite sono già una realtà. Ma uno dei problemi nello sviluppare sistemi satellitari per accesso a larga banda nella classe del Terabit al secondo è legato a come collegare il satellite alle stazioni *gateways* di terra che si collegano alla rete terrestre. Uno dei problemi che viene esacerbato dall'uso dell'ottica, ma presente anche con l'uso delle onde millimetriche, è legato ai disturbi atmosferici alla propagazione. Molta ricerca è stata fatta ed è tuttora in corso sulle tecnologie ottiche e modi di attenuare gli effetti dell'atmosfera, ma il rischio è che questi specialisti lavorino in isolamento rispetto a chi progetta sistemi di comunicazione satellitare. Quindi non si tiene tempestivamente conto di elementi come la complessità del *payload* di bordo complementare al sottosistema ottico, il costo di interconnessione delle stazioni di terra e non si comparano propriamente le soluzioni proposte con alternative non ottiche. Anche in questo caso un approccio più interdisciplinare, aperto e end-to-end alla ricerca permette di avere risultati con maggiore impatto pratico. Questo è un altro campo in cui l'Università di Parma sta supportando l'ESA a trovare adeguate soluzioni tecniche per il prossimo futuro.

3.7 Lavorare in un'organizzazione tecnica internazionale

L' Agenzia Spaziale Europea in cui ho avuto la fortuna di lavorare ha caratteristiche uniche in quanto racchiude (spesso nello stesso centro o comunque in pochi centri) specialisti che coprono tutti i campi tecnici che sono rilevanti allo spazio. Questi specialisti lavorano insieme all' industria e al mondo della ricerca per realizzare nuovi programmi e sviluppare le tecnologie associate. Come detto questo "mix" di specialisti che fa da ponte tra mondo della ricerca, industria e progetti rappresenta un elemento essenziale per ottenere dei risultati importanti nella ricerca applicata. La possibilità di essere esposti a programmi spaziali avanzati e allo stesso tempo di potere stimolare e indirizzare la ricerca applicata è un atout molto importante. Purtroppo, i tempi richiesti per lo sviluppo delle tecnologie spaziali sono spesso piuttosto lunghi, vuoi per le difficoltà intrinseche, vuoi per lo spezzettamento dei fondi di ricerca vuoi per la mancanza di un vero focus da parte dell'industria.

A mio avviso rimane ancora del cammino da fare per assicurarsi che gli specialisti in campi diversi dello spazio possano pienamente coalizzare gli sforzi per raggiungere degli obiettivi comuni superando "silos" tecnologici. Ritengo pure importante trovare il modo di condividere le esperienze del passato tra i chi ha seguito sia dal punto di vista programma che tecnico i differenti progetti, massimizzando le interazioni tra gli esperti delle varie discipline. Questo spirito ha spinto alla creazione in ESA dei *Competence Domains* che raccolgono esperti di varie aree tecnologiche che hanno in comune un dominio tecnico su cui preparare delle *Technology roadmaps* interdisciplinari che combinano il *technology push* con l'application *pull*. Considero che l'interazione tra gli specialisti che supportano i *Competence Domains* e tra i vari *Competence Domains* sia fondamentale per perseguire un approccio multidisciplinare e pragmatico indispensabile nell' affrontare le sfide tecnologiche che ci attendono.

4 LE SFIDE CHE CI ASPETTANO PER MANTENERE IL RUOLO DEL SATELLITE NELL' ERA DEL 5G E OLTRE

4.1 La necessità di una visione di sistema e analisi dei costi benefici delle tecnologie

Come ho cercato di mostrare nel ripercorrere il cammino delle telecomunicazioni satellitari, il satellite da semplice ripetitore di segnali radio si sta trasformando in un complesso sistema multi-satellite capace di elaborare il segnale a bordo, di usare al meglio le varie tecnologie analogiche, digitali e ottiche in maniera sinergica al segmento di terra. Questo comporta un approccio sistemistico nella sua concezione e sviluppo con attenzione non solo agli aspetti tecnici e tecnologici ma anche a quelli operativi, economici e di mercato. Come detto in precedenza, a mio avviso per avere successo nel futuro mondo delle comunicazioni satellitari (e non solo) occorre mettere insieme specialisti di vari settori includendo persone che vengono da altre aree (e.g. terrestre) che possono apportare prospettive non convenzionali rispetto alle soluzioni attualmente utilizzate nel campo satellitare. Le nuove tecnologie ovviamente, se propriamente inquadrare, giocano un ruolo importante per soddisfare gli ambiziosi obiettivi che di pongono di fronte. Occorre però fare attenzione ad essere dominati dal *technology push*. Per questo ritengo sia importante definire degli obiettivi chiari a livello di sistema, e successivamente mettere in competizione le varie opzioni architetturali e tecnologiche mediante una rigorosa analisi dei costi/benefici.

4.2 Il problema dei volumi ridotti per mantenere costi accettabili

Il mondo satellitare, malgrado le evoluzioni viste che cercano di rendere il costo del segmento spaziale più contenuto, rimane comunque un settore relativamente di nicchia, con volumi non comparabili al settore terrestre. Per questo, pur beneficiando dello spin-in di tecnologie terrestri, ha difficoltà allo stare al passo con le medesime. Questo perché nello spazio le tecnologie si trovano ad operare in condizioni "difficili" soprattutto in termini di radiazioni, temperature operative e vuoto. Inoltre, a differenza dei sistemi terrestri, i satelliti non possono essere riparati, per cui sono richieste delle garanzie molto più spinte in termini

di affidabilità e verifica di funzionamento in condizioni ambientali molto diverse da quelle in cui operano gli apparati terrestri. Questo rende l'innovazione delle tecnologie spaziali relativamente lenta a meno che importanti fondi istituzionali siano messi a disposizione. Ed è questo il ruolo che spero l'Unione Europea possa svolgere per complementare le attività dell'ESA in maniera coordinata e sinergica in particolare per i componenti elettronici come quelli basati sulle *Ultra Deep Submicron technologies*, *Gallium Nitride devices* e *Additive Manufacturing*. L'uso di componenti non spaziali opportunamente selezionati è sicuramente una via che può aiutare a mitigare ma non risolvere il problema. Infatti, questa soluzione utilizzata da anni anche per missioni istituzionali, richiede comunque investimenti e volumi sostenuti di acquisto in tempi brevi. Questo approccio si sposa bene con le costellazioni o per satelliti progettati per una vita breve come i *cubesats* o i *minisats*.

4.3 Software defined satellites – da sogno a realtà

Un approccio che si sta diffondendo nel mondo industriale per applicazioni telecom ma anche per GNSS è quello del *Software Defined Satellite* ossia la possibilità di riprogrammazione del satellite in orbita dopo il lancio. Questo approccio preconizzato in ESA nel 2008 (vedi Figura 28) è oggi possibile grazie alle tecnologie digitali e architetture avanzate di *payload*. Questa impostazione permette di ridurre il tempo di sviluppo e i costi garantendo la possibilità di adattare il segmento spaziale alle evoluzioni del mercato. Ma per rendere le tecnologie di ultima generazione terrestre disponibili al settore spaziale in tempi ragionevoli occorrono investimenti consistenti ed utilizzabili in tempi relativamente brevi. Uno dei primi satelliti riconfigurabili in orbita sviluppato in Europa da Airbus co-finanziato da Eutelsat ed ESA e lanciato a Luglio 2021 è rappresentato da Quantum. Quantum combina tecnologia di antenne attive e *payload* flessibili analogici. Ma progetti di satelliti riconfigurabili ancora più ambiziosi e più vicini al *dream satellite* da noi ipotizzato nel 2008 (vedi Figura 28) sono rappresentati dai progetti di OneSat di Airbus (vedi Figura 29) e Space Inspire di Thales (vedi Figura 30). Questa nuova generazione di satelliti co-finanziati da ESA, sono capaci con un

progetto standard di riconfigurare *on-the-fly* la copertura, la potenza e il piano di frequenze per adattarsi all'evoluzione delle esigenze del mercato. Questo permette di ridurre del 50% il *time-to-market* e il *total cost of ownership*.

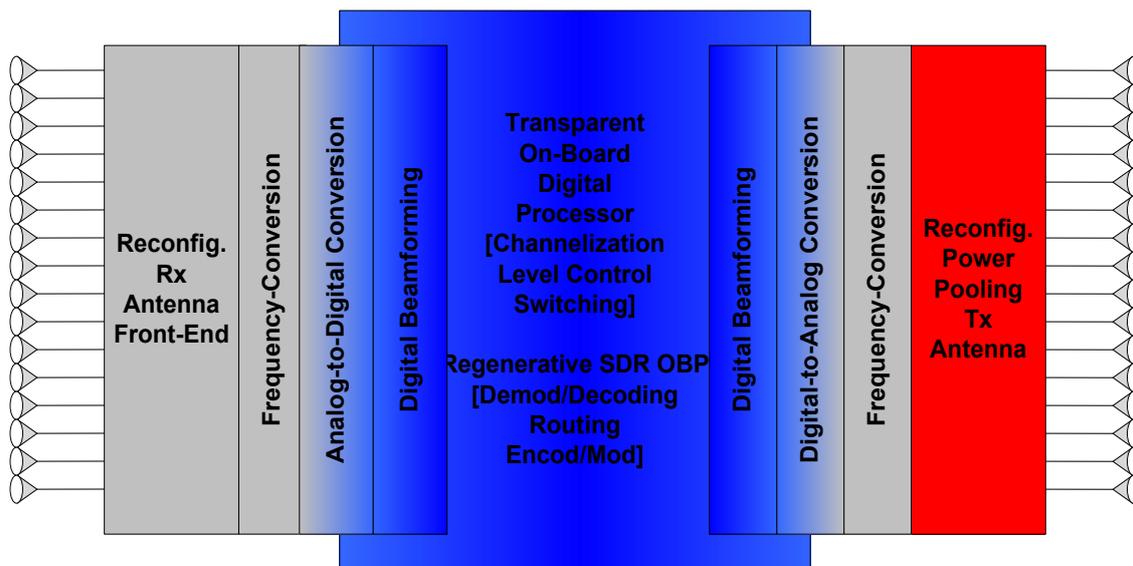


Figura 28: Concetto di satellite software defined payload [20].



Figura 29: Il satellite OneSat di Airbus



Figura 30: Il satellite Space Inspire di Thales.

4.4 Le megacostellazioni, nuovi modi di produrre i satelliti

Come menzionato precedentemente, a mio avviso la sfida delle megacostellazioni che stanno scuotendo gli operatori satellitari incumbenti rimane attualmente aperta. L'esperienza della prima generazione di costellazioni per comunicazioni mobili personali ha mostrato la difficoltà di realizzare un solido *business case* a causa delle difficoltà pratiche nell'operare un sistema globale con legislazioni molto eterogenee, di creare una rete commerciale capillare a livello mondiale oltre al costo non trascurabile del segmento spaziale e terrestre. Personalmente pur rimanendo affascinato dagli aspetti tecnici delle (mega)costellazioni, rimango scettico sulla possibilità che possano autosostenersi economicamente. Ciononostante alcune megacostellazioni potrebbero diventare, come nel caso di Iridium, una infrastruttura strategica per operatori istituzionali e privati (come Google, Amazon e Facebook) che hanno la necessità di garantire un accesso globale a Internet e possono permettersi di coprirne i costi di sviluppo ed operazione [16].

4.5 Il segmento utente – chiave di accesso al mercato di massa

In chiusura, vorrei sottolineare l'importanza del segmento terrestre dei sistemi di telecomunicazione via satellite. In primo luogo risulta essenziale rendere il costo e l'utilizzo dei terminali satellitari *user-friendly*. Abbiamo visto che per comunicazioni personali mobili questo è stato uno degli ostacoli nell'adozione su vasta scala di soluzioni satellitari. Il problema sembra ripetersi per l'accesso a banda larga per singoli utenti in paesi in via di sviluppo. E se probabilmente per utenti fissi soluzioni accettabili in termini di prestazioni, facilità di installazione e costo possono essere trovate grazie ai potenziali larghi volumi di produzione, l'accesso in mobilità via satellite rimane attualmente limitato a grandi piattaforme come navi, aerei e treni. In questo campo le tecnologie per antenne attive che sono in corso di sviluppo per le reti 5G terrestri [21] possono dare una mano notevole anche ai terminali satellitari con un sensibile abbassamento del loro costo. Alcune di queste

tecnologie, con opportuni adattamenti tecnologici, potrebbero trovare applicazione nel segmento spaziale facilitando l'avvento del *SDR payload*.

Per dare una idea dello stato dell'arte dei terminali satellitari attualmente previsti per OneWeb in Figura 31 sono rappresentate la versione rurale e aeronautica dell'antenna del terminale utente. L' antenna rurale è inserita nei pannelli fotovoltaici e si basa su un puntamento meccanico dell'antenna verso il satellite. La versione aeronautica invece è composta da due antenne attive piatte rispettivamente per la ricezione e la trasmissione. Invece Figura 32 fa vedere il terminale fisso della costellazione Starlink. In questo caso l'antenna attiva e il *modem* sono integrati nel disco esterno. L'interno come si vede è molto complesso e contiene un numero elevato di circuiti integrati. Per stessa ammissione del CEO di SpaceX, Elon Musk, la realizzazione del terminale è stata una impresa molto ardua e i costi di produzione, malgrado siano stati ordinati un milione di terminali, risulta essere intorno ai 2700 \$, ossia più di cinque volte il prezzo di vendita. Per questo Starlink, facendo tesoro dell'esperienza acquisita sino adesso, sta sviluppando una seconda generazione di terminali con costi più ridotti.

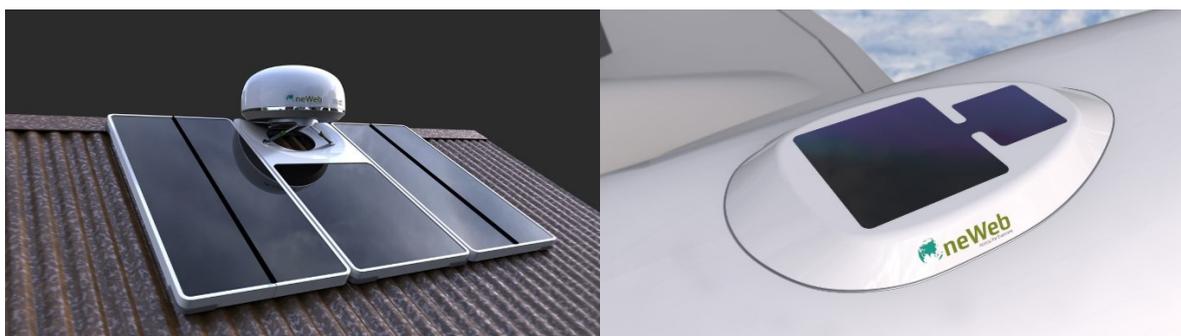


Figura 31: Esempi di terminali per utenti rurali (sinistra) aeronautici per la costellazione OneWeb

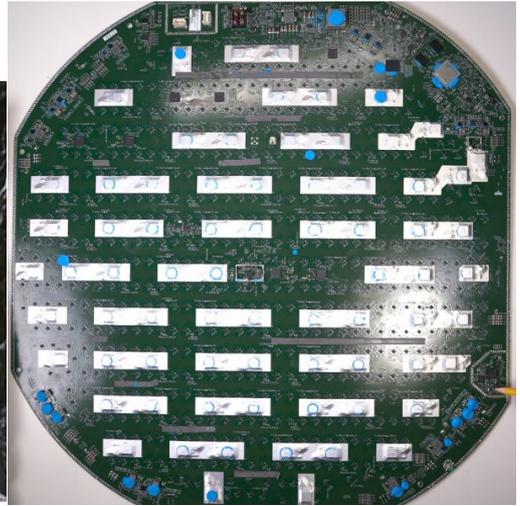


Figura 32: Il terminale della costellazione Starlink e il suo interno.

5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] A. C. Clarke, "Extra-Terrestrial Relays - Can Rocket Stations Give Worldwide Radio Coverage?," *Wireless World*, pp. 305-308, 1945.
- [2] M. D. Maria, L. Orlando and O. Pigliacelli, "Italy in Space 1946-1988," European Space Agency Publications Division, Noordwijk, The Netherlands, 2003.
- [3] J. Rivera, A. Martellucci, P. Sivas, E. Benzi, A. Pandolfi, D. de Bernardo, S. Falzini and G. Codispoti, "Alphasat Aldo Paraboni, an advanced Q/V band mission space segment," *Wiley International Journal on Satellite Communications and Networking*, pp. 397-409, 2018.
- [4] K. Maine, C. Devieux and P. Swan, "Overview of IRIDIUM satellite network," in *WESCON/'95 Microelectronics Communications Technology Producing Quality Products Mobile and Portable Power Emerging Technologies*, 1995.
- [5] F. J. Dietrich, P. Metzen and P. Monte, "The Globalstar cellular satellite system," *IEEE Transactions on antenna and propagation*, pp. 935-942, 1998.
- [6] S. C. Taylor and W. D. Shurvinton, "The Archimedes satellite system," in *14th International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit*, Washington, DC, U.S.A., 1992.
- [7] R. D. Briskman, "Radio frequency broadcasting systems and methods using two low-cost geosynchronous satellites". United States Patent US5278863A, 1992.
- [8] R. Akturan, "An overview of the Sirius satellite radio system," *Wiley International Journal of Satellite Communications and Networking*, pp. 349-358, 2008.

- [9] S. DiPierro, R. Akturan and R. Michalski, "Sirius XM Satellite Radio system overview and services," in *2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop*, Cagliari, Italy, 2010.
- [10] A. Bolea Alamanac, P. Burzigotti, M. Cohen, R. De Gaudenzi, G. Liva, S. Lipp, O. Pulvirenti, L. Roullet and H. Stadali, "Performance Validation of the DVB-SH," *IEEE Transactions on Broadcasting*, pp. 802-825, 2011.
- [11] S. Scalise, C. Parraga Niebla, R. De Gaudenzi, O. Del Rio Herrero, D. Finocchiaro and A. Arcidiacono, "S-MIM: a Novel Radio Interface for Efficient Messaging Services over Satellite," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 3, pp. 119-125, 2013.
- [12] "Percentage of Individuals using Internet 2000-2012," *International Telecommunications Union*, June 2013.
- [13] P. Angeletti, R. De Gaudenzi, E. Re and D. Petrolati, "Future technologies for very high throughput satellite systems," *Wiley International Journal on Satellite Communications and Networks*, no. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sat.1327>, 2019.
- [14] "State of the Satellite Industry Report," *Satellite Industry Association, Bryce space and technology*, , no. 20th edition, June 2017.
- [15] European Global Navigation Systems Agency, "GNSS Supervisory Authority Market Report 2019," no. 6, 2019.
- [16] C. Daehnick, I. Klinghoffer, B. Maritz and B. Wiseman, "Large LEO satellite constellations: Will it be different this time?," *Mc Kinsey & Company - Aerospace & Defense*, 4 May 2020.
- [17] Digital Video Broadcasting (DVB), "Digital Video Broadcasting (DVB) Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite

applications (DVB-S2)," European Telecommunication Standards Institute, Sophia Antipolis, France, ETSI EN 302 307, V1.2.1, April 2009.

- [18] Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), Recommendation for Space Data System Standards (Blue Book) Flexible Advanced Coding and Modulation Scheme for High Rate Telemetry, Washington, D.C., USA, 2012.
- [19] Digital Video Broadcasting (DVB), "Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications Part II: S2 - Extensions (DVB-S2X)," European Telecommunication Standards Institute, Sophia Antipolis, France, 2014.
- [20] P. Angeletti and R. De Gaudenzi, "From "Bent Pipes" to "Software Defined Payloads": Evolution and Trends of Satellite Communications Systems," in *26th AIAA International Communications Satellite Systems Conference*, San Diego, CA, USA, 2008.
- [21] P. Hinde, "Comprehensive Survey of Commercial mmWave Phased Array Companies," *Microwave Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 1-6, 2020.
- [22] R. De Gaudenzi, C. Elia and R. Viola, "Band-Limited Quasi-Synchronous CDMA BLQS-CDMA," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 10, no. 2, pp. 328-343, 1992.