La Comunicazione - Note, Recensioni e Notizie n. 70
Anno 2025

Stato dell'arte sull'attività di regolamentazione del servizio di connettività diretta da satellite a terminali utente IMT (DC-MSS-IMT)

State of the art on the regulatory activity of the direct satellite connectivity service to IMT user terminals (DC-MSS-IMT)

Massimo Celidonio♦

♦ Fondazione Ugo Bordoni

Sommario

Il presente lavoro intende fornire lo stato dell'arte riguardante le attività di carattere tecnico e normativo in svolgimento a livello internazionale su una tematica di grande attualità: il servizio mobile via satellite per la connettività diretta con i terminali utente IMT denominato DC-MSS-IMT. Lo studio è specificamente motivato e guidato dalla Risoluzione 253 approvata nel corso della Conferenza Mondiale delle Radiocomunicazioni del 2023 (WRC-23), la quale ha dato origine all'Agenda Item 1.13 (AI 1.13) per la prossima Conferenza Mondiale (WRC-27). In particolare, l'AI 1.13 è dedicato all'esame di possibili nuove allocazioni spettrali per i sistemi mobili via satellite e all'elaborazione di regolamenti tecnici e operativi, compresi i criteri di coordinamento, per proteggere i servizi esistenti. In questo contributo, oltre a fornire una breve descrizione delle funzionalità previste, vengono individuati i gruppi di lavoro in ambito ITU e CEPT che stanno studiando le problematiche connesse con l'introduzione di questo nuovo servizio e, in particolare, focalizza l'attenzione sui problemi interferenziali che si potrebbero determinare nelle zone di confine di due Stati, di cui uno ne autorizza il servizio e l'altro lo esclude. A tal riguardo vengono mostrati i parametri di riferimento per la valutazione del grado di interferenza i cui valori dovranno essere stabiliti a seguito degli studi che sono in corso.

Vengono anche descritte alcune tecniche di mitigazione delle interferenze che sono attualmente oggetto di studio per ridurre gli effetti dannosi prodotti dai segnali indesiderati.

Abstract

This paper aims to provide a state-of-the-art overview of the technical and regulatory activities underway at the international level on a highly topical issue: the mobile satellite service for direct connectivity with IMT user terminals, known as DC-MSS-IMT. The study is specifically motivated and guided by Resolution 253 adopted at the 2023 World Radiocommunication Conference (WRC-23), which gave rise to Agenda Item 1.13 (AI 1.13) for the next World Conference (WRC-27). Specifically, AI 1.13 is dedicated to examining possible new spectrum allocations for mobile satellite systems and developing technical and operational regulations, including coordination criteria, to protect existing services. This paper, in addition to providing a brief description of the features envisioned for this service, identifies the ITU and CEPT working groups that are studying the issues associated with the introduction of this new service. It focuses on the interference problems that could arise in the border areas of two countries, one of which authorizes the service and the other excludes it. In this regard, it presents the reference parameters for assessing the level of interference, the values of which will be established following ongoing studies.

It also describes some interference mitigation techniques currently under study to reduce the harmful effects of unwanted signals.

Keyword

Servizio mobile IMT via satellite, Aspetti di regolamentazione, Problemi interferenziali, tecniche di mitigazione

1 - Introduzione

Il rapido avanzamento delle tecnologie spaziali e delle telecomunicazioni ha inaugurato una nuova era per la connettività globale, in particolare con l'emergere di costellazioni di **satelliti in orbita terrestre bassa (LEO - Low Earth Orbit)**. Questi sistemi LEO, progettati per offrire servizi di *Direct-to-Cell (D2C),* mirano a integrare la copertura radiomobile terrestre utilizzando le bande di frequenza tradizionalmente assegnate all' *International Mobile Telecommunications (IMT),* consentendo ai comuni *smartphone* di comunicare direttamente con i satelliti. Sebbene questa innovazione prometta di estendere la connettività nelle aree remote e di colmare il divario digitale, essa introduce significative sfide nella gestione dello spettro radio a livello internazionale, in particolare riguardo al rischio di **interferenza transfrontaliera**.

Il presente studio si focalizza sull'analisi critica del potenziale impatto interferenziale generato da questi sistemi satellitari LEO-D2C sui **sistemi radiomobili terrestri** operanti nelle medesime bande di frequenza IMT, ma situati in **Paesi confinanti** a quelli che hanno autorizzato l'uso dei servizi satellitari. L'interferenza non si limita ai confini dello Stato che autorizza, ma si propaga a causa della vasta area di copertura del fascio satellitare (*footprint*), ponendo a rischio la qualità e l'affidabilità dei servizi mobili terrestri limitrofi. Infatti, il modello tradizionale di accordi bilaterali per la coordinazione transfrontaliera è reso insufficiente dalla natura intrinseca delle costellazioni satellitari LEO. La "cella" di un satellite LEO può avere un diametro superiore a 100 km, un singolo satellite può attraversare diversi confini internazionali in pochi minuti e un'intera costellazione opera come un'unica, grande rete. Ciò significa che una singola fonte di interferenza può colpire più giurisdizioni contemporaneamente, rendendo indispensabile una soluzione multilaterale e globalmente armonizzata, a differenza dei frammentati accordi bilaterali del passato. Si tratta di un cambiamento fondamentale nell'approccio alla gestione dello spettro a livello transfrontaliero.

Lo scopo principale della ricerca è **determinare il criterio di protezione più appropriato** per i terminali radiomobili terrestri. L'analisi si concentra sulla valutazione di due parametri tecnici fondamentali per la protezione:

1. **Rapporto Interferenza/Rumore (I/N):** Un parametro chiave utilizzato per quantificare il livello massimo di interferenza tollerabile dal terminale terrestre rispetto al rumore di sistema, garantendo che le prestazioni del servizio rimangano accettabili.

2. ***Power Flux Density (PFD)* al suolo:** Un limite imposto sulla potenza del segnale satellitare che raggiunge la superficie terrestre, inteso a limitare l'interferenza nelle regioni al di fuori dell'area di servizio autorizzata.

La scelta del criterio di protezione ottimale è essenziale per bilanciare l'innovazione offerta dai servizi satellitari D2C con la necessità di salvaguardare gli investimenti e la continuità operativa delle reti mobili terrestri esistenti in Paesi confinanti.

Questo lavoro si inserisce in un contesto normativo internazionale di grande attualità, rappresentando un contributo diretto alle attività in corso in seno all'**Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU)**. Lo studio è specificamente motivato e guidato dalla **Risoluzione 253 (WRC-23)** [1], la quale ha dato origine all'***Agenda Item 1.13* (AI 1.13)** per la prossima **Conferenza Mondiale delle Radiocomunicazioni (WRC-27)**. L'AI 1.13 è dedicato all'esame della necessità di nuove allocazioni spettrali per i sistemi mobili via satellite e all'elaborazione di regolamenti tecnici e operativi, compresi i criteri di coordinamento, per proteggere i servizi esistenti.

Pertanto, i risultati di questi studi mirano a fornire ai gruppi di studio dell'ITU (in particolare l'**ITU-R,** Settore delle Radiocomunicazioni dell'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni) e alle amministrazioni nazionali una solida base tecnica e analitica per lo sviluppo di **regolamentazioni internazionali** e **accordi di coordinamento transfrontaliero** efficaci e lungimiranti, assicurando una coesistenza armoniosa tra i sistemi satellitari e terrestri nelle bande di frequenza assegnate ai servizi IMT.

2 - Attività in corso da parte degli Enti Internazionali e Regionali

2.1 – L'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU-R)

A livello mondiale, l'ITU-R e in particolare i suoi gruppi di studio e le *Working Parties* pertinenti, costituisce il foro principale per la conduzione di studi di compatibilità e per l'elaborazione dei Rapporti ITU-R che saranno la base tecnica per le decisioni della WRC-27. Gli studi sono specificamente motivati e guidati dalla Risoluzione 253 approvato nel corso della Conferenza Mondiale delle Radiocomunicazioni del 2023 (WRC-23), la quale ha dato origine *all'Agenda Item 1.13* (AI 1.13) da discutere nella prossima Conferenza della WRC che si svolgerà nel 2027. La gestione degli studi sull'AI 1.13 all'interno dell'ITU-R è caratterizzata da una divisione del lavoro coordinata tra i suoi gruppi di lavoro. Il Gruppo di Lavoro 4C (WP 4C), responsabile dei servizi satellitari, ha la responsabilità complessiva per questo punto dell'agenda [2]. Il Gruppo di Lavoro 5D (WP 5D), che si occupa dei sistemi IMT, fornisce invece le caratteristiche tecniche e operative essenziali del componente terrestre [3]. Per coordinare le attività, una riunione congiunta tra i due gruppi si è svolta a ottobre 2024, con l'obiettivo di definire ruoli, responsabilità e una tempistica collaborativa.

Questa collaborazione non è una semplice convenienza amministrativa, ma una necessità tecnica. Per modellare e prevedere con precisione l'interferenza, gli studi devono disporre di dati precisi sia per il sistema interferente (la costellazione satellitare LEO) sia per il sistema interferito (la rete IMT terrestre). L'esperienza del WP 5D sulle implementazioni IMT terrestri, comprese le caratteristiche per gli studi di condivisione e compatibilità, è un prerequisito fondamentale affinché il WP 4C possa condurre simulazioni significative e sviluppare criteri di protezione efficaci. L'esito positivo dell'AI 1.13 dipende dall'efficace e tempestivo scambio di questi dati tecnici tra i due gruppi di lavoro. Il WP 4C ha già finalizzato un elenco di potenziali bande di frequenza da studiare sulla base dei contributi del WP 5D ed è in collegamento con altri gruppi di lavoro in ambito ITU, evidenziando il processo strutturato di condivisione delle informazioni all'interno dell'ITU.

2.2 – La Prospettiva Europea: I Contributi Tecnici e Politici della CEPT

Il lavoro della Conferenza Europea delle Amministrazioni delle Poste e Telecomunicazioni (CEPT) è suddiviso tra due gruppi chiave. Il *Project Team 1* (ECC PT1) della Commissione Europea delle Comunicazioni (ECC) [4] è incaricato degli studi tecnici sull'*Agenda Item* 1.13 della WRC-27, concentrandosi sulla protezione del componente terrestre delle reti IMT. Il *Project Team C* (CPG PTC) [5], orientato alla politica e facente parte del Comitato di Preparazione della Conferenza (CPG), ha la responsabilità generale del "*CEPT Brief*" (documento di posizione) e della "*European Common Proposal*" (ECP) per l'AI 1.13, ed è tenuto informato dei risultati tecnici dell'ECC PT1.

La posizione preliminare della CEPT sottolinea che le operazioni IMT terrestri "devono essere protette sia all'interno dei Paesi che in situazioni transfrontaliere, incluse le acque territoriali". La protezione dei servizi per le imbarcazioni nelle Zone Economiche Esclusive (ZEE) e in acque internazionali è una preoccupazione specifica.

Il forte accento posto dalla CEPT sulla protezione dei servizi transfrontalieri e costieri rivela una preoccupazione strategica specifica per la regione. L'Europa è un continente ad alta densità di paesi confinanti e con un'attività marittima significativa. Le reti mobili terrestri forniscono già servizi voce e dati cruciali alle imbarcazioni fino a 70-120 km dalla costa, fungendo anche da servizio di sicurezza. Il potenziale di un servizio satellitare LEO, autorizzato in un Paese, di degradare questo servizio esistente, non basato su satellite, per le navi costiere di un paese limitrofo, presenta una diretta sfida economica e di sicurezza pubblica che la CEPT sta affrontando in modo proattivo. Ciò dimostra come le discussioni normative globali siano plasmate da priorità regionali e nazionali.

Di seguito, una panoramica delle responsabilità all'interno dell'ITU-R e della CEPT.

Tabella 1 - Gruppi di lavoro in ambito ITU e CEPT sulla tematica riguardante il servizio DC-IMT-MSS

Organizzazione	Gruppo di Lavoro	Responsabilità/Mandato
ITU-R	WP 4C	Ha il ruolo guida per gli studi sull'AI 1.13. Ha il compito di sviluppare un documento di lavoro sulle caratteristiche tecniche e operative del MSS per la comunicazione diretta con i terminali utente IMT e di finalizzare la lista delle bande di frequenza da studiare in base ai contributi del WP 5D.
ITU-R	WP 5D	Fornisce le caratteristiche tecniche e operative del componente terrestre delle reti IMT essenziali per gli studi di condivisione e compatibilità. È stato incaricato di fornire il suo parere sugli "aspetti tecnici relativi all'uso e al funzionamento del TDD per la connettività diretta" [6, 13].
CEPT	CPG PTC	Ha la responsabilità generale per il documento di posizione (CEPT Brief) e la Proposta Comune Europea (ECP) per l'AI 1.13. È tenuto informato sui risultati degli studi tecnici condotti dall'ECC PT1.
CEPT	ECC PT1	È incaricato di affrontare gli studi tecnici sull'AI 1.13, con particolare attenzione alla protezione del componente terrestre delle reti IMT. I suoi risultati sono richiesti per la preparazione dei documenti CPG PTC.

2.3 – Attività di Altri Organismi di Standardizzazione

2.3.1 – 3GPP e l'Integrazione delle Reti Non Terrestri (NTN)

Il quadro di riferimento si estende oltre l'ITU e la CEPT. Il *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) svolge un ruolo cruciale nella standardizzazione della tecnologia stessa [6]. Il 3GPP ha formalizzato l'inclusione delle Reti Non Terrestri (*Non-Terrestrial Network,* NTN) come parte dell'ecosistema 5G nella Release 17, definendo architetture e modelli di propagazione [7]. L'obiettivo è creare un sistema di comunicazione unificato e senza interruzioni, dove i satelliti possono fornire connettività in aree remote o fungere da ridondanza in caso di disastri.

Il lavoro del 3GPP non è ridondante rispetto a quello dell'ITU, ma piuttosto complementare. Il 3GPP definisce come la tecnologia funziona (ad esempio, l'interfaccia radio, l'architettura di rete), mentre l'ITU fornisce il quadro normativo di alto livello, compresi quali bande di

frequenza possono essere utilizzate e i criteri di protezione per i servizi esistenti. I progressi del 3GPP, in particolare nella Release 17, forniscono le basi tecniche su cui si fonderanno le decisioni normative dell'ITU per l'AI 1.13. Il 3GPP si concentra su aspetti tecnici come la gestione dei ritardi di trasmissione e degli effetti *Doppler*, e lo sviluppo di tecniche avanzate di gestione dell'interferenza e della mobilità.

2.3.2 – Contesto Nordamericano: ATIS e il Quadro della FCC per la Copertura Supplementare dallo Spazio (SCS)

Un'altra prospettiva rilevante è fornita dal lavoro della *Alliance for Telecommunications Industry Solutions* (ATIS) e del suo gruppo di lavoro NTN in Nord America [8]. ATIS sta sviluppando una specifica per le "zone di esclusione" (EZ) a supporto del quadro normativo per la "Copertura Supplementare dallo Spazio" (SCS) della *Federal Communications Commission* (FCC) [9]. Questo quadro è un esempio concreto di un approccio normativo regionale volto a mitigare l'interferenza attraverso requisiti tecnici e di collaborazione.
Il lavoro di ATIS sulle zone di esclusione offre un prezioso caso di studio per gli studi internazionali. Il quadro EZ è uno strumento normativo tangibile che mira a gestire l'interferenza creando una separazione spaziale o temporale tra i servizi satellitari e quelli terrestri [10]. I risultati di questa iniziativa regionale potrebbero informare le discussioni globali più ampie in seno all'ITU e alla CEPT, fornendo dati e modelli pratici del mondo reale per la coesistenza. Ciò evidenzia una dinamica in cui la sperimentazione normativa a livello regionale può informare direttamente la politica globale.

2.3.3 – Sintesi del Progresso e Coordinamento Inter-organizzativo

L'analisi dei documenti di riferimento rivela un processo complesso e multilaterale, guidato dall'ITU-R, supportato da organismi regionali come la CEPT e con un contributo tecnologico cruciale da parte di enti di standardizzazione come il 3GPP e ATIS. Il principio guida è la protezione dei servizi esistenti, in particolare le reti IMT terrestri che già servono miliardi di persone. Gli studi attuali si concentrano sulla definizione di criteri di protezione robusti, come

il rapporto *I*/*N* e il parametro *PFD*, che saranno descritti nei paragrafi successivi e che possano affrontare le sfide uniche poste dalle costellazioni LEO, inclusa l'interferenza transfrontaliera e le emissioni indesiderate. La collaborazione tra WP 4C e WP 5D nell'ITU-R è tecnicamente indispensabile, così come la divisione dei compiti tra gli organi tecnici e politici all'interno della CEPT.

3 – Il Servizio DC-IMT-MSS: Definizione e Bande di Frequenza in Esame

3.1 – Il servizio DC-MSS-IMT

Il servizio Mobile via Satellite per la connettività diretta con i terminali utente IMT (DC-MSS-IMT) è un'iniziativa volta a integrare le reti satellitari con l'ecosistema IMT terrestre esistente [11]. Il suo obiettivo principale è estendere la copertura in aree remote, rurali e con scarsa connettività, fornendo una soluzione di comunicazione essenziale per le comunità non servite. Inoltre, questo servizio può offrire una maggiore resilienza della rete in caso di guasti o disastri naturali. Il *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) ha formalizzato l'inclusione delle NTN come parte dell'ecosistema 5G, con l'obiettivo di supportare la connettività diretta con gli smartphone tradizionali. L'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU) sta attualmente conducendo studi per definire le possibili nuove allocazioni di frequenza per questo servizio [2, 3]. Le bande di frequenza considerate si trovano nell'intervallo compreso tra 694 MHz e 2.7 GHz, in linea con gli accordi stabiliti per il servizio IMT.

3.2 – Frequenze allo studio per il servizio DC-MSS-IMT

Le frequenze elencate di seguito sono attualmente quelle candidate e oggetto di studio da parte dei gruppi di lavoro dell'ITU (come WP 4C e WP 5D) e della CEPT per la possibile assegnazione al servizio Mobile via Satellite per la connettività diretta [2, 3].

Tabella 2 – Frequenze candidate e oggetto di studio per il servizio DC-MSS-IMT

Banda di Frequenza (uplink)	Banda di Frequenza (downlink)
814/824-849	859/869-894
880-915	925-960
832-862	791-821
698-716 776-798	716-746 746-768
698-748	753-803
1 427-1 470	1 475-1 518
1 920-1 980	2 110-2 170
1 710-1 785	1 805-1 880
1 850-1 920	1 930-2 000
1 710-1 780	2 110-2 180
2 000-2 020	2 180-2 200
2 010-2 025	1 880-1 920
2 305-2 320	2 345-2 360
2 500-2 570	2 620-2 690

3.2 – Modalità operative per offrire il servizio DC-MSS-IMT

Se si considera un generico Stato, il servizio fornito da un sistema DC-MSS-IMT può essere realizzato attraverso due possibili modalità: attraverso una copertura complementare a quella già esistente messa a disposizione dal MNO, a seguito di un accordo commerciale con lo stesso MNO che opera in quello Stato; oppure in modo esclusivo, dopo aver acquisito la licenza di una banda di frequenza utilizzata per il servizio IMT di quello Stato (vedi Figura 1).

In questa tipologia di servizio il satellite opera come una stazione radio base che attraverso un'antenna, tipicamente di tipo *phased array*, comunica con i terminali degli utenti a Terra. Ogni satellite della costellazione è normalmente dotato di tecnologie avanzate per facilitare la trasmissione dei dati. Oltre alle antenne *phased array*, sono presenti anche antenne paraboliche, che consentono comunicazioni ad alto guadagno con le stazioni a Terra, e

collegamenti ottici inter-satellitari utilizzati per la trasmissione dati tra i satelliti della costellazione.

Per i satelliti della costellazione, le stazioni a Terra operano come punti accesso alla rete mobile terrestre e in ultima analisi consentono di mettere in comunicazione gli utenti dei terminali mobili, collegati via satellite, con i loro interlocutori.

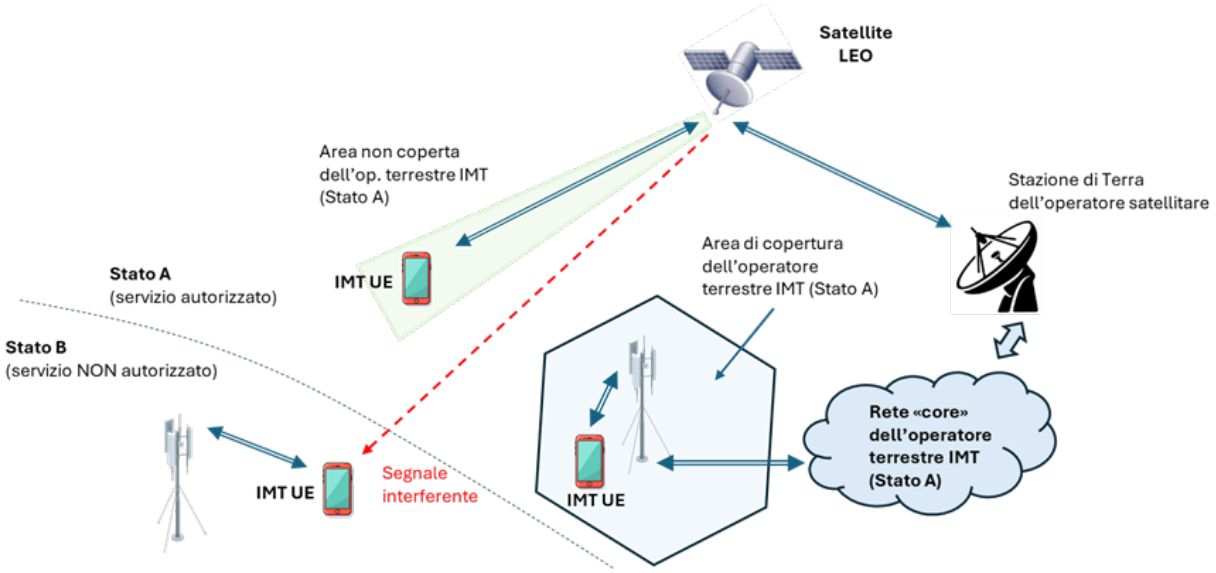


***Figura 1** – Scenario interferenziale con il servizio DC-MSS-IMT*

4 – Dati caratteristici delle costellazioni di satelliti

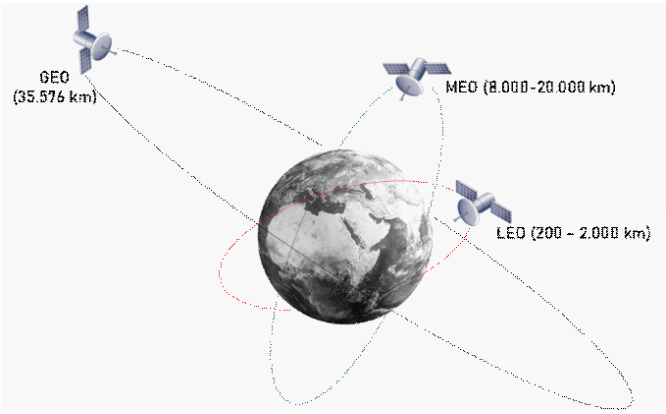
4.1 – Generalità sulle orbite dei satelliti

I satelliti, in base alle loro caratteristiche orbitali, sono generalmente classificati in tre grandi tipologie (vedi anche figura 2):

- **Orbita terrestre bassa** (**LEO**). I satelliti che operano su questa tipologia di orbita viaggiano ad un'altitudine relativamente vicina alla superficie terrestre, di solito, compresa tra i 200 e i 2000 km. Al di sopra di questo limite vi sono le fasce di Van Allen[1] che creano un ambiente ostile per i satelliti. L'altitudine inferiore a cui un satellite può orbitare è limitata dall'impatto con l'atmosfera terrestre. I piani orbitali dei satelliti LEO sono caratterizzati dall'angolo che formano rispetto il piano equatoriale. Vista la loro vicinanza alla superficie terrestre sono particolarmente indicati per acquisire immagini della superficie terrestre dallo spazio. Ultimamente, grazie anche alle basse latenze che garantiscono i collegamenti da queste orbite, si sta sviluppando un mercato che intende utilizzare questi satelliti nel settore delle comunicazioni rivolto ai consumatori di massa per fornire il servizio di Internet a banda larga e, nel prossimo futuro, anche quello dedicato ai terminali radiomobili IMT.
- **Orbita terrestre media** (**MEO**). In questo caso i satelliti operano su orbite che si trovano tra gli 8.000 e i 20.000 chilometri sopra la superficie terrestre. I satelliti MEO sono stati storicamente utilizzati per applicazioni GPS e per la radionavigazione. Più recentemente, costellazioni di questi satelliti, sono state implementate per fornire connettività dati a ridotta latenza (rispetto ai satelliti geostazionari) e ad alta larghezza di banda a fornitori di servizi, agenzie governative e aziende commerciali. I satelliti MEO possono offrire connessioni a larga banda in aree dove la posa della fibra non è praticabile come le navi da crociera e quelle commerciali, gli aeromobili e nelle aree critiche come quelle dove sono in svolgimento operazioni di soccorso umanitario.

[1] Le fasce di Van Allen sono regioni che circondano la Terra e che contengono particelle cariche ad alta energia, intrappolate dal campo magnetico terrestre. Sono composte principalmente da protoni ed elettroni provenienti dal vento solare e da raggi cosmici. Queste fasce sono pericolose per gli equipaggi umani e le apparecchiature elettroniche a causa dell'energia contenuta nelle particelle.

- **Orbita terrestre geostazionaria** (o equatoriale geosincrona) (**GEO**). Questa orbita è nota anche come Orbita di Clarke, fissata a 35.786 chilometri sopra l'equatore. I satelliti che operano su questa orbita seguono la rotazione terrestre, rimanendo quindi sempre sopra lo stesso punto sulla Terra. I satelliti GEO sono tradizionalmente dedicati alla trasmissione di servizi come dati meteorologici, trasmissioni televisive e alcune comunicazioni dati a bassa velocità. Negli ultimi anni, la tecnologia è migliorata notevolmente grazie all'uso di satelliti ad alta capacità (HTS), progettati appositamente per la trasmissione di dati.



	Altitudine (km)	Latenza (ms)	copertura globale
LEO	200-2000	15 - 25	Migliaia di satelliti
MEO	8.000-20.000	50 - 150	6 satelliti (90%)
GEO	35.786	≈ 250 ms	3 satelliti (99%)

***Figura 2** – Tipologie di orbite per i satelliti e principali caratteristiche*

4.2 – Costellazioni di satelliti che offrono il servizio DC-IMT-MSS

In ambito ITU-R sono state individuate alcune costellazioni di satelliti in orbita bassa (LEO) di riferimento per condurre gli studi di compatibilità e coesistenza tra il servizio DC-IMT-MSS e quello IMT terrestre. In tabella 3 sono riportate le caratteristiche delle costellazioni che possono essere ritenute le più significative per questi studi, se si considera che maggiore è il numero di satelliti presenti all'interno della costellazione e più aumenta la possibilità che si possano presentare situazioni di interferenza indesiderate situate nelle aree limitrofe a quelle nelle quali è autorizzato il servizio.

Come risulta evidente dalla tabella, l'uso di ciascuna costellazione è rivolto ad uno specifico insieme di bande di frequenza. Di conseguenza, gli studi che prenderanno in considerazione la costellazione denominata *System 1* si limiteranno ad utilizzare solo una banda di frequenza

in modalità FDD, e precisamente la banda 2.5-2.57 GHz per il collegamento da Terra a satellite (*uplink*) e la banda 2.62-2.69 GHz per il collegamento da satellite a Terra (*downlink*).

Una costellazione particolarmente interessante è quella denominata *System 3-1* (Figura 3) che prevede 28 piani orbitali inclinati a 53° rispetto il piano equatoriale terrestre. Su ciascun piano orbitale vi sono 120 satelliti, separati uno dall'altro di 3° e ad un'altezza di 525 km. Tale costellazione è una di quelle che già viene sfruttata commercialmente anche se, per ora, con un numero di satelliti inferiore.

Tabella 3 – Caratteristiche di alcune costellazioni di satelliti da utilizzare per gli studi di coesistenza

System ID	System 1	System 2	System 3-1	System 3-2
Bande di frequenza (MHz)	2 500-2 570/ 2 620-2 690	694/698-960	698-960	698-960
		1 427-1 518	1 427-1 518	1 427-1 518
		1 710-1 785/ 1 805-1 880	1 710-2 025/ 2 110 2 200	1 710-2 025/ 2 110 2 200
		1 920-1 980/ 2 110-2 170	2 500-2 690	2 500-2 690
		2 010-2 025/ 1 880-1 920		
		2 300-2 400		
		2 500-2 690		
Altitudine (km)	680	500	525	340
Inclinazione (gradi)	97	55	53	53
Numero piani orbitali	12	60	28	48
Numero satelliti per piano orbitale	60	60	120	110
Numero totale di satelliti	720	3600	3360	5280

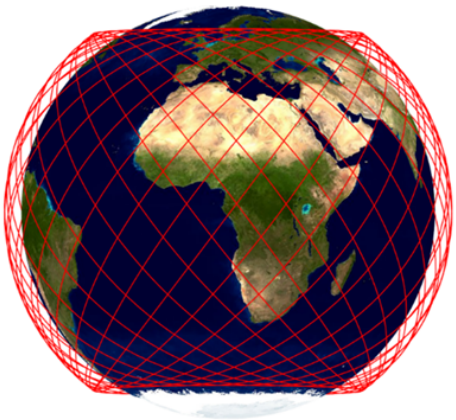


***Figura 3** – Piani orbitali relativi al System 3-1*

5 – Problematiche interferenziali con le reti IMT terrestri

Il servizio DC-MSS-IMT, essendo offerto via satellite, potrebbe dare luogo a problemi di interferenza nei confronti del servizio IMT offerto da operatori mobili che operano in Stati che non ne hanno autorizzato l'uso e che si trovano adiacenti o comunque nelle vicinanze degli Stati che, al contrario, ne hanno concesso l'autorizzazione.

Inoltre, come avviene anche per altri servizi, se il segnale trasmesso via satellite non viene opportunamente controllato, limitando il livello di segnale presente al di fuori della banda utile, potrebbero crearsi problemi per altri servizi di radiocomunicazione, che possono essere anche differenti da quelli IMT, che operano nelle bande adiacenti a quella in uso al sistema DC-MSS-IMT.

Su queste due problematiche si stanno concentrando gli studi in ambito internazionale [2,3,5] allo scopo di fissare i livelli di potenza in trasmissione che saranno consentiti per i segnali emessi dal satellite verso Terra, sia nella banda utile sia in quelle adiacenti, al fine di garantire prestazioni adeguate al servizio DC-MSS-IMT e che, allo stesso tempo, protezione ad altri servizi esistenti che operano già sul territorio e che hanno il diritto di essere opportunamente tutelati.

5.1 – Studi tecnici e operativi per la protezione delle reti terrestri

5.1.1 – I Principi Fondamentali della Coesistenza

Il principio cardine degli studi è la protezione dei servizi terrestri esistenti. Le ricerche indicano che la protezione deve essere garantita sia per gli scenari di condivisione del canale che per quelli in banda adiacente. Gli studi considerano l'interferenza derivante sia dalle emissioni dirette del satellite verso il terminale terrestre sia dalle sue "emissioni indesiderate" (*unwanted emissions*) [2, 3].

La necessità di considerare le emissioni indesiderate nella protezione delle reti MFCN (*Mobile/Fixed Communications Networks*) rappresenta un cambiamento significativo nella pratica normativa. Questo evidenzia una lacuna normativa che è stata esposta dall'introduzione di costellazioni LEO ad alta potenza e che ora viene affrontata attraverso gli

studi sull'AI 1.13. La necessità di giustificare un nuovo approccio per le emissioni indesiderate per le MFCN suggerisce che gli studi non si limiteranno ad applicare le regole esistenti, ma saranno costretti a svilupparne di completamente nuove.

5.1.2 – Analisi Dettagliata dei Criteri di Protezione

5.1.2.1 – Il Rapporto I/N

Il **rapporto *I/N*** fornisce una misura del livello del segnale interferente rispetto il rumore termico del sistema ricevente ed è una metrica chiave per valutare il degrado del bilancio di collegamento causato da uno o più segnali interferenti. Gli studi compilati dal rapporto della *National Telecommunications and Information Administration* (NTIA) [13] hanno rilevato che per le interferenze continue e a lungo termine, sono comunemente utilizzati valori di *I/N* compresi tra -6 e -10 dB. Tuttavia, per segnali intermittenti o a impulsi, i criteri possono variare. I satelliti LEO non sono una fonte di interferenza continua per un punto fisso, poiché il loro passaggio è temporaneo, rendendo questa intermittenza un fattore da considerare.
Le simulazioni Monte Carlo sono uno strumento essenziale per questi studi. Tale metodo modella un ricevitore "vittima" all'interno di una popolazione di "interferenti" per produrre risultati efficienti in termini di spettro.

5.1.2.1 – Densità di Flusso di Potenza (PFD)

La PFD misura la potenza per unità di area e per unità di banda che un'emissione satellitare consegna a un punto a Terra ed è normalmente utilizzata come strumento normativo per limitare le emissioni satellitari e proteggere i servizi terrestri. I limiti di PFD sono presi in considerazione come un meccanismo per gestire le emissioni del satellite LEO. L'obiettivo è garantire che la potenza ricevuta a terra dal satellite non superi una soglia che possa causare interferenza dannosa ai sistemi terrestri. Gli studi in corso dovranno determinare le **soglie di PFD appropriate per vari scenari**, comprese le operazioni co-canale e in banda adiacente, e tenere conto sia delle emissioni desiderate che di quelle indesiderate. Lo scenario di riferimento per il calcolo di questo parametro è mostrato in figura 4.

L'espressione utilizzata per il calcolo di questo parametro è la seguente:

$$PFD(\vartheta) = \frac{P_T G_T(\vartheta)}{4\pi\big(R(\vartheta)\big)^2}$$

dove P_T è la potenza emessa dal trasmettitore, ϑ è l'angolo con cui il satellite vede il punto di ricezione a Terra, $G_T(\vartheta)$ è il guadagno dell'antenna nella direzione della stazione a Terra e $R(\vartheta)$ è la distanza tra satellite e stazione ricevente.

Quando si considerano costellazioni di satelliti come quelle in orbita bassa (LEO), con la possibilità che un singolo punto a Terra possa essere in visibilità con più satelliti della costellazione, **la PFD viene spesso sostituita dal parametro di PFD Equivalente** (**EPFD**). Storicamente, l'ITU ha stabilito limiti di EPFD per proteggere i satelliti in orbita geostazionaria (GEO) dall'interferenza causata dai satelliti non geostazionari (NGSO) [11]. L'EPFD calcola l'effetto aggregato di un insieme di satelliti NGSO su un ricevitore specifico, a differenza della PFD che si applica tipicamente a un singolo satellite. Con il lancio di un numero sempre maggiore di satelliti LEO dedicati al servizio IMT-MSS, aumenta il rischio di interferenza con i ricevitori IMT terrestri [11]. L'espressione dell'EPFD è la seguente:

$$EPFD = 10\log_{10}\left[\sum_{i=1}^{N} 10^{\frac{P_i}{10}} \cdot \frac{G_{Ti}(\vartheta_i)}{4\pi d_i^2} \cdot \frac{G_R(\zeta_i)}{G_{R,max}}\right]$$

nella quale si evidenzia una caratterizzazione dei singoli parametri riferita a ciascuno dei N satelliti che appartengono alla costellazione, visibili dalla stazione di Terra. In questa espressione $G_{R,max}$ è il guadagno massimo dell'antenna della stazione ricevente e $G_R(\zeta)$ il guadagno dell'antenna ricevente nella direzione del satellite.

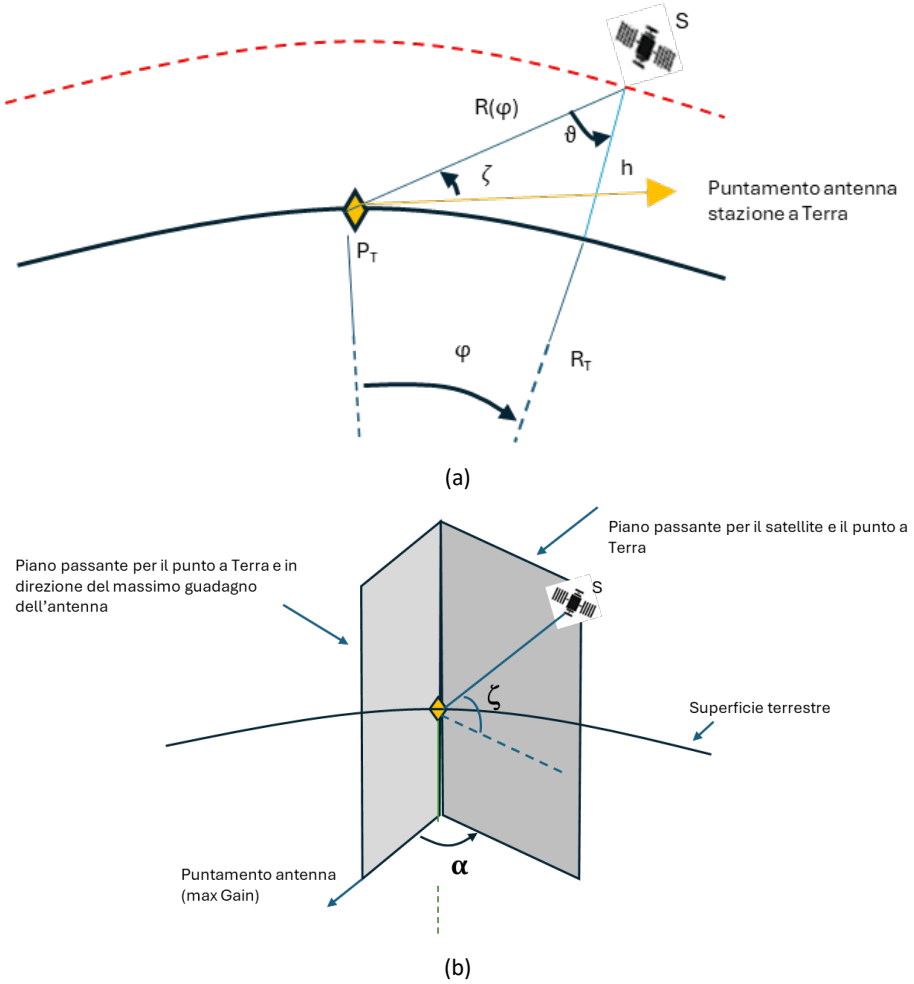


***Figura 4** – Angoli caratteristici per il calcolo dei parametri PFD e EPFD*

La scelta tra *I/N* e *EPFD*, o una combinazione di entrambi, è un aspetto critico degli studi. Il rapporto *I/N* si riferisce direttamente alle prestazioni del ricevitore ed è una metrica "di ricezione" (back-end) che richiede la conoscenza del rumore di fondo della vittima. La PFD è una metrica "di trasmissione" (front-end) che può essere regolamentata dal satellite trasmittente. I limiti di *PFD* offrono uno strumento normativo più semplice e universale, ma potrebbero non sempre cogliere accuratamente scenari di interferenza complessi, soprattutto per i diversi tipi di ricevitori. Il quadro normativo finale probabilmente utilizzerà una combinazione di queste e altre metriche per garantire una protezione completa.

Di seguito, un riepilogo dei due principali criteri di protezione:

Criterio	Definizione	Applicazione negli attuali studi
I/N (Rapporto Interferenza/Rumore)	Rapporto tra la potenza di un segnale interferente e la potenza del rumore termico del ricevitore.	Utilizzato per quantificare il degrado del bilancio di collegamento. Valori di -6 a -10 dB sono punti di riferimento comuni per interferenze continue. Gli studi impiegano simulazioni Monte Carlo per analizzare gli effetti di aggregazione in un ambiente di rete.
PFD (Densità di Flusso di Potenza) e **EPFD** (PFD Equivalente)	La PFD misura la potenza per unità di area e per unità di banda che un'emissione satellitare consegna a un punto a Terra. L'EPFD estende questo concetto per calcolare l'effetto aggregato di intere costellazioni di satelliti.	La PFD è utilizzata come strumento normativo per limitare le emissioni satellitari e proteggere i servizi terrestri. L'EPFD è il parametro rilevante per valutare l'interferenza causata da costellazioni di satelliti. Gli studi stanno valutando i limiti per prevenire interferenze dannose da segnali satellitari, incluse le emissioni indesiderate.

6 - Possibili tecniche di mitigazione

Come è stato evidenziato nei paragrafi precedenti, la possibilità che si presentino problemi di interferenza in corrispondenza dei confini tra due Stati di cui uno ha autorizzato l'uso del servizio DC-MSS-IMT su una determinata banda di frequenza mentre l'altro Stato continua ad utilizzare la stessa banda di frequenza per il servizio IMT terrestre, è piuttosto elevata. Ciò è dovuto al fatto che l'operatore satellitare intende fornire servizio a tutti gli utenti dello Stato che ne ha autorizzato il servizio ma allo stesso tempo, il satellite, operando da un'altitudine di diverse centinaia di km, non ha la piena capacità di regolare il fascio in modo da limitare il segnale alle sole aree di interesse ma potrebbe accadere che il suo raggio di copertura si estenda facilmente in aree non autorizzate al servizio.

Per far fronte a questo problema sono allo studio diverse soluzioni di mitigazione del segnale che, allo stato attuale, si possono sintetizzare nelle seguenti tecniche:

- Spegnere il segnale trasmesso dal satellite a partire da qualche chilometro prima che il *nadir* del satellite raggiunga il confine dello Stato (ad esempio 20-50 km);
- Ridurre progressivamente la potenza del segnale trasmesso dal satellite a partire da una determinata distanza dal confine dello Stato;
- Quando il satellite si avvicina al confine dello Stato, sfruttare le caratteristiche funzionali delle antenne *phased array* a bordo del satellite per indirizzare opportunamente il fascio per limitare i fenomeni interferenziali e continuare a offrire il servizio fino a che il *nadir* del satellite permane sul territorio dello Stato che lo ha autorizzato.

7 - Conclusioni

Un approccio emergente per fornire connettività satellitare sulle bande terrestri IMT (*International Mobile Telecommunications*), noto come DC-MSS-IMT (*Direct Connectivity between Mobile Satellite Service stations and IMT*), è in fase di discussione presso il Settore Radiocomunicazioni dell'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU-R). L'IMT, come definito dall'ITU-R, comprende tutte le generazioni di sistemi di comunicazione mobile, tra cui *IMT-2000* (3G), *IMT-Advanced* (4G), *IMT-2020* (5G) ecc. In questo modello, la trasmissione satellitare avverrebbe nelle bande IMT terrestri, assegnate a un MNO. Pertanto, la copertura satellitare sarebbe complementare a quella terrestre e avverrebbe sotto la responsabilità end-to-end dell'MNO. Tuttavia, le attuali normative internazionali in materia di radiocomunicazioni non consentono ai sistemi di comunicazione satellitare di operare all'interno delle bande IMT terrestri sui territori. Vari gruppi di lavoro, sia tecnici sia regolamentari, stanno attualmente discutendo la possibilità di consentire l'utilizzo del DC-MSS-IMT all'interno delle bande IMT terrestri. In particolare, il problema dell'interferenza transfrontaliera generata dai sistemi satellitari LEO-D2C è al centro di intense attività tecniche e normative a livello globale e regionale.

In **Europa**, la **CEPT** (Conferenza Europea delle Amministrazioni delle Poste e delle Telecomunicazioni) sta svolgendo un ruolo cruciale, in particolare attraverso i suoi gruppi di lavoro. Il **PTC (*Project Team C*)** e il **PT1 (*Project Team 1*)** sono attivamente impegnati nell'elaborazione di studi tecnici e nella preparazione di posizioni comuni europee (ECPs) in vista della WRC-27. Questi gruppi stanno esaminando i criteri di protezione, inclusi i limiti di *I/N* e *PFD*, per assicurare la coesistenza armoniosa e per sviluppare proposte regolamentari per l'Agenda Item 1.13.

A livello **mondiale**, l'**ITU-R** (Settore delle Radiocomunicazioni dell'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni), in particolare i suoi gruppi di studio e le *Working Parties* pertinenti, costituisce il foro principale per la conduzione di studi di compatibilità e per l'elaborazione dei **Rapporti ITU-R** che saranno la base tecnica per le decisioni della WRC-27. Parallelamente, anche **organizzazioni di standardizzazione extra-europee**, come il **3GPP** (*3rd Generation Partnership Project*), pur non essendo un organismo regolatore, sono coinvolte nell'analisi delle specifiche tecniche e dei requisiti di **interoperabilità e coesistenza** tra le reti terrestri e le nuove componenti satellitari (NTN - *Non-Terrestrial Networks*). Grazie a questo lavoro congiunto si punta a definire un quadro normativo e tecnico solido che consenta ai servizi innovativi D2C di operare proteggendo al contempo i servizi radiomobili terrestri esistenti.

9 - Bibliografia

[1] International Telecommunication Union. *Resolution 253 (WRC-23) – "*Studies on possible new allocations to the mobile-satellite service for direct connectivity between space stations and International Mobile Telecommunications (IMT) user equipment to complement terrestrial IMT network coverage", *World Radiocommunication Conference 2023, Dubai, United Arab Emirates*, 20 November - 15 December 2023

[2] International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector. (n.d.). Working Party 4C – Efficient orbit/spectrum utilization for MSS and RDSS. Retrieved [data di accesso], https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg4/rwp4c/Pages/default.aspx

[3] International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector. (n.d.). Working Party 5D (WP 5D) – IMT Systems, https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/Pages/default.aspx

[4] CEPT ECC PT1 - Group PT1 – IMT Matters., https://www.cept.org/ecc/groups/ecc/ecc-pt1/

[5] CEPT ECC CPG PTC - Project Team C – Mobile Satellite Service & General Issues (CPG PTC). https://www.cept.org/ecc/groups/ecc/cpg/cpg-ptc/

[6] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Home – The Mobile Broadband Standard. https://www.3gpp.org/

[7] 3GPP Release 17 – "Specifications & Technologies", *3rd Generation Partnership Project*, 2022

[8] Alliance for Telecommunications Industry Solutions - Integration of Non-Terrestrial Networks (NTN) 5G Working Group. https://www.atis.org/initiatives/non-terrestrial-networks-ntn-5g-integration/

[9] Federal Communications Commission, "Report and Order and Further Notice of Proposed Rulemaking: Single Network Future: Supplemental Coverage from Space", *GN Docket No. 23-65 & IB Docket No. 22-271*, April 2024

[10] ATIS. (version V16.00). ATIS.3GPP.38.820.V1600 (contributo ATIS a 3GPP)," Parametri RF e spatial/frequency exclusion utili per la definizione delle EZ", https://atisorg.s3.amazonaws.com/archive/3gpp-documents/Rel16/ATIS.3GPP.38.820.V1600.pdf

[11] ITU-R WP4C, , "Working Document on the possible Description and Functionality of MSS Systems for Direct Connectivity Between Space Stations and IMT User Equipment", *R23-WP4C-251015-TD-0135*, October 2025

[12] 3GPP TR 38.821 — "Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN). 3rd Generation Partnership Project", *Technical Report*, 2021

[13] Paul, A., Hurt, G., Sullivan, T., Patrick, G., Sole, R., Brunson, L., Wang, C.-W., Joiner, B., Drocella, E. (2005). "Interference Protection Criteria – Phase 1: Compilation from Existing Sources", *NTIA Report 05-432. U.S. Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration*. October 1, 2005