TAICS

TAICS v1.0 : 2026

衛星地空通訊介面基準研析

2026/10/14

社團法人台灣資通產業標準協會

Taiwan Association of Information and Communication Standards

衛星地空通訊介面基準研析

公告日期: 2026/10/14

目錄

引言 1

1. 適用範圍 5

2. 引用標準 6

3. 用語及定義 7

4. 介面相容性分類 19

4.1 通訊系統架構 21

4.2 無線電技術共存 29

4.3 營運系統對外介面 30

4.4 地面接取設備與後端設備介面 33

4.5 地面接取設備與衛星介面 35

4.6 地面接取設備內部單元介面 39

4.7 衛星內部次系統／單元介面 40

4.8 O-RAN 多設備內部單元介面 41

4.9 測試及資安方面 44

5. 無線電技術共存 46

5.1 ITU 的無線電規範 46

5.1.1 無線電規範的法律架構、原則與主要建議書 46

5.1.2 衛星服務分類、通訊場型定義與頻譜規範 47

5.1.3 衛星設備頻率之協調、通報、登記與使用期限 49

5.1.4 無線電干擾保護機制與 EPFD 規範 50

5.1.5 新興衛星技術監理規範與未來趨勢 55

5.2 無線電規範下共存的開發建議 57

5.2.1 天線射頻性能與輻射場型設計建議 57
5.2.2 天線控制單元與自動化監理機制 58
5.2.3 功率管理與干擾評估建議 59
6. 營運系統對外介面 61
6.1 DVB-S/RCS 營運系統對外介面 61
6.1.1 營運系統對應 PoP 介面 61
6.2 3GPP NTN 營運系統對外介面 64
6.2.1 營運系統對應 PoP 的 N6 64
6.2.2 營運系統與衛星營運系統的 SbMA 介面 66
6.3 營運系統對外介面的開發建議 68
6.3.1 營運系統對外介面共通技術指標 68
6.3.2 營運系統對外實務建議 68
7. 地面接取設備與後端設備介面 70
7.1 DVB-S/RCS 閘道、衛星終端（RCST）、與網路中心介面 70
7.1.1 採用衛星不分類型，GW 與 NCC/NMC 的介面 70
7.1.2 採用衛星不分類型，RCST 與 NCC/NMC 的介面 74
7.2 3GPP NTN 無線接取網路（RAN）與核心網路（CN）介面 77
7.2.1 採用通透型衛星時，地面 gNB 與 5GC 的 NG 77
7.3 3GPP NTN 用戶設備（UE）與核心網路（CN）介面 80
7.3.1 採用衛星不分類型，UE 與 5GC 的 N1（NAS） 80
7.4 地面接取設備與後端設備介面的開發建議 84
7.4.1 地面接取設備與後端設備介面共通技術指標 84
7.4.2 地面接取設備與後端設備實務建議 84

8. 地面接取設備與衛星介面 86
8.1 DVB-S/RCS 衛星終端（RCST）、閘道、與衛星介面 86
8.1.1 採用通透型衛星時，RCST 與 GW 的 FL、RL 86
8.1.2 採用再生型衛星時，RCST/GW 與衛星的 DL、UL 89
8.2 3GPP NTN 用戶終端（UE）、NTN 閘道、與 NTN 酬載介面 91
8.2.1 採用通透型衛星時，UE 與 NTN GW 的 Uu over SRI 91
8.2.2 採用再生型衛星時，UE 與 NTN PL gNB 的 Uu 95
8.2.3 採用再生型衛星時，NTN PL gNB 與 NTN GW 的 NG over SRI 98
8.3 地面接取設備與衛星的開發建議 101
8.3.1 地面接取設備與衛星介面共通技術指標 101
8.3.2 地面接取設備與衛星實務建議 103
9. 地面接取設備內部單元介面 106
9.1 通用戶外單元（ODU）與室內單元（IDU）介面 106
9.1.1 類比中頻（Analog IF）連結 106
9.1.2 IEEE-ISTO 數位中頻互通（DIFI） 110
9.1.3 開放天線數據機介面協定（OpenAMIP） 113
9.1.4 開放升頻器數據機介面協定（OpenBMIP） 115
9.2 3GPP RAN 無線電單元（RU）與基頻單元（BBU）介面 117
9.2.1 通用公共無線電介面（CPRI） 117
9.2.2 增強型通用公共無線電介面（eCPRI） 120
9.3 地面接取設備內部單元介面的開發建議 122
9.3.1 地面接取設備內部單元介面共通技術指標 122
9.3.2 地面接取設備內部單元實務建議 123

10. 衛星內部次系統／單元介面 125
10.1 衛星本體與酬載次系統介面 125
10.1.1 基本電氣、機構與熱介面 126
10.1.2 CCSDS 遙測與命令標準 130
10.1.3 MIL-STD-1553 高可靠度匯流排 135
10.1.4 SAE 時間觸發乙太網路（TTEthernet） 137
10.1.5 ECSS SpaceWire 與 SpaceFibre 140
10.1.6 ANSI/VITA SpaceVPX 背板介面整合 143
10.2 衛星酬載內部單元介面 148
10.2.1 與衛星本體共用上述網路 149
10.2.2 內部獨立連結或網路 152
10.3 冗餘架構的容錯運用 155
10.4 衛星內部次系統／單元介面的開發建議 155
10.4.1 衛星內部次系統／單元介面共通技術指標 156
10.4.2 衛星內部次系統／單元實務建議 161
11. O-RAN 多設備內部單元介面 163
11.1 O-RAN 單元介面基本說明 163
11.2 3GPP NTN O-RAN 單元介面 166
11.2.1 採用通透型衛星時，地面 gNB 內部單元的 O-FH 與 F1 167
11.2.2 採用再生型衛星時，NTN PL 內部 O-RU 與 O-DU 的 O-FH 170
11.2.3 採用再生型衛星時，NTN PL O-DU 間的 F1 over ISL 172
11.2.4 採用再生型衛星時，NTN GW 與 NTN PL O-DU 的 F1 over SRI 175
11.2.5 採用再生型衛星時，NTN GW 與地面 O-CU 的 F1 178

11.3 O-RAN 多設備內部單元介面的開發建議 181
11.3.1 O-RAN 多設備內部單元介面共通技術指標 181
11.3.2 O-RAN 多設備內部單元實務建議 181
12. 測試標準 183
12.1 通訊設備與單元測試 183
12.1.1 監理標準與 GSOA SOMAP 183
12.1.2 DVB 規格書中的符合性測試 186
12.1.3 3GPP RAN5 符合性測試 187
12.1.4 O-RAN 測試規格 189
12.2 衛星酬載額外測試 190
12.2.1 ECSS 太空硬體環境與品保 191
12.2.2 ANSI/AIAA 太空相關測試 192
12.2.3 NASA-STD 環境標準 194
12.2.4 軍用與 ITU-R EMI/EMC 規範 195
12.2.5 GEA IPC 製造品保 196
13. 資安指引與標準 198
13.1 美國政府 SPD-5 指引 198
13.2 NASA 太空資產保護標準 199
13.3 NIST 安全框架 201
13.4 台灣 TAICS 資安標準 203
14. 結論與展望 205
參考資料 206
版本修改紀錄 213

圖表目錄

圖 1、階層式介面分類示意 2
圖 2、衛星通訊系統中的介面類型範例 3
圖 3、DVB-S/RCS 通透型系統架構 22
圖 4、DVB-S/RCS 再生型系統架構 22
圖 5、DVB-S/RCS 通透型系統架構簡化示意 24
圖 6、DVB-S/RCS 再生型系統架構簡化示意 24
圖 7、3GPP NTN 通透型系統架構 24
圖 8、3GPP NTN 再生型系統架構 25
圖 9、3GPP NTN 再生型多衛星與多後端設備系統架構 25
圖 10、3GPP NTN 通透型系統架構簡化示意 27
圖 11、3GPP NTN 再生型系統架構簡化示意 27
圖 12、GEO 與其他衛星系統的無線電技術共存 29
圖 13、DVB-S/RCS 通透型系統的營運系統對外介面 31
圖 14、DVB-S/RCS 再生型系統的營運系統對外介面 31
圖 15、3GPP NTN 通透型系統的營運系統對外介面 32
圖 16、3GPP NTN 再生型系統的營運系統對外介面 32
圖 17、DVB-S/RCS 通透型系統的地面接取設備與後端設備介面 33
圖 18、DVB-S/RCS 再生型系統的地面接取設備與後端設備介面 34
圖 19、3GPP NTN 通透型系統的地面接取設備與後端設備介面 34
圖 20、3GPP NTN 再生型系統的地面接取設備與後端設備介面 35
圖 21、DVB-S/RCS 通透型系統的地面接取設備與衛星介面 36
圖 22、DVB-S/RCS 再生型系統的地面接取設備與衛星介面 37

圖 23、3GPP NTN 通透型系統的地面接取設備與衛星介面 38
圖 24、3GPP NTN 再生型系統的地面接取設備與衛星介面 38
圖 25、地面接取設備內部單元介面 39
圖 26、3GPP RAN 基站內部單元介面 40
圖 27、衛星內部次系統/單元介面 41
圖 28、3GPP RAN 基站內部單元介面 (a) 傳統 RAN 架構 (b) O-RAN 架構 42
圖 29、3GPP NTN 通透型系統的 O-RAN 基站內部單元介面 43
圖 30、3GPP NTN 再生型系統的 O-RAN 多設備內部單元介面 44
圖 31、規範下行方向干擾的 EPFD 示意 52
圖 32、規範上行方向干擾的 EPFD 示意 52
圖 33、規範衛星間方向干擾的 EPFD 示意 53
圖 34、DVB-S/RCS 通透型系統的營運系統對應 PoP 介面 61
圖 35、DVB-S/RCS 再生型系統的營運系統對應 PoP 介面 62
圖 36、3GPP NTN 通透型系統的營運系統對外介面 64
圖 37、3GPP NTN 再生型系統的營運系統對外介面 64
圖 38、DVB-S/RCS 通透型系統的 GW 與 NCC/NMC 的介面 70
圖 39、DVB-S/RCS 再生型系統的 GW 與 NCC/NMC 的介面 71
圖 40、DVB-S/RCS 通透型系統的 RCST 與 NCC/NMC 的介面 74
圖 41、DVB-S/RCS 再生型系統的 RCST 與 NCC/NMC 的介面 74
圖 42、3GPP NTN 通透型系統的地面 gNB 與 5GC 的 NG 77
圖 43、3GPP NTN 通透型系統的 UE 與 5GC 的 N1（NAS） 81
圖 44、3GPP NTN 再生型系統的 UE 與 5GC 的 N1（NAS） 81
圖 45、DVB-S/RCS 通透型系統的 RCST 與 GW 的 FL、RL 86

圖 46、DVB-S/RCS 再生型系統的 RCST/GW 與衛星的 DL、UL 89
圖 47、3GPP NTN 通透型系統的 UE 與 NTN GW 的 Uu over SRI 92
圖 48、3GPP NTN 再生型系統的 UE 與 NTN PL gNB 的 Uu 95
圖 49、3GPP NTN 再生型系統的 NTN PL gNB 與 NTN GW 的 NG over SRI 98
圖 50、地面接取設備的 ODU 與 IDU 的介面 106
圖 51、傳統類比中頻 vs.數位中頻架構 108
圖 52、DIFI v1.3.0 雙封包機制的架構示意 111
圖 53、3GPP RAN 的 RU 與 BBU 的介面 117
圖 54、衛星本體（BUS）與酬載次系統介面 125
圖 55、與本體（BUS）共用的衛星酬載內部單元介面 148
圖 56、獨立的衛星酬載內部單元介面 149
圖 57、3GPP 地面網路系統 O-RAN 單元介面 163
圖 58、3GPP NTN 通透型系統 O-RAN 的地面 gNB 內部單元的 O-FH 與 F1 167
圖 59、3GPP NTN 再生型系統 O-RAN 的 NTN PL 內部 O-RU 與 O-DU 的 O-FH 170
圖 60、3GPP NTN 再生型系統 O-RAN 的 NTN PL O-DU 間的 F1 over ISL 173
圖 61、3GPP NTN 再生型系統 O-RAN 的 NTN PL O-DU 與 NTN GW 的 F1 over SRI 176
圖 62、3GPP NTN 再生型系統 O-RAN 的 NTN GW 與地面 O-CU 的 F1 178

表 1、衛星通訊系統中設備與介面類型設備用語對應 28

引言

太空通訊在現今全球各國已受到高度重視，運用衛星可以在太空形成超越在地面能建設的通訊網路架構，進一步提供更不受位置限制（如偏遠地區、海上等）的通訊型態與相關應用。由於各地發生的森林大火、土石流等天然災害頻仍，多加運用衛星監控、接收並回傳可以加速救災，而包括漁業、長程物流運輸等在海上作業的經濟活動，若能依靠衛星服務，就算在地面建設範圍之外也能加強管理；另外，跨海的國家或地區間已鋪設多年的海底電纜亦有損壞之虞，若發生國際通訊中斷動輒將造成重大影響與損失，加入衛星通訊鏈路可以更強化網際網路的韌性；再加上近年來全球地緣政治衝突升溫的情勢下，各國政府更積極思考能否有更多太空通訊服務可以選用甚至可以自主建設，而民間企業包括 SpaceX、Eutelsat、Amazon 等正積極投入太空通訊建設與服務，太空通訊已不只是過去由國家政府單位執行的計畫，也在民間形成持續發展的產業。

此時我國正積極支持具有計畫性的太空通訊產業發展布局，但在推動時會發生廠商須面對衛星、地面設備等相關產品開發前期成本的問題，這些前期成本之中就包括在進入產業時，特別是進到國際產業鏈會面臨的各種標準與規範、甚至包含資安等琳瑯滿目的知識門檻要跨越，造成廠商在難以跨越門檻的情況下，不易決策是否要進入產業、或是在產業中是否要調整產品線，這無疑會阻礙我國的衛星通訊產業之計畫。

過去各種通訊產業發展的經驗指出，能在通訊系統中持續發展的產品，無論通訊的性能優劣，都必須具備在系統中的介面相容性，該產品的廠商需要快速對前述相關標準與規範等的內容做評估。以現況最具代表性的兩個衛星通訊系統開放標準：數位視訊廣播－廣播衛星／互動衛星系統（Digital Video Broadcasting-Satellite/ Interactive Satellite System, DVB-S/RCS）與第三代合作夥伴計畫非地面網路（3rd Generation Partnership Project Non-Terrestrial Network, 3GPP NTN）的架構為例，這兩個系統的標準化倡議組織 DVB Project 與 3GPP 都有成立多個工作組，也已經產出許多文件說明其系統內各組成對象的功能、介面相容性等，由於不同倡議組織對於工作組的職責與產出文件的結構不同，且其產出文件對於不同系統架構的組成對象的描述方法也不同，另外在出版界也幾乎找不到合併解析多個衛星通訊系統的書籍，確實造成廠商去探討與比較的門檻。

不僅如此，上述 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 系統的標準，主要是規範通訊「設備」（包括地面設備與太空衛星）的功能及其介面，但若將設備視為小的系統，其中又可以

拆分出不同的「單元」讓不同廠商發展，但對於 DVB Project 與 3GPP 組織而言，要定義涵蓋太空與地面如此大規模的通訊系統架構，這類比設備還小的單元功能及其介面不是在它們的標準中必要的內容，原則上是留給設備廠商自行定義。不過在多年的發展後，也出現補充設備內部單元的其他相關開放標準，例如專用於 3GPP 基站內部的開放無線接取網路（Open Radio Access Network, O-RAN）標準、可通用於衛星的地面閘道與用戶終端內部的數位中頻互通（Digital Inter-Frequency Interoperability, DIFI）標準等。這些在通訊系統中存在階層關係的開放標準互相補充，讓複雜的衛星通訊系統可以讓更多不同專長的廠商有機會加入開發或是測試，逐漸加速衛星通訊系統供應生態系的形成。當然，出現更多的標準在實際上也導致廠商要花更多的時間去認識。

為使廠商更容易跨越此類門檻，本文件進行衛星地空通訊介面基準的研析，將成果內容彙整成研究報告。本文件採用一個研析框架去探討各個衛星通訊系統，以相同的分類規則去區別產品與介面，再對應到標準與規範等內容，也就更容易去歸納各產品在系統中會面臨的介面相容性要求範圍。本研析工作的重點方法如下：

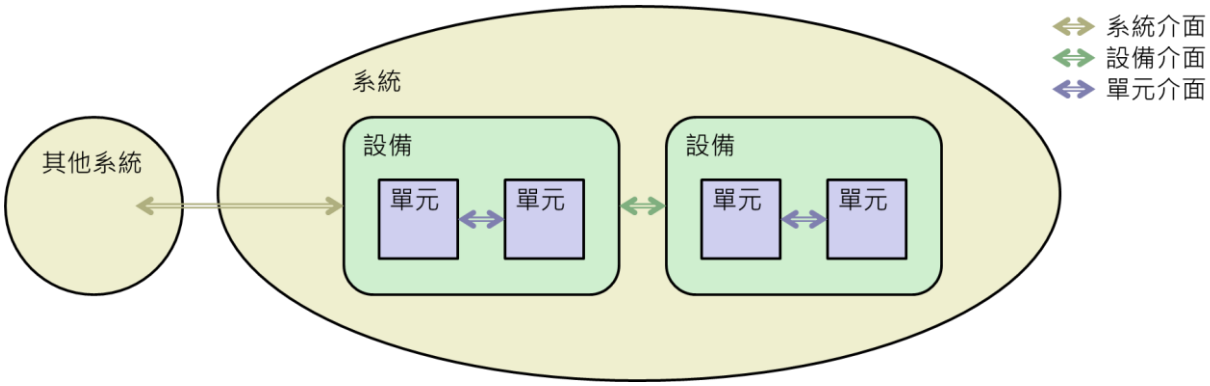


圖 1、階層式介面分類示意

一、介面分類：先以階層的角度分類組成對象，再根據對象分類介面，如圖 1。

二、對應內容調查：各對象介面關聯的實際產品、介面對應的數個標準與規範、及這些產品或介面的測試與資安現況。

三、評估建議：歸納產品在面對其介面相容性要求的建議。

圖 1 對於介面類型的示意是抽象的，就衛星通訊系統而言，採用範例做標示會比較具體，如圖 2。例如某個「系統」是衛星通訊系統，之外有其他系統；該衛星通訊系統包含的「設備」有後端設備、地面接取設備、衛星等，其中地面接取設備（如閘道）又

包含「單元」有室內單元和戶外單元。這些對象是階層式的，其間以實線連接表示它們有關聯，視為介面，並在下方以對齊的箭號雙實線來標示這些對象的介面。可以看到圖中對後端設備（如核心網路）和其他系統的關聯，標示類型為「系統介面」，對各地面設備與衛星、地面接取設備（如閘道）與後端設備的 3 個關聯，標示類型為「設備介面」，而對戶外單元和室內單元的關聯，標示類型為「單元介面」。

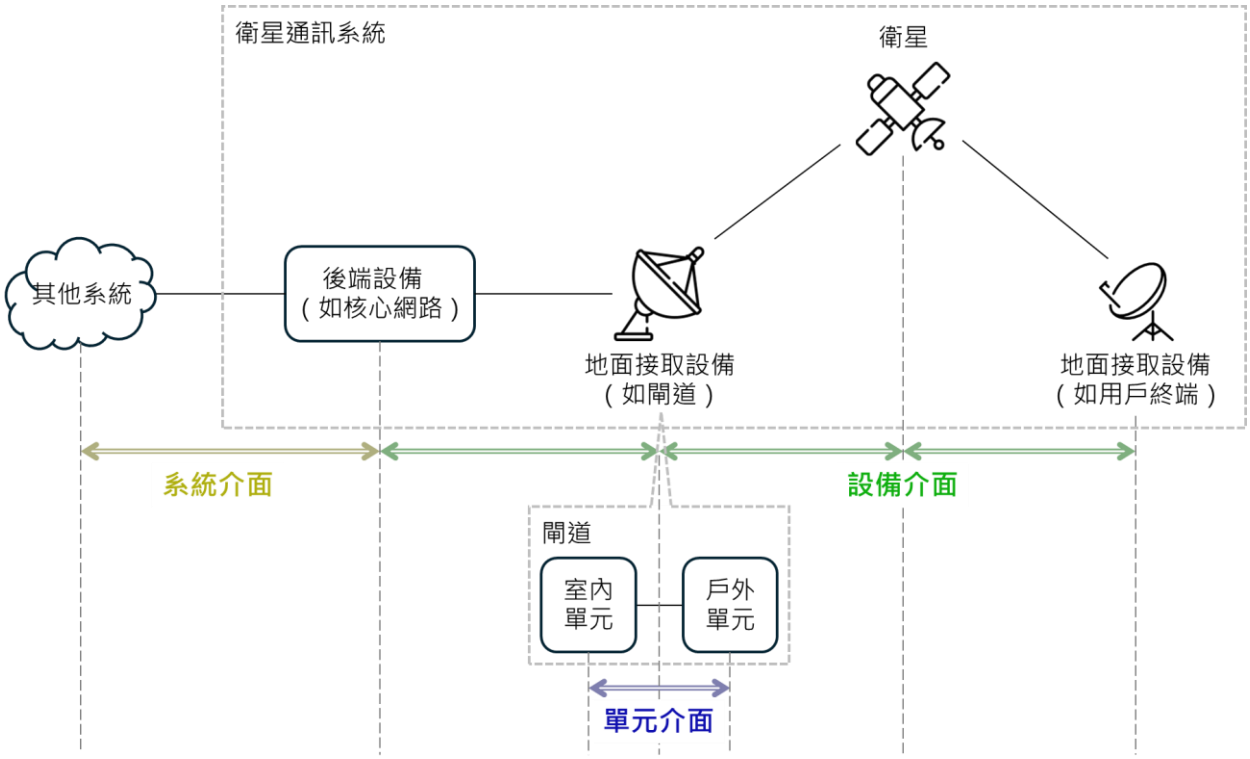


圖 2、衛星通訊系統中的介面類型範例

上述的介面示意僅是簡化的範例，各設備也可包含不同的單元，不再舉例。原則上衛星通訊系統至少有如此的架構，當然實際的衛星通訊系統標準會更複雜，且各標準有各自的名稱。但無論是 DVB-S/RCS 還是 3GPP NTN 的系統架構，所有的對象都會分為「系統」、「設備」和「單元」，而且設備層級也可對應「後端設備」、「地面接取設備」、與「衛星」等用語，由於後端設備與地面接取設備是位於地面，衛星是位於太空，後端設備不需要具備無線電功能，而其他設備則需要無線電功能，使得它們之間的介面基本特性有不同。這些設備層級的對象必須以這些特性加以區分，將用於地空之間的介面和地面的介面區分出來各別說明。由於實際的標準中在同一階層有更多的對象，同一介面類型會有涉及不同對象的多個介面主題，本文件以有關聯的對象名稱來命名介面主題，以上述的範例來說，在閘道與衛星之間就會稱為「閘道與衛星介面」。

於是本文件先在第 4 章對於設備與單元的相容性介面做分類，在簡介 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 系統的架構，對應各系統中的設備名稱到可分類介面的設備類型用語後，說明各類介面在 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 系統中出現的位置與相關介面主題，再介紹通訊設備與單元的測試、以及衛星通訊的資安方面，做為後續各章的基礎。

接著在第 5～11 章分別說明各類介面的規範與標準調查內容，其中每一章各小節的介面主題皆以設備與單元、主要內涵、相關文件來源、與技術指標的 4 大段落呈現，再以該章所有介面主題的共通技術指標與實務建議完成該介面類型的說明。最後在第 12 與 13 章分別說明測試標準的調查內容、與資安指引與標準的調查內容。

台灣的科技硬體產業發展蓬勃，在全球太空通訊產業亦不會缺席，而且不同的廠商各有不同的專業，值得在政府與廠商彼此之間，找到在複雜的技術生態中可以互補合作的可能性，政府與廠商也能藉此發現還有哪些是欠缺發展的。本文件以彙整各種開放標準的介面內容拋磚引玉，期待讓國內廠商在打入相關衛星、地面設備供應鏈時，作為開發前期評估的參考，也讓政府與廠商在衛星通訊系統的範疇中，發展出更多的可能性，包括系統整合等有關業務，以對我國在太空產業的佈局推動上有所協助。

1. 適用範圍

本文件係進行衛星地空通訊介面基準研析之報告，聚焦於「介面基準」而非通訊系統的原理與設計，研析方向為先分類介面的類型，調查系統、設備及單元介面對應的標準與規範、測試以及資安現況，並建議在進入產業時對各相關產品的評估。

本文件的適用範圍是對衛星通訊系統中，在太空與地面由不同廠商製造之各式產品之間的介面，包括太空設備與地面設備之間、地面設備之間、以及設備內部的單元之間的介面。本文件以現況最具代表性的兩個衛星通訊系統：DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 的架構下進行研析，涵蓋各設備介面，以及具備無線電接取功能設備內單元介面。

2. 引用標準

下列文獻為本文件所引用，其中的圖示內容成為本文件之一部分；本文件再根據引用的圖示，繪製更多便於清楚標示介面的圖示，以作為加強說明的用途。

[1] ETSI, TS 101 545-1, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 1: Overview and System Level specification", Version 1.4.1, 2026-01. (Fig. 1, 2)

[2] 3GPP, TR 38.821, “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)”, Version 16.2.0, 2023-04. (Fig. 5.1-1, 5.2.1-1, and 5.2.1-2)

其他更多文獻為本文件所參考（非直接引用），請見最後的「參考資料」。

3. 用語及定義

下列用語及定義適用於本文件。

3.1 數位視訊廣播計畫（Digital Video Broadcasting Project, DVB Project）

成立於 1993 年，由全球數百家廣播電視、電信晶片與衛星通訊業者組成的國際非營利產業聯盟，致力於共同制定並維護開放的數位電視與數據傳輸標準（如 DVB-S2、DVB-T2），並由歐洲電信標準協會（ETSI）等機構正式發佈以推向全球。

3.2 第三代合作夥伴計畫（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）

成立於 1998 年，由歐洲電信標準協會（ETSI）、美國電信產業解決方案聯盟（ATIS）等多國標準研發機構共同組成的全球性電信標準組織，主要透過制定全球統一的開放技術規範（技術報告與技術規格），來驅動並定義從 3G 到未來 6G 的全球行動通訊。

3.3 國際電信聯盟（International Telecommunication Union, ITU）

成立於 1865 年，現為聯合國負責資訊通信技術的核心專門機構，主要透過三大部門共同協調全球無線電頻譜的分配與衛星軌道軌跡、制定全球電信技術標準（如 6G 行動通訊框架與影像編碼），並致力於提升開發中國家的數位基礎建設。

3.4 歐洲電信標準協會（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）

成立於 1988 年，總部位於法國的獨立非營利官方標準化組織，作為歐洲三大標準化機構之一，它主要負責制定資通訊技術的歐洲地區與全球性公開標準，不僅是 3GPP 和 DVB Project 的創始核心成員，同時也主導發佈多項電信技術的規範。

3.5 美國國家標準協會（American National Standards Institute, ANSI）

成立於 1918 年的私營非營利組織，本身不直接編寫標準，而是作為美國國家標準體系的官方協調樞紐，專責審核、認可並整合美國國內的各個產業技術團體所倡議的自願性標準，同時作為美國在國際標準化組織（ISO）與國際電工委員會（IEC）的唯一官方代表，致力於確保美國技術標準的公正性與全球互操作性。

3.6 台灣資通產業標準協會（Taiwan Association of Information and Communication Standards, TAICS）

成立於 2015 年，由經濟部指導的台灣國家級資通訊標準制定組織，廣納產官學研各界力量，已針對行動通訊、物聯網、及車聯網等領域制定自願性產業標準，盡力建構台灣通訊產業本身的技術規範，並協助本地企業與全球資通訊產業鏈接軌。

3.7 太空資料系統諮詢委員會（The Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS）

成立於 1982 年，由全球主要太空機構如美國國家航空暨太空總署（NASA）、歐洲太空總署（ESA）共同組成的國際標準化組織，專門研發並制定用於太空通訊、導航、控制以及科學資料處理的公開與互操作性技術標準，旨在簡化不同國家與商業航太系統之間的地面與星際鏈路對接，降低太空任務的成本與跨國協作難度。

3.8 歐洲太空標準化合作組織（European Cooperation for Space Standardization, ECSS）

成立於 1993 年，由歐洲太空總署（ESA）、各國航太主管機關及歐洲太空工業界共同組成的合作機構，專門制定並維護一套統一且嚴格的歐洲太空標準體系（涵蓋專案管理、品質保證與航太工程技術），旨在提高歐洲航太任務的安全性與效率，並降低跨國太空計畫的研發成本與技術風險。

3.9 美國國家航空暨太空總署（National Aeronautics and Space Administration, NASA）

成立於 1958 年的美國聯邦政府獨立機構，專責執行國家民用航空、太空科學研究與探索計畫，其任務範疇涵蓋登月與火星探測、深空通訊與資料標準制定、地球環境科學觀測，以及航太技術開發，是帶領美國科學界與商業航太發展的核心推手。

3.10 美國國家標準與技術研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）

成立於 1901 年隸屬於美國商務部的非監管聯邦機構，主要透過推動測量科學、嚴謹標準與技術的革新（範疇涵蓋晶片精密計量、原子鐘時間標準、網路安全架構、以及密碼學演算法驗證），來提升美國產業的創新力、核心競爭力與資安防禦韌性。

3.11 美國航太學會（American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA）

成立於 1963 年，由多個歷史悠久的航太團體合併而成的全球最大航太專業工程學會，致力於透過發行頂級學術期刊、舉辦核心國際會議、頒佈技術標準以及推動科學普及政策，來連結全球航太領域的專家，共同推動航空、太空與國防科技的創新。

3.12 全球衛星營運商協會（Global Satellite Operators Association, GSOA）

成立於 2002 年，當時名為歐洲衛星營運商協會（ESOA），後於 2022 年擴大更名為 GSOA，是全球由企業執行長領軍的衛星產業組織，代表衛星營運商及上下游生態系，致力於跨國政策倡議、軌道保護、頻譜協調、以及推動衛星與地面通訊整合。

3.13 全球電子協會（Global Electronics Association, GEA）

有近 70 年歷史的國際電子電路互連與封裝協會（IPC）於 2025 年正式更名成立的全球性代表組織，總部位於美國伊利諾州，致力於連結原始設備製造商（OEM）、半導體、印刷電路板（PCB）與封裝製造等整個電子價值鏈，透過維護全球通用的 IPC 技術標準與認證、推動產官學合作及強化全球供應鏈的「策略性相互依存」與韌性，以支持年產值超過 6 兆美元的全球電子產業成長。

3.14 網路接入點（Point of Presence, PoP）

網路接入點（PoP）是指不同通訊網路、網際網路服務供應商（ISP）或雲端服務商之間，為相互連接、進行數據交換或提供在地化接入服務，而設立在特定地理位置（如電信機房、數據中心）且配置路由器、交換器及伺服器等通訊設備的實體節點。

3.15 廣播衛星／互動衛星系統（Broadcasting Satellite/ Interactive Satellite System, DVB-S/RCS）

DVB-S/RCS 是由歐洲數位視訊廣播組織（DVB）所制定的一套全球主流衛星通訊標準體系，結合負責單向高速前傳廣播的 DVB-S/S2/S2X 規範，與負責提供雙向互動回傳通道的 DVB-RCS/RCS2 規範，允許地面的衛星終端在不依賴鄰近地面基礎設施而連接網際網路，達成提供頻寬彈性且涵蓋廣闊的多媒體播送與雙向傳輸。

3.16 網路控制中心（Network Control Center, NCC）

在衛星通訊系統中，網路控制中心（NCC）通常是指負責控制面功能的核心設備；在 DVB 互動衛星系統中，NCC 是部署於鄰近地面閘道（GW）的核心控制系統，主要負責系統時鐘同步的發送、衛星終端（RCST）的登入與認證管理，並透過動態容量分配機制即時監控並指派回傳通道的資源，以便維持雙向衛星網路的通訊效率。

3.17 網路管理中心（Network Management Center, NMC）

在衛星通訊系統中，網路管理中心（NMC）通常是指負責管理面功能的核心設備；在 DVB 互動衛星系統中，NMC 即是核心管理平台，主要處理較高層級的非即時性維運工作，包含使用者開通、服務品質與計費策略配置、全網設備狀態監控、告警處理以及韌體遠端更新，與 NCC 相輔相成，共同維持雙向衛星網路的整體運作。

3.18 閘道（Gateway, GW）

在衛星通訊系統中，閘道（GW）通常是指負責將衛星通訊與外部網路（如網際網路、地面電信核心網路）連接的設備；在 DVB 互動衛星系統中，GW 是連接外部網路的實體樞紐，並與衛星之間形成匯集鏈路（Feeder Link），負責將地面的 IP 數據封裝並調變為高頻訊號發射，同時接收並解調來自各個衛星終端（RCST）的回傳數據。

3.19 通透型衛星（Transparent Satellite）

通透型（Transparent）衛星又稱彎管型（Bent-pipe）衛星，是僅在軌道上對接收到的訊號進行頻率轉換與功率放大便直接發射回地面，不做任何數據拆解或基頻訊號處理；在 DVB 衛星通訊系統標準中即是純訊號中繼的衛星架構定義，在 3GPP 的非地面（Non-Terrestrial Networks）通訊系統標準亦採用相同定義。

3.20 再生型衛星（Regenerative Satellite）

再生型（Regenerative）衛星又稱星載處理型（On-board Process）衛星，其具備解調、解碼、路由及重新編碼調變等基頻處理能力（如同把部分地面閘道功能搬到太空中）；在 DVB 衛星通訊系統中標準中視為具有星載交換能力的衛星架構定義，在 3GPP 的非地面（Non-Terrestrial Networks）通訊系統標準亦採用類似定義，但功能不盡相同。

3.21 衛星終端（Return Channel Satellite Terminal, RCST）

在 DVB 互動衛星系統中，衛星終端（RCST）是部署於用戶端的雙向衛星通信設備

（通常包含碟型天線、戶外收發單元及室內數據機），它負責接收來自衛星下行的 DVB-S/S2/S2X 廣播訊號，並依據網路控制中心（NCC）指派的資源，將用戶的數據發射回傳給衛星再到地面閘道（GW），讓用戶不依賴地面網路建設即可連接網際網路。

3.22 非地面網路（Non-Terrestrial Networks, NTN）

NTN 是由 3GPP（自 Release 17 起）所定義的一種新世代通訊架構，泛指利用地球軌道衛星以及高空平台系統（如飛船、無人機）作為無線基站或中繼節點的通訊網路，旨在將傳統地面行動通訊（如 5G、6G、窄頻物聯網）的訊號延伸至海洋、空域與偏遠地區，以實現全球無縫、高韌性且立體化的寬頻與物聯網覆蓋。

3.23 核心網路（Core Network, CN）與 5G 核網（5G Core, 5GC）

3GPP 的核心網路（CN）是行動通訊系統的中央控制樞紐，負責處理使用者認證、行動性管理、呼叫控制以及將流量路由至外部數據網路；而作為其最新演進的 5G 核網（5GC）則全面採用雲端原生與服務導向架構，將控制面與用戶面徹底分離，並導入網路切片（Network Slicing）等關鍵技術，以支援 5G 所需求的多元服務。

3.24 無線接取網路（Radio Access Network, RAN）

3GPP 的無線接取網路（RAN）是行動通訊系統中連接終端裝置（如手機、物聯網設備）與核心網路（CN）的實體基礎設施，由基站系統組成，主要負責處理射頻調變、無線資源管理（RRM）、封包加密與空中介面（Air Interface）控制，並在 Release 17 起將架構延伸至衛星與高空平台，以支援非地面網路（NTN）的連接。

3.25 基站（Base Station, BS）與 5G 基站（Next Generation NodeB, gNB）

3GPP 的基站（BS）是 RAN 中負責與終端裝置進行空中介面通訊的實體硬體設施，主要處理射頻訊號收發、無線鏈結控制與資源調配；而作為 5G 新式無線電（NR）標準下的特定基站型態，5G 基站（gNB）進一步採用了控制面與用戶面分離的模組化架構，

能提供大頻寬與低延遲的無線接入，並在 Release 17 起支援非地面網路（NTN）。

3.26 NTN 閘道（NTN Gateway, NTN GW）

在 3GPP 非地面網路（NTN）架構中，NTN 閘道（NTN GW）是連接地面 5G 核心網路（5GC）或地面 5G 基站（gNB）與非地面設備（如地球軌道衛星或高空平台）的實體樞紐，用於衛星通訊時它需配置衛星用地面天線，負責與衛星形成可以傳輸 5G 協定與訊號的匯集鏈路（Feeder Link），讓核心網路或基站能與衛星連接。

3.27 NTN 酬載（NTN Payload, NTN PL）

在 3GPP 非地面網路（NTN）架構中，NTN 酬載（NTN PL）是搭載於衛星或高空平台上、專門用來處理地面用戶終端（UE）與 NTN 閘道之間無線通訊訊號的太空設備，可分為僅進行頻率轉換與功率放大的通透型（Transparent），以及具備完整或部分 5G 基站（gNB）功能的再生型（Regenerative），是實現地空鏈路的必要設備。

3.28 用戶設備（User Equipment, UE）

3GPP 的用戶設備（UE）是指任何允許用戶接入 3GPP 行動通訊網路以進行數據、語音或物聯網傳輸的實體裝置（包含智慧型手機、平版電腦、車載通訊設備等），通常由行動終端與通用使用者識別模組（USIM）組成，且在 Release 17 起部分用戶設備（UE）將具備與非地面網路（NTN）衛星或高空平台建立地空鏈路的通訊功能。

3.29 小型衛星地面站（Very Small Aperture Terminal, VSAT）

在衛星通訊系統中，小型衛星地面站（VSAT）是一種非常小口徑終端，部署於用戶端的雙向衛星通訊地面站，通常配置有直徑小於 3.8 公尺（常見為 0.6 至 2.4 公尺）的碟型或相控陣列天線，並整合負責射頻的室外單元（ODU）與負責基頻的室內單元（IDU），能夠透過衛星與遠端的地面站通訊。

3.30 基頻單元（Baseband Unit, BBU）

在行動通訊基站架構中，基頻單元（BBU）是負責處理核心電信協定與數位訊號的處理核心，主要執行通道編碼、調變、加密等基頻演算法，並負責與核心網路（CN）進行數據對接，同時透過通用公共無線介面（CPRI）將處理後的數位基頻訊號傳送至遠端無線電單元（RU）進行發射，同時也將從 RU 傳來的訊號進行處理。

3.31 無線電單元（Radio Unit, RU）

在行動通訊基站架構中，無線電單元（RU）是部署於天線端附近的實體，專門負責將來自基頻單元（BBU）的數位基頻訊號進行數位類比轉換、升頻轉換、功率放大並透過天線發射出去，同時也將天線接收到的微弱空中射頻訊號進行低雜訊放大、降頻轉換與類比數位轉換，透過通用公共無線介面（CPRI）回傳給基頻單元（BBU）處理。

3.32 室內單元（Indoor Unit, IDU）

在衛星通訊、微波鏈路或分離式基站架構中，室內單元（IDU）是部署於建築物或機房內部的核心通訊數據機硬體，主要負責處理數位基頻訊號的調變與解調、協定轉換、多工匯集以及使用者數據介面的接入，並透過同軸電纜或光纖將中頻或數位訊號傳輸至部署於外面的戶外單元（ODU），同時將從 ODU 傳來的訊號進行處理。

3.33 戶外單元（Outdoor Unit, ODU）

在衛星通訊、微波鏈路或分離式基站架構中，戶外單元（ODU）是直接安裝於戶外天線後端或支架上的實體射頻硬體模組（通常包含功率放大器、低雜訊放大器及頻率轉換器），專門負責將來自室內單元（IDU）的中頻訊號進行升頻轉換與功率放大並送往天線發射，同時將天線接收到的微弱空中射頻訊號進行放大與降頻轉換回傳給 IDU。

3.34 開放無線接取網路（Open Radio Access Network, O-RAN）

O-RAN 是一種新型態的行動通訊無線接取網路架構，它倡導將傳統基站的實體與邏

輯切分，並採取開放標準定義無線電單元（RU）、分散單元（DU）與中央單元（CU）之間的互通介面，允許營運商混合搭配不同廠商的硬體與雲端化軟體，並導入無線接取網路智慧控制器（RIC）的自動化與智慧化，以打破傳統電信設備商的封閉生態。

3.35 開放型中央單元（O-RAN Central Unit, O-CU）

在開放無線接取網路（O-RAN）架構中，開放型中央單元（O-CU）負責執行非即時性（Non-real-time）的無線電資源控制協定（RRC）與封包資料匯聚協定（PDCP），它通常以純軟體形式部署於雲端或邊緣資料中心，向下透過標準化的開放介面與分散式單元（O-DU）連接，是基站內部集中上層協定功能的單元。

3.36 開放型分散式單元（O-RAN Distributed Unit, O-DU）

在開放無線接取網路（O-RAN）架構中，開放型分散式單元（O-DU）負責處理近即時性（Near-real-time）的無線電鏈結控制協定（RLC）、媒介接取控制協定（MAC）與即時性的部分高層實體層功能，向上透過標準化開放中置連結（Mid-haul）介面與中央單元（O-CU）連接，向下則經由開放前置連結（Open Front-haul）介面控制並調度多個無線電單元（O-RU），是基站內從上層協定轉換至基頻訊號處理功能的單元。

3.37 開放型無線電單元（O-RAN Radio Unit, O-RU）

在開放無線接取網路（O-RAN）架構中，開放型無線電單元（O-RU）主要負責處理低層實體層功能以及射頻訊號的收發、數位類比轉換與功率放大，是部署於天線端的實體射頻硬體，向上透過標準化的開放前置連結（Open Front-haul）介面與不同廠商的分散式單元（O-DU）連接，是基站內部從基頻訊號處理傳換到射頻功能的單元。

3.38 無線接取網路智慧控制器（RAN Intelligent Controller, RIC）

在開放無線接取網路（O-RAN）架構中，無線接取網路智慧控制器（RIC）負責導入智慧化與自動化管理與控制，分為處理秒級以上策略優化的非即時控制器（Non-RT RIC）與處理毫秒級無線資源調度的近即時控制器（Near-RT RIC），它透過標準化開放介

面收集無線網路的資訊，以優化基站如波束成形、負載平衡及能源效率的單元。

3.39 衛星營運商最低天線性能要求（Satellite Operator Minimum Antenna Performance Requirements, SOMAP）

由主要衛星營運商如 SES、Intelsat、Eutelsat 等主導在全球衛星營運商協會（GSOA）制定的通用技術規範指引，目的是要建立統一的地面天線性能驗證標準，確保新的天線產品具備良好的旁波瓣抑制與指向精度，以降低對鄰近衛星的干擾（Adjacent Satellite Interference）並兼顧通訊性能，並簡化製造商在各營運商間的產品認證流程。

3.40 VITA 標準（VITA Standard）

由無線電與嵌入式技術組織（VITA Radio-and-Embedded Technology Organization）所制定的一系列公開、模組化且高可靠性的開放式電腦架構與介面標準，專門針對國防、航太及嚴苛工業環境，定義關鍵硬體插槽與資料傳輸規範，如 VITA 1 VMEbus 與太空用 VITA 78 SpaceVPX 等，確保嵌入式計算系統在極端環境下能順利運作。

3.41 軍用標準（MIL-STD/Military Standard）

由美國國防部制定並維護的一系列嚴格的技術與測試規範，如 MIL-STD-810 環境工程試驗與 MIL-STD-461 電磁相容要求等，旨在確保國防武器、裝備與嵌入式組件在極端氣候、高強度震動及嚴苛電磁環境下具備極高的可靠度、耐用性與跨軍種的互操作性，直至目前已經實質影響全球國防、航太及高端工業界的品質基準。

3.42 IPC 標準（IPC Standard）

由全球電子協會（前身為國際電子電路互連與封裝協會）所制定的一系列全球通用電子製造規範，涵蓋印刷電路板（PCB）的設計、材料、製造以及電子組裝與驗收要求（如廣受國防與航太界採用的 IPC-A-610 系列），旨在為全球電子供應鏈提供統一的技術語言，以確保電子產品的製程品質、高可靠度與生命週期穩定性。

3.43 地球同步軌道（Geosynchronous Orbit, GSO）

地球同步軌道（GSO）為環繞地球運行的軌道，其軌道半長軸約為 42,164 公里（距地面高度約 35,786 公里），使其軌道週期與地球自轉週期完全相同（約為 23 小時 56 分 4 秒）。從地面觀看在此軌道上的衛星，每天都會在同一時間出現在天空中的同一位置，若此軌道不是位於赤道平面上，則看起來衛星的軌跡會呈現南北向的 8 字形。

3.44 地球靜止軌道（Geostationary Earth Orbit, GEO）

地球靜止軌道（GEO）是地球同步軌道（GSO）的一個特例，它是地球赤道平面上的一個圓形地球同步軌道。其軌道週期如同地球同步軌道，與地球自轉週期完全相同，但從地面觀看在此軌道運行的衛星，如同懸浮在空中固定不動，這項特性讓地面天線只需對準固定方向即可持續通訊，已有許多氣象與電視廣播用衛星使用此軌道。

3.45 低地球軌道（Low Earth Orbit, LEO）

低地球軌道（LEO）是指距離地球表面約 160 公里至 2,000 公里之間的近地圓形或橢圓形軌道。其軌道週期極短（約 88 至 127 分鐘），從地面觀看衛星飛過視野內的時間僅數分鐘，故需要部署許多數量的衛星來服務。然而相較於地球同步軌道（GSO），LEO 具備傳播延遲低、路徑損耗小等優勢，近來已受到寬頻通訊需求的重視。

3.46 地球靜止衛星軌道（Geostationary Satellite Orbit, GSO）

地球靜止衛星軌道（GSO）是國際電信聯盟（ITU）的定義，與地球靜止軌道（GEO）同義，但縮寫卻與地球同步軌道的 GSO 相同。在 ITU 的無線電規範（Radio Regulations）中，GSO 衛星系統相關設備是受規範保護的一方，以免到受其他衛星軌道系統的干擾。但在實務上，不只是地球靜止軌道（GEO），ITU 仍將地球同步軌道包含在內。

3.47 非地球靜止衛星軌道（Non-Geostationary Satellite Orbit, NGSO）

非地球靜止衛星軌道（NGSO）是國際電信聯盟（ITU）的定義，泛指所有繞地球運行但不屬於地球靜止衛星軌道（GSO）的其他軌道，包括低、中地球軌道。NGSO 衛星系統相關設備是被無線電規範約束的一方，以免干擾包含地球同步軌道在內之 GSO 衛星系統相關設備，對於可能會造成干擾的頻段，規範有功率相關的限制。

3.48 等效全向輻射功率（Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP）

等效全向輻射功率（EIRP）指無線電發射系統在特定方向上所輻射出的總功率，其數值等於發射機輸出功率扣除饋線損耗後，再加上天線在該方向上的增益，單位常用 dBW 或 dBm。EIRP 的定義考慮到不同場型的天線（就算饋入天線的功率相同），相較於在所有方向都沒有增益的理想全向性天線，在特定方向上的等效功率。

3.49 等效功率通量密度（Equivalent Power Flux Density, EPFD）

等效功率通量密度（EPFD）是國際電信聯盟（ITU）用來評估非地球靜止衛星軌道（NGSO）系統設備對地球靜止衛星軌道（GSO）系統設備產生實質射頻干擾程度的量化指標，其數值是將所有同時在空中的 NGSO 設備發射訊號在 GSO 地面站或衛星的天線方向上所產生的各別功率通量密度，根據各別天線場型的增益進行加權累加運算而得的等效值，此定義對於不同軌道與設備特性的規劃將有不同的計算結果。

3.50 混合式自動重傳請求（Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ）

混合式自動重傳請求（HARQ）是一種將前向錯誤更正（FEC）編碼與自動重傳請求（ARQ）協定相結合的錯誤控制技術，當接收端偵測到封包解碼失敗時，會將資料暫存於緩衝區中並向發送端要求重傳，隨後將新收到的重傳訊號與先前暫存的訊號進行軟組合（Soft Combining）以進行再度解碼，可在相同的成功率下大幅降低傳輸延遲。

4. 介面相容性分類

本章介紹衛星通訊系統架構類型與衛星通訊介面類型，之後的各章以本章提出的介面類型，分別說明對於該介面類型中各介面主題之標準的調查與建議。

對於通訊系統架構，考慮已有制定開放標準的衛星通訊系統，包括常見的數位視訊廣播（Digital Video Broadcasting, DVB）計畫的廣播衛星／互動衛星系統（Broadcasting Satellite/ Interactive Satellite System, DVB-S/RCS）標準，與長期發展自 3G 到 5G 行動通訊的第三代合作夥伴計畫（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）在近幾年提出將 5G 地面網路，擴展到包含非地面網路（Non-Terrestrial Networks, NTN）的標準。

由於 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 的系統架構在其標準中主要以「設備」為對象規範功能與其介面，例如衛星、地面閘道、衛星終端等，若將這些設備視為較小的系統，通常又可以再拆分出不同的「單元」讓不同廠商發展，但對於 DVB Project 與 3GPP 組織而言，要定義涵蓋如此大規模的通訊系統架構，這類比設備還小的單元功能及其介面不是在它們的標準中必要的內容，原則上是留給設備廠商自行定義。不過在多年的發展後，也出現補充設備內部單元的其他相關開放標準，例如專用於 3GPP 基站內部的開放無線接取網路（Open Radio Access Network, O-RAN）標準、可通用於衛星的地面閘道與用戶終端內部的數位中頻互通（Digital Inter-Frequency Interoperability, DIFI）標準等。

由此看來，DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 這些衛星通訊系統的標準在規範「系統」中的「設備」功能及介面，而 O-RAN 和 DIFI 這些標準在規範「設備」中的「單元」功能及介面（或規範既有功能單元的介面），形成從系統、設備、到單元的階層式關係，在不同階層互相補充。對於這些標準的通訊介面，可以從這種共通的階層式關係衍生出探討的原理，先將對象分為系統、設備、單元層級，若同一層級的對象的功能不同而採用的介面不同，再對同一層級不同類型的對象，分出更多的介面類型。

考慮通常無線通訊系統必須與其他無線通訊系統不互相干擾才能共存，且通常無線通訊系統也依賴對外的連接才能讓用戶連接上網際網路，這兩種與其他系統的相容性關係就視為系統層級的兩種介面類型，衛星通訊系統也是類似。

再者，衛星通訊系統中至少會有的設備，包括位於太空的「衛星」、可以與衛星連接的「地面接取設備」如用戶的衛星終端與營運商的地面閘道、與不連接衛星只與地面閘

道連接的「後端設備」如營運商的核心網路設備，這些設備的再分類，是因為設備介面會因為是地空之間的關係、還是都在地面的關係而有很大的不同，所以大致上有後端設備與地面接取設備的連接、地面接取設備與衛星的連接的這兩類相容性關係，也就視為設備層級的兩種介面類型。雖然在用戶這裡的衛星終端與營運商的地面閘道，連接衛星的性能規劃不同，但兩者連接衛星的通訊方式與協定可能相似，甚至有可能重複採用或是將協定加以變換組合，仍值得一併探討。

然後，包括衛星、能夠與衛星連接的地面接取設備，是其他非衛星通訊系統所沒有的，容易吸引較多廠商投入開發，在多年的發展已經發生將設備切分為單元，使得單元連接的相容性關係也出現標準化的情況，如前所述可以用於地面接取設備內單元的DIFI，由於不是通訊系統的標準直接規範，勢必存在多個這種單元層級的介面標準相互競爭或合作，然而畢竟地面接取設備與衛星所在的外界環境有巨大差異，衛星的切分結構也有不同，用於地面的單元介面很難在太空重複採用，但至少可以分為地面接取設備內部與衛星內部的兩類相容性關係，視為單元層級的兩種介面類型。

綜上所述，總共有 6 種介面類型如下。雖然在實際上在 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 系統有更多的設備類型（參見下一節的介紹），仍可以上述分類方式概括。

(1) 無線電技術共存

(2) 營運系統對外介面

(3) 地面接取設備與後端設備介面

(4) 地面接取設備與衛星介面

(5) 地面接取設備內部單元介面

(6) 衛星內部次系統／單元介面

其中第 6 種「衛星內部次系統／單元介面」表示衛星的切分結構有包括次系統與單元，但無論它們的關係為何，暫且都概括為在衛星內部的單元層級介面。

另外，在已知的單元層級介面標準中，有個本來專用於 3GPP 基站切分單元功能及其介面的 O-RAN 標準，在 3GPP NTN 發展的未來趨勢中，將會發生特殊的情況，使得該標準規範的重點對象單元不再只出現在同一個設備內部，不再只從單一設備切分，它包括不只是傳統上的地面基站切分，還有當整個基站變成星載（on-board）的切分，已及

僅部分基站變成星載時同時將地面設備與衛星切分出單元，變成單元層級介面有跨越多個設備的情況，這使得其中有的介面還在設備內部，而有的介面則因為跨出設備要適應設備層級介面。這種情況無法在上述 6 種介面類型概括，而獨立成如下第 7 種。

(7) O-RAN 多設備內部單元介面

以上共 7 種介面類型，其中第 7 種介面類型僅能對應 3GPP NTN 通訊系統。

本章的第 4.1 節先介紹 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 通訊系統架構，第 4.2～4.8 節分別介紹上述 7 種介面類型如何對應 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 通訊系統架構，說明其出現的位置與相關介面主題。對於通訊介面相容性與衛星可靠性的測試，已發展出相關測試標準，而衛星通訊的資安方面，也逐漸受到重視，最後第 4.9 節介紹與這些系統相關的設備與單元測試方面，以及衛星通訊的資安方面。

延續第 4.2～4.8 節介紹之上述 7 種介面類型，在本章之後的第 5～11 章進一步說明各類介面的規範與標準調查內容，對於各介面類型對應 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 通訊系統架構中，所包含的相關介面主題，分別為這些系統中的各個介面主題說明，說明的內容皆以設備與單元、主要內涵、相關文件來源、與技術指標的 4 大段落呈現，再以該章所有介面主題的共通技術指標與實務建議完成該介面類型的說明。

接著也延續第 4.9 節的介紹，在第 12 章說明有關 DVB-S/RCS、3GPP NTN 與其他的設備與單元測試標準，以及有關衛星酬載額外測試標準的調查內容，最後在第 13 章說明有關衛星通訊之資安指引與標準的調查內容。

4.1 通訊系統架構

本節介紹 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 這 2 個衛星通訊系統架構。

DVB-S/RCS 系統有分為採用通透型（Transparent）與再生型（Regenerative）衛星的架構，引用自 DVB Project 文件 ETSI TS 101 545-1 [1] 的系統示意分別如圖 3 與圖 4。

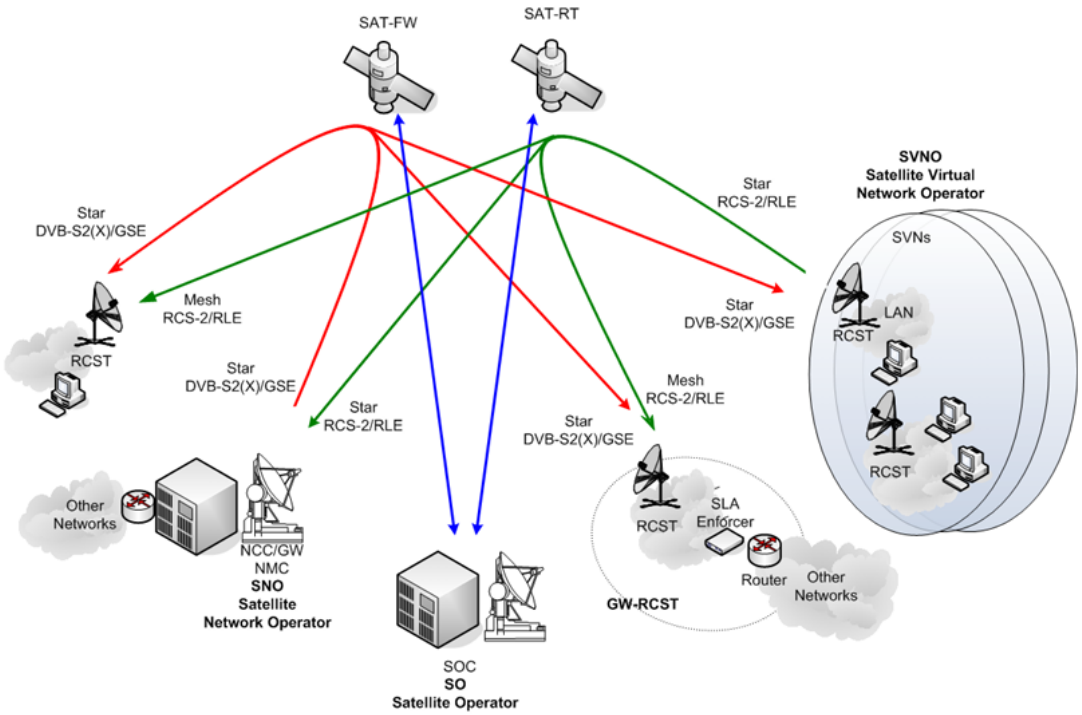


圖 3、DVB-S/RCS 通透型系統架構

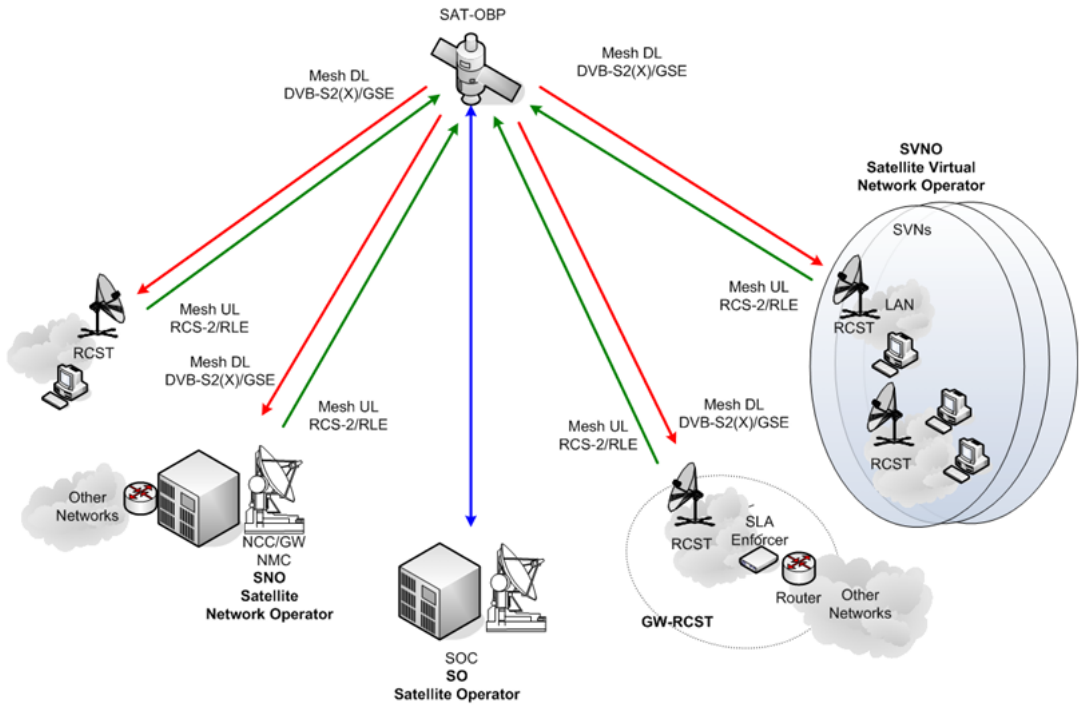


圖 4、DVB-S/RCS 再生型系統架構

DVB-S/RCS 系統標準的圖示主要是呈現其他網路（Other Network）、衛星網路營運商（Satellite Network Operator, SNO）、閘道（Gateway, GW）、衛星（Satellite, SAT）、與

衛星終端（Return Channel Satellite Terminal, RCST）等設備的關聯。其中 SNO 又包括網路控制中心（Network Control Center, NCC）與網路管理中心（Network Management Center, NMC），在本文件將簡單合稱 NCC 與 NMC 為網路中心（Network Center）。

採用通透型衛星的 DVB-S/RCS 通透型系統，如圖 3 的通透型衛星 SAT-FW 與 SAT-RT 分別負責前傳鏈路（Forward Link, FL）的訊號中繼與回傳鏈路（Return Link, RL）的訊號中繼，FL 是從地面 GW 傳輸到地面 RCST，RL 是從地面 RCST 傳輸到地面 GW。通透型衛星的訊號中繼是進行射頻的接收、頻率轉換、放大、與發射，沒有解調變（Demodulation）與調變（Modulation）也沒有更進一步的訊號處理與交換。

採用再生型衛星的 DVB-S/RCS 再生型系統，如圖 4 的再生型衛星 SAT-OBP，因為其具備星載處理器（On-board Processor, OBP），能夠負責與地面 RCST 與 GW 個別設備的下行鏈路（Downlink, DL）的訊號傳送與上行鏈路（Uplink, UL）的訊號接收，對於地面 RCST 與 GW，是靠再生型衛星的 UL 接收與 DL 傳送完成地面設備彼此之間的傳輸。再生型衛星從訊號接收到訊號傳送是在射頻接收後，降到基頻進行解調變、解碼（Decoding）、根據協定資訊的交換、編碼（Coding）、調變、再升到射頻發射，這個過程讓訊號恢復為數據後再重新產生訊號，故名「再生」。

DVB-S/RCS 系統已經發展多年並有營運商正式服務，傳統上採用在地球靜止軌道（Geostationary Earth Orbit, GEO）上的衛星，這種衛星從地面的 RCST 與 GW 來看是在天空靜止不動的，如此對於這些設備的發展比採用其他種軌道的系統要單純。

由於有通透型與再生型的系統，至少在「地面接取設備與衛星介面」這種介面類型在對應 DVB-S/RCS 通訊系統時，還會因為有通透型與再生型的不同，而有不同的介面主題，就像目前看到通透型系統的 FL、RL 是一個介面主題，再生型系統的 DL、UL 是另一個介面主題。而其他不是衛星用到的介面類型是否會因為通透型與再生型有差異，要看該通訊系統架構是否會因此連動到其他介面類型。

DVB-S/RCS 系統架構具有上述 6 種介面類型可以探討（參見以下各節），但由於上述架構圖示內的線條較為複雜，不便於再標示出介面類型，以下根據該架構內涵改用較為簡潔的圖示如圖 5 與圖 6。介面分類用的設備用語可以對應圖中設備，「後端設備」是網路中心包含 NCC 與 NMC，「地面接取設備」包括 GW 與 RCST，以及「衛星」包括通透型衛星（SAT-FW, SAT-RT）和再生型衛星（SAT-OBP）。

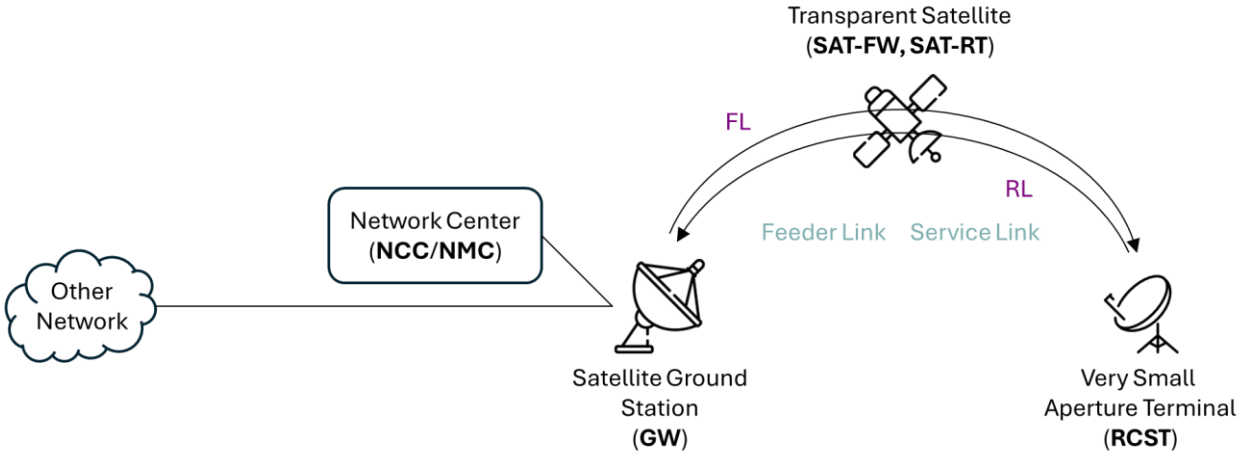


圖 5、DVB-S/RCS 通透型系統架構簡化示意

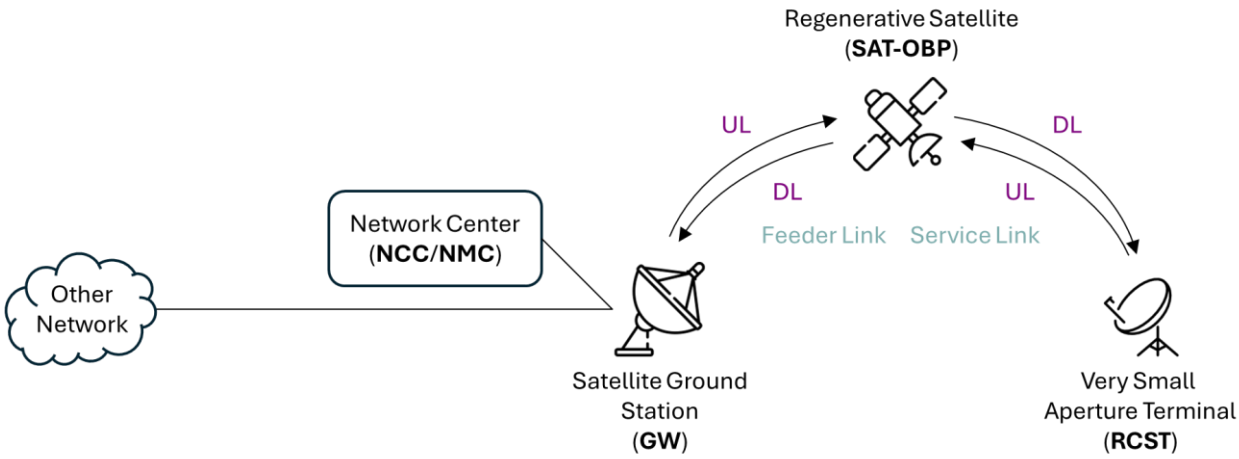


圖 6、DVB-S/RCS 再生型系統架構簡化示意

3GPP NTN 系統也有分為採用通透型與再生型衛星的架構，引用自 3GPP 文件 3GPP TR 38.821 [2] 的系統示意分別如圖 7、圖 8 與圖 9。

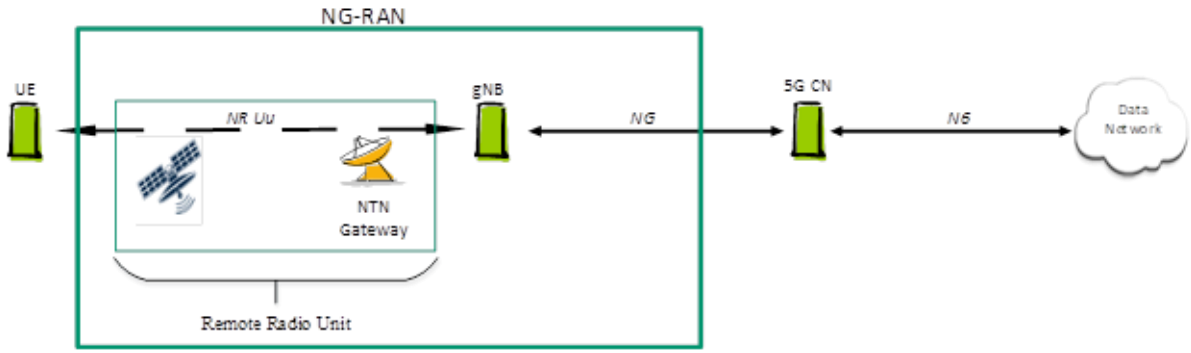


圖 7、3GPP NTN 通透型系統架構

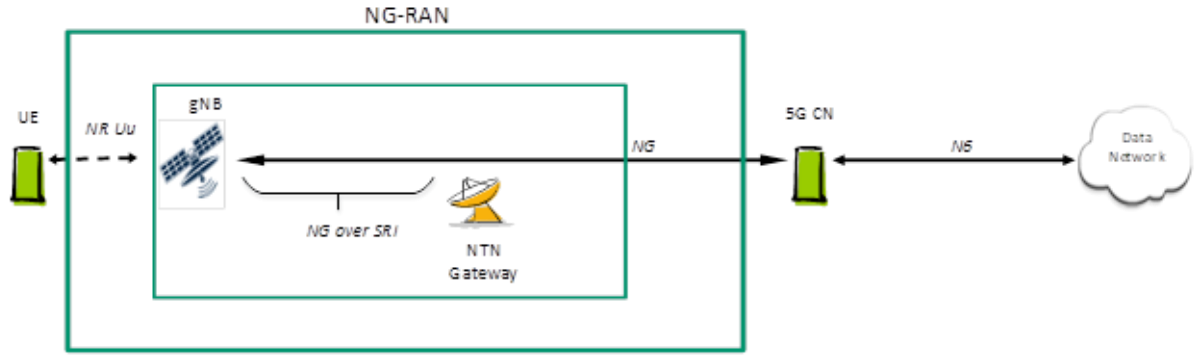


圖 8、3GPP NTN 再生型系統架構

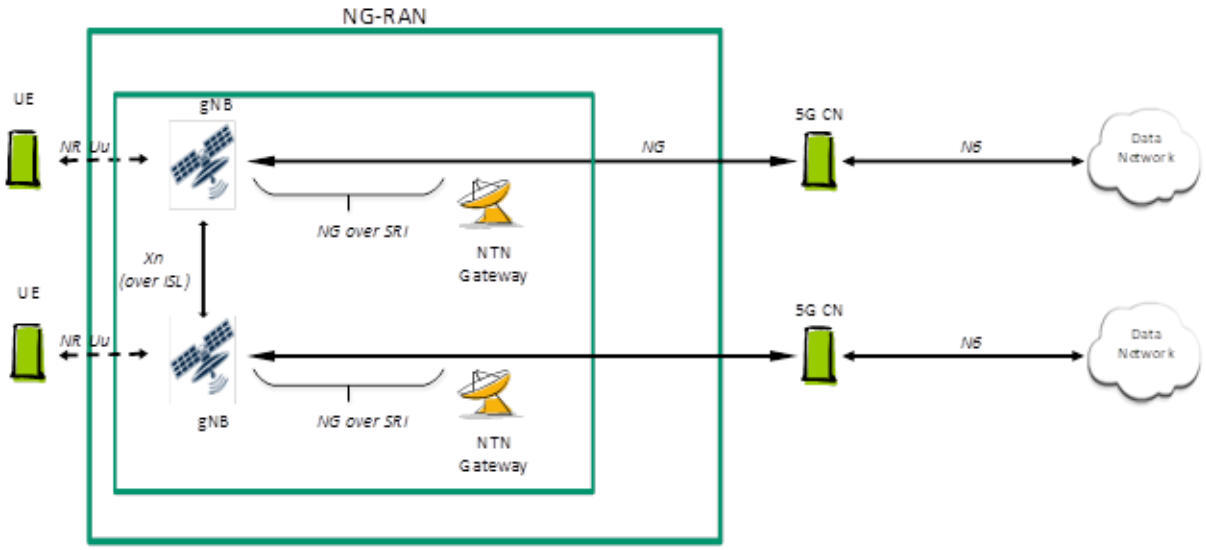


圖 9、3GPP NTN 再生型多衛星與多後端設備系統架構

3GPP NTN 系統標準的圖示則呈現出資料網路（Data Network）、5G 核網（5G Core, 5GC）、5G 基站（Next Generation NodeB, gNB）、NTN 閘道（NTN Gateway, NTN GW）、NTN 酬載（NTN Payload, NTN PL）、與用戶設備（User Equipment, UE）等的關聯。

採用通透型衛星的 3GPP NTN 通透型系統，與 DVB-S/RCS 通透型系統的性質相同，圖 7 的通透型衛星上有 NTN PL，負責在 UE 與 NTN GW 之間的訊號中繼，圖中標示名為 NR Uu 的介面名稱，雖然從 NTN GW 到 UE 也可稱為 FL、UE 到 NTN GW 也可稱為 RL，但依 3GPP 命名的正式規則是稱為 Uu（NR 是 5G 無線電接取技術的名稱，NR Uu 是代表在 5G 中的 Uu 介面），不過 Uu 介面在地面網路原本是 UE 與 gNB 的介面，使用微波頻段，此時 NTN GW 是對 gNB 載在有線連結的訊號與 NTN PL 用的更高頻段無線電做橋接。NTN PL 用的無線電也稱為衛星無線電介面（Satellite Radio Interface, SRI），

此時的 SRI 同時就是 Uu 介面，除了頻段不同之外其它特性要相容。此系統的 NTN PL 不具備 gNB 的功能，與 DVB-S/RCS 通透型系統的 SAT-FW 與 SAT-RT 的功能近似。

採用再生型衛星的 3GPP NTN 再生型系統，與 DVB-S/RCS 再生型系統的性質相近，圖 8 與圖 9 的再生型衛星上是具備 gNB 功能的 NTN PL，負責與 UE 之間的訊號接收與傳送，圖中是將 NTN PL gNB 與 UE 之間標示名為 NR Uu 的介面，同時也負責與 NTN GW 之間的訊號接收與傳送，圖中是將 NTN PL gNB 與 NTN GW 之間標示名為 NG over SRI 的介面，由於 5G 地面網路的 NG 介面是地面 gNB 與 5GC 的介面，本來沒有無線電的相容性部分，但是將 gNB 放到衛星上後 NG 介面必須適應 SRI 的無線電，而名為 NG over SRI。對於 UE 與 NTN GW 之間，是靠再生型衛星 NTN PL gNB 的接收與傳送完成地面設備彼此之間的傳輸，不過具有 gNB 功能的 NTN PL 做得比 DVB-S/RCS 的 SAT-OBP 還多，不但將訊號恢復為數據，還以解封裝（Decapsulation）與封裝（Encapsulation）來轉換協定格式（在 NG 協定格式與 Uu 協定格式轉換）並交換數據，在系統架構中讓衛星具備完整 gNB 功能時，就會做這些更複雜的「再生」過程。

3GPP NTN 系統標準還在繼續完備中，截至目前嚴格而言尚未有正式營運的服務，以現今有更多種軌道的衛星用來支持通訊的趨勢來看，3GPP NTN 系統將面臨多種軌道衛星的選擇與發展難度的議題，例如若不是像 DVB S/RCS 選擇地球靜止軌道，就會發生衛星會從 NTN GW 與 UE 的視野中飛掠過去的情況，在部署足夠密度衛星的規劃下，NTN GW 與 UE 須在飛離開與飛進入視野的衛星間換手，若又採用再生型系統，就不只是 Uu 介面要支援，還有 NG 介面也要適應，在還未確認可以克服這些技術挑戰之前，NTN 初期應該仍以通透型系統為較有可能營運的系統。

既然有通透型與再生型的系統，至少在「地面接取設備與衛星介面」這種介面類型在對應 3GPP NTN 通訊系統時，還會因為有通透型與再生型的不同，而有不同的介面主題，就像目前看到通透型系統的 Uu 是一個介面主題，再生型系統的 Uu 與 NG over SRI 是另兩個介面主題。而其他介面類型就 3GPP NTN 通訊系統架構來看，由於出現 gNB 有不同部署位置的差異，容易連動其他的介面類型，因此而增減介面主題。

3GPP NTN 系統架構具有上述 7 種介面類型可以探討（參見以下各節），雖然在地面的設備比 DVB-S/RCS 系統還要多種，仍不影響介面的分類，由於上述的架構圖示不至於太複雜，本文件僅調整為風格與左右方向一致的圖示如圖 10 與圖 11，圖中的其他網

路（Other Network）與 3GPP 的資料網路（Data Network）同義。介面分類用的設備用語可以對應圖中設備，「後端設備」是 5GC，「地面接取設備」包括 gNB、NTN GW、UE，以及「衛星」包括通透型衛星（NTN PL）和再生型衛星（gNB as NTN PL）。

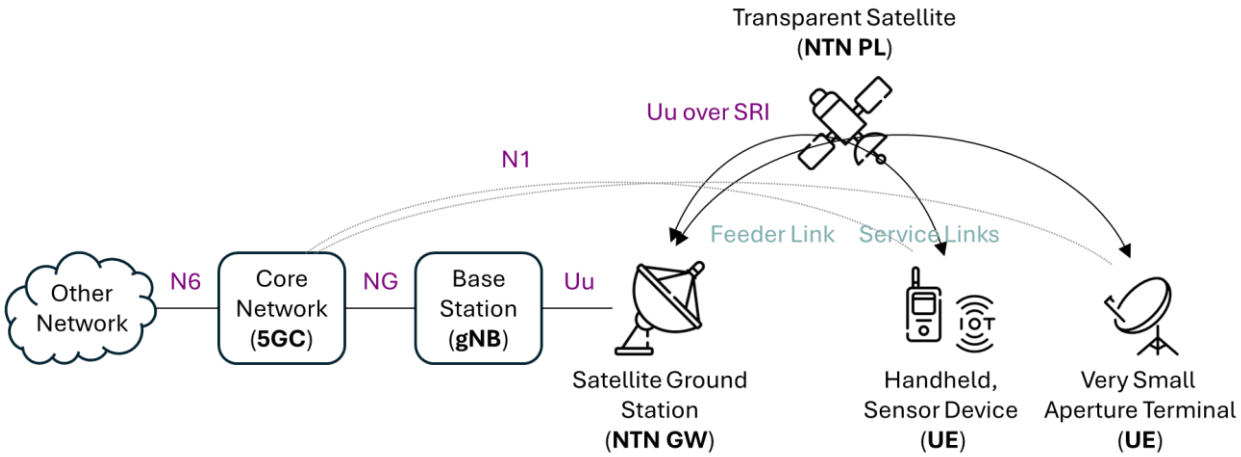


圖 10、3GPP NTN 通透型系統架構簡化示意

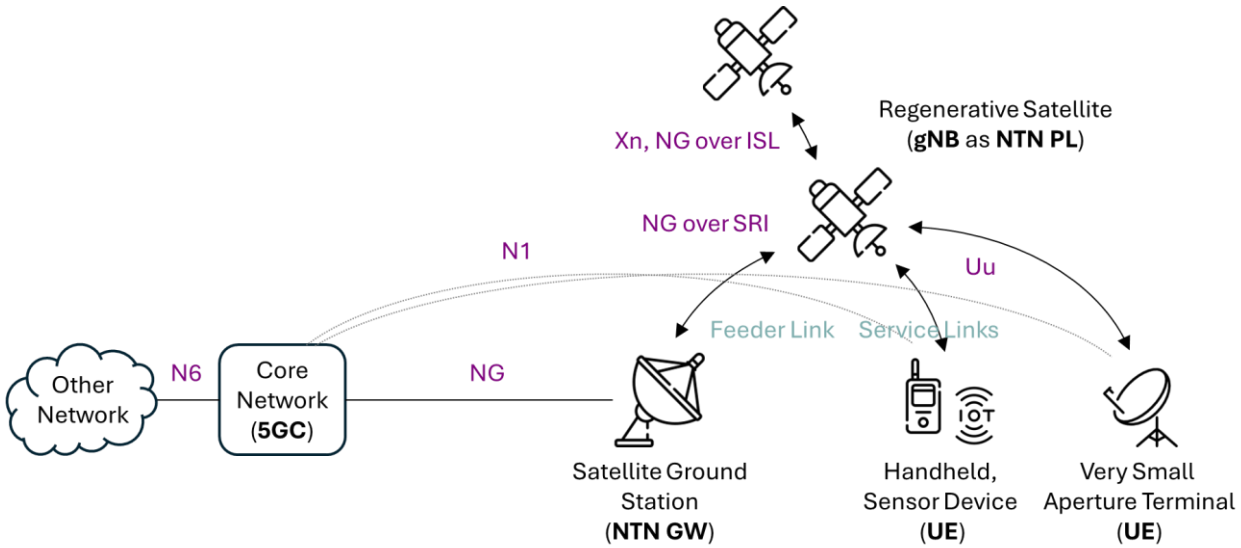


圖 11、3GPP NTN 再生型系統架構簡化示意

在上述 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 衛星通訊系統架構的介紹中，已提到系統中多個設備名稱與介面分類設備用語的對應，如「後端設備」、「地面接取設備」、與「衛星」，在以下各節的介面類型介紹時，這些設備名稱會在其中的介面主題提到，在進到之後的內容，再次整理這些設備名稱與介面類型中設備用語的對應如表 1。

表 1、衛星通訊系統中設備與介面類型設備用語對應

衛星通訊系統	DVB-S/RCS	3GPP NTN
後端設備	網路中心（NCC, NMC）	5G 核網（5GC）
地面接取設備	閘道（GW） 衛星終端（RCST）	5G 基站（gNB） NTN 閘道（NTN GW） 用戶終端（UE）
衛星	通透型衛星（SAT-FW, SAT-RT） 再生型衛星（SAT-OBP）	通透型衛星（NTN PL） 再生型衛星（gNB as NTN PL）

在系統層級的介面類型中，無線電技術共存與表 1 中「地面接取設備」與「衛星」中具備無線電功能的設備相關，這些設備都是做為與其他網路無線電共存的端點，已有一致的相容性定義做為根據；對於營運系統對外介面，則是以表 1 中的某個設備（未必是「後端設備」中的），做為此介面與其他網路對接的端點。

在設備層級的地面接取設備與後端設備介面，從表 1 看「地面接取設備」與「後端設備」，在 DVB-S/RCS 系統中也許有 GW 與 NCC/NMC 介面、RCST 與 NCC/NMC 介面等由設備的組合來做為介面的主題（仍須依系統架構中有出現的關聯為準）。架構介紹中還有提到在系統中採用通透型衛星或再生型衛星，可能影響介面主題與內涵，例如地面接取設備與衛星介面，在 DVB-S/RCS 系統中採用通透型衛星時有 RCST 與 GW 的 FL/RL 介面，但採用再生型衛星後就分成 RCST 與衛星的 DL/UL 介面、GW 與衛星的 DL/UL 介面，同理在 3GPP NTN 系統中採用通透型衛星時有 UE 與 gNB 的 Uu over SRI 介面，但採用再生型衛星後（gNB 移到衛星上）就分成 UE 與 NTN PL gNB 的 Uu 介面、NTN PL gNB 與 NTN GW 的 NG over SRI 介面；又如地面接取設備與後端設備介面，在 3GPP NTN 系統中採用通透型衛星時有 gNB 與 5GC 的 NG 介面，但採用再生型衛星後，在此介面類型中就改變成 NTN GW 與 5GC 的 NG 介面。

於是文件對於在各介面類型中出現的介面主題，將先以衛星通訊系統 DVB-S/RCS、3GPP NTN 區分，在該系統之內以採用的衛星為前提來介紹不同設備組合的介面主題，有的介面主題不分通透型或再生型，而有的則是有通透型或再生型的前提。

4.2 無線電技術共存

本節介紹第 1 種介面類型「無線電技術共存」。

無線電技術共存是關於規範系統間的無線電干擾，不同系統的無線電技術很可能是不相容的，但在無線電頻譜有限的情況下，考慮到不同系統在頻譜協調後將採用的頻率可能會互相影響對方的接收，必須加以規範。例如當某個較早建置採用地球靜止軌道（GEO）衛星的通訊系統，與之後建置的另一非地球靜止軌道（Non-Geostationary Orbit, NGSO）衛星通訊系統採用重疊的頻道共存，將可能發生包括 NGSO 衛星對 GEO 衛星終端的干擾、NGSO 衛星地面站（Ground Station）對 GEO 衛星的干擾、以及 NGSO 衛星對 GEO 衛星的干擾，示意如圖 12。國際電信聯盟（International Telecommunication Union, ITU）制定的規範主要是考慮早期開始營運的 GEO 衛星通訊系統，與後期的 NGSO 衛星通訊系統有上述 3 個干擾關係，但不考慮後期系統被早期系統干擾的情況。

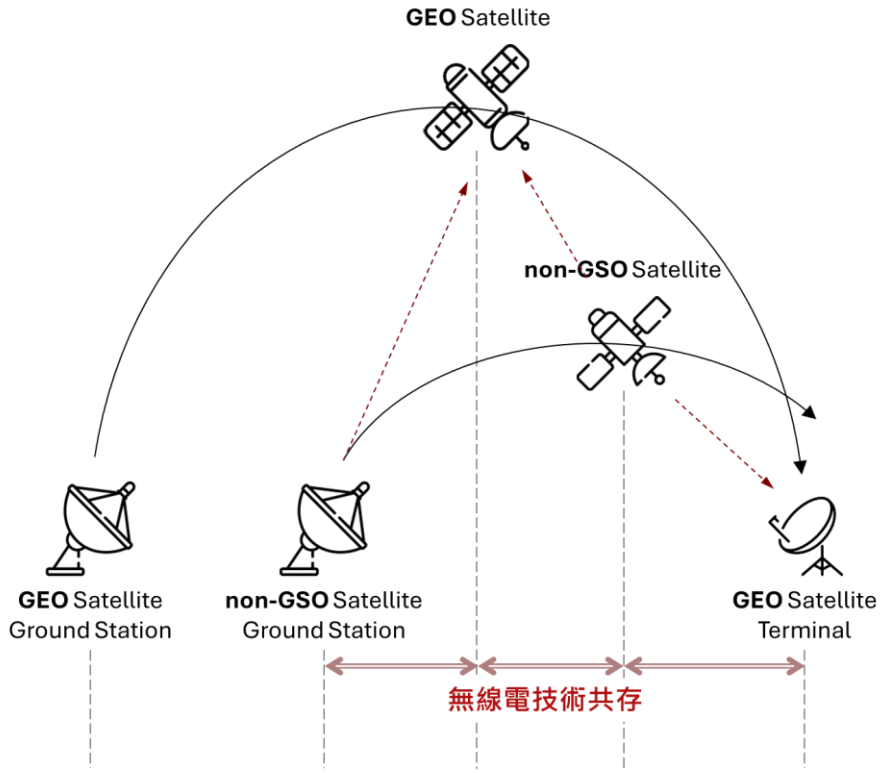


圖 12、GEO 與其他衛星系統的無線電技術共存

考慮到任何系統都能根據一致的共存規範來運作，這種規範基本上必須與通訊介面的訊號形式、協定格式等無相依性，才能用於所有系統，ITU 制定的規範是限制 NGSO

衛星通訊系統中發射設備在不同干擾情境下的等效功率通量密度（Equivalent Power Flux Density, EPFD）方式，以減低對 GEO 衛星通訊系統中接收設備的干擾。以 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 系統為例，若某個採用 DVB 技術的 GEO 衛星廣播或通訊系統與另一個採用 3GPP 技術的 NGSO 衛星通訊系統，只要有共用頻道的可能，就需要套用此規範到該 3GPP NTN 系統來減低對該 DVB-S/RCS 系統的干擾，此時該 3GPP NTN 系統中「地面接取設備」的 NTN GW、UE，「衛星」如再生型的 NTN PL gNB，由它們發射的無線電功率在規範下必須受到限制，使得該 DVB-S/RCS 系統相關設備例如「地面接取設備」的 GW、RCST，「衛星」如通透型的 SAT-FW、SAT-RT 等承受的 EPFD 符合規範。

無線電技術共存不會因為是通透型或再生型系統、或通訊系統的不同而有介面主題上的不同。共存規範的主題包括「無線電規範的法律架構、原則與主要建議書」、「衛星服務分類、通訊場型定義與頻譜規範」、「衛星設備頻率之協調、通報、登記與使用期限」、「無線電干擾保護機制與 EPFD 規範」、與「新興衛星技術監理規範與未來趨勢」，對於這些主題所調查的規範內容以及相關建議，於第 5 章說明。

4.3 營運系統對外介面

本節介紹第 2 種介面類型「營運系統對外介面」。

營運系統對外介面通常是傳統電信所稱網路接入點（Point of Presence, PoP），PoP 是衛星通訊系統與公共網際網路（Internet）或企業的私有網路（Intranet）的實體交匯點，因此在前述的架構圖示中即是與其他網路（Other Network）的連接的設備端點。不過，衛星通訊系統雖然以衛星做為通訊設備之一，衛星卻是由不同的衛星營運系統來操控，通常衛星通訊的營運系統不直接操控衛星，是故與衛星營運系統也需要介面，這種介面不是網路之間的 PoP，而是業界在衛星責任分工上另外需要的介面。

在 DVB-S/RCS 系統無論是採用通透型或再生型衛星的系統，都在 GW 採用相同的對外介面對應傳統 PoP，分別示意如圖 13 與圖 14。要注意的是，DVB-S/RCS 系統的網路中心通常沒有直接對其他網路的介面，但 DVB 標準的架構圖示，如圖 3 與圖 4 是將 NCC、GW、NMC 都畫在一起為 SNO，並未明確畫出對外介面是在 GW。然而，DVB-S/RCS 系統並未定義與衛星營運系統的介面，相關內容並未開放。

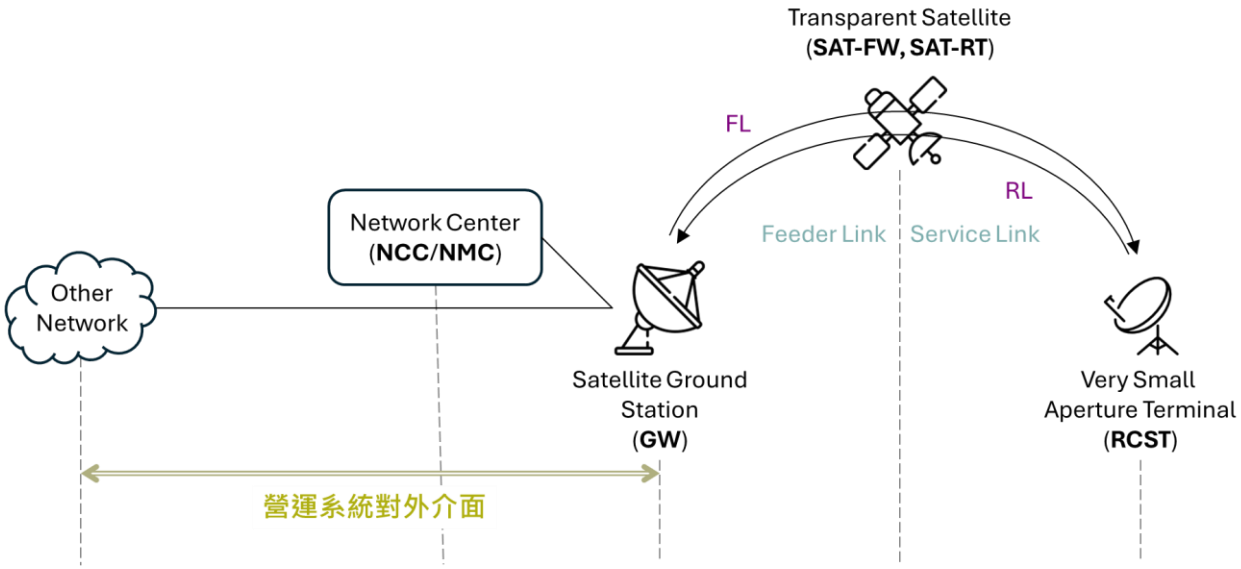


圖 13、DVB-S/RCS 通透型系統的營運系統對外介面

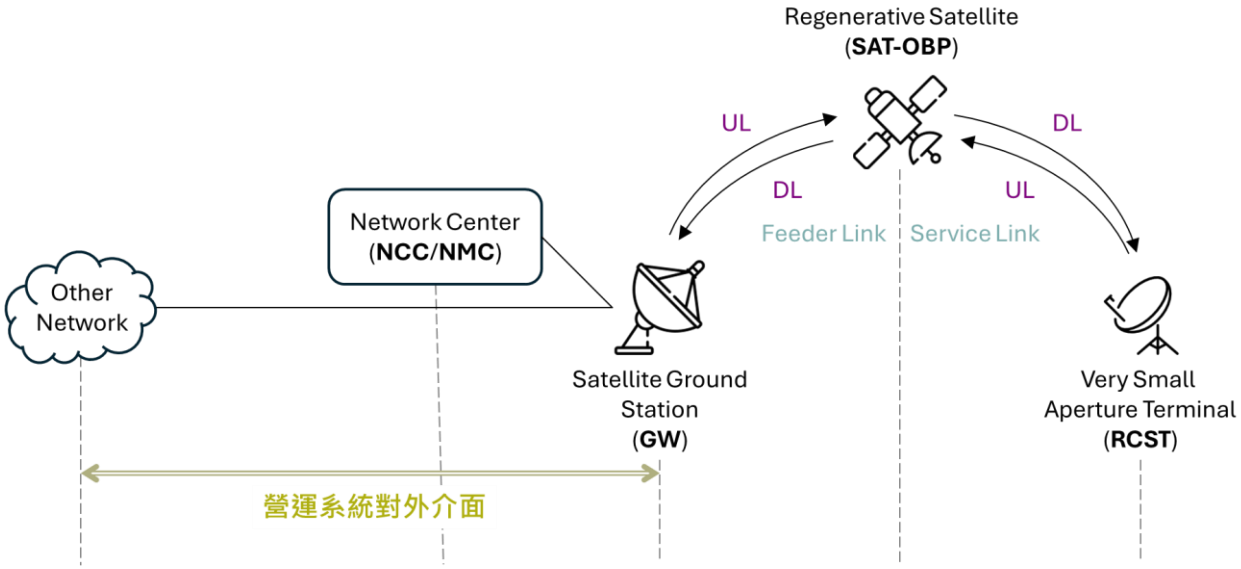


圖 14、DVB-S/RCS 再生型系統的營運系統對外介面

在 3GPP NTN 系統無論是採用通透型或再生型衛星的系統，都在 5GC 採用相同的對外介面對應傳統 PoP，分別示意如圖 15 與圖 16，為圖中標示名為 N6 的介面。3GPP NTN 系統還有定義與衛星營運系統的介面，類似如圖中 5GC 與其他網路的連接，5GC 的管理功能與衛星營運系統之間不是使用圖中的 N6，而是另一種 SbMA 介面。

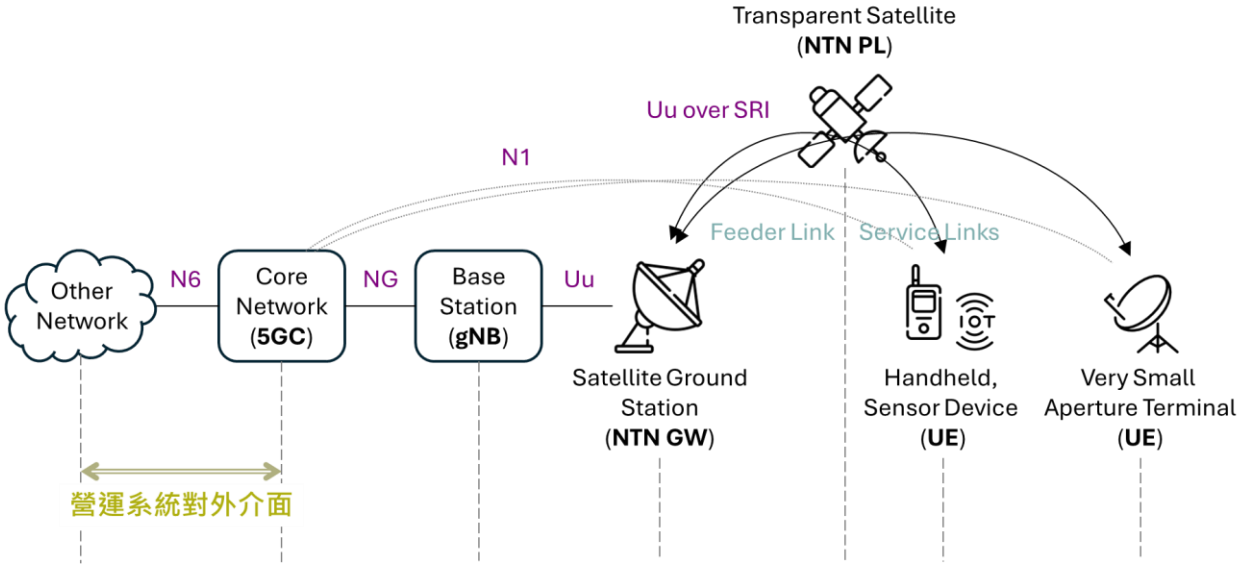


圖 15、3GPP NTN 通透型系統的營運系統對外介面

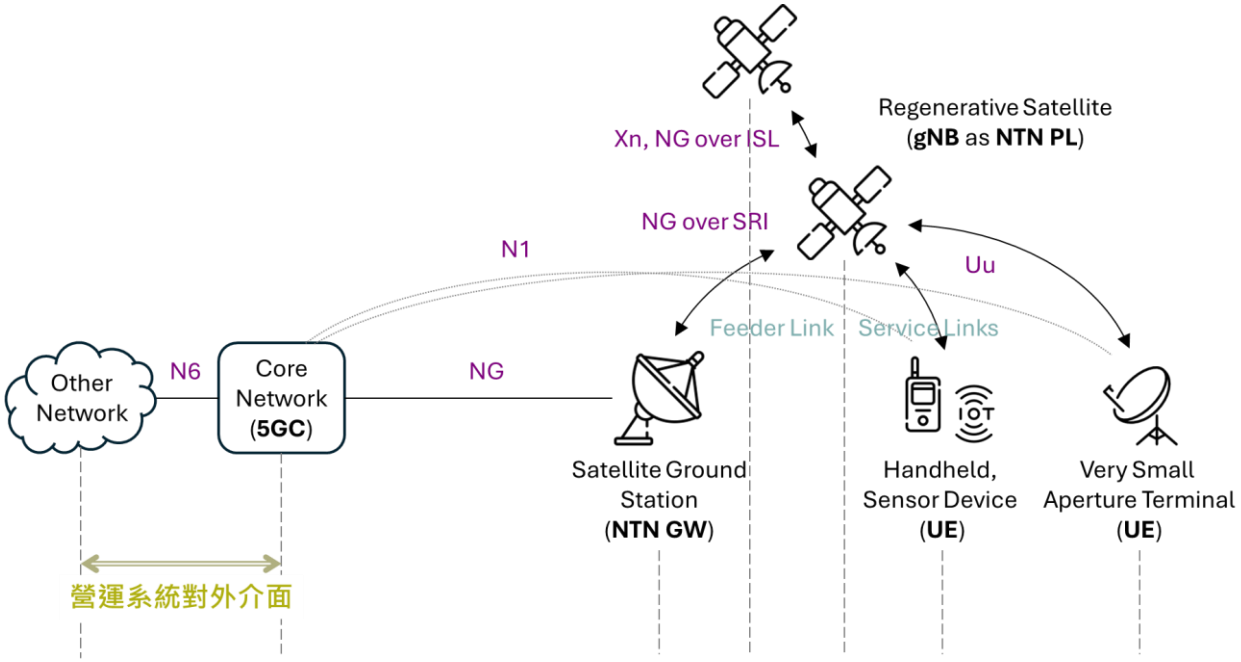


圖 16、3GPP NTN 再生型系統的營運系統對外介面

營運系統對外介面不會因為是通透型或再生型系統而有介面主題上的不同。營運系統對外介面對應 DVB-S/RCS 系統的主題為「DVB-S/RCS 營運系統對應 PoP 介面」，而對應 3GPP NTN 系統的主題則依與其他網路系統、衛星營運系統分為「3GPP NTN 營運系統對應 PoP 的 N6」與「3GPP NTN 營運系統與衛星營運系統的 SbMA 介面」，對於這些主題所調查的標準內容以及相關建議，於第 6 章說明。

4.4 地面接取設備與後端設備介面

本節介紹第 3 種介面類型「地面接取設備與後端設備介面」。

地面接取設備與後端設備介面是系統內在地面各種與後端設備的連接，與此類介面相關的地面接取設備不只是 DVB-S/RCS 系統的 GW、3GPP NTN 系統在地面的 gNB 等設備，也包括在地面需要通過衛星才能通訊的設備，如 DVB-S/RCS 系統 RCST 和 3GPP NTN 系統的 UE。DVB-S/RCS 系統的 RCST 主要是小型衛星地面站（Very Small Aperture Terminal, VSAT）的型態，而 3GPP NTN 系統的 UE 則同時包括手持式（Handheld）的型態與非手持的 VSAT 型態，儘管外型不同但在 NTN 設備層級介面的相容性定義相同。雖然 RCST、UE 在實體上是以無線電直接連接衛星，與網路中心、5GC 等後端設備沒有實體連接，其間仍存在邏輯介面以便給後端設備控制與管理。

在 DVB-S/RCS 系統，即為 GW、RCST 與網路中心（含 NCC 與 NMC）介面，無論是採用通透型與再生型衛星的系統，都是相同的介面，分別示意如圖 17 與圖 18。其中分為 GW 與 NCC/NMC 的介面、RCST 與 NCC/NMC 的介面。

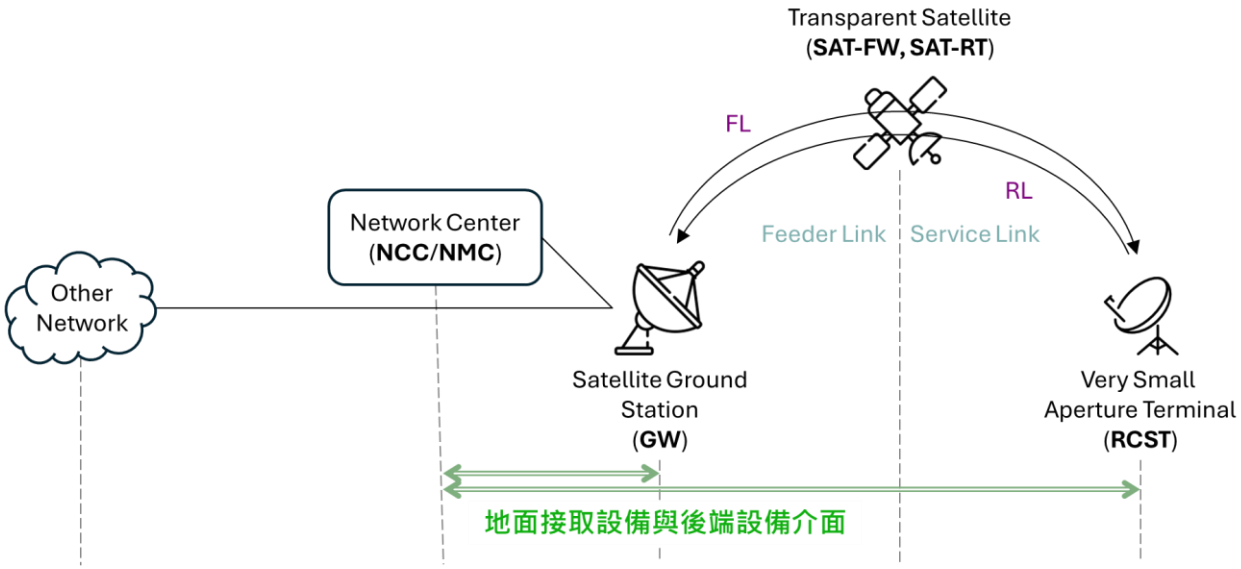


圖 17、DVB-S/RCS 通透型系統的地面接取設備與後端設備介面

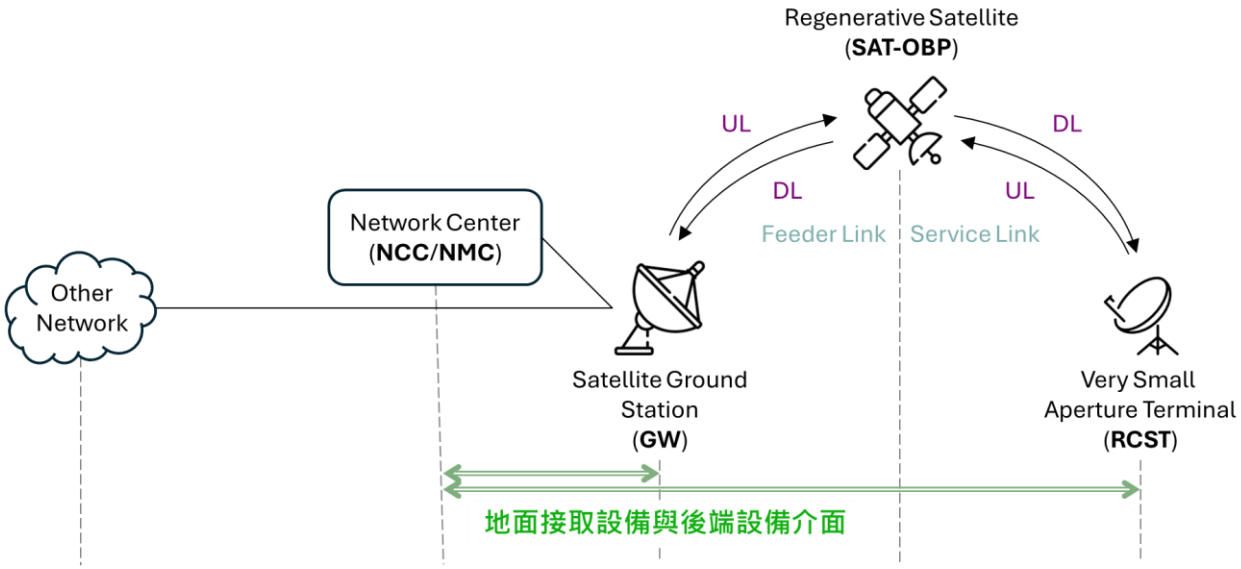


圖 18、DVB-S/RCS 再生型系統的地面接取設備與後端設備介面

在 3GPP NTN 系統，則為無線接取網路（Radio Access Network, RAN）、UE 與核心網路介面，在採用通透型與再生型衛星的系統中，由於 gNB 的變化，會出現用於不同設備的相同介面，分別示意如圖 19 與圖 20。其中分為採用通透型衛星時在地面的 gNB 與 5GC 的 NG 介面、採用再生型衛星時 NTN GW 與 5GC 的 NG 介面、以及 UE 與 5GC 的 N1 介面。要注意當採用再生型衛星時 gNB 從地面移到衛星上，NG 介面會繼續延伸到衛星，這個延伸部分是分類在下一種介面類型「地面接取設備與衛星介面」；但無論系統採用通透型或再生型衛星，UE 與 5GC 的 N1 介面都是相同的。

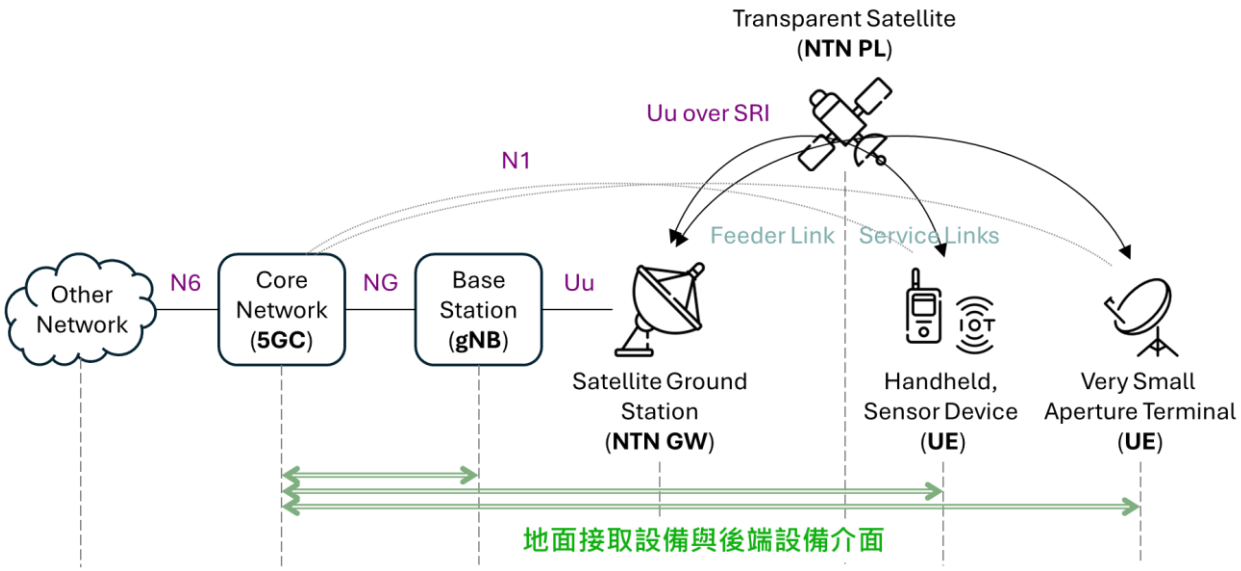


圖 19、3GPP NTN 通透型系統的地面接取設備與後端設備介面

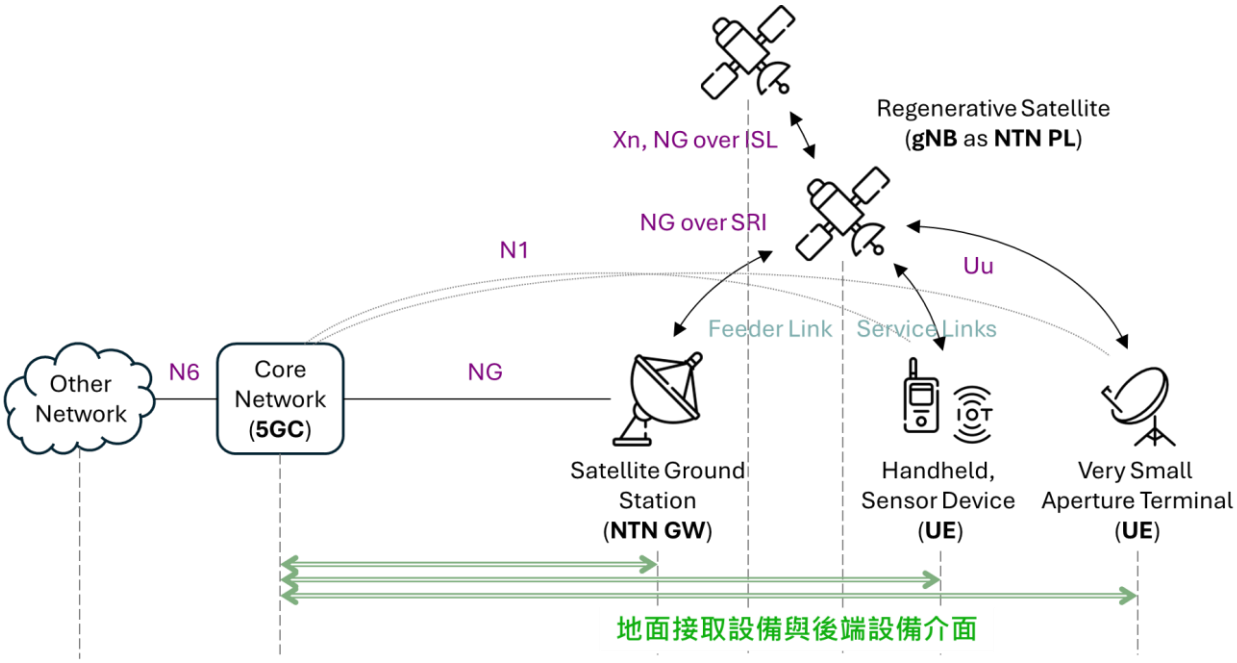


圖 20、3GPP NTN 再生型系統的地面接取設備與後端設備介面

地面接取設備與後端設備介面在 DVB-S/RCS 系統不會因為是通透型或再生型系統而有介面主題上的不同，但在 3GPP NTN 系統為通透型或再生型系統時，會出現用於不同設備的相同介面。地面接取設備與後端設備介面對應 DVB-S/RCS 系統的主題包括「採用衛星不分類型，GW 與 NCC/NMC 的介面」、「採用衛星不分類型，RCST 與 NCC/NMC 的介面」，而對應 3GPP NTN 系統的主題包括「採用通透型衛星時，地面 gNB 與 5GC 的 NG」、「採用再生型衛星時，NTN GW 與 5GC 的 NG」、與「採用衛星不分類型，UE 與 5GC 的 N1」，對於這些主題所調查的標準內容以及相關建議，於第 7 章說明。

4.5 地面接取設備與衛星介面

本節介紹第 4 種介面類型「地面接取設備與衛星介面」。

地面接取設備與衛星介面是系統內在地空之間各種與衛星的連接，與此類介面相關的地面接取設備與上一節提及的相同，但與衛星的連接則完全是基於無線電的介面，故此種介面類型只與具備無線電功能的設備有關，與後端設備無關。

首先，在衛星通訊業界對於地面接取設備與衛星介面，會依地面接取設備在營運商或在用戶而有不同的名稱，在營運商的地面接取設備如 DVB-S/RCS 的 GW、3GPP NTN

的 NTN GW 與衛星的介面通稱為匯集鏈路（Feeder Link），在用戶的地面接取設備如 DVB-S/RCS 的 RCST、3GPP NTN 的 UE 與衛星的介面通稱為服務鏈路（Service Link），無論是在 DVB、3GPP 的標準甚至其他衛星通訊系統，這些通稱都適用。但在 DVB、3GPP 這些標準中對於介面相容性，如第 4.1 節提及在通透型或再生型衛星就有定義上的不同，如 FL、RL 或 DL、UL，於是此類型介面中還有各自專用的其他名稱。

在 DVB-S/RCS 系統，即為 RCST、GW 與衛星介面，在採用通透型與再生型衛星的系統中，如第 4.1 節所述，定義有不同的介面，分別示意如圖 21 與圖 22。其中分為採用通透型衛星時 RCST 與 GW 的 FL、RL 介面、與採用再生型衛星時 RCST/GW 與衛星的 DL、UL 介面。通透型衛星（SAT-FW 與 SAT-RT）不處理 FL 與 RL 介面無線電基頻及基頻以上的訊號形式與協定格式，僅符合射頻相容性定義，只有 RCST 與 GW 才需要符合完整無線電相容性定義，介面的兩端都是在地面；而再生型衛星（SAT-OBP）則與 RCST、GW 一起都要符合 DL 與 UL 介面的完整無線電相容性定義，此時相當於通透型的 FL 被斷開成再生型的 DL 與 UL 介面（RL 也是），DL 與 UL 介面的兩端就是分別在地面與太空。從通透型到再生型衛星的功能變化，通常視為是衛星通訊系統的演進，DVB-S/RCS 在這樣的過程中，地面的 RCST 與 GW 功能相當，僅衛星的功能增加。

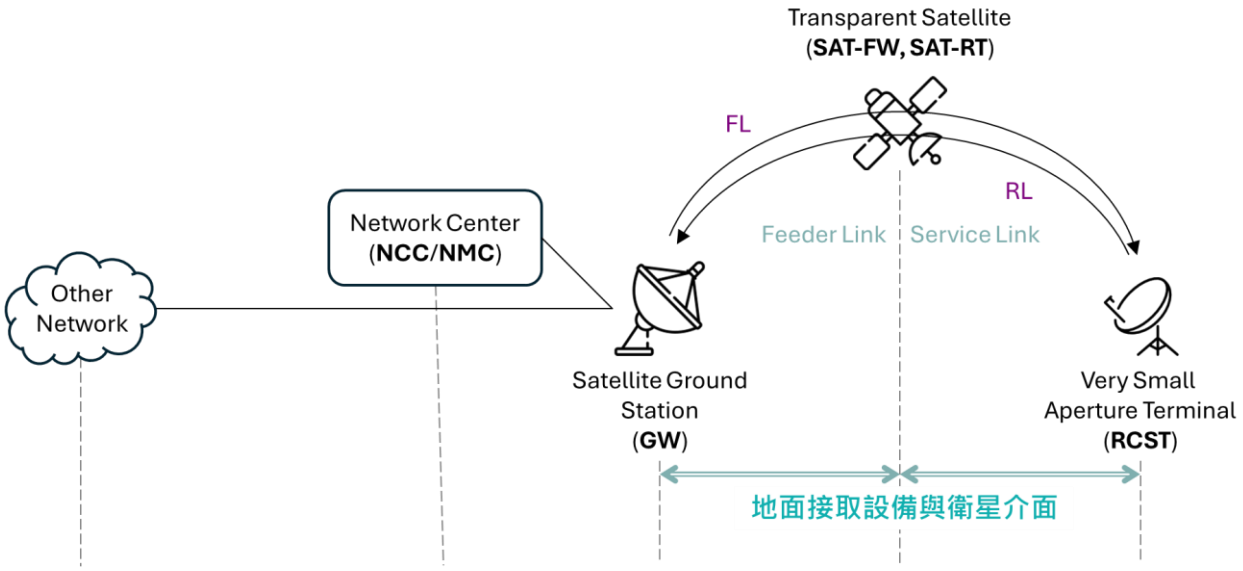


圖 21、DVB-S/RCS 通透型系統的地面接取設備與衛星介面

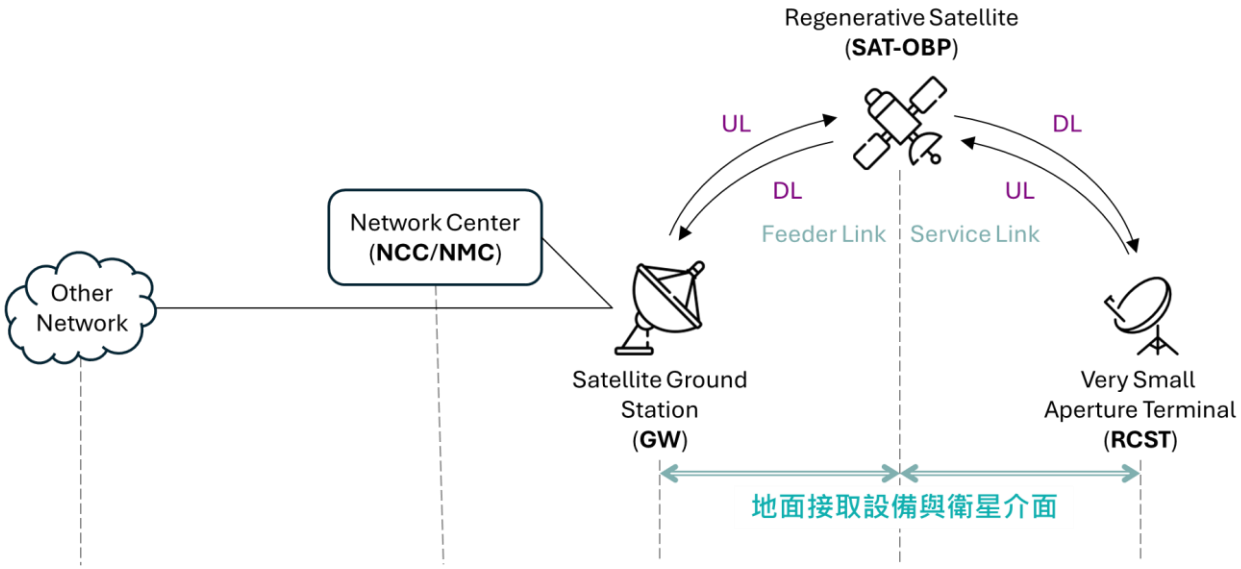


圖 22、DVB-S/RCS 再生型系統的地面接取設備與衛星介面

在 3GPP NTN 系統，則為 UE、NTN GW 與 NTN PL 介面，在採用通透型與再生型衛星的系統中，同樣如第 4.1 節所述，會改變為不同的介面，分別示意如圖 23 與圖 24。3GPP NTN 系統技術對於不同種衛星的介面差異比 DVB-S/RCS 系統技術大很多，並不是單純將兩端都在地面的介面斷開成兩端在太空與地面的介面，而是將兩個介面中共同端點的 gNB 從地面移動到太空。其中分為採用通透型衛星時 UE 與 NTN GW 的 Uu over SRI 介面、採用再生型衛星時 UE 與 NTN PL gNB 的 Uu 介面、採用再生型衛星時 NTN PL gNB 與 NTN GW 的 NG over SRI 介面。同樣地通透型衛星（不含 gNB 功能的 NTN PL）只符合射頻相容性定義，另外 NTN GW 則不一定完全符合 Uu 完整無線電相容性定義（只處理 Uu 的無線電到基頻訊號在未恢復為本來的數據之前，就橋接到以有線連結乘載訊號），Uu 介面有經過 NTN PL 與 NTN GW，但兩端是在路徑上跨過前兩者的 UE 與 gNB，其中從 UE 經過衛星到 NTN GW 的這部分又稱為 Uu over SRI；而再生型衛星 NTN PL gNB 則使 Uu 介面向右縮至 UE 與衛星之間，而使 NG 介面經過 NTN GW 向右延伸到衛星，延伸到空中的這部分又稱為 NG over SRI，另外又增加支援再生型衛星 NTN PL gNB 之間的 Xn，Xn 本來是地面 gNB 之間的介面，在 gNB 從地面移動到太空後則要適應衛星間鏈路（Inter-Satellite Link, ISL），故這部分又稱為 Xn over ISL。於是從通透型到再生型衛星，不只是 NTN PL 有功能上的變化，而 NTN GW 必須從符合 Uu 變成符合 NG，但 NTN GW 卻只要符合這些介面的部份相容性定義，是 3GPP 技術在將地面網路擴展成 NTN 後仍繼續沿用並調整既有的架構才具有的特性。

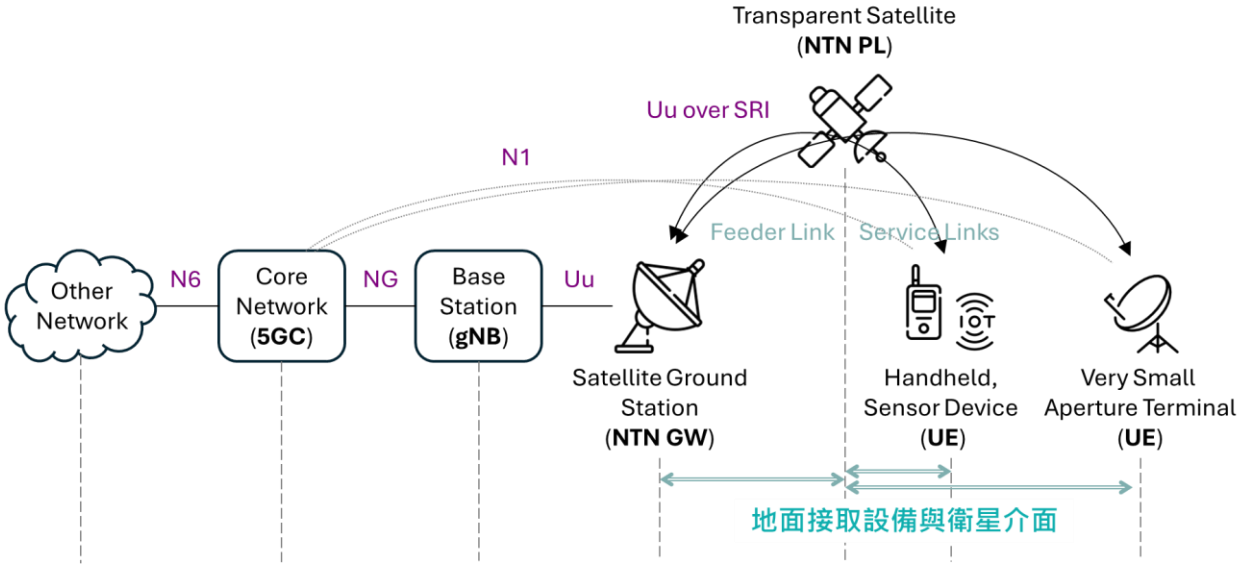


圖 23、3GPP NTN 通透型系統的地面接取設備與衛星介面

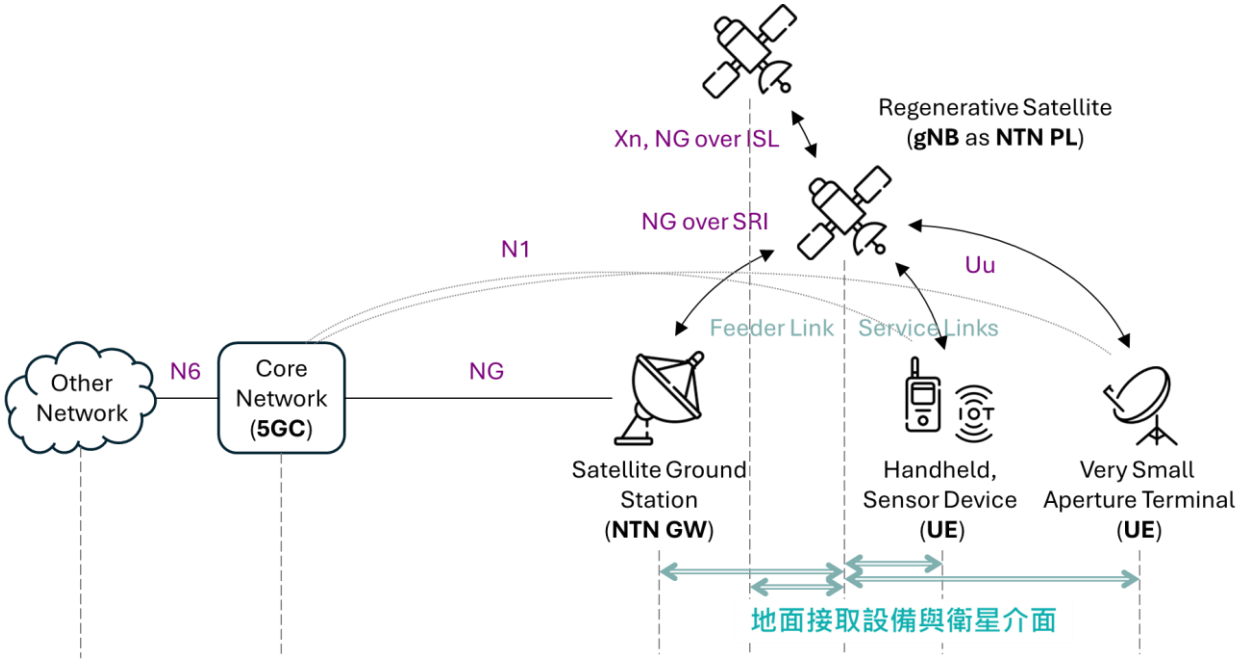


圖 24、3GPP NTN 再生型系統的地面接取設備與衛星介面

地面接取設備與衛星介面在通透型或再生型系統必然有介面主題上的不同，對應 DVB-S/RCS 系統的主題包括「採用通透型衛星時，RCST 與 GW 的 FL、RL 介面」、「採用再生型衛星時，RCST/GW 與衛星的 DL、UL 介面」，而對應 3GPP NTN 系統的主題包括「採用通透型衛星時，UE 與 NTN GW 的 Uu over SRI 介面」、「採用再生型衛星時，UE 與 NTN PL gNB 的 Uu 介面」、「採用再生型衛星時，NTN PL gNB 與 NTN GW 的 NG over SRI 介面」，對於這些主題所調查的標準內容以及相關建議，於第 8 章說明。

4.6 地面接取設備內部單元介面

本節介紹第 5 種介面類型「地面接取設備內部單元介面」。

地面接取設備內部單元介面是將地面接取設備切分為數個單元後，對於單元的各種連接，單元層級如本章開頭所述，是設備的下一個層級。相關設備是前兩節皆有提到的如 DVB-S/RCS 系統的 GW、RCST，3GPP NTN 系統的 NTN GW、UE 等，但其中 UE 只考慮非手持式的較大 VSAT 型態，這些設備通常切分為戶外單元（Outdoor Unit, ODU）與室內單元（Indoor Unit, IDU），於是單元介面即為 ODU 與 IDU 介面，設備內部的單元介面原則上不會因為是採用通透型與再生型衛星的系統而改變，示意如圖 25。由於衛星通訊系統不直接規範單元介面，只要如此切分，用於這些單元的介面算是通用的。

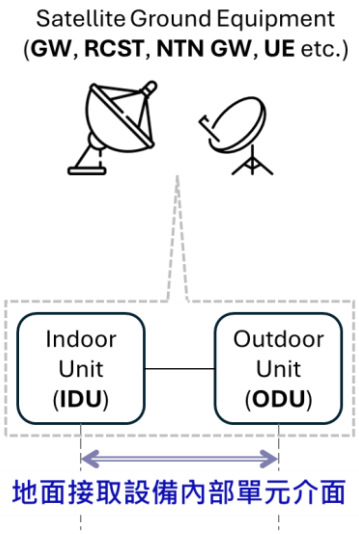


圖 25、地面接取設備內部單元介面

而傳統上 3GPP 地面網路的基站也採用類似的切分，只是命名為無線電單元（Radio Unit）與基頻單元（Baseband Unit, BBU），仍為相近的架構，示意如圖 26，RU 與 BBU 介面是稱為前置（Fronthaul, FH），如圖中標示的 FH 介面。

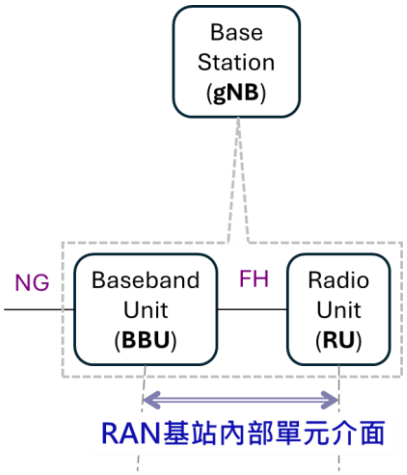


圖 26、3GPP RAN 基站內部單元介面

單元層級介面是希望讓單元能由不同廠商製造而制定的，如果不需要不同廠商製造不同的單元，這種介面就不需要提供給其他廠商，更沒有機會形成標準。但在產業裡這些設備內部的單元由不同廠商製造的情況已經很常見，自然也會出現標準。就如本章開頭所述，在通訊系統標準的設備及其介面，由設備內單元介面的標準所補充。

地面接取設備內部單元介面原則上不會在通透型或再生型系統而有不同，甚至也可能通用在不同通訊系統中的設備裡，主題包括「類比中頻（Analog IF）連結」、「IEEE-ISTO 數位中頻互通（DIFI）」、「開放天線數據機管理介面協定（OpenAMIP）」、與「開放升頻器數據機介面協定（OpenBMIP）」，而用來特別對應 3GPP 的 RAN 基站時的主題包括「通用公共無線電介面（CPRI）」與「增強型通用公共無線電介面（eCPRI）」，對於這些主題所調查的標準內容以及相關建議，於第 9 章說明。

4.7 衛星內部次系統／單元介面

本節介紹第 6 種介面類型「衛星內部次系統／單元介面」。

衛星內部次系統／單元介面是基於傳統上衛星系統有切分為階層式次系統與單元的系統工程方法，而需要制定的介面，在次系統層級是衛星本體（Spacecraft Bus, BUS）與數個次系統的介面，而在單元層級是衛星本體內部單元的介面或次系統內部單元的介面。而衛星通訊系統中位於衛星的通訊設備，是一種衛星酬載（Payload），與衛星本體組合，衛星酬載在衛星系統工程視為次系統，不只是衛星需要制定次系統層級介面，當衛星酬載有切分單元的架構時，也需要制定單元層級介面，示意如圖 27。

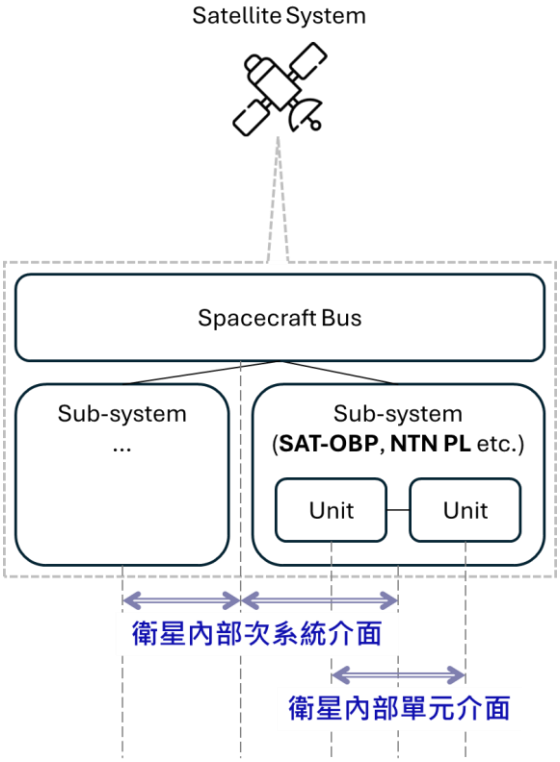


圖 27、衛星內部次系統/單元介面

如 DVB-S/RCS 採用通透型衛星 SAT-FW、SAT-RT，或採用再生型衛星 SAT-OBP，都需要有對應通訊功能的衛星酬載與衛星本體組合，又如 3GPP NTN 的 NTN PL 就是指衛星酬載，也是要和衛星本體組合，必須相容衛星的次系統層級介面。

衛星內部次系統／單元介面不只是衛星系統決定的，原則上也不會因為是採用通透型與再生型衛星的系統而改變，相同衛星系統與內部介面也有機會用於不同的衛星通訊系統。酬載次系統介面主題包括「基本電氣、機構、與熱介面」、「CCSDS 遙測與命令標準」、「MIL-STD-1553 高可靠度匯流排」、「SAE 時間觸發乙太網路（TTEthernet）」、「ECSS SpaceWire 與 SpaceFibre」、與「ANSI/VITA SpaceVPX 背板介面整合」，而單元介面可以採用相同介面，甚至也能不用階層式架構讓單元直接與衛星本體共用。另外，衛星為提高可靠度，有的會加入冗餘（Redundant）架構以便容錯，也會影響次系統與單元介面的規劃，對於這些主題所調查的標準內容以及相關建議，於第 10 章說明。

4.8 O-RAN 多設備內部單元介面

本節介紹第 7 種介面類型「O-RAN 多設備內部單元介面」。

O-RAN 多設備內部單元介面如本章開頭所述，是在 3GPP NTN 發展的未來趨勢中發生的特殊情況，無法概括在前 6 種介面類型下所考慮的另一種介面類型。為瞭解發生這種情況的背景，需要先介紹 3GPP RAN 基站單元切分的演進。

傳統上 3GPP RAN 基站設備通常由某家廠商主導設備的架構，在開放架構的標準出現前，如第 4.6 節所述常見的設備切分為 RU 與 BBU，示意如圖 28 的左圖(a)，兩個單元間的介面稱為前置（Fronthaul, FH）。之後基站的開放架構標準 O-RAN 出現，其設備切分為開放型無線電單元（O-RAN Radio Unit, O-RU）、開放型分散式單元（O-RAN Distributed Unit, O-DU）、與開放型中央單元（O-RAN Central Unit, O-CU），示意如圖 28 的右圖(b)，其中 O-DU 與 O-CU 之間有增加新的介面，通稱為中置（Midhaul），在圖中是標示為 F1 的介面，而 O-RU 與 O-DU 之間的介面則稱為開放前置（Open Fronthaul, O-FH）。O-RAN 中還有一種單元稱為無線接取網路智慧控制器（RAN Intelligent Controller, RIC），RIC 用來加強對 O-DU 與 O-CU 的智慧化與自動化與管理與控制，但不像前 3 種單元是分工實現 5G 無線電訊號與協定的處理，且不見得是放在基站內部，暫且不作為設備內部單元要探討的主題。

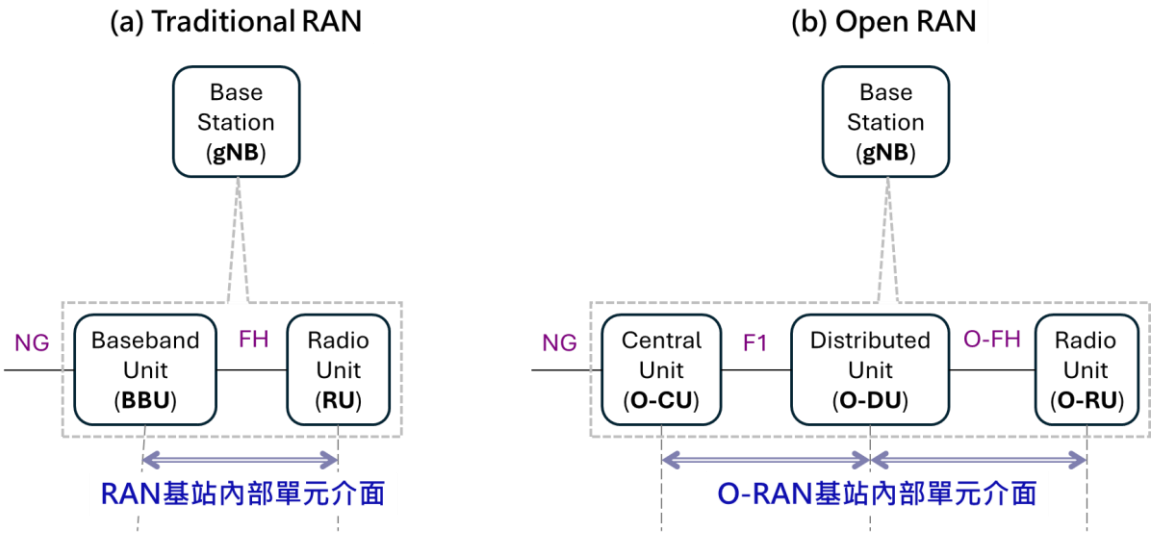


圖 28、3GPP RAN 基站內部單元介面 (a) 傳統 RAN 架構 (b) O-RAN 架構

在 3GPP NTN 系統採用通透型衛星時，O-RAN 對於地面的 gNB 內部單元 O-RU、O-DU、O-CU 的介面，相當於如第 4.6 節所介紹的地面接取設備內部單元介面的類型，示意如圖 29；然而在 3GPP NTN 系統採用再生型衛星時，若與第 4.1 節介紹的架構有些不同，只考慮部分 gNB 功能移到衛星上的話，在 gNB 設備採用 O-RAN 架構時，就會是

一部份的 O-RAN 單元如 O-CU 留在地面基站，一部分的 O-RAN 單元如 O-RU 與 O-DU 則移到衛星上，示意如圖 30，變成單元層級介面有跨越多個設備的情況，這使得其中的 O-FH 介面還在同一個設備即衛星內部，而 F1 介面則會跨出設備，從地面基站出來經過 NTN GW 連接到太空的衛星，由於 F1 介面在地面本來沒有無線電定義，這時需要適應 SRI，故稱為 F1 over SRI，這個情況與第 4.1 節介紹過 3GPP 本來的再生型系統架構不同，最特殊的就是 O-RAN 的單元層級介面中有的變成設備層級介面。

比較一下這裡介紹的通透型系統的 O-RAN 介面與再生型系統的 O-RAN 介面，其中的 O-FH 都是出現在設備內部，在通透型系統時是還在地面的 gNB 內部，而在再生型系統系統時則變成在衛星內部，這使得還在地面的 O-FH 與移到太空衛星內部的 O-FH，必須配合不同設備內部的介面。O-RAN 在 3GPP NTN 系統中架構的變化與介面的型態，尚未在 O-RAN 標準完備，這些介面的標準化進度仍需要再後續觀察。

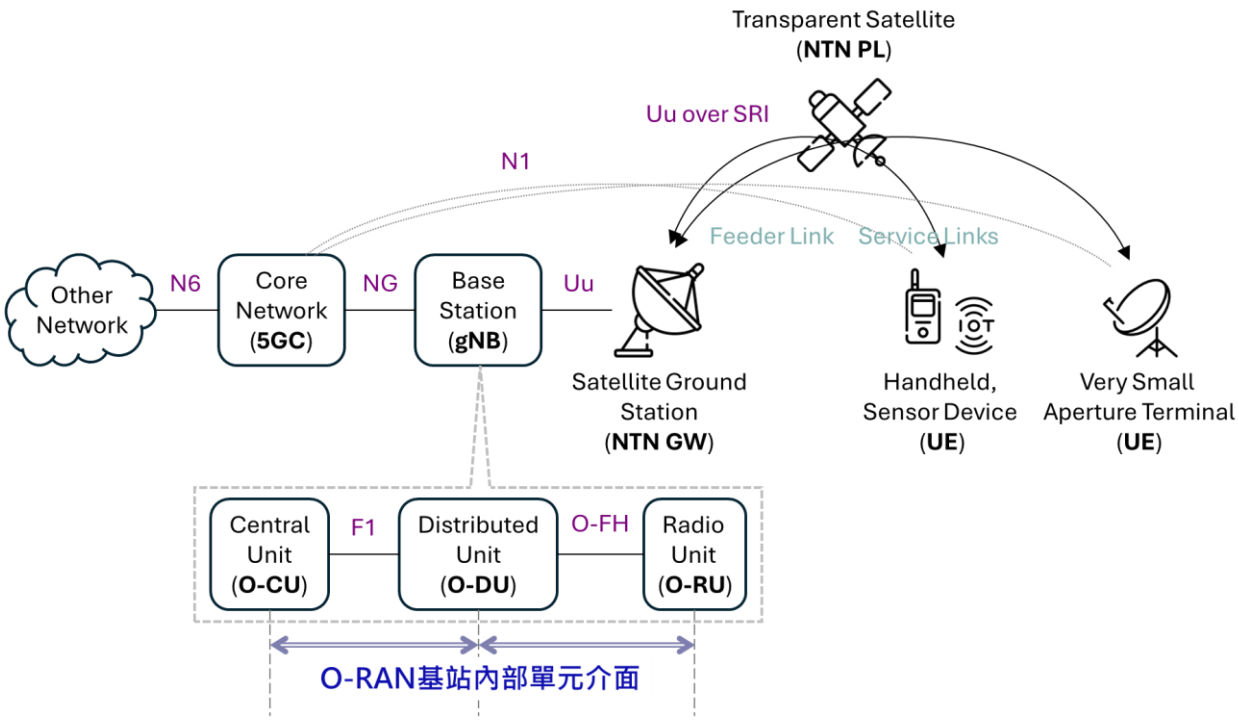


圖 29、3GPP NTN 通透型系統的 O-RAN 基站內部單元介面

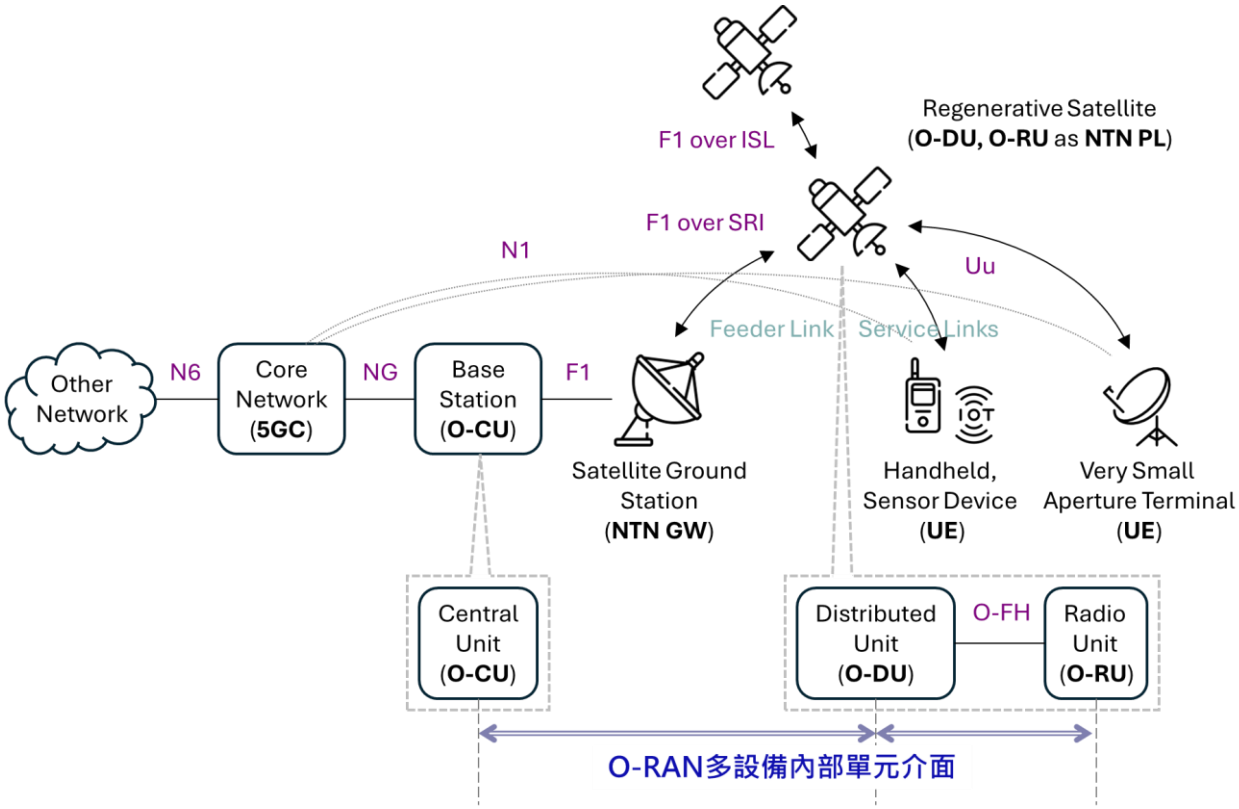


圖 30、3GPP NTN 再生型系統的 O-RAN 多設備內部單元介面

O-RAN 多設備內部單元介面只能對應 3GPP NTN 系統，且在採用通透型與再生型衛星的系統可能會有很大的不同，尤其是再生型系統的特殊情況，介面主題包括「採用通透型衛星時，地面 gNB 內部單元的 O-FH 與 F1」、「採用再生型衛星時，NTN PL 內部 O-RU 與 O-DU 的 O-FH」、「採用再生型衛星時，NTN GW 與 NTN PL -DU 的 F1 over SRI」、與「採用再生型衛星時，NTN GW 與地面 O-CU 的 F1」，對於這些主題所調查的標準內容以及相關建議，於第 11 章說明。

4.9 測試及資安方面

在以上各節介紹 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 系統架構，與 7 種通訊介面類型之後，本節介紹與這些系統相關的設備與單元測試方面，以及衛星通訊的資安方面。

在測試方面，由於衛星通訊系統中不只是在地面有設備，還在有運作在太空環境中的衛星酬載，對於系統中的設備，包括各地面接取設備與衛星酬載，皆需要符合該通訊系統標準的要求，但可以在地面運作的設計很難在發射升空後與在太空環境中維持功能

正常，所以廠商設計的通訊酬載還要符合額外的相關測試標準後才能採用。

對應設備與單元測試的主題包括「監理標準與 GSOA SOMAP」、「DVB 規格書中的符合性測試」、「3GPP RAN5 符合性測試」、與「O-RAN 測試規格」，而對應衛星酬載額外測試的主題包括「ECSS 的太空硬體環境與品保」、「ANSI/AIAA 太空相關測試」、「NASA-STD 環境標準」、「軍用與 ITU-R EMI/EMC 規範」、與「GEA IPC 製造品保」，對於這些主題所調查的標準內容，於第 12 章說明。

在資安方面，雖然在衛星通訊開始蓬勃發展之後，與衛星通訊相關的資安問題也就開始受到高度重視，但是目前相關的標準仍非常少見，更是缺乏針對不同衛星通訊系統甚至設備的資安標準，有的政府或組織已經發布相關指引，或是較為通用的標準。於是，本文件先從可能較受重視的美國與台灣已經發表的指引或標準進行調查。

目前調查到與美國與台灣衛星通訊資安相關的主題包括「美國政府 SPD-5 指引」、「NASA 太空資產保護標準」、「NIST 安全框架」、與「台灣 TAICS 資安標準」，對於這些主題所調查的指引與標準內容，於第 13 章說明。

5. 無線電技術共存

本章延續第 4.2 節，包括對應「無線電共存」所調查的規範內容以及相關建議。

5.1 ITU 的無線電規範

5.1.1 無線電規範的法律架構、原則與主要建議書

(a) 設備與單元

無線電台（Radio Stations）；地球靜止衛星軌道（Geosynchronous Satellite Orbit, GSO）的衛星與地球站（Earth Station）；非地球靜止衛星軌道（Non-Geostationary Satellite Orbit, NGSO）的衛星與地球站（Earth Station）。

(b) 主要內涵

ITU 的《無線電規範》（Radio Regulations, RR）是規範全球無線電通訊服務與頻率使用的核心法律文件，其地位等同於國際條約。該規則作為 ITU《組織法》與《公約》的補充，法律效力涵蓋全球約 200 個條約國，規範範圍包括從 9 kHz 至 300 GHz 的電磁波頻譜分配，與其他有利於無線電通訊的相關要求。為因應衛星技術與通訊產業的快速變遷，該規則由世界無線電通訊大會（World Radiocommunication Conference, WRC）每三至四年進行修訂，以確保國際監理框架能與時俱進。

《無線電規範》的法律架構嚴謹且層次分明，內容主要分為四卷：第一卷為條款（Articles），定義術語、服務類別、頻率分配及行政程序；第二卷為附錄（Appendices），包含詳細的技術參數、頻率指配計畫與幾何模型；第三卷為決議與建議書（Resolutions and Recommendations）；第四卷則是經引用併入國際電信聯盟無線電部門（International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, ITU-R）建議書。核心原則奠基於對無線電頻率與衛星軌道資源的理性、有效與經濟使用。規則明確指出，頻譜與軌道是有限的自然資源，必須確保各國能公平且平等地獲取，並特別保障開發中國家的需求與特定國家的地理現狀。此外，防止有害干擾是其最重要的法律目標，所有電台的設置與運

行均須符合技術參數，以免損害其他會員國合法運作的無線電服務。

在主要建議書與技術規範方面，ITU 透過一系列文件落實監理。例如 ITU-R S.1503-4 建議書提供核心演算法，用以檢查 NGSO 衛星網路是否符合第 22 條（Article 22）規定的等效功率通量密度（Equivalent Power Flux Density, EPFD），而《小型衛星手冊》則為奈米與微型衛星的佈署提供法律指引與最佳實踐。

在行政程序上，規則確立協調（Coordination）、通報（Notification）與登記（Recording）三階段流程。任何行政當局在將頻率指配投入使用前，必須依據第 9 條與第 11 條（Article 9、Article 11）與可能受影響的國家達成協議，並在國際頻率登記總表（Master International Frequency Register, MIFR）正式紀錄，方能獲得國際認可與保護。

(c) 相關文獻

(1) ITU RR Vol.1

ITU, "Radio Regulations (RR) Volume 1: Articles", Edition of 2024。該文件為衛星通訊之國際條約，定義全球頻率分配之法律框架；其中第 3 條（Article 3）確立軌道與頻譜資源必須「理性、有效且經濟使用」之核心原則。

(2) ITU-R 1503-4

ITU-R, Recommendation 1503-4, "Functional description to be used in developing software tools for determining conformity of non-geostationary-satellite orbit fixed-satellite service systems or networks with limits contained in Article 22 of the Radio Regulations", 2023-09。該文件提供全球公認之干擾模擬演算法；其中 Annex 1 定義 EPFD 計算幾何模型、PFD、EIRP 掩模格式及累積分布函數（CDF）之產出邏輯。

5.1.2 衛星服務分類、通訊場型定義與頻譜規範

(a) 設備與單元

固定衛星服務（Fixed Satellite Service, FSS）的地球站（Earth Station）；行動衛星服務（Mobile Satellite Service, MSS）的地球站（Earth Station）；廣播衛星服務（Broadcasting-

Satellite Service, BSS）的接收器；衛星間服務（Inter-Satellite Service, ISS）。

(b) 主要內涵

在國際電信監理體系中，ITU 透過其制定的《無線電規範》為全球無線電頻譜的使用建立統一的法律框架與術語定義。ITU 在規則中定義約 40 種不同類別的無線電通訊服務，這些定義是各國行政當局指配頻率與協調干擾時的基本法律依據。對於衛星通訊而言，明確劃分服務類別是確保全球通訊互不干擾、有序運行的核心基礎。

其中最基礎的服務類別為 FSS，其定義為利用一個或多個衛星，在處於給定位置的地球站之間進行的無線電通訊服務。這類服務通常用於骨幹網路傳輸，且在某些情況下，FSS 也包含其他空間服務所需的匯集鏈路（Feeder Links）。相對於固定位置，MSS 則提供行動地球站與太空站（Space Station）之間，或太空站之間的通訊。MSS 進一步細分為陸地行動衛星、海事行動衛星及航空行動衛星等類別，以因應不同載具的需求。

BSS 則是指透過太空站發送或轉發訊號，旨在供公眾直接接收的無線電通訊服。BSS 的「直接接收」概念涵蓋使用小型天線的個別接收，以及透過較複雜天線系統供多用戶使用的集體接收。而 ISS 則與前述服務不同，它專門提供人造衛星之間鏈路的無線電通訊服務，亦即「太空對太空」的連接。

為具體落實這些服務的運行，《無線電規範》第 5 條（Article 5）提供詳盡的頻率分配表。為便利分配，ITU 將全世界劃分為三個區域（Regions）：第一區涵蓋歐洲、非洲與前蘇聯地區；第二區為美洲與格陵蘭；第三區則包含亞洲大部分地區與大洋洲。頻率分配表詳細列出各類服務在不同區域所獲得的頻譜權限，並區分為一級服務（Primary Services）次級服務（Secondary Services）。一級服務在分配表中以「大寫字母」表示（如 FIXED-SATELLITE），享有優先使用權且受有害干擾之保護；次級服務則不得對一級服務造成干擾，且無法要求免受一級服務的干擾保護。這種透過區域劃分與服務分級的制度，確保軌道與頻譜這類有限的資源能獲得理性、有效且經濟的公平使用。

(c) 相關文獻

(1) ITU RR Article 5

ITU, Radio Regulations (RR) Article 5, "Frequency allocations", Edition of 2024。該文

件將全球劃分為三個區域（Regions），並詳細列出各服務類別在不同頻段之權限；其中區分 Primary（一級）與 Secondary（次級）服務，確立干擾保護之優先順序。

(2) ITU RR Article 1

ITU, Radio Regulations (RR) Article 1, "Terms and definitions", Edition of 2024。該文件定義約 40 種無線電服務，包含 FSS、MSS、BSS 等衛星服務之技術邊界。

5.1.3 衛星設備頻率之協調、通報、登記與使用期限

(a) 設備與單元

衛星網路（Satellite Networks）內的相關無線電設備。

(b) 主要內涵

在衛星通訊的國際管理體系中，協調（Coordination）、通報（Notification）與登記（Recording）是確保全球無線電頻譜有序使用的核心行政程序，也是各國衛星指配獲得國際認可與法律保護的基礎。這套程序被詳細規定在 ITU《無線電規範》的第三章及相關條款中，其首要目的在於避免不同衛星網路間的有害干擾，並促進有限軌道與頻譜資源的公平獲取，目前對於干擾避免已有明確規範的是限制 NGSO 衛星網路對 GSO 衛星網路的干擾。不過要注意的是，雖然 ITU 的 GSO 是指在地面看起來衛星是靜止的地球靜止衛星軌道，與地球靜止軌道（Geostationary Earth Orbit, GEO）同義，但在實務上，ITU 的 GSO 不只有地球靜止軌道，也包括相同高度但在地面看起來未必是靜止的軌道，亦即地球同步軌道（Geosynchronous Orbit, GSO），都受到規範的保護。

第一階段是依據《無線電規範》第 9 條（Article 9）協調程序。行政當局在將任何頻率指配投入使用前，必須先與可能受影響的其他行政當局達成協議，以確保技術相容性。這包括 GSO 衛星系統之間的協調，以及 GSO 與 NGSO 系統之間的交互分析（如《無線電規範》9.7A 與 9.7B）。協調過程通常涉及雙邊或多邊談判，若未能在規定期限內完成程序，該指配將無法獲得防範他國干擾的法律保障。

第二階段是依據《無線電規範》第 11 條（Article 11）通報程序。一旦行政當局完成

必要的協調，便須將頻率指配的技術特性通報給 ITU 無線電通信局（Radiocommunication Bureau, BR）。BR 會對通報內容進行技術審查，核實其是否符合頻率分配表及干擾限制指標（例如 EPFD 限制），並隨後將其記錄在 MIFR 中。

最後的登記程序代表該指配已成功完成行政與技術審核，正式獲得「國際認可（International Recognition）」。進入 MIFR 的指配享有優先權，能免受後來指配的有害干擾，其他國家在規劃新網路時必須將其納入考量。行政當局通常需在規定時間內（如七年）將指配投入實際使用，否則相關登記將面臨失效或取消。

為因應衛星技術的飛速發展，這些規範並非固定不變。世界無線電通訊大會（WRC）每三至四年召開一次，對《無線電規範》進行修訂與更新。這種演進機制確保國際監理框架能兼顧技術創新與頻譜資源的理性使用。

(c) 相關文獻

(1) ITU RR Article 9

ITU, Radio Regulations (RR) Article 9, "Procedure for effecting coordination", Edition of 2024。該文件定義行政當局間的協調義務；其中 Section II 詳細描述 GSO 網路間、以及 GSO 與 NGSO 間為確保技術相容性所必須達成的協議程序。

(2) ITU RR Article 11

ITU, Radio Regulations (RR) Article 11, "Notification and recording of frequency assignments", Edition of 2024。該文件定義指配如何正式進入 MIFR；其中描述 BR 如何進行技術審查，並在成功後賦予該指配「國際認可」地位。

5.1.4 無線電干擾保護機制與 EPFD 規範

由於 NGSO 系統如低軌寬頻衛星星系的快速發展與大規模佈署，衛星通訊領域面臨前所未有的頻譜共享挑戰。在促進技術創新的同時，確保傳統 GSO 衛星系統不受有害的干擾，ITU 在《無線電規範》中建立一套嚴格的技術指標與法律框架。其核心機制在於定義 EPFD，並透過第 22 條（Article 22）限制與 ITU-R S.1503-4 建議書來落實監理。

(a) 設備與單元

非地球靜止衛星軌道（Non-Geostationary Satellite Orbit, NGSO）的衛星發射站與地球站（Earth Station）；地球靜止衛星軌道（Geosynchronous Satellite Orbit, GSO）的地球站（Earth Station）天線。

(b) 主要內涵

EPFD 是一個用來衡量 NGSO 衛星系統對 GSO 接收站產生干擾總量的綜合性指標。根據規則定義，EPFD 是 NGSO 系統中所有可見發射站，在考慮 GSO 接收天線的離軸判別力（Off-axis Discrimination）後，在 GSO 地面站或太空站產生的功率通量密度之總和。與傳統的功率通量密度（Power Flux Density, PFD）不同，EPFD 的計算考慮接收端的指向性特性。PFD 僅代表無線電訊號通過單位面積的功率密度，而 EPFD 則引入受干擾系統（Victim）接收天線的相對增益。這意味著，如果干擾源位於 GSO 天線的主波瓣之外，其對系統性能的實際影響將隨偏軸角度的增加而減弱。因此，EPFD 本質上是衡量受害者接收端干擾程度的動態量化指標。其計算涉及多個變數，包括發射站的射頻功率、天線增益、發射站與接收站之間的距離，以及接收站天線在干擾源方向上的相對增益與最大增益比值。為實踐對 GSO 系統的保護義務，ITU 在《無線電規範》第 22 條（Article 22）中明訂，NGSO 系統不得對 GSO FSS 與 BSS 網路造成不可接受的干擾。這項保護義務具體落實為針對三種不同干擾路徑的 EPFD「硬性限制（Hard Limits）」。

(1) 下行方向的 EPFD（epfd↓）

規範 NGSO 太空站發射對 GSO 地球站接收造成的干擾。規則針對不同的頻段（如 Ku、Ka 頻段）與不同尺寸的 GSO 地球站天線，訂定隨時間百分比變化的限制曲線。

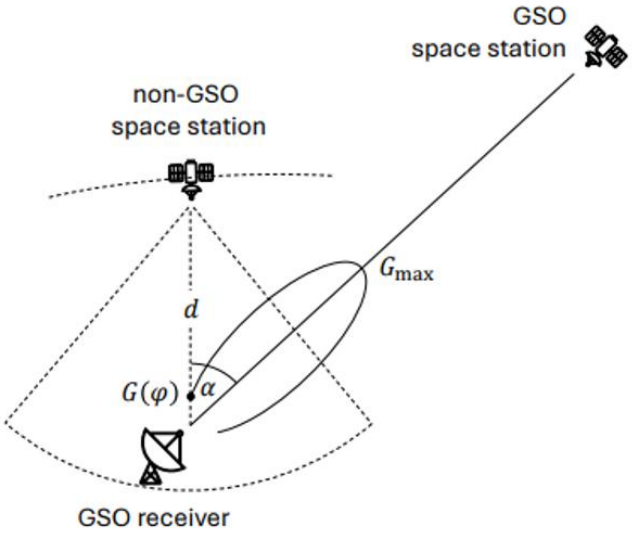


圖 31、規範下行方向干擾的 EPFD 示意

(2) 上行方向的 EPFD（epfd↑）

規範大量佈署的 NGSO 地球站發射對 GSO 太空站接收造成的干擾。

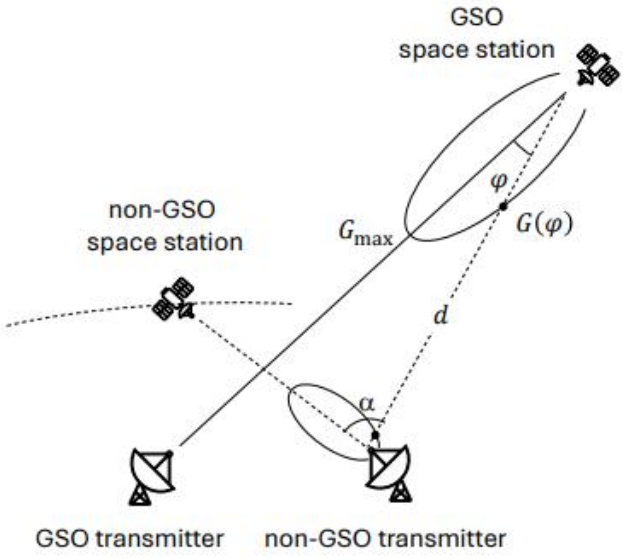


圖 32、規範上行方向干擾的 EPFD 示意

(3) 衛星間方向的 EPFD（$epfd_{IS}$）

規範 NGSO 太空站發射對同樣位於太空軌道的 GSO 太空站接收造成的干擾。

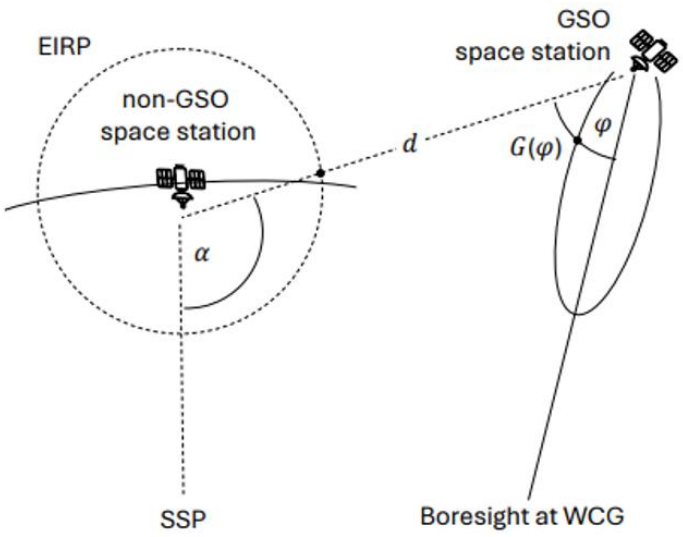


圖 33、規範衛星間方向干擾的 EPFD 示意

這些限制值不僅涵蓋單一系統的干擾指標，還透過第 76 號決議（Resolution 76）聚合 EPFD 限制，確保 GSO 網路在複雜的多星系環境下仍能維持服務可用率。如果 NGSO 營運商無法證明符合這些限制，其頻率指配將無法獲得 ITU BR 的有利審查結論，進而失去國際認可與保護。

(4) 合規性驗證的科學基準

由於 NGSO 衛星不斷移動且系統架構極其複雜，傳統的靜態分析無法準確評估干擾。ITU-R S.1503-4 建議書提供全球公認的「功能描述與演算法」，作為開發驗證軟體的標準基準。ITU 無線電通信局即使用依此開發的軟體工具來檢查 NGSO 的通報資料是否符合第 22 條（Article 22）的限制。其演算法的核心機制包含以下關鍵步驟。

掩模（Mask）生成：要求申請行政當局提供太空站的 PFD 掩模與地球站的 EIRP 掩模，這些掩模包絡系統在整個壽命期間內，無論採用何種資源分配或切換策略，所產生的最大輻射包絡。

統計模擬與累積分布函數（CDF）產出：最壞情況幾何模型（Worst-Case Geometry, WCG）演算法會搜尋最容易產生干擾的空間位置與天線指向角度，在選定的 WCG 下，軟體會進行足夠長時間的模擬，計算干擾的統計分布，並產出 CDF 曲線。

合格判定：最後將生成的 CDF 曲線與《無線電規範》第 22 條（Article 22）的法定限制門檻進行比對，得出「通過」或「不通過」的最終結論。

(5) 監理趨勢：從靜態保護到動態效率

儘管 EPFD 規範已沿用二十餘年，但隨著衛星技術的演進，如自適應編碼與調變（Adaptive Coding and Modulation, ACM），現行的靜態功率限制被認為過於保守，可能阻礙頻譜效率。美國聯邦通訊委員會（Federal Communications Commission, FCC）目前正諮詢擬議，考慮是否將 EPFD 限制改採更具彈性的「傳輸量降階方法（Degraded Throughput Methodology, DTM）」。DTM 專注於動態評估干擾對 GSO 網路實際「傳輸量」與「可用率」的影響，這反映出衛星監理政策正從「靜態保護」轉向「動態效率導向」的重大轉折。總結而言，EPFD 是確保衛星軌道與頻譜資源理性、有效且經濟使用的技術基石。透過第 22 條（Article 22）的法律約束與 ITU-R S.1503-4 建議書的技術驗證，ITU 為全球衛星產業建立一個可預測且無干擾的共存機制，支持低軌衛星星系的佈署，同時也保護 GSO 衛星的服務品質。

(c) 相關文獻

(1) ITU RR Article 22

ITU, Radio Regulations (RR) Article 22, "Space services", Section II, Edition of 2024。該文件制定保護 GSO 系統免受 NGSO 干擾之「硬性限制」；其中 Table 22-1A 至 22-1E 詳列隨時間百分比變化之 epfd↓、epfd↑與 $epfd_{IS}$ 數值門檻。

(2) ITU-R S.1503-4

ITU-R, Recommendation S.1503-4, "Functional description to be used in developing software tools for determining conformity of non-geostationary-satellite orbit fixed-satellite service systems or networks with limits contained in Article 22 of the Radio Regulations", 2023-09。該文件提供全球公認之干擾模擬演算法；其中 Annex 1 定義 EPFD 計算幾何模型、PFD、EIRP 掩模格式及累積分布函數（CDF）之產出邏輯。

5.1.5 新興衛星技術監理規範與未來趨勢

(a) 設備與單元

移動中地球站（Earth Station in Motion, ESIM）；太空補充涵蓋（Supplemental Coverage from Space, SCS）設備（如手機直連衛星）。

(b) 主要內涵

隨著衛星技術與通訊產業的飛速變遷，ITU 持續針對各類創新應用制定專門的法律框架與技術規範。這些規範旨在確保新興技術在推動全球互聯的同時，能與既有的無線電服務和諧共存，並維持頻譜資源的理性使用。

首先，針對在高速移動平台上運行的通訊需求，ITU 制定 ESIM 的專門條款。依據第 169 號決議（Resolution 169），安裝於飛機或船隻上的地球站，在利用 17.7-19.7 GHz（下行）與 27.5-29.5 GHz（上行）頻段與 GSO FSS 系統通訊時，必須嚴格遵守技術限制。為保護領土內的地面固定服務及其他太空站，營運商必須確保其發射功率符合特定的離軸 EIRP 密度掩模，並具備由地面下令「立即停止發射」的自動中止機制。

其次，針對近年來由國際上許多大專院校及新創業者主導的微型太空任務，ITU-R 於 2023 年發布新版《小型衛星手冊》。該手冊為奈米衛星（Nanosatellites）與微型衛星（Picosatellites）的佈署提供詳細的監理指引，涵蓋從頻率申請流程、太空物體登記、到發射後的太空碎片減緩措施等最佳實踐。這套指引確保這類低成本、短週期的衛星任務能符合《無線電規範》，並避免在有限的低軌道空間中產生有害干擾。

第三，SCS 系統，即大眾熟知的「手機直連衛星」技術，已成為監理焦點。WRC-23 通過第 253 號決議（Resolution 253），將「研究指配新頻率供衛星直接與地面的國際行動電信（IMT）終端連接」正式納入 WRC-27 的議程項目（Agenda Item 1.13）。其目標是透過衛星與手機的直接通訊來補足地面網路的覆蓋缺口，實現「未來單一網路」的政策願景，並在災害發生時提供必要的網路韌性。

最後，為應對移動過程中的技術挑戰，ITU-R S.1857 建議書規範指向誤差限制。對於安裝在車輛等平台上的地球站，由於平台的隨機運動，天線可能會產生指向誤差並導致發射功率洩漏至相鄰衛星。該建議書提供一套統計方法與模型，用於估算這種動態環

境下的離軸功率密度，並評估其對相鄰 GSO 系統的干擾影響，確保移動終端在追求傳輸速率的同時，不會損害鄰近網路的服務可用率。

(c) 相關文獻

(1) ITU Resolution 169 (WRC-19)

ITU, Resolution 169 (WRC-19) "Use of the frequency bands 17.7-19.7 GHz and 27.5-29.5 GHz by earth stations in motion communicating with geostationary space stations in the fixed-satellite service", 2019。該文件規範機載與船載 ESIM 運行條件；其中 Annex 3 定義保護地面服務所需符合之地表 PFD 限制與自動中止機制要求。

(2) ITU Resolution 156 (WRC-15)

ITU, Resolution 156 (WRC-15) "Use of the frequency bands 19.7-20.2 GHz and 29.5-30.0 GHz by earth stations in motion communicating with geostationary space stations in the fixed-satellite service", 2015。該文件針對移動中地球站之指向精度要求極為嚴格，規範天線的指向誤差應長期維持在≤ 0.2°，旨在最大程度減少對 GSO 弧段的有害干擾。

(3) ITU Resolution 902 (WRC-03)

ITU, Resolution 902 (WRC-03) "Provisions relating to earth stations located on board vessels which operate in fixed-satellite service networks in the uplink bands 5 925-6 425 MHz and 14-14.5 GHz", 2003。該文件定義移動中地球站之技術與運作限制，要求系統必須具備「失效安全（Fail-safe）」之硬體聯鎖機制，當指向偏差超過預設門檻時，必須能於 100 ms 內自動停止發射。

(4) ITU-R S.1857

ITU-R, Recommendation S.1857 "Methodologies to estimate the off-axis e.i.r.p. density levels and to assess the interference towards adjacent satellites resulting from pointing errors of vehicle mounted earth stations in the 14 GHz frequency band", 2010-01。該文件規範安裝於車輛平台之地球站指向誤差限制，提供一套統計方法與模型來估算動態環境下的離軸功率密度，並評估其對相鄰 GSO 系統的干擾，確保不會損害鄰近網路之服務可用率。

(5) ETSI TR 103 611

ETSI, TR 103 611, "Satellite Earth Stations and Systems (SES); Seamless integration of satellite and/or HAPS systems into 5G and related architecture options", Version 1.1.1, 2020-06。該文件描述衛星與 5G 網路之整合場景；其中 Clause 6.2.3 定義 UE 與 NTN 閘道間的協議層實例化，並提及 NAS 訊息與 PDU 交談（Session）之流程。

(6) FCC 47 CFR Part 25

FCC, 47 CFR Part 25 "Satellite Communications", 2026。該文件為美國聯邦法規關於衛星通訊之專章；其中§25.226 與§25.228 規範車載 ESIM 與機載 ESIM 之設備授權門檻，包含 100 ms 內自動停止發射之效能需求。

5.2 無線電規範下共存的開發建議

衛星通訊產品的開發不僅需追求傳輸效率，更必須符合 ITU 對於頻譜資源保護與干擾防制的硬性規定。對於實務上開發建議，本節採「基準項目、ITU 依據、介面與設備要求、驗證資料」的邏輯進行規範描述，核心目的在於協助廠商在產品定義與初步設計階段，即能深度導入監理導向設計的思維。在衛星通訊產業中，硬體研發成本極高且修正週期長，若在產品成型後才發現無法符合國際規範，將面臨巨大的重新設計成本與市場准入延遲，透過將這些複雜的國際電信法規轉化為具體的開發指標，企業能更自信地推動技術創新，實現高效且合規的全球佈署。

5.2.1 天線射頻性能與輻射場型設計建議

在衛星通訊系統的開發過程中，天線的輻射場型設計是決定系統能否合規運行的核心關鍵。由於衛星軌道資源日益擁擠，不精確的波束指向或過強的旁波瓣（Side-lobe）發射，都會對相鄰衛星網路造成嚴重的有害干擾。因此，開發者在設計階段應優先考量以下四大技術指標，並將其納入硬體驗證程序。

首先，關於旁波瓣增益包絡線的限制，建議開發者以優化空間資源利用率為目標。根據 ITU-R S.580-6 與 FCC §25.209 的規範，地球站天線的設計應確保至少 90%的旁波

瓣峰值低於 29 - 25logθ dBi（其中 θ 為偏離主軸角度，適用範圍通常自 1.5°或 100λ/D 起算），以優化軌道間隔空間利用。這項指標要求開發者在選擇饋源（Feed）設計與反射面加工精度時，必須嚴格控制能量洩漏，以確保天線在非目標衛星方向上的增益受到壓制，從而支持更小的衛星間隔。

其次，針對離軸 EIRP 密度的控制，特別是運行於 Ku 頻段的數位 FSS 地球站，應嚴格遵循功率掩模規範。具體而言，在 1.5° ≤ θ ≤ 7°範圍內，離軸 EIRP 密度需低於 15 - 10log(N) - 25logθ dBW/4kHz。這裡的 N 代表在同一衛星接收波束內、同時使用相同頻率發射的地球站數量（例如在支援多重接取的系統中，N 值會大於 1），開發者必須透過動態功率控制或選用高效率前向糾錯（FEC）技術，確保單站或聚合的離軸輻射不會超過此限制，以保護 GSO 弧段的通訊安全。

第三，頻率公差（Frequency Tolerance）是確保頻道穩定性與避免頻率飄移干擾的基礎。規則要求地球站發射機的頻率公差必須維持在參考頻率的 0.001%以內，而空間站發射機則建議維持在 0.002%以內。開發者在選用晶體振盪器（TCXO 或 OCXO）與實施頻率轉換電路設計時，應考量長期運作下的溫度補償與老化因素，確保其發射中心頻率不會偏離授權範圍，從而影響相鄰頻道或其他無線電服務。

最後，為提升頻譜效率，極化隔離度（Polarization Isolation）的性能至關重要。對於 GSO FSS 空間站天線，建議跨極化隔離度在主涵蓋區域內應至少達到 30 dB；而對於 BSS 系統，則應至少達到 25 dB（或在某些標準下要求 27 dB）。開發者應採用先進的全頻率重用技術，透過正交極化（Orthogonal Polarizations）或空間獨立波束來倍增系統容量，並在天線饋源設計中精確校準極化軸，以最小化跨極化干擾對鏈路品質的影響。

5.2.2 天線控制單元與自動化監理機制

在 ESIM 如車載（Vehicle-Mounted Earth Station, VMES）、船載（Earth Station on Vessel, ESV）及機載（Earth Station Aboard Aircraft, ESAA）衛星通訊系統的開發中，天線控制單元（Antenna Control Unit, ACU）是確保合於法規與維繫鏈路品質的核心組件。由於載具移動會產生複雜的動態指向誤差，ACU 必須具備高度精確的追蹤能力與反應敏捷的自動化監理機制，以防止發射功率因指向偏離而洩漏至相鄰衛星弧段。

一、指向精度（Pointing Accuracy）與穩定性要求，法規對於 ACU 的指向精度要求極為嚴格，旨在最大程度減少對 GSO 弧段的有害干擾。依據 ITU-R 第 156、902 號決議（Resolution 156、Resolution 902）與 FCC §25.221 及§25.226 等規範，ACU 的指向誤差應長期維持在≤0.2°。針對技術要求更高的 ESAA，開發者必須進行詳盡的工程分析，證明其追蹤誤差在「三倍標準差（3-sigma）」的統計基礎下仍能維持在 0.2°以內，確保 99.7%的運作時間皆能精確對準衛星。此外，天線系統必須具備機械穩定性，例如在時速 100 km/h 的風速與陣風環境下仍需維持正常運作且不產生永久變形。

二、毫秒級自動停止發射（Cessation of Emission）機制，ACU 必須整合「自我監測」功能，這在無人看守的自動追蹤終端設備中尤為關鍵。當指向偏差超過預設門檻（GSO 標準通常定義為>0.5°，或開發者於申請時聲明的最大指向誤差門檻）時，系統必須在 100 ms 內自動停止發射或減少發射功率。此外，系統必須即時監控目標衛星的下行鎖定狀態；一旦偵測到失去同步、失去接收信號或發生任何可能導致有害干擾的硬體故障，ACU 必須在 100 ms 內（部分條件允許 5 秒內）立即切斷發射。這種「Fail-safe」的硬體聯鎖機制是製造商取得國際型式認證的強制性技術要求。

三、遠端監理連動與地理位置紀錄，ACU 不僅須具備本地自主控管能力，還必須受控於網路控制監測中心（Network Control and Monitoring Center, NCMC）。法規要求地球站必須具備持續與 NCMC 通訊的手段，並能在接收到 NCMC 下達的「禁止發射」或「參數更改」命令後的 100 ms 內執行完畢。

最後，為確保干擾發生時的可追查性，ACU 應整合全球導航衛星系統，詳實紀錄各項運作數據。

5.2.3 功率管理與干擾評估建議

在衛星通訊開發的後期與驗證階段，功率管理（Power Management）與干擾預警模擬是確保產品能順利通過監理審核的最後一道防線。開發者必須在追求鏈路可用率（Availability）的同時，導入環境補償機制與標準化的干擾評估流程。以下針對開發實務提供三項關鍵建議：

一、上行鏈路功率控制與雨衰補償，在高頻段（如 Ku 與 Ka 頻段），降雨衰減是影

響通訊品質的主要因素，開發者可設計增益功能，在偵測到降雨衰減時，允許其發射功率上升，但補償增幅不得超過 20 dB。開發建議中必須包含一項核心邏輯：一旦天氣條件好轉，發射功率必須立即回復至正常晴朗天空（Clear-sky）用的水平。此外，為保護其他網路，最大功率控制應事先與相鄰衛星營運商進行協調，以避免在補償過程中對鄰近網路造成無意干擾。

二、NGSO 系統開發中的 PFD/EPFD 掩模預檢，針對 NGSO 系統的開發，製造商須提供 PFD 與 EIRP 掩模最壞幾何情況（Worst-Case Geometry, WCG），即對 GSO 地球站產生最高干擾的角度與位置。透過生成 EPFD 累積分布函數（CDF）曲線，開發者能預先判斷系統是否符合《無線電規範》第 22 條（Article 22）的硬性指標，避免在產品通報（Notification）階段因干擾超標而被 ITU BR 退件。此外，在實際操作上，須將設備操作在 PFD 與 EIRP 掩模的範圍中，確保使用過程不會超出保護範圍。

三、SCS 設備的帶外發射防護隨著「手機直連衛星」技術的興起，SCS 設備的功率限制成為新興規範重點。若開發旨在直接連通標準行動終端（如智慧型手機）的衛星系統，必須特別注意對地面既有服務的保護。根據最新法規，太空站下行發射在 SCS 授權頻段外的聚合 PFD，在離地 1.5 公尺處不得超過-120 dBW/m²/MHz。這項極為嚴苛的指標旨在確保衛星信號不會干擾地面行動通訊營運商的敏感接收端。開發者應優化衛星波束的旁波瓣抑制與濾波器設計，確保終端設備在符合地面無線執照（如 FCC Part 22、24 或 27）技術參數的前提下運作，從而達成「未來單一網路」的無縫整合願景。

6. 營運系統對外介面

本章延續第 4.3 節，包括對應 DVB-S/RCS 系統與 3GPP NTN 系統的「營運系統對外介面」所調查的標準內容以及相關建議。其中 DVB-S/RCS 的介面主題有「DVB-S/RCS 營運系統對應 PoP 介面」，而 3GPP NTN 的介面主題則包括「3GPP NTN 營運系統對應 PoP 介面」與「3GPP NTN 營運系統與衛星營運系統的 SbMA 介面」。

DVB 相關標準有定義對其他網路系統的介面，但沒有定義與衛星營運系統的介面，然而通訊網路營運系統與衛星營運系統之間仍需要有介面，對於 DVB-S/RCS 營運商，必須與衛星營運商之間自訂該介面；3GPP 標準對其它網路系統與衛星營運系統分別都有定義介面，在本章分為不同介面主題說明。

6.1 DVB-S/RCS 營運系統對外介面

6.1.1 營運系統對應 PoP 介面

DVB-S/RCS 營運系統對應 PoP 介面示意如圖 34 與圖 35。

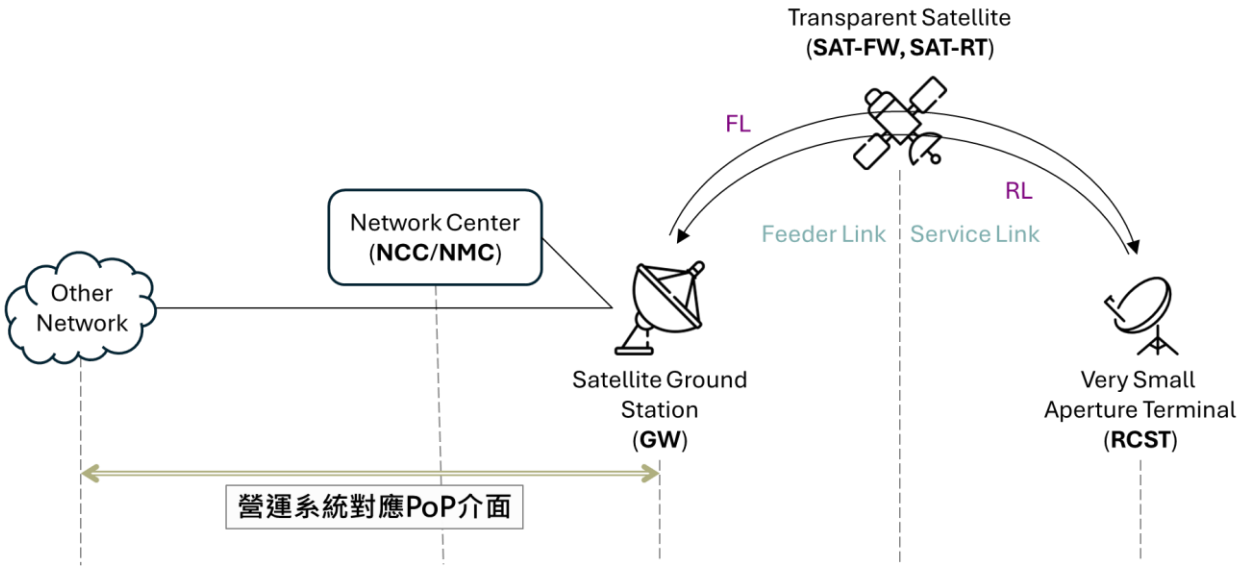


圖 34、DVB-S/RCS 通透型系統的營運系統對應 PoP 介面

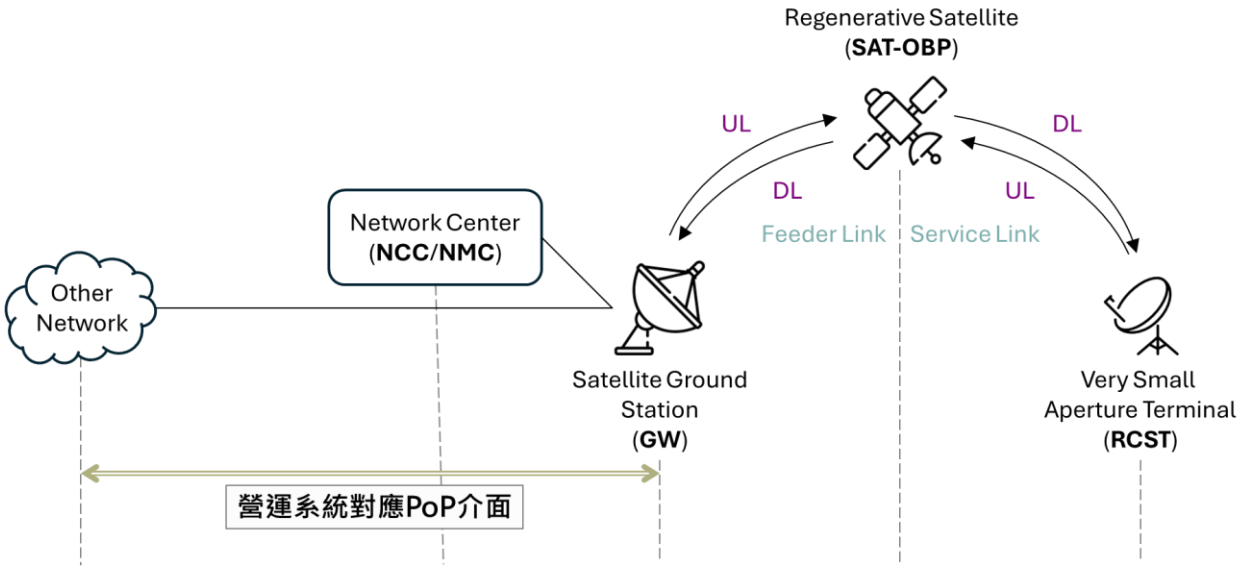


圖 35、DVB-S/RCS 再生型系統的營運系統對應 PoP 介面

(a) 設備或單元

閘道（Gateway, GW）；其中的 GSE 或 MPE 封裝（Encapsulation）功能。

(b) 主要內涵

DVB 系統（如 DVB-S2X/RCS2）偏向「廣播與寬頻」架構，其與 PoP 對接的核心在於 IP 數據封裝與服務等級管理。傳統 PoP 提供的標準乙太網路流量，必須在 DVB 閘道透過 GSE（Generic Stream Encapsulation）或 MPE（Multi-Protocol Encapsulation）協議映射到 DVB 基頻幀。由於衛星頻寬成本極高，DVB 系統會將來自 PoP 的不同訊務標籤（如 DSCP 或 VLAN ID）映射到衛星鏈路特定的優先等級，確保關鍵應用（如語音）在擁塞時優先傳輸。

(c) 相關文獻來源

(1) ETSI EN 301 790

ETSI, EN 301 790, "DVB; Interaction channel for satellite distribution systems", Version 1.5.1, 2009-05。該文件提及的 Traffic Gateway 對應 IP 接入與服務介面的 PoP 實現；其中 Clause 4.3 Reference model of the Satellite Interactive Network 定義 DVB-RCS 互動式衛星網路架構，描述關鍵角色：Network Control Center（NCC）、Traffic Gateway（TG）與 Feeder

Station，而 TG 為提供與外部網路的連線與服務接入。

(2) ETSI TR 101 790

ETSI, TR 101 790, "DVB; Interaction channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines for the use of EN 301 790", Version 1.5.1, 2009-05。該文件補充 EN 301 790 在實務系統含 PoP 功能整合的部署；其中章節說明 GW 與 NCC 部署方式、QoS 與資源分配策略、RCST 接入流程。

(3) ETSI TS 101 545-1

ETSI, TS 101 545-1, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 1: Overview and System Level specification", Version 1.4.1, 2026-01。該文件提及下一代的 RCS 互動式衛星網路架構；其中 Clause 4 System definition 定義 DVB-RCS2 整體系統架構，涵蓋 GW、網路功能、控制與管理機制，未改變既有對應 PoP 定義。

(d) 技術指標

(1) GSE 封裝線速能力（GSE Wirespeed Capability）

閘道端 IP 封裝器（IPE）將地面 IP 訊務轉為 DVB 基頻訊框（Baseband Frames）的每秒封包數（Packet per Second, PPS）處理能力，在 10 或 40 Gbs 乙太網路傳輸滿載下須達到硬體線速，且封裝引發的內部 jitter 須≤ 5 us。

(2) 封裝耗費比（Encapsulation Overhead）

量測 GSE 標頭佔用的頻寬耗費，在傳輸可變長度 IP 封包時必須控制在總傳輸量的 2%到 3%以內。

(3) DAMA 配置回應延遲（DAMA Allocation Latency）

衛星終端（RCST）因應地面突發流量發出 Volume-Based 頻寬請求，到 NCC 經由 TBTP 表回饋時槽的動態回應時間，在 GEO 環境下須穩定控制在 500～700 ms 內。

6.2 3GPP NTN 營運系統對外介面

6.2.1 營運系統對應 PoP 的 N6

3GPP NTN 營運系統對應 PoP 的 N6 示意如圖 36 與圖 37。

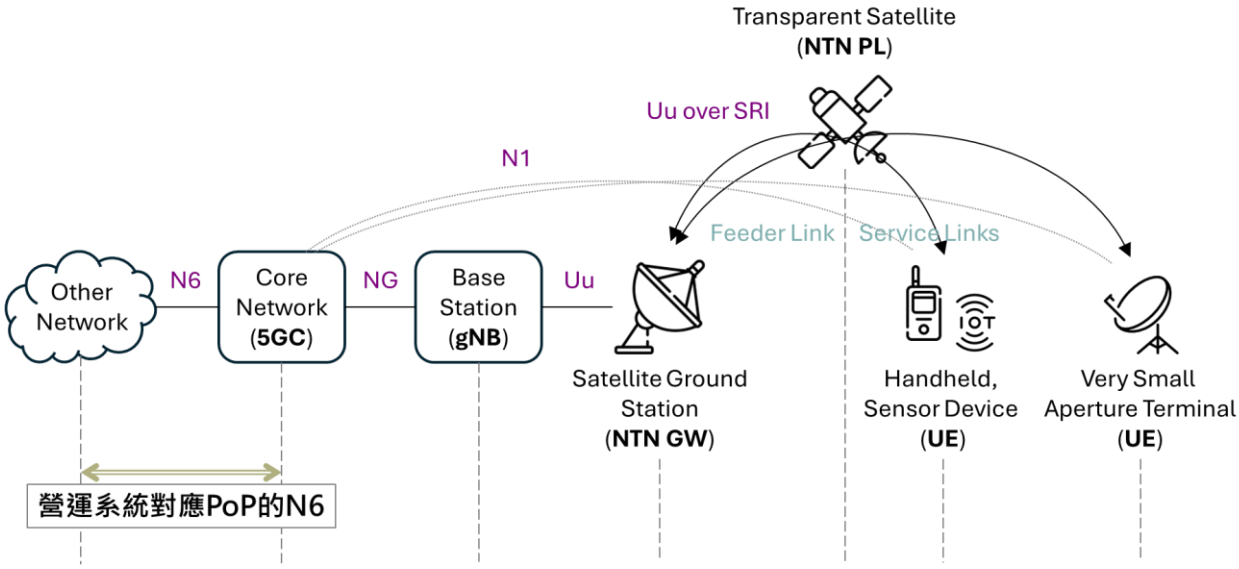


圖 36、3GPP NTN 通透型系統的營運系統對外介面

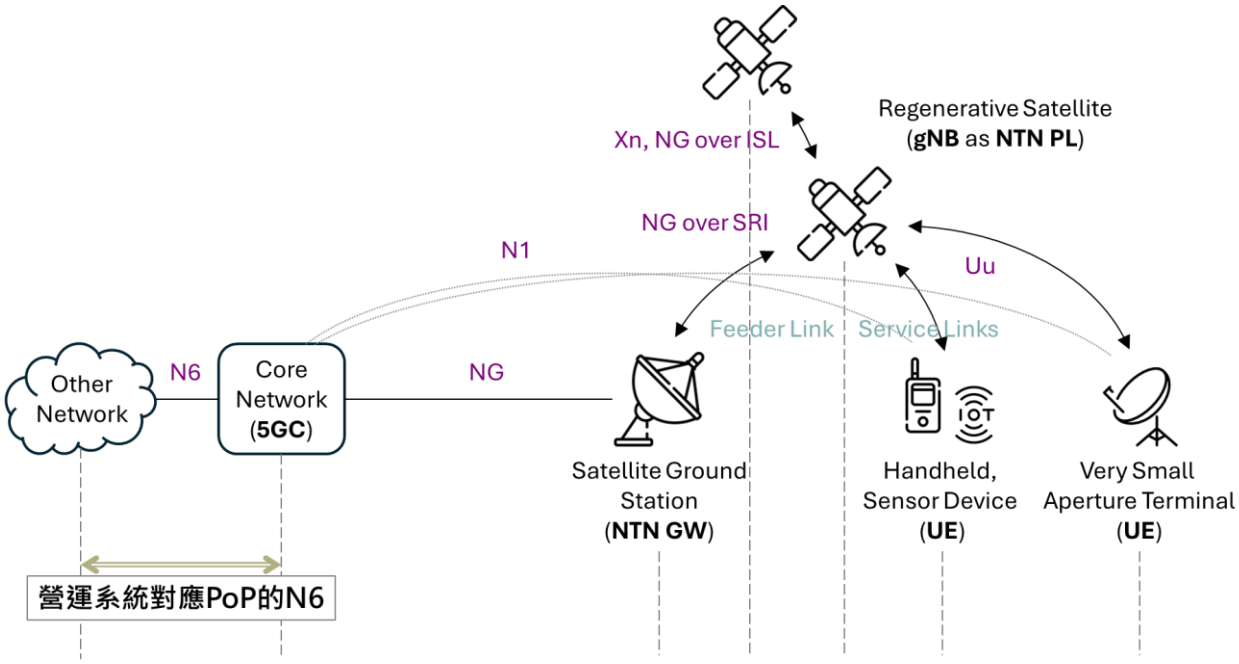


圖 37、3GPP NTN 再生型系統的營運系統對外介面

(a) 設備或單元

5G 核網（5G Core, 5GC）；其中的用戶面功能（User Plane Function, UPF）。

(b) 主要內涵

在 5G NTN 架構下，系統間介面的標準化程度更高，重點在於與外部數據網路（Data Network）的 N6 介面定義。3GPP 系統透過 UPF 對應 PoP 對接，主要內涵是將 UE 的 PDU 交談（Session）解封裝，並轉換為標準 IP 路由，發送到外部數據網路。營運系統間必須交換用戶的認證資訊。當用戶從地面網路切換到 NTN 時，核心網路透過介面確保用戶權限在 PoP 端的連續性。若用戶屬於不同營運商的漫遊案例，則涉及 N32 介面（控制面）與 N9、N6 介面（用戶面），以處理跨業者間的計費與流量結算。

(c) 相關文獻來源

(1) 3GPP TS 23.501

3GPP, TS 23.501, "5G; System architecture for the 5G System (5GS)", Version 19.8.0, 2026-06。該文件提及 UPF 與 N6 作為 PoP 資料出口功能，即可視為對應 PoP 定義；其中 Clause 4 Architecture model and concepts 與 Clause 5 High level features 定義 5G 核網（5GC）的功能分解為 UPF、SMF、PCF、AMF 等，並指出 UPF 負責用戶資料轉送，N6 介面連接外部數據網路（Data Network）。

(2) 3GPP TS 23.502

3GPP, TS 23.502, "5G; Procedures for the 5G System (5GS)", Version 19.8.0, 2026-06。該文件提及 PoP 的控制邏輯來源包括訊務如何被導向 UPF 與 QoS 如何落實於 UPF；其中 Clause 4.3 Session Management procedures、4.4 SMF and UPF interactions 定義包括 PDU Session 建立流程、SMF 如何選擇 UPF、與 N4 控制流程（SMF ↔ UPF），並說明包括 IP 位址配置、N6 連接 DN、QoS policy 如何下發至 UPF。

(3) 3GPP TR 38.821

3GPP, TR 38.821, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)", Version

16.2.0, 2023-04。該文件提及 UPF 在 NTN 中的部署位置；其中 Clause 5 NTN-based NG-RAN Architectures 分析 NR over satellite 的技術方案，描述包括通透型 NTN 與再生型 NTN 架構的核心網路 UPF、N6 的位置。

(4) 3GPP 官方網站

3GPP 官方網站的 Non-Terrestrial Networks (NTN)。該頁面提供 NTN 整體系統背景，簡述架構中的端到端路徑，其中說明 NTN 的應用場景與地面 5G 整合模式。

(d) 技術指標

(1) GTP-U 解封裝與 N6 轉發線速能力（GTP-U to N6 Wirespeed Capability）

UPF 功能接收帶有 GTP-U 隧道標頭的衛星訊務，解封裝後由 N6 介面發往 PoP 的轉發能力，硬體或虛擬化功能處理延遲須≤ 10 us。

(2) 5G QoS 識別碼（5QI）至地面 DSCP 映射精確度

N6 介面邊界路由器或 UPF 必須 100%準確地將 3GPP 延遲延展型 5QI 的 QoS 憑據，翻譯並標記為地面 PoP 的 L3 DiffServ/DSCP（如 EF, AF41）或 L2 p-bit。

(3) 地空切換數據緩衝範圍（Handover Buffering Window）

在 LEO 衛星頻繁換手（Handover）期間，N6 介面向地面 PoP 接收的下行數據在 UPF 內部快取的容忍時間，須達 500 至 2000 ms 而不導致封包溢位丟棄。

6.2.2 營運系統與衛星營運系統的 SbMA 介面

(a) 設備或單元

5G 核網（5G Core, 5GC）、衛星營運中心（Satellite Operation Center, SOC）；其中 5GC 包括網路管理器（Network Manager, NM）、安全閘道（Security Gateway, SeGW）。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 營運系統的管理功能 OAM（Operation Administration and Maintenance）與衛星營運中心（Satellite Operation Center, SOC）之間的服務基礎管理架構（Service-based Management Architecture, SbMA）介面，是連結「地面電信網路管理」與「太空資源管理」的服務 API，該介面建立在 HTTP/2、JSON 與 RESTful API 之上，主要實現資訊共享與協同控制。但 SbMA 介面不可用於如衛星姿態調整、軌道提升、推進器等控制，這些是衛星營運系統內部以專用的太空協定（如第 10.1.2 節所述的 CCSD 遙測與命令標準）來運作，與 3GPP OAM 的 SbMA 協定之間是彼此隔離的。

(1) 星曆與飛行動態資訊交換（Ephemeris & Flight Dynamic Exchange）

SOC 定期透過此介面主動發送 TLE（Two-Line Elements）或高精度的 OEM（Orbit Ephemeris Message）等星歷資訊給 3GPP OAM，3GPP OAM 接收星曆後，再轉給地面 gNB 或 NTN GW，用於計算動態都普勒頻移（Doppler Shift）與空間延遲補償。

(2) 鏈路換手與波束排程（Link Handover and Beam Scheduling）

由於 LEO 衛星移動速度極快，單一衛星覆蓋 NTN GW 的時間有限。SOC 會經由 SbMA 介面提前通知 3GPP OAM 匯集鏈路換手（Feeder Link Handover）的精確 UTC 時間點，也會協調衛星可調波束（Steerable Beams）的指向與覆蓋區域（Tracking Area/Cell ID）的變更，使得 5GC 的 AMF、UPF 能在波束移轉時完成對應的信令路由更新。

(3) 酬載波束與資源配置（Payload Beam & Resource Configuration）

3GPP OAM 可發起 API 請求，請 SOC 根據訊務負載動態開關星載 RF 波束或調整特定地理區域的全向等效發射功率（EIRP）。而當需要動態擴充或縮減載波頻寬時，可經由 SbMA 介面向 NOC 請求變更星載轉發器（Transponder）的頻率分配。

(4) 酬載健康狀態與遙測（Payload Health & Telemetry）

對於再生架構的衛星酬載，也就是當 gNB 部署於衛星上時，NOC 透過此介面將星載 CPU/FPGA 處理負載、記憶體使用率、單粒子翻轉（SEU）異常、溫度與太陽能電池功率上限等遙測（Telemetry）數據回報給 3GPP OAM。當衛星發生姿態異常或硬體故障時，NOC 能告警 3GPP OAM，以決定地面流量轉移或將用戶切換至備份衛星。

(5) 時間同步確保（Time Synchronization Assurance）

衛星營運系統 NOC 會將星載 GNSS 接收器或原子鐘的鎖定狀態與時間漂移率回報 3GPP OAM，以判斷是否滿足時分雙工及多波束同步要求的≤ 1.5 μs 相位精準度。

6.3 營運系統對外介面的開發建議

以下說明 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 共通技術指標與實務開發建議。

6.3.1 營運系統對外介面共通技術指標

無論是 DVB 終端將 GSE 還原為 IP 轉發至 LAN，還是 UPF 將 GTP-U 還原為 IP 轉發至 N6，其硬體快取與晶片組處理的總時延均要求在微秒（us）等級。兩者也都必須將地面相對充裕、低成本帶有標準標籤（DSCP/VLAN）的訊務，精確映射到受限、高成本特定優先級的衛星通訊管道（DVB 的 Class of Service 與 3GPP 的 5QI）。

6.3.2 營運系統對外實務建議

基於上述指標的特性，研發團隊在開發 DVB 閘道或 5G NTN 核心網路時，可採用統一的架構設計來應對以下四大實務問題。

(1) 緩衝區設計：導入主動佇列管理（AQM）防止 Bufferbloat

地面 PoP 出口頻寬已達 10 Gbps 甚至是 100 Gbps，但經由介面要送往衛星鏈路的下行頻寬受到衛星實體層極限限制。若 GSE IPE 或 UPF 在邊界介面的下行緩衝區（Buffer）設計過小會導致嚴重丟包；若設計過大，突發流量會填滿緩衝區，引發緩衝區膨脹（Bufferbloat），導致端到端延遲飆升至數秒，讓標準 TCP 擁塞控制異常。因此製造商不應在介面端配置固定的緩衝記憶體深度。硬體開發應實作主動佇列管理演算法（如 CoDel 或 FQ-CoDel 等），使其能實時感知當前衛星實體層（PHY）或通道狀態資訊（CSI）的動態頻寬，動態縮減或擴展緩衝區深度，主動丟棄或標記過期封包。

(2) 實作根據實體層變動的「內部反壓與流量平滑機制」

衛星鏈路常因氣候(如雨衰)或 LEO 動態切換而發生實體層劇烈變動(DVB 的 ACM 降級或 3GPP NTN 的鏈路調變調變變更)，頻寬可能在一瞬間縮減 70%以上。此時地面 PoP 端對此毫無所悉，仍會持續以原速率傳送流量，導致邊界瞬間雍塞。因此研發時必須在基頻晶片與上層封裝轉發器（GSE IPE 或 UPF）之間建立低延遲的內部反壓機制（Internal Backpressure Mechanism）。一旦實體層變動，封裝轉發器必須在微秒級時間內對地面 PoP 介面執行流量控制（如發送乙太網路 Pause 訊框），或者主動壓低 TCP 的通告視窗（Advertised Window），在地空邊界完成平滑限速。

(3) 設計長延遲感知（Latency-Aware）的應用層計時器

許多標準地面電信網管與認證協定（如 RADIUS, SNMPv3, TR-069）在對接 PoP 時，其預設的逾時（Timeout）計時器通常較短（約 1 到 3 秒）。在衛星通訊的長延遲（GEO 達 500 ms 以上）或 LEO 頻繁換手過渡期，信令極易因長延遲而超過該計時器限制，導致地面伺服器不斷誤判設備斷線。因此軟體團隊在開發設備的協定堆疊時，所有與地面 PoP 對接的維運、認證、網管應用的計時器必須設計成可配置（Configurable）且具備時延感知能力。例如，將 RADIUS 重新嘗試次數提升，並將單次 Timeout 上限放寬至 5 到 10 秒，且 heartbeat 週期需與衛星系統資訊的廣播與信令週期搭配。

(4) 管理面區別「Alignment」與「Calibration」告警

對於整併衛星與地面網路的通訊系統中，製造商在開發天線控制、射頻前端與地面網管系統（NMS）的對接介面時，必須在軟體程式碼與維運介面中嚴格區別航太與通訊工程術語：「對準（Alignment）」與「校正（Calibration）」。「對準」指的是天線與衛星之間的空間幾何指向、追蹤與尋星對準（涉及機械馬達、軌道預測曆書計算），「校正」指的是內部射頻電路、本地振盪器（Local Oscillator, LO）或相位陣列的頻率、相位、內部熱補償與功率放大器線性化校正。在管理面的軟體設計上，兩種告警必須完全獨立。因為 Alignment 失敗通常需要檢查天線機械結構或物理遮擋，而 Calibration 失敗則可能代表晶片組熱補償演算法失效或射頻元件老化，明確區別才能確保地面 PoP 維運團隊具備正確認知基礎以有效診斷功能的故障。

7. 地面接取設備與後端設備介面

本章延續第 4.4 節，包括對應 DVB-S/RCS 系統的「閘道、衛星終端（RCST）、與網路中心介面」與對應 3GPP NTN 系統的「無線接取網路（RAN）與核心網路（CN）介面」、「用戶設備（UE）與核心網路（CN）介面」所調查的標準內容以及相關建議。

7.1 DVB-S/RCS 閘道、衛星終端（RCST）、與網路中心介面

7.1.1 採用衛星不分類型，GW 與 NCC/NMC 的介面

採用衛星不分類型，GW 與 NCC/NMC 的介面示意如圖 38 與圖 39。

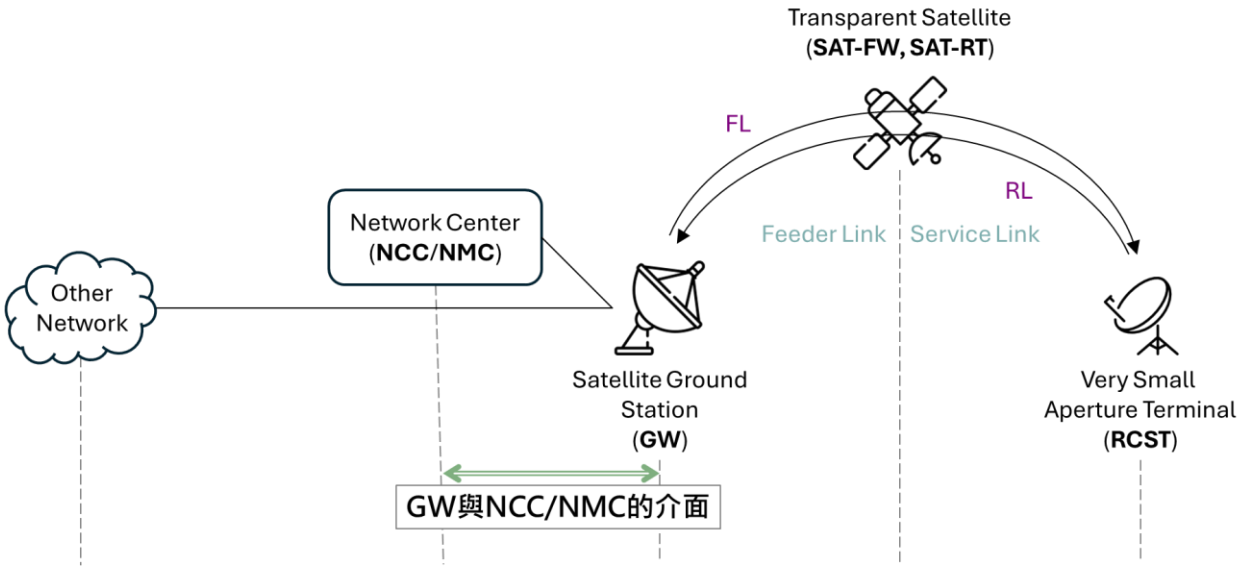


圖 38、DVB-S/RCS 通透型系統的 GW 與 NCC/NMC 的介面

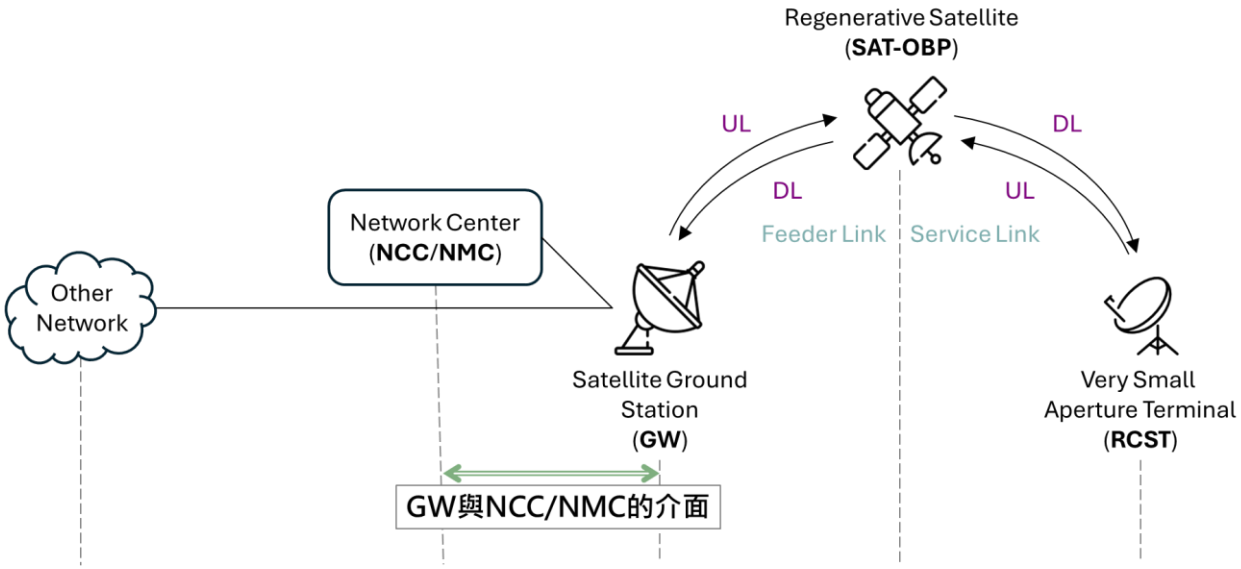


圖 39、DVB-S/RCS 再生型系統的 GW 與 NCC/NMC 的介面

(a) 設備或單元

閘道（Gateway, GW）、網路控制中心（Network Control Centre, NCC）、網路管理中心（Network Management Centre, NMC）。

(b) 主要內涵

在 DVB-S/S2 與 DVB-RCS/RCS2 標準中，GW 與網路中心之間的介面主要負責資源動態分配、終端同步控制以及鏈路效能監控。這些介面的內涵可以分為以下三個核心維度：

(1) 資源調度與同步控制（Resource & Sync Control）

DVB-RCS 的衛星回傳鏈路（Return Link）是多個終端共享的，必須由 NCC 統一精確調度。NCC 透過介面下達 TBTP(Terminal Burst Time Plan)做時槽分配(Slot Allocation)，這決定了每個衛星終端（RCST）在什麼時間、哪個頻率可以發射信號，以避免碰撞。根據閘道回傳的終端需求（Capacity Request），NCC 即時調整資源做動態頻寬分配（DAMA），將頻寬從閒置終端撥給高負載終端。閘道測量終端信號的抵達時間偏差與功率，NCC 則透過控制介面發送校正指令（Synchronization Control）做時序與功率校正，確保波束對準與時序精確。

(2) 網路管理與設備監控（Monitoring and Control）

屬於管理面（Management Plane），確保閘道硬體與整個衛星網路的健康。NMC 透過介面下達調變參數（如 MODCOD：調變與編碼方式）、頻率設定與符號率的配置管理。閘道即時向 NMC 匯報射頻單元（BUC/HPA）的狀態、負載情況以及當前的氣象衰落（Fading）補償狀態。當介面偵測到硬體失效或鏈路中斷時的故障告警，NMC 會觸發備援切換。

(3) 用戶與傳送面介面（User & Transport Plane）

定義資料如何在 GW 中被封裝並送往衛星。GW 需處理由其他網路送來的 IP 資料，並依照標準封裝為 GSE 或早期的 MPE。NMC 定義不同業務的優先權（如語音優於下載）的 QoS 策略執行，GW 則在介面上執行流量整形（Traffic Shaping）與排隊調度。

(c) 相關文獻來源

(1) ETSI EN 301 790

ETSI, EN 301 790, "DVB; Interaction channel for satellite distribution systems", Version 1.5.1, 2009-05。該文件提及 GW ↔ NCC 的控制分工與 GW ↔ 外部 IP 服務的角色；其中 Clause 4.3 Reference model of the Satellite Interactive Network 定義 DVB-RCS 系統的核心功能角色包括：NCC（Network Control Center）負責控制與監測功能、TG/GW（Traffic Gateway）處理回傳流量並連接外部網路、Feeder Station 傳送 forward link。

(2) ETSI TR 101 790

ETSI, TR 101 790, "DVB; Interaction channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines for the use of EN 301 790", Version 1.5.1, 2009-05。該文件補強 EN 301 790 對於 GW↔NCC signaling 與流程、capacity request 與 allocation；其中章節提供包括系統整合建議、GW 與 NCC 的交互模式、RCST 與 GW/NCC 資料流與控制流。

(3) ETSI TS 101 545-1

ETSI, TS 101 545-1, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 1: Overview and System Level specification", Version 1.4.1, 2026-01。該文件提

及 GW ↔ NCC/NMC 在控制與管理平面中的協作；其中 Clause 4 System definition 定義包括 DVB-RCS2 整體系統架構、控制與管理功能整合，並強調 interoperability（互通性）、GW 與 NCC、NMC 的管理面功能關係。

(4) ETSI EN 301 545-2

ETSI, EN 301 545-2, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard", Version 1.5.1, 2026-04。該文件提及 GW→NCC（如 capacity request）與 NCC→GW/terminal（如 allocation 與 TBTP）；其中 Clause 6 Forward Link L2S、Clause 7.2 Return Link Medium Access Control、7.5 The Return Link Structure (MF-TDMA) 詳述包括 MF-TDMA 結構、資源分配機制、與 signaling 格式（含 TBTP 類型）。

(5) ETSI TR 101 545-4

ETSI, TR 101 545-4, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 4: Guidelines for Implementation and Use of EN 301 545-2", Version 1.2.1, 2026-01。該文件提及 GW–NCC 介面的拓撲配置；其中 Clause 4 Reference Model 描述不同部署模式包括 GW 與 NCC 共站、分散式 GW 架構，並說明控制與管理訊號在不同架構中的流動。

(d) 技術指標

(1) TBTP 實時動態分發延遲（TBTP Distribution Latency）

GW 將訊務狀態回報給 NCC，NCC 運算完 DAMA 演算法後，將動態時槽表（TBTP）送回 GW 發射的端到端時延。在 GEO 環境下，硬體與軟體的處理時延須≤ 10 ms（不含空中傳輸延遲），以確保時槽表不因過期而失效。

(2) 管理面同步傳輸率（NMC Sync Throughput）

當系統管理數萬台終端時，GW 與 NMC 介面要注意在尖峰時段處理 SNMP/TR-069 狀態回報的最大同時交易數（Transactions Per Second, TPS）。

7.1.2 採用衛星不分類型，RCST 與 NCC/NMC 的介面

採用衛星不分類型，RCST 與 NCC/NMC 的介面示意如圖 40 與圖 41。

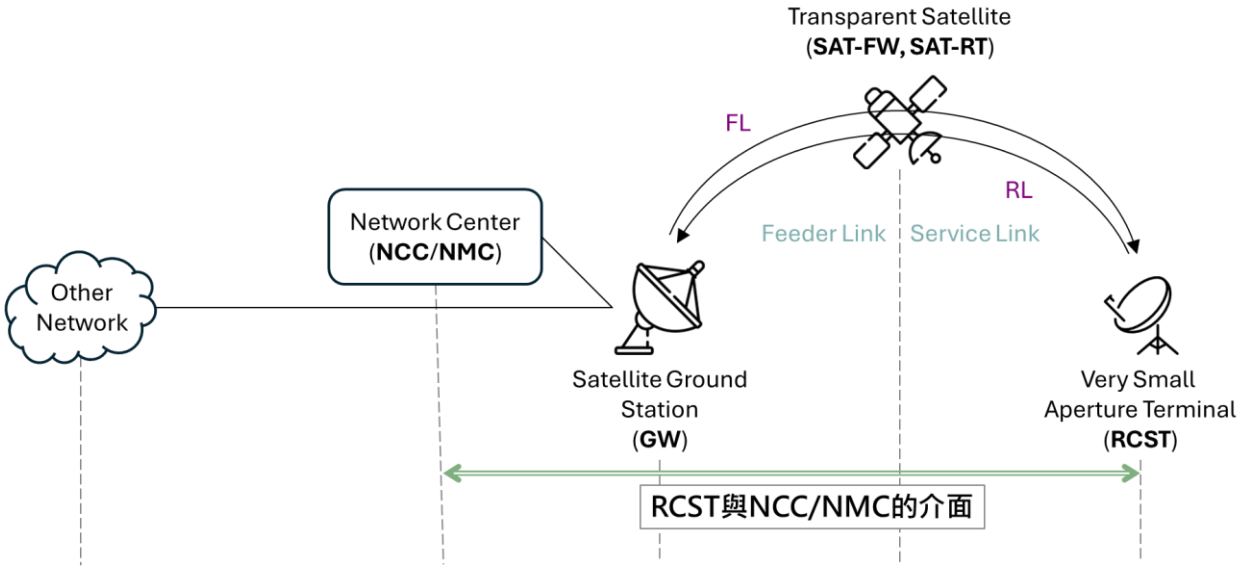


圖 40、DVB-S/RCS 通透型系統的 RCST 與 NCC/NMC 的介面

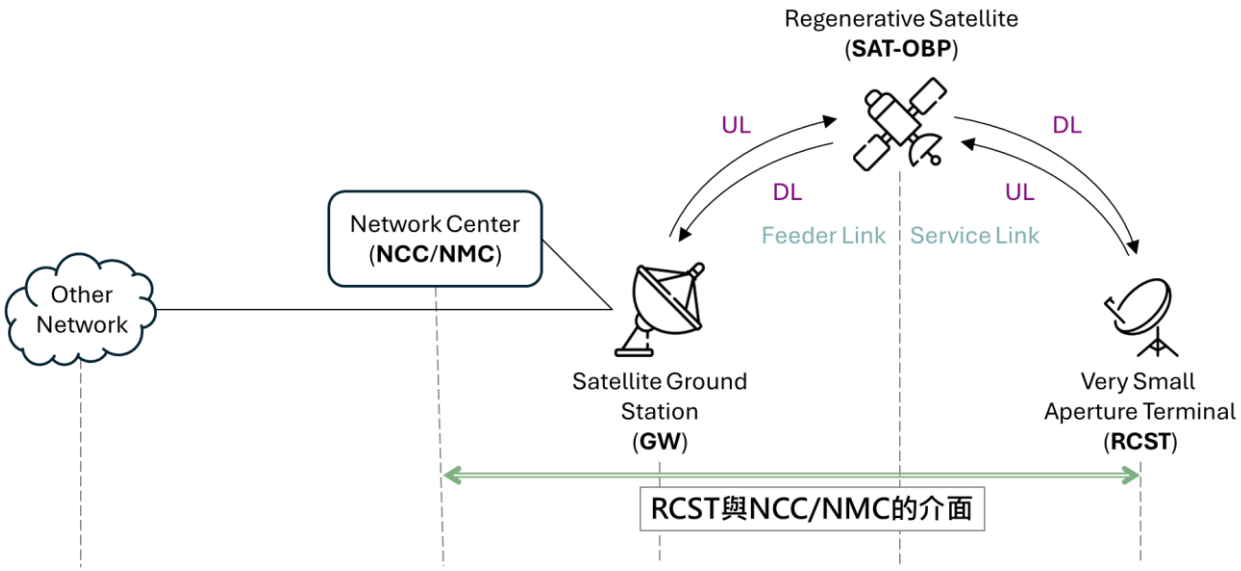


圖 41、DVB-S/RCS 再生型系統的 RCST 與 NCC/NMC 的介面

(a) 設備或單元

衛星終端（Return Channel Satellite Terminal, RCST）、網路控制中心（Network Control Centre, NCC）、網路管理中心（Network Management Centre, NMC）。

(b) 主要內涵

在 DVB-S/RCS 的系統架構中，RCST 與網路中心之間的介面內涵，本質上是一套高度同步且動態的閉迴路控制機制。雖然物理上訊號必須經過衛星與 GW，但在邏輯上，這層介面定義了終端如何被管控以及如何請求資源。其主要內涵可分為以下四大面向：

(1) 接取控制與身分驗證（Access Control & Authentication）

這是終端與中心互動的第一步，確保只有授權設備能進入衛星網路。終端透過非同步隨機接取（Slotted ALOHA）向 NCC 發送登入請求（Log-on PDU）進行登入程序（Log-on Procedure）。中心透過介面將該終端所需的網路參數（如頻率列表、時槽結構、衛星星曆）下發至終端。NMC 檢查終端的硬體 ID（MAC）與訂閱狀態做交互驗證，決定是否核發連網許可。

(2) 精確同步與鏈路維護（Synchronization & Maintenance）

由於衛星距離遠且終端硬體品質不一，介面必須處理毫秒級的誤差。NCC 監測終端回傳信號的偏移，透過介面下達 Correction Message，微調終端的發射時間（Alignment）以進行時序同步（Timing Alignment），確保其精確落在分配的時槽內。根據大氣衰落（如雨衰），NCC 指令終端調整發射功率，以維持鏈路預算平衡。

(3) 動態頻寬管理（Demand Assignment Radio Access, DAMA）

DVB-RCS 介面中最核心的互動，決定頻寬的利用率。終端根據本地端的數據積壓情況，透過介面發送五種不同類型的請求（如 VBDC、RBDC、AVBDC 等）的容量請求（Capacity Request）。NCC 彙整所有終端請求後，計算出資源分配方案，並透過時槽分配表（Terminal Burst Time Plan, TBTP）廣播給所有終端，告訴每個終端在未來的幾毫秒內擁有哪個頻率與時槽的發射權。

(4) 終端配置與性能管理（Configuration & Performance）

這部分屬於管理面（Management Plane），著重於長期的維運。NMC 透過介面讀取終端的信噪比（Es/N_0）、溫度、鎖定狀態等遙測數據以進行遠端診斷。透過廣播介面下發新版韌體，實現數千個終端的同步升級。規定終端對於語音（VoIP）與一般網頁流量的優先等級處理方式的服務品質（QoS）策略。

(c) 相關文獻來源

(1) ETSI EN 301 790

ETSI, EN 301 790, "DVB; Interaction channel for satellite distribution systems", Version 1.5.1, 2009-05。該文件提及 RCST↔NCC 之間的基本互動模型；其中 Clause 4.3 Reference model of the Satellite Interactive Network 描述 DVB-RCS 系統架構包括網路控制中心（NCC）、衛星終端（RCST）、Gateway（TG），NCC 提供控制訊號、同步、系統運作機制，RCST 接收 forward link 控制訊息並回傳資料。

(2) ETSI TR 101 790

ETSI, TR 101 790, "DVB; Interaction channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines for the use of EN 301 790", Version 1.5.1, 2009-05。該文件提及 RCST↔NCC 完整控制流程；其中 Clause 7 Synchronization procedures、Clause 8 Control and management 補充 EN 301 790 的實作細節包括 RCST 接入流程（logon）、同步（coarse/fine synchronization）、capacity request 流程，並描述 RCST 與 NCC 之間的信令交換與控制流程。

(3) ETSI TS 101 545-1

ETSI, TS 101 545-1, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 1: Overview and System Level specification", Version 1.4.1, 2026-01。該文件強化 RCST↔NCC↔NMC 的整合關係，對應 QoS、session control、管理控制；其中 Clause 4 System definition 定義第二代系統中包括 RCST 能力（terminal profiles）、NCC 控制功能、管理與控制整合，並涵蓋 higher layer control。

(4) ETSI EN 301 545-2

ETSI, EN 301 545-2, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard", Version 1.5.1, 2026-04。該文件提及 RCST → NCC（如 capacity request）與 NCC → RCST（如 TBTP/ allocation）；其中 Clause 6 Forward Link L2S、Clause 7.2 Return Link Medium Access Control、7.5 The Return Link Structure (MF-TDMA) 定義包括 MF-TDMA 結構、capacity request 格式、burst scheduling

與 signaling，並支援 random access 與 dynamic bandwidth allocation。

(d) 技術指標

(1) 粗略至精細同步收斂範圍（Logon Synchronization Window）

RCST 從冷開機、在 Logon Slot 發送請求、接收 NCC 修正參數並完成時序（Timing）與頻率（Frequency）校正，最終進入精細同步（Fine Sync）狀態的總時間，目標須≤5 秒。

(2) Logon 衝突機率（Logon Collision Probability）

在大量終端同時開機的突發情境下，RCST 接入機制的碰撞率須控制在 5%以內。

7.2 3GPP NTN 無線接取網路（RAN）與核心網路（CN）介面

7.2.1 採用通透型衛星時，地面 gNB 與 5GC 的 NG

採用通透型衛星時，地面 gNB 與 5GC 的 NG 示意如圖 42。

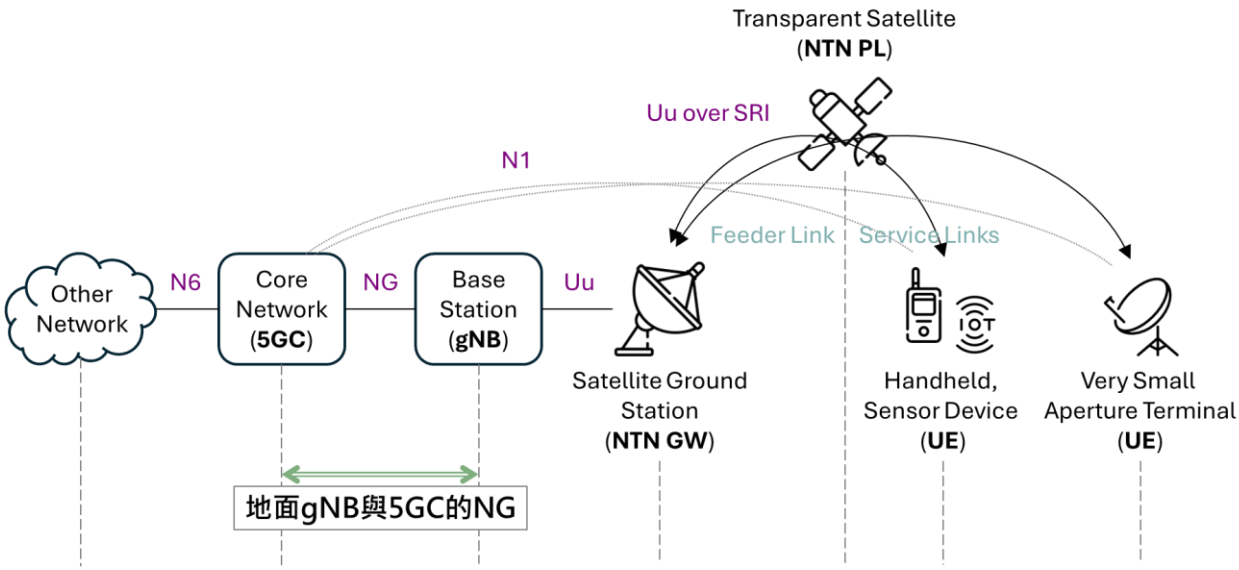


圖 42、3GPP NTN 通透型系統的地面 gNB 與 5GC 的 NG

(a) 設備或單元

5G 基站（Next Generation NodeB, gNB）、5G 核網（5G Core, 5GC）；其中 5GC 包括的接取與行動管理功能（Access and Mobility Management Function, AMF）、用戶面功能（User Plane Function, UPF）。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN（Non-Terrestrial Network）的獨立組網（Standalone, SA）架構中，NG 介面是連通無線接取網路（RAN）與 5G 核網（5GC）的標準橋樑。儘管 NTN 引入了數百甚至數萬公里的衛星鏈路，3GPP 的設計原則是讓 NG 介面盡可能保持與地面網路（TN）一致，但為了應對衛星的特殊物理特性，其主要內涵包含了以下關鍵點：

(1) 協定堆疊組成：NG-C 與 NG-U

NG 介面在邏輯上分為控制面與用戶面，分別對接不同的核心網單元，包括 NG-C（Control Plane）：基站（gNB）與 AMF 之間的介面，使用 NGAP（NG Application Protocol）協定。負責終端（UE）的註冊、連接管理、NAS 訊息傳輸以及移動性管理，與 NG-U（User Plane）：基站（gNB）與 UPF 之間的介面，使用 GTP-U 協定。負責封裝與轉發用戶的實際數據業務（如影音、網頁流量）。

(2) NTN 環境下的特殊功能內涵

由於衛星的移動與高延遲，NG 介面在 NTN 中承載比地面網更複雜的任務。衛星往返延遲（RTT）極高（GEO 衛星可達 540 ms+），NG 介面上的信令程序（如 Paging 或 PDU Session Setup）必須調整定時器（Timers），進行時序與同步優化（Timing & Latency Adaptation），以防止核心網在等待基站回應時過早發生超時。衛星波束（Beams）會隨衛星移動（LEO 衛星）的星對地覆蓋，當波束掠過地面時，NG 介面需處理頻繁的基站內或跨基站的換手（Handover），而且基於法規與計費需求，AMF 會透過 NG 介面要求 gNB 驗證 UE 的地理位置，確保終端位於合法的服務區域內。gNB 會在 NG 介面的設置訊息中向 AMF 宣告其為「NTN 節點」，為衛星特有的網路屬性標記（NTN Indicators），並提供衛星軌道類型（低、中或高）與軌道參數，這有助於核心網選擇適當的優化策略（如 PEP 效能增強代理）。

(c) 相關文獻來源

(1) 3GPP TS 23.501

3GPP, TS 23.501, "5G; System architecture for the 5G System (5GS)", Version 19.8.0, 2026-06。該文件提及 NG 介面的架構定義包括 N2 與 N3，為 PoP（UPF/N6）與 NG 的連結基礎；其中 Clause 4 Architecture model and concepts 及其 4.2.7 Reference points、Clause 5 High level feature、Clause 8 Control and User Plane Protocol Stacks 定義 5G 核心網路與 RAN 之間的參考點（Reference Points）包括 N2：gNB ↔ AMF（控制面）與 N3：gNB ↔ UPF（用戶面），並指出該 N-interfaces 標準化介面分別使用 NGAP 與 GTP-U。

(2) 3GPP TS 23.502

3GPP, TS 23.502, "5G; Procedures for the 5G System (5GS)", Version 19.8.0, 2026-06。該文件提及 NG 介面上的控制流程（如 Session 建立）以對應包括 N2 上的 NGAP 信令行為與 N3 上的 GTP tunnel 建立；其中 Clause 4 System procedures 定義 NG 介面上發生的具體流程（procedures），包含 UE 註冊（透過 N2）、PDU session 建立（N2＋N3）、QoS 配置、與 UPF 選擇。

(3) 3GPP TS 38.300

3GPP, TS 38.300, "5G; NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及 NG interface 技術的協定堆疊與控制／用戶面分離；其中 Clause 4.3 Network Interfaces 及其 4.3.1 NG Interface 定義 NG 介面在 RAN 側的實作包括 gNB ↔ AMF 的 NG-C（N2）與 gNB ↔ UPF 的 NG-U（N3），並說明協定堆疊分別包括 NGAP over SCTP（控制面）與 GTP-U over UDP/IP（用戶面）。

(4) 3GPP TS 38.413

3GPP, TS 38.413, "5G; NG-RAN; NG Application Protocol (NGAP)", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及 N2 控制面在 NG 控制流程的實體協定；其中 Clause 8 NGAP Procedures、Clause 9.2 Message Functional Definition and Content 定義 gNB ↔ AMF 之間的 NGAP 應用層信令，包含 UE context setup、registration signaling、paging 與 handover signaling。

(5) 3GPP TS 29.281

3GPP, TS 29.281, "5G; General Packet Radio System (GPRS) Tunnelling Protocol User Plane (GTPv1-U)", Version 19.2.0, 2025-09。該文件提及 N3 用戶面資料傳輸機制；其中章節定義用於 gNB ↔ UPF（N3）的用戶面封包封裝（GTP-U）。

(6) 3GPP TR 38.821

3GPP, TR 38.821, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)", Version 16.2.0, 2023-04。該文件提及 NG interface 在通透型 NTN 中完全不變，僅影響 latency 與 timing（非協定上的）；其中 Clause 5.1 Transparent satellite based NG-RAN architecture 描述通透型 NTN 架構包括衛星為 RF relay 且 NG-RAN 節點即基站（gNB）在地面，且強調 NG 介面仍在地面終止（gNB ↔ 5GC）。

(d) 技術指標

(1) NGAP 信令重傳率（NGAP Retransmission Rate）

由於匯集鏈路（Feeder Link）經由通透型衛星中繼，NG-C（控制面）在傳輸 AMF NAS 信令時，因長延遲或暫時性氣候衰落導致的 NGAP 訊息重傳比率須≤ 0.1%。

(2) GTP-U 隧道 Jitter 容忍度（GTP-U Jitter Tolerance）

NG-U（用戶面）傳輸因 LEO 衛星動態軌道造成的都卜勒頻移與延遲變化時，NG 介面硬體 Jitter 緩衝區（Jitter Buffer）須能平滑吸收±20 ms 的動態 Jitter。

7.3 3GPP NTN 用戶設備（UE）與核心網路（CN）介面

7.3.1 採用衛星不分類型，UE 與 5GC 的 N1（NAS）

採用衛星不分類型，UE 與 5GC 的 N1（NAS）示意如圖 43 與圖 44。

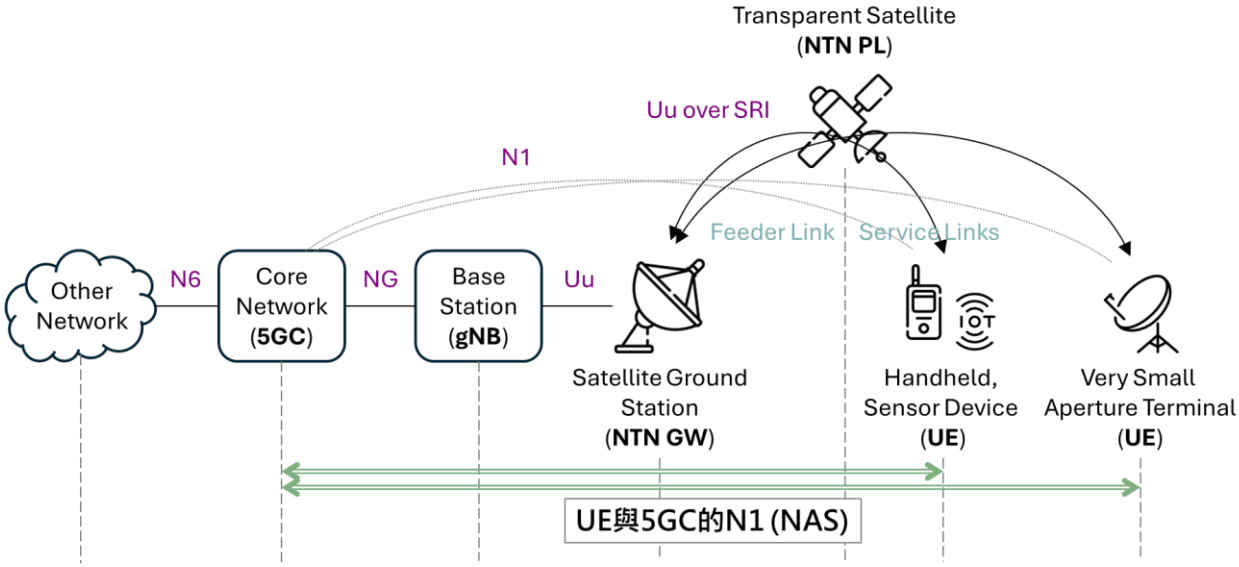


圖 43、3GPP NTN 通透型系統的 UE 與 5GC 的 N1（NAS）

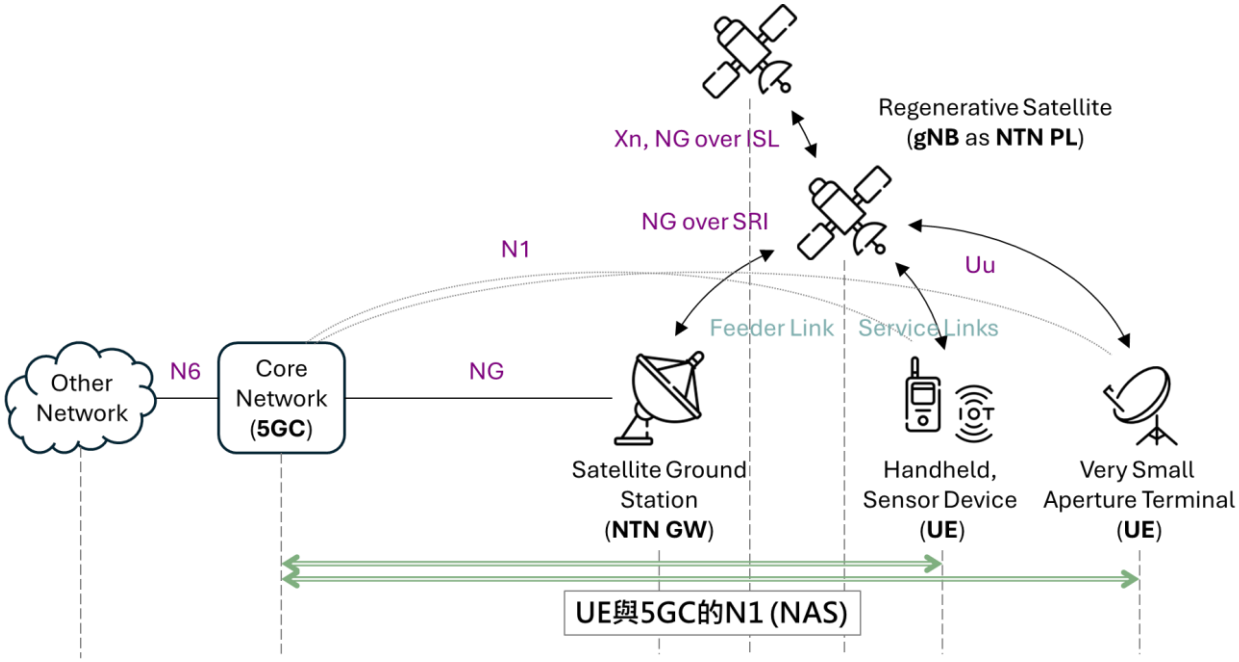


圖 44、3GPP NTN 再生型系統的 UE 與 5GC 的 N1（NAS）

(a) 設備或單元

用戶設備（User Equipment, UE）、5G 核網（5G Core, 5GC）；其中 5GC 包括的接取與行動管理功能（Access and Mobility Management Function, AMF）、驗證服務功能（Authentication Server Function, AUSF）、聚合資料管理（Unified Data Management, UDM）、用戶面功能（User Plane Function, UPF）。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 架構中，用戶設備（UE）與核心網路（CN）之間的介面核心是非接取層（Non-Access Stratum, NAS）。這個介面的設計原則是「架構透明性」，即讓 5G 核心網將衛星鏈路視為一種特殊的無線接取方式。然而，為了適應衛星環境，其主要內涵在 Release 17 之後進行了重要的增強與調整：

(1) 移動性與位置驗證（Mobility & Location Verification）

這是 NTN 中 NAS 介面最特殊的內涵。由於衛星波束覆蓋範圍跨度極大（甚至跨越國境），核心網路必須精確掌握 UE 位置。AMF 會透過 NAS 介面要求 UE 提供其地理坐標（經緯度），核心網會比對 UE 回報的位置與其接入的衛星波束資訊，以進行位置驗證（Location Verification），防止非法跨國接取或違反頻譜監管規定。在 LEO 衛星場景中，波束會高速移動。NAS 介面需處理頻繁的 TAU（Tracking Area Update）的追蹤區域管理（Tracking Area Management），確保核心網路能在正確的衛星波束下尋呼（Paging）到終端。

(2) 延遲耐受性（Delay Tolerance）

衛星鏈路（尤其是 GEO 衛星）的往返時延（RTT）遠高於地面網路，這直接影響了 NAS 程序的穩定性。NAS 介面上的信令程序（如註冊、鑑權、PDU 會話建立）都設有等待回傳的定時器，在 NTN 模式下，這些定時器的數值會被放大調整，以避免因衛星傳輸延遲導致的超時失敗。對於緊急呼叫（Emergency Call）等高時效要求訊息，NAS 介面定義了優先處理機制。

(3) 能力協商與星曆下載（Capabilities & Ephemeris）

UE 與 CN 必須在介面建立初期達成對彼此能力的認知。UE 在註冊（Registration）過程中，會透過 NAS 訊息告知 AMF 其是否支援 NTN 功能、支援哪些頻段，以及是否具備 GNSS（全球導航衛星系統）定位能力。核網可透過 NAS 介面輔助下發衛星星曆（Ephemeris）資訊，幫助 UE 預測衛星位置，加速小區搜尋與切換流程。

(c) 相關文獻來源

(1) 3GPP TS 24.501

3GPP, TS 24.501, "5G; Non-Access-Stratum (NAS) protocol for 5G System (5GS); Stage 3", Version 19.7.0, 2026-06。該文件提及 N1，即為 NAS 訊號內容本體，包括 Registration、Authentication 與 PDU Session NAS signaling；其中 Clause 4 General 的 4.1 Overview、4.4 NAS Security、4.5 Unified access control、Clause 5 Elementary procedures for 5GS mobility management、Clause 6 Elementary procedures for 5GS session management 與 Clause 9 General message format and information elements coding 定義 NAS message 結構與格式、UE ↔ AMF 訊號流程、協定行為與狀態機，涵蓋核心包括移動管理（5GMM）、交談管理（5GSM）、認證與安全（Security）、NAS 訊息編碼與解碼。

(2) 3GPP TS 23.501

3GPP, TS 23.501, "5G; System architecture for the 5G System (5GS)", Version 19.8.0, 2026-06。該文件提及 N1 介面的系統層定義、在整體架構中的位置、與 N2、N3、N6 的關係；其中 Clause 4 Architecture model and concepts 及其 4.2.7 Reference points、Clause 5 High level feature、Clause 8 Control and User Plane Protocol Stacks 定義 5G 系統架構與參考點，指出 N1 參考點在 UE ↔ AMF（NAS signaling）。

(3) 3GPP TS 23.502

3GPP, TS 23.502, "5G; Procedures for the 5G System (5GS)", Version 19.8.0, 2026-06。該文件提及 NAS 如何被實際運用而對應的 N1 message 流程（端到端）；其中 Clause 4 System procedures 定義 UE ↔ AMF 之間的實際流程，並描述如何使用 NAS 完成 Registration、PDU session establishment、QoS 設定。

(d) 技術指標

(1) NAS 註冊成功率（NAS Registration Success Rate）

UE 經由 LEO 或 GEO 鏈路向地面 5GC 的 AMF 發起註冊時，在考慮長往返時間（RTT）下，單次 NAS 流程成功率須≥ 99%。

7.4 地面接取設備與後端設備介面的開發建議

以下說明 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 共通技術指標與實務開發建議。

7.4.1 地面接取設備與後端設備介面共通技術指標

無論是 DVB-RCS 的 NCC 修正參數，還是 3GPP NTN 中因應地空距離變動的 TA（Timing Advance，時間提前量）計算，其介面在傳遞時序修正值時，硬體量測與運算精度皆要求在亞微秒（Sub-microsecond）等級。當後端（NMC 或 5GC）突發的大量控制指令（如 DVB 的 TIM 表更新、5G 的 Paging）時，地面接取設備（GW 或 NTN 閘道）介面在等待地空確認（ACK）期間，兩者都要注意其硬體控制佇列（Control Queue）的快取容量限制。

7.4.2 地面接取設備與後端設備實務建議

(1) 動態調整 5G gNB 基站與 DVB NCC 的「信令計時器（Timers）」

地面 5G 核網與標準 DVB 網管的計時器（如 3GPP 的 T3410 註冊計時器、SCTP heart beat 逾時、SNMP 逾時）通常以毫秒或 1～2 秒為單位。在 NTN（特別是 GEO 衛星或 LEO 換手期間）的長延遲環境下，這些計時器會容易逾時，導致 UE 的 N1 介面重複斷開重連，或 DVB RCST 被 NMC 判定為異常離線。因此製造商在開發地面閘道、gNB 軟體協定堆疊 5G 核網功能時，必須實作「時延感知型計時器（Latency-Aware Timers）」。系統應根據當前軌道星曆（Ephemeris）計算出的 RTT，動態將 3GPP NAS 計時器及 SCTP T1-init 計時器放寬（例如從 1 秒調整至 4～8 秒）；DVB NCC 的 TIM 廣播與 RCST 回應計時器亦需同步放大容忍範圍。

(2) 再生型架構下的「快取重傳與狀態機凍結」機制

當採用再生型衛星（星載基站）時，衛星高速移動會導致地空匯集鏈路（Feeder Link）頻繁在中斷與換手（Handover）。在此瞬間，地面 NTN 閘道與 5GC 之間的 NG 介面實體鏈路會暫時中斷，若直接讓地面 5GC 判定基站斷線，會引發核網內部大量清除用戶狀態（Context Clear）的災難。因此製造商在開發 NTN 閘道與地面核心網路介面時，應引入

「狀態機凍結與轉發快取（State-Machine Freezing & Forward Buffering）」機制。當偵測到 Feeder Link 換手時，介面軟體應對 AMF 與 UPF 隱瞞中斷狀態（透過代理維持 SCTP 存活的訊號），並將 N6 與 NG 下行的用戶數據與 NAS 控制信令暫存在地面閘道的硬體緩衝區中，待衛星與新閘道重新連線後即時補發，將星載基站換手對地面核心網的衝擊降至消失。

(3) 多波束（Multi-beam）與多載波環境下的動態時序預補償演算法

無論是 3GPP NTN UE 還是 DVB RCST，在開機接入時（N1 介面的隨機接入或 RCS 的 Logon 流程），如果因為高度移動或多波束切換，導致時序提前量（TA）或時序偏移（Timing Offset）計算不準，發射信號（Burst）或前導碼（Preamble）就會在時間軸上與其他用戶重疊，直接導致地面接收端的多載波解調器（MCD）接收困難。因此終端設備（UE 或 RCST）的韌體開發，必須內建基於絕對時間、定位與衛星軌道預測的「主動式時序與頻率預補償（Proactive Open-Loop Compensation）演算法」。在信令送出 N1 介面或射頻前端之前，硬體晶片組必須先自行扣除因空間距離引起的延遲（計算當前時間點的即時距離）與都卜勒頻移，確保送達另一地面接取設備（即 gNB 或 GW）的訊號誤差控制在微秒（us）級的保護間隔（Guard Interval）之內。

(4) 管理面區別「Alignment」與「Calibration」告警

如第 6.3.2 節所述，本章提及的地面接取設備與後端設備在管理面的軟體設計上，Alignment（對準）與 Calibration（校正）兩種告警必須完全獨立。

8. 地面接取設備與衛星介面

本章延續第 4.5 節，包括對應 DVB-S/RCS 系統的「DVB-S/RCS 衛星終端（RCST）、閘道、與衛星介面」與對應 3GPP NTN 系統的「用戶設備（UE）、NTN 閘道、與 NTN 酬載介面」所調查的標準內容以及相關建議。

8.1 DVB-S/RCS 衛星終端（RCST）、閘道、與衛星介面

8.1.1 採用通透型衛星時，RCST 與 GW 的 FL、RL

採用通透型衛星時，RCST 與 GW 的 FL、RL 示意如圖 45。

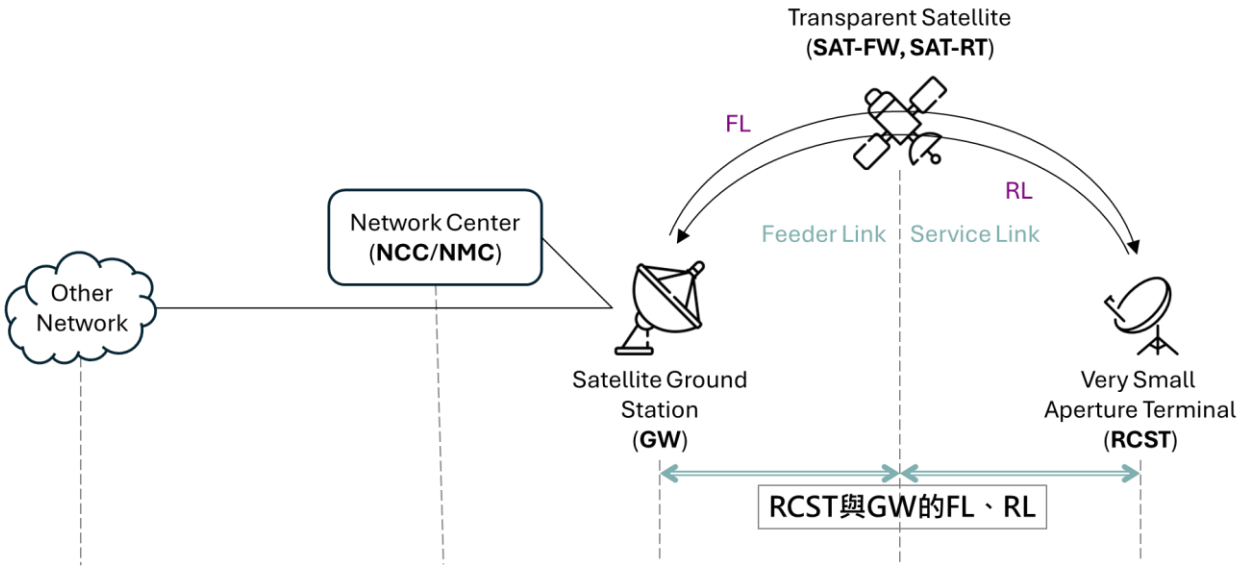


圖 45、DVB-S/RCS 通透型系統的 RCST 與 GW 的 FL、RL

(a) 設備或單元

衛星終端（Return Channel Satellite Terminal, RCST）、閘道（Gateway）。

(b) 主要內涵

在 DVB-S/RCS 的通透型架構中，衛星僅作為彎管（Bent-pipe）轉發無線電訊號。這意味著所有複雜的基頻處理、同步、資源調度以及封裝協定，完全由地面端的衛星終端

（RCST）與閘道（Gateway）負責。以下是 forward link 與 return link 在此架構下的主要技術內涵：

(1) 前向鏈路（Forward Link, FL)：Gateway → RCST

Forward link 是由閘道發送給所有終端的廣播或群播鏈路。其核心內涵在於高效能傳輸與控制資訊的下發。閘道發射的是一條連續的數據流（通常採用 DVB-S2 標準）的連續時分多工（Continuous TDM)，所有在該波束下的 RCST 都會接收並過濾出屬於自己的封包。主要採用 GSE（Generic Stream Encapsulation）或 MPE（Multi-Protocol Encapsulation）的多層級封裝（Encapsulation）將 IP 數據映射至 DVB 傳送流，再透過 BBFrame（Baseband Frame）結構，結合 ACM（自適應編碼調變)，根據各個終端所在地的天候狀況（如雨衰）即時調整信號強度與速率。閘道透過 forward link 廣播 SI（System Information）表單的信令公告（Signalling Broadcast)，關鍵表單包括 SCT（System Composition Table）定義頻率結構，以及 TBTP（Terminal Burst Time Plan）如同點名表告知各終端在 Return Link 哪個時槽可以說話。

(2) 回傳鏈路（Return Link, RL)：RCST → Gateway

Return link 是由各個終端回傳至閘道的互動鏈路。其核心內涵在於多用戶接取控制與精確同步。Return Link 將頻寬切分為多個頻率與時槽（Time Slots）的多頻段時分多路接取（MF-TDMA)，RCST 僅在被分配到的特定時間與頻率發送突發信號（Burst)，這大幅節省了衛星頻寬資源。RCST 會持續向閘道發送 Capacity Requests（容量請求)，報告本地緩存中有多少數據等待傳送，閘道之後 NCC 即時計算並更新分配，實現頻寬隨需而變的動態容量分配（DAMA)。由於通透型衛星不處理訊號，且衛星與終端的相對距離會變化，RCST 必須精確計算傳播延遲以進行精確同步補償（Timing & Frequency Correction)，RCST 會透過 SYL（Synchronization Log-on）過程調整發射時間與頻率，確保信號準時抵達閘道的突發接收機（Burst Receiver)。

(c) 相關文獻來源

(1) ETSI EN 300 421

ETSI, EN 300 421, "DVB; Framing structure, channel coding and modulation for 11/12

GHz satellite services", Version 1.1.2, 1997-08。該文件提及 FL(DVB-S)必須符合 MPEG-TS framing 與 broadcast 傳輸模型；其中 Clause 4 Transmission system 定義包括 MPEG-TS 傳輸、QPSK 調變、channel coding。

(2) ETSI EN 301 790

ETSI, EN 301 790, "DVB; Interaction channel for satellite distribution systems", Version 1.5.1, 2009-05。該文件提及 FL 與 RL 完整定義；其中 Clause 4.3 Reference model of the Satellite Interactive Network、Clause 5 Forward link、Clause 6 Return link base-band physical layer specification and multiple access definition 說明 FL 由 Feeder station 廣播 DVB-S 信號，傳送使用者資料與控制訊號，RL 是 RCST 透過 MF-TDMA 回傳資料與資源請求。

(3) ETSI EN 302 307-1

ETSI, EN 302 307-1, "DVB; Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2", Version 1.4.1, 2014-11。該文件提供 FL 效率提升，包含 per-terminal link adaptation；其中章節說明改進 FL 包括 Adaptive Coding and Modulation（ACM）與 Variable Coding（VCM）。

(4) ETSI EN 301 545-2

ETSI, EN 301 545-2, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard", Version 1.5.1, 2026-04。該文件完整規範 FL 與 RL，是 RCS 後續演進；其中 Clause 5 Forward Link and Regenerative Mesh Downlink、Clause 7 Return Link and Mesh Uplink 定義 FL 與 RL 的低層，支援通透型星狀網路。

(d) 技術指標

本節提出基頻技術相關指標，射頻與天線相關指標請見第 8.3.1 節。

(1) 發射信號保護間隔符合性（Burst Guard Interval Compliance）

由於 RL 採用 MF-TDMA 發射，RCST 發射的 Burst 抵達閘道多載波解調器（MCD）時，時序誤差必須控制在保護間隔（Guard Interval，通常≤1 至 3 μs）內，以防干擾相鄰

時槽。

(2) ACM 切換遲滯範圍（ACM Hysteresis Window）

當前向鏈路（FL）因雨衰導致 C/N 迅速變動時，硬體調變器在 32APSK、16APSK、QPSK 之間切換的點對點反應時間須≤ 20 ms，且錯誤率（PER）須維持在 10^{-7} 以下。

8.1.2 採用再生型衛星時，RCST/GW 與衛星的 DL、UL

採用再生型衛星時，RCST/GW 與衛星的 DL、UL 示意如圖 46。

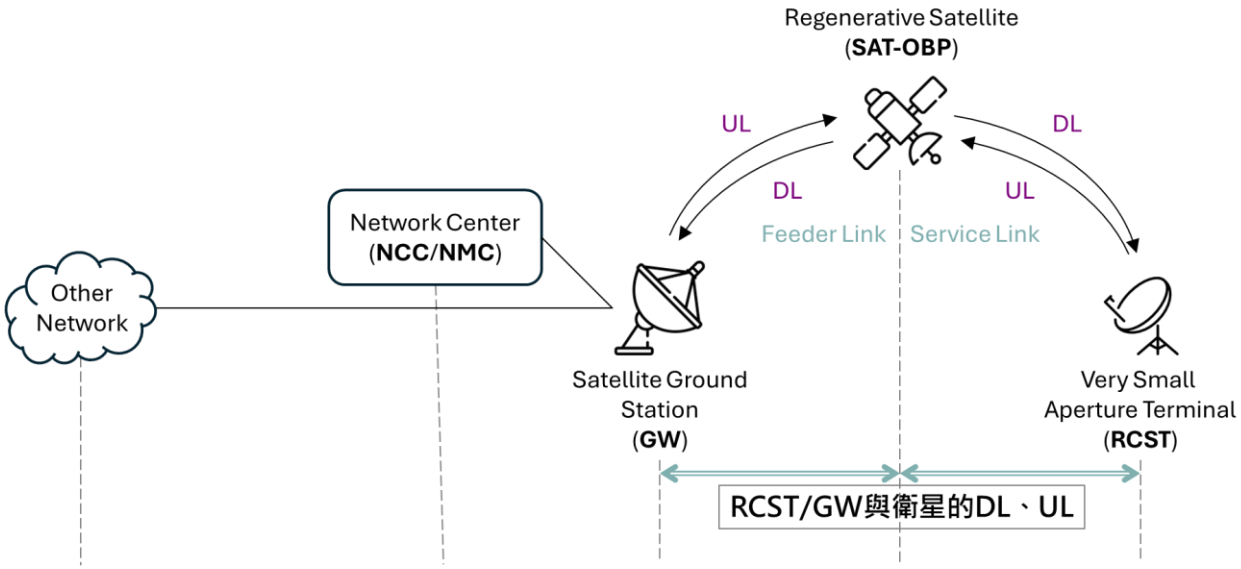


圖 46、DVB-S/RCS 再生型系統的 RCST/GW 與衛星的 DL、UL

(a) 設備或單元

衛星終端（Return Channel Satellite Terminal, RCST）、閘道（Gateway, GW），星載處理器（On-Board Processing, OBP）。

(b) 主要內涵

在 DVB-S/RCS 的再生型架構中，衛星的角色從單純的信號轉發器演變為軌道上的網路節點。這意味著衛星具備解調、位元錯誤校正、封包路由及重新調變的能力。以下是 uplink（上行）與 downlink（下行）在再生型架構下的核心內涵：

(1) 上行鏈路（Uplink, UL）：GW 與 RCST → 衛星

再生型架構的上行鏈路最主要的內涵是「鏈路終止」。衛星直接解調來自 RCST 的 MF-TDMA 信號或來自閘道的連續信號，達成物理層解耦（Link Decoupling），這意味著上行鏈路產生的熱雜訊與干擾會在衛星端處理，不會累積到下行鏈路。由於衛星能看見上行封包的內容，它可以即時處理容量請求（Capacity Requests），縮短動態頻寬分配（DAMA）的控制迴路，以提升反應速度的星載資源分配（On-Board Scheduling）。衛星對接收到的封包執行前向錯誤校正（FEC）解碼，即使上行訊號品質邊緣化，只要能成功解碼，衛星就能重新生成原本的位元流。

(2) 下行鏈路（Downlink, DL）：衛星 → GW 與 RCST

下行鏈路的內涵在於「信號再生」與「跨波束調度」。衛星將處理後的基頻數據重新進行 DVB-S2 調變。這使得下行鏈路始終保持最高的信號強度與純度，顯著降低了對地面接收天線口徑的要求。衛星內部的交換矩陣可以根據封包標頭進行星載基頻交換（On-Board Switching），將來自某個上行波束的數據路由到任何一個下行波束，這實現了 mesh（終端對終端）直接通訊，延遲從「地面-衛星-地面-衛星-地面」的兩跳（Double-hop）縮減為一跳（Single-hop）。衛星可以根據各個波束的擁塞情況，在軌調整下行資料的優先等級（QoS）流量塑型，確保語音或關鍵信令優先發射。

(c) 相關文獻來源

(1) ETSI TS 101 545-1

ETSI, TS 101 545-1, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 1: Overview and System Level specification", Version 1.4.1, 2026-01。該文件提及可在衛星內部處理的 RCST ↔ Satellite ↔ Gateway 關聯架構；其中 Clause 4 System definition 定義 DVB-RCS2 整體系統架構，包含通透型與再生型的網狀（Mesh）拓樸。

(2) ETSI EN 301 545-2

ETSI, EN 301 545-2, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard", Version 1.5.1, 2026-04。該文件完整規範 DL 與 UL，是 RCS 後續演進；其中 Clause 5 Forward Link and Regenerative Mesh Downlink、

Clause 7 Return Link and Mesh Uplink 規範低層適用於再生型網狀（Mesh）拓樸，並指出 forward link 支持 GSE 封裝與 return link 使用 RLE（Return Link Encapsulation）。

(3) ETSI TR 101 545-4

ETSI, TR 101 545-4, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 4: Guidelines for Implementation and Use of EN 301 545-2", Version 1.2.1, 2026-01。該文件補充 DL 與 UL 工程實作與部署層面；其中 Clause 4.4 Architecture with regenerative satellites and NGSO、Clause 5 Forward Link、6 Return Link 提供系統實作，包含再生型衛星酬載的實作。

(d) 技術指標

本節提出基頻技術相關指標，射頻與天線相關指標請見第 8.3.1 節。

(1) 星載解調與再調變延遲（On-board Demod-Remod Latency）

衛星酬載直接進行基頻解調與再調變。量測指標要求星載轉發晶片的處理延遲須≤2 ms，以防放大端到端的 Jitter。

8.2 3GPP NTN 用戶終端（UE）、NTN 閘道、與 NTN 酬載介面

8.2.1 採用通透型衛星時，UE 與 NTN GW 的 Uu over SRI

採用通透型衛星時，UE 與 NTN 閘道的 Uu over SRI 示意如圖 47。

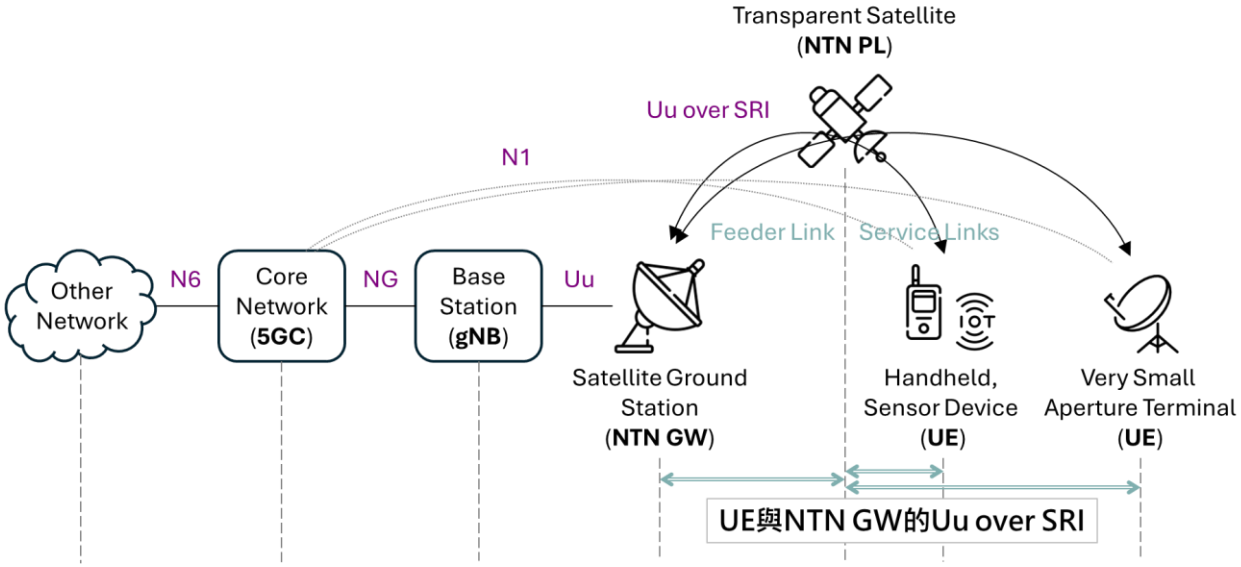


圖 47、3GPP NTN 通透型系統的 UE 與 NTN GW 的 Uu over SRI

(a) 設備或單元

用戶設備（User Equipment, UE）、NTN 閘道（NTN Gateway）、NTN 酬載（NTN Payload）。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 的通透型架構中，Uu 介面（UE 與 gNB 之間的無線介面）在物理上被「拉長」，其訊號必須跨越衛星鏈路。由於衛星僅作為射頻中繼（Bent-pipe），所有的協定處理都在地面完成。因此，UE 與 NTN 閘道之間關於 Uu 介面的主要內涵，集中在如何解決超長傳播延遲與高速多普勒頻移帶來的物理層與鏈路層挑戰。

(1) 物理層補償與同步強化（Physical Layer Enhancements）

這是 Uu 介面在 NTN 中最核心的變動，目的是讓標準的 5G NR 訊號能在衛星長距離傳輸下依然保持同步。在地面網路時，時序提前量（Timing Advance, TA），但在 NTN 時 UE 必須進行預補償（Pre-compensation），UE 利用自身 GNSS 位置與衛星星曆（Ephemeris），自主計算並在發射前提前偏置訊號，以抵消衛星服務鏈路與饋送鏈路造成的巨大雙向時延（RTT）。由於 LEO 衛星高速移動，會產生極大的頻率偏移，Uu 介面要求 UE 與地面站（經由 NTN 閘道）共同協作多普勒頻移補償（Doppler Shift Compensation），在發射與接收端進行頻率預偏置，確保子載波間隔（SCS）的穩定。

(2) 鏈路層程序的適應性（MAC、RLC、PDCP Layer）

由於 RTT 顯著增加（GEO 可達 540 ms 以上），傳統 5G 的反饋機制必須調整。在 NTN 中，傳統的停止並等待（Stop-and-Wait）混合式自動重傳要求（Hybrid Automatic Repeat request, HARQ）機制會因等待確認（ACK/NACK）時間過長而導致吞吐量崩潰，Uu 介面支援 HARQ 禁用（HARQ disabling）或增加 HARQ 進程數量，並引入更長的重傳定時器（Timers）以達成 HARQ 程序優化。由於延遲大，隨機接取頻道（Random Access Channel, RACH）流程中的定時器（如 ra-ResponseWindow）會被顯著放大以進行隨機接取（Random Access）優化，確保 UE 有足夠時間接收來自 NTN 閘道轉發的基站回應（RAR）。

(3) 衛星星曆與系統資訊（System Information Broadcast）

Uu 介面的控制面內涵包含了衛星的動態資訊。NTN 增加專屬的系統資訊 SIB19（System Information Block 19），地面基站經由 NTN 閘道廣播衛星的星曆資訊（Ephemeris）及公共延遲（Common Drift）參數，UE 藉此掌握衛星位置，從而進行上述的 TA 與多普勒補償，並判斷何時進行衛星間的換手（Handover）。

(c) 相關文獻來源

(1) 3GPP TS 38.300

3GPP, TS 38.300, "5G; NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及 Uu 介面的系統架構定義與 UE 與 gNB 之間的無線通信模型；其中 Clause 4 Overall Architecture and Functional Split 定義 NG-RAN 整體架構與 UE ↔ gNB 之間的無線接入（Uu interface），並說明 gNB 提供完整 NR 協定終止。

(2) 3GPP TS 38.401

3GPP, TS 38.401, "5G; NG-RAN; Architecture description", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及的 Uu 終止於 gNB，故在通透型 NTN 中當 gNB 位於 Gateway 即為 Uu over SRI 終點；其中 Clause 5 General architecture、Clause 6.1.1 Overall Architecture of NG-RAN 描述 gNB 架構與 Uu 終止位置，並說明 gNB 與 Uu 無線介面的交互關係。

(3) 3GPP TS 38.331

3GPP, TS 38.331, "5G; NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及 RRC，為 Uu 控制面（CP）的核心；其中 Clause 4 General、Clause 5 Procedures 定義 UE ↔ gNB 控制面訊令，包含 RRC connection establishment、mobility management 與 measurement & reporting。

(4) 3GPP TR 38.821

3GPP, TR 38.821, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)", Version 16.2.0, 2023-04。該文件提及 Uu 實體延伸（兩段鏈路）與 NTN 傳輸模型；其中 Clause 5 NTN-based NG-RAN Architectures 定義 NTN 系統構成，並說明 Service Link（UE ↔ Satellite）、Feeder Link（Satellite ↔ Gateway）與通透模式。

(5) 3GPP TS 38.211/212/213

3GPP, TS 38.211, "5G; NR; Physical channels and modulation", Version 19.4.0, 2026-06；3GPP, TS 38.212, "5G; NR; Multiplexing and channel coding", Version 19.4.0, 2026-06；3GPP, TS 38.213, "5G; NR; Physical layer procedures for control", Version 19.4.0, 2026-06。該系列文件提及對 NTN 加入延遲與 Doppler 補償；各別文件章節的重點包括 OFDM modulation、HARQ 和 timing advance。

(6) 3GPP 官方網站

3GPP 官方網站的 Non-Terrestrial Networks (NTN)。該頁面提及 Uu 在 NTN 中的運作特性，其中重點在於 NTN 增加 timing advance 補償與 Doppler correction。

(d) 技術指標

本節提出基頻技術相關指標，射頻與天線相關指標請見第 8.3.1 節。

(1) 都卜勒頻移預補償殘留誤差（Residual Doppler Error）

在 LEO 軌道下，由於衛星高速移動引發極大的都卜勒頻移（可達±幾百 kHz），經由 SRI 中繼後，UE 射頻前端與基頻晶片的動態追蹤殘留誤差必須≤0.1 ppm（約幾百 Hz），否則無法維持子載波（Subcarrier）正交性。

8.2.2 採用再生型衛星時，UE 與 NTN PL gNB 的 Uu

採用再生型衛星時，UE 與 NTN 酬載 gNB 的 Uu 示意如圖 48。

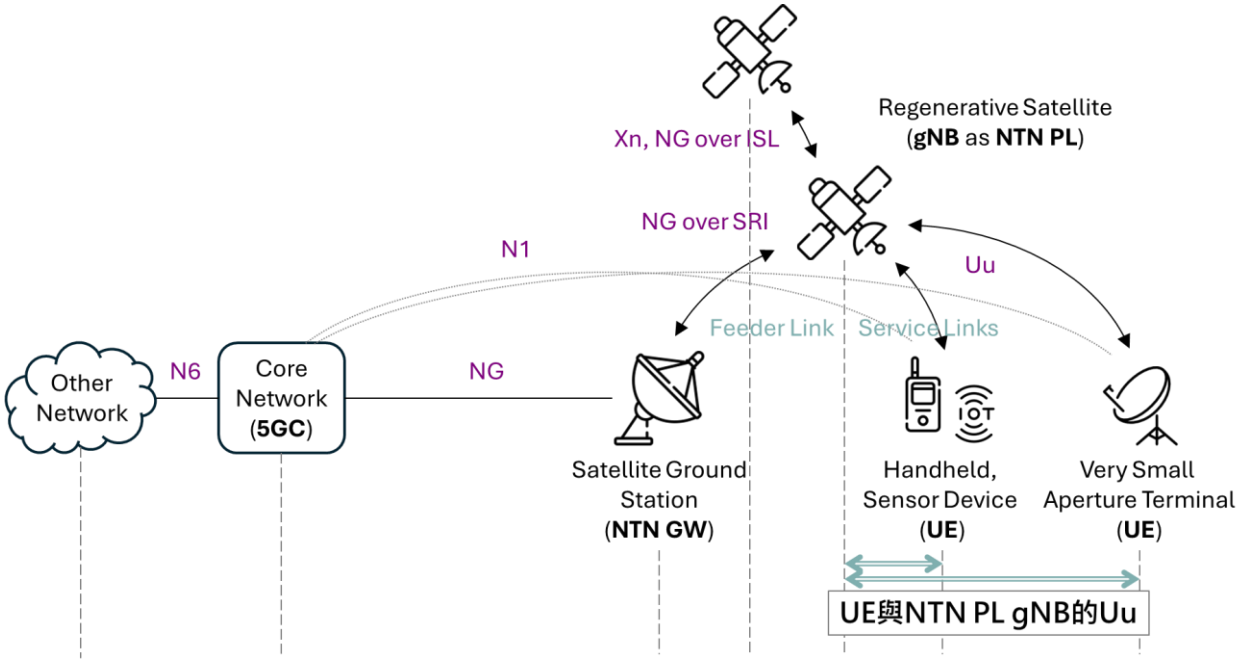


圖 48、3GPP NTN 再生型系統的 UE 與 NTN PL gNB 的 Uu

(a) 設備或單元

用戶設備（User Equipment, UE）、NTN 酬載（NTN Payload）。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 的再生型架構下，Uu 介面（UE 與基站之間的無線介面）的性質與通透模式在設備的關連上有顯著的不同，此時 Uu 介面的邏輯終點從地面移動到衛星上。在這種架構下，衛星酬載即變成 gNB 的完整或部分功能，這使得 UE 與 NTN 閘道之間關於 Uu 介面的運作內涵產生了以下變革：

(1) 介面終止與鏈路解耦（Interface Termination）

在再生型架構中，Uu 介面的協定棧在衛星上即被終結，不再延伸至地面閘道。UE 僅需與衛星上的 gNB 實體進行同步的單段 Uu 控制。這意味著 Uu 介面僅涵蓋 Service Link（服務鏈路），而不包含從衛星到地面閘道的 Feeder Link（匯集鏈路）。衛星與 NTN

閘道之間的通訊不再屬於 Uu 介面，而是演變為無線後置（Wireless Backhaul），通常承載的是封裝後的 NG 介面（N2/N3）或 Xn 介面訊務。

(2) 時序與頻率補償的簡化（Timing & Frequency Compensation）

由於 gNB 就在衛星上，Uu 介面的物理層挑戰大幅減輕。在往返時延（RTT）減半的情況下，UE 在進行時序提前量（Timing Advance, TA）補償時，只需要考慮其與衛星之間的距離。相較於通透模式，這減少了 feeder link 帶來的巨大延遲波動。衛星 gNB 可以直接在軌處理 UE 的頻移，UE 僅需補償其相對於衛星的相對位移，這使得 Uu 介面的同步程序更接近地面 5G 的運作模式。

(3) 星載調度與重傳機制（On-Board Scheduling & HARQ）

這是再生架構提升通訊效率的關鍵內涵。由於調度器（Scheduler）位於衛星上，Uu 介面的無線資源分配可以在毫秒級內完成，無需等待地面閘道的指令。數據包的重傳（HARQ）直接在 UE 與衛星之間完成。這避免了因長傳播延遲導致的 HARQ 程序停擺，大幅提升了 Uu 介面的吞吐量與可靠性。

(4) 系統資訊與接入控制（System Information）

Uu 介面的控制平面內容也隨之調整。雖然仍會廣播星曆資訊（如 SIB19），但其主要目的是輔助 UE 進行移動性預測。所有的隨機接入程序（RACH）由衛星直接處理。UE 接收到的隨機接入回應（RAR）是直接由衛星生成的，反應速度極快。

(c) 相關文獻來源

(1) 3GPP TS 38.300

3GPP, TS 38.300, "5G; NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及的 Uu 介面在再生型 NTN 中仍完全沿用 TS 38.300 定義，但 gNB 位置由地面移至衛星；其中 Clause 4 Overall Architecture and Functional Split 定義 UE 與 gNB 之間的 Uu 空中介面與 NR 協定分層與功能分布，並描述 gNB 終止 PHY、MAC、RLC、PDCP、RRC 協定。

(2) 3GPP TS 38.401

3GPP, TS 38.401, "5G; NG-RAN; Architecture description", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及的 Uu，若 gNB 部署於衛星，就終止於衛星 payload；其中 Clause 6.1.1 Overall Architecture of NG-RAN 定義 gNB 是 Uu 介面的終止點，並說明 RAN 節點與無線介面的關係。

(3) 3GPP TS 38.331

3GPP, TS 38.331, "5G; NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及的 RRC 在再生型 NTN 中直接在衛星 gNB 終止，因此 Uu 控制面（RRC）在地空之間運作。其中 Clause 5 Procedures 定義 UE ↔ gNB 之間控制面協定，涵蓋包括 connection setup、radio configuration 與 mobility control。

(4) 3GPP TS 38.211/212/213/321/322/323

3GPP, TS 38.211, "5G; NR; Physical channels and modulation", Version 19.4.0, 2026-06；3GPP, TS 38.212, "5G; NR; Multiplexing and channel coding", Version 19.4.0, 2026-06；3GPP, TS 38.213, "5G; NR; Physical layer procedures for control", Version 19.4.0, 2026-06；3GPP, TS 38.321, "5G; NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification", Version 19.3.0, 2026-06；3GPP, TS 38.322, "5G; NR; Radio Link Control (RLC) protocol specification", Version 19.3.0, 2026-06；3GPP, TS 38.323, "5G; NR; Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification", Version 19.1.0, 2026-01。該系列文件提及的 PHY、MAC、RLC、PDCP 協定全部在衛星 gNB 終止且執行，重要的特性是 MAC scheduler 在衛星而 HARQ 不需在地面設備之間往返；各別文件章節的重點包括 PHY OFDM 調變與 channel coding、MAC scheduling 與 HARQ、RLC segmentation 與 ARQ、以及 PDCP header compression 與 security。

(5) 3GPP TR 38.821

3GPP, TR 38.821, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)", Version 16.2.0, 2023-04。該文件提及在再生型 NTN 中，gNB（部分或全部）可部署於衛星，因此 Uu interface：UE ↔ Satellite gNB；其中 Clause 5 NTN-based NG-RAN Architectures 定義 NTN 兩種模式：通透型（RF relay）與再生型（含 gNB 功能），說明 NR functions 可

部署於衛星，並描述 satellite as part of NG-RAN。

(d) 技術指標

本節提出基頻技術相關指標，射頻與天線相關指標請見第 8.3.1 節。

(1) 隨機接入（RACH）動態 TA 補償範圍

在衛星上直接運行 gNB 的情況下，UE 在發起 RACH 時，其硬體必須能自主計算並補償高達數毫秒（ms）等級的時間提前量（Timing Advance, TA），以確保 Preamble 能精確落入星載基站的接收範圍。

8.2.3 採用再生型衛星時，NTN PL gNB 與 NTN GW 的 NG over SRI

採用再生型衛星時，NTN 閘道與 NTN 酬載 gNB 的 NG over SRI 示意如圖 49。

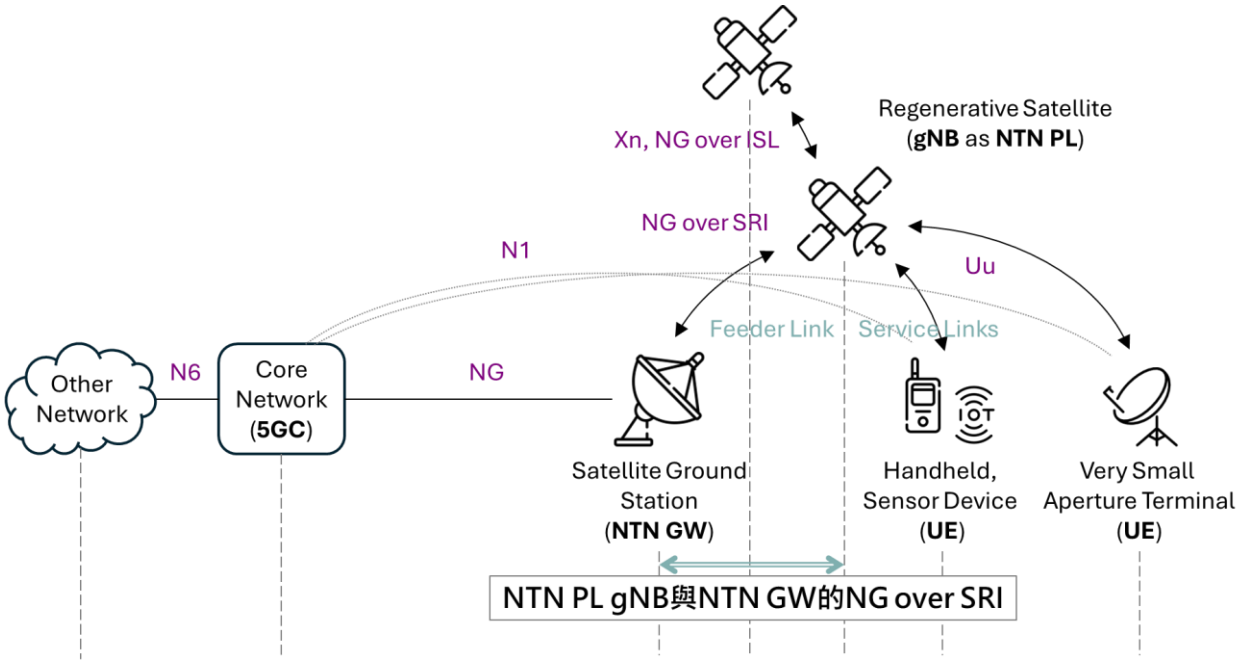


圖 49、3GPP NTN 再生型系統的 NTN PL gNB 與 NTN GW 的 NG over SRI

(a) 設備或單元

位於 NTN 酬載（NTN Payload）的 5G 基站（Next Generation NodeB, gNB）、NTN 閘

道（NTN Gateway）。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 的再生型架構中，NTN 閘道（NTN Gateway）與 NTN 酬載（NTN Payload）之間的介面定義為 NG over SRI。此介面的本質是將原本在地面網路中透過光纖傳輸的 NG 介面（gNB 與核心網之間的標準介面），封裝在衛星無線電介面（SRI, Satellite Radio Interface）之上。以下是其主要技術內涵：

(1) 在再生型架構的後置（backhaul）

在通透型架構中，閘道傳輸的是 Uu 介面的射頻訊號；而在再生型架構下，閘道與衛星之間的鏈路變成了無線後置（Wireless Backhaul）。NG 介面的一端是地面核心網（5GC），另一端則是位於衛星酬載上的基站（gNB）。SRI 扮演的是底層傳輸載體（Transport Network），負責在動態的衛星環境中，穩定地承載 N2（控制面）與 N3（用戶面）的訊務。

(2) 控制面（N2）的內涵

透過 SRI 傳輸的 N2 信令，確保核心網能有效管理軌道上的基站。衛星 gNB 產生的 NGAP（NG Application Protocol）訊息會被封裝在 SRI 的無線訊框中，傳送至地面閘道，再轉發至核心網的 AMF。包含衛星基站的狀態更新、小區配置資訊，以及針對 NTN 特有的移動性管理（如衛星與地面站之間的切換準備）的星載狀態同步。

(3) 用戶面（N3）的內涵

處理 UE 與外部網路之間的實際數據流。用戶的 IP 封包在衛星上即被封裝進 GTP-U（GPRS Tunnelling Protocol for User Plane）的隧道封裝。由於衛星回傳頻寬珍貴，NG over SRI 介面通常包含流量塑型（Traffic Shaping）與標頭壓縮技術，以最大化饋送鏈路（Feeder Link）利用率的後置鏈路優化。

(4) 針對衛星環境的適應性技術

由於 SRI 必須應對衛星與閘道之間遠距離、高頻段（如 Ka/V 頻段）的物理特性，其內涵包含：確保控制平面的 N2 信令優先於 N3 數據流的後置調度與優先級，避免因鏈

路擁塞導致衛星基站與核心網路失聯。雖然 NG 介面是邏輯連接，但 SRI 必須處理衛星移動導致的時延變化（Delay Variation）的動態延遲補償，確保符合核心網規定的超時限制（Timers）。由於 NG 介面包含敏感的用戶與信令資訊，且是在開放的空間中傳輸，NG over SRI 必須包含強化的 IPsec 隧道或類似加密機制的安全性。

(c) 相關文獻來源

(1) 3GPP TS 23.501

3GPP, TS 23.501, "5G; System architecture for the 5G System (5GS)", Version 19.8.0, 2026-06。該文件提及 NG 介面協定與邏輯定義在再生型 NTN 中該 NG 介面被延伸至衛星（透過 SRI）；其中 Clause 4 Architecture model and concepts 及其 4.2.7 Reference points、Clause 5 High level feature、Clause 8 Control and User Plane Protocol Stacks 定義 5G 核心網路與 RAN 之間的介面包含 gNB ↔ AMF 的 N2（NG-C）與 gNB ↔ UPF 的 N3（NG-U），並說明控制面與用戶面分離以及 session 與 QoS 模型。

(2) 3GPP TS 38.401

3GPP, TS 38.401, "5G; NG-RAN; Architecture description", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及的 NG 終止於 gNB，在再生型 NTN 中 gNB 部署於衛星故 NG 終止於衛星；其中 Clause 6.1.1 Overall Architecture of NG-RAN 定義 NG-RAN 由多個 gNB 構成，gNB 透過 NG 連接 5GC，並強調 NG 接口終止於 gNB。

(3) 3GPP TS 38.413

3GPP, TS 38.413, "5G; NG-RAN; NG Application Protocol (NGAP)", Version 19.3.0, 2026-06。該文件提及的 NGAP 訊務在再生型 NTN 中經由 Feeder link（SRI）傳輸；其中 Clause 8 NGAP Procedures、Clause 9.2 Message Functional Definition and Content 定義 gNB ↔ AMF 之間的控制信令，包含功能 UE context setup、handover signaling 與 session trigger。

(4) 3GPP TS 29.281

3GPP, TS 29.281, "5G; General Packet Radio System (GPRS) Tunnelling Protocol User Plane (GTPv1-U)", Version 19.2.0, 2025-09。該文件提及的 GTP-U 訊務在再生型 NTN 中

在 gNB（satellite） ↔ UPF（ground）經由 SRI 傳輸；其中章節定義 User plane tunnel（GTP-U），包括功能 UE 資料傳輸與 PDU session 承載。

(5) 3GPP TR 38.821

3GPP, TR 38.821, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)", Version 16.2.0, 2023-04。該文件提及 Feeder link（SRI）承載 NG signaling（N2）和 User data（N3）；其中 Clause 4 Non-Terrestrial Networks overview and scenarios、Clause 5 NTN-based NG-RAN Architectures 定義 NTN 結構包含 Service link：UE ↔ Satellite 與 Feeder link：Satellite ↔ Gateway，並描述比較通透型與再生型衛星酬載。

(6) 3GPP 官方網站

3GPP 官方網站的 Non-Terrestrial Networks (NTN)。該頁面提及衛星可具備基站功能（gNB）使得 NG 需連接至衛星；其中再生型衛星有 on-board processing 可實現基站功能，衛星可進行訊號解調變、路由與調變。

(d) 技術指標

本節提出基頻技術相關指標，射頻與天線相關指標請見第 8.3.1 節。

(1) 匯集鏈路（Feeder Link）最大可用傳輸率

匯集鏈路（Feeder Link）在閘道與星載基站間，的骨幹傳輸介面，通常在 Ka/Q/V 頻段，既然是作為骨幹傳輸介面，其用戶面是否可達成其最大可用傳輸率，依賴硬體轉發的位元錯誤率（BER），在經過 LDPC 前向錯誤修正後 BER 須≤ 10^{-11}。

8.3 地面接取設備與衛星的開發建議

以下說明 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 共通技術指標與實務開發建議。

8.3.1 地面接取設備與衛星介面共通技術指標

3GPP 的 Uu over SRI 與 DVB-RCS 的 RL 介面，在面對非地球靜止軌道時，底層硬

體晶片組皆必須量測「頻率偏移變動率（Doppler Rate）」與「延遲變動率（Delay Drift Rate）」的追蹤與補償極限。DVB 的 ACM 與 3GPP NTN 的 AMC（自適應調變與編碼）是實體上是非常近似的機制，兩者皆需在空中介面上量測「通道狀態資訊（CSI 或 C/N）回報週期」與「實際調變降低/提升」之間的同步程度，不可因回報過期造成的適應能力不足而導致鏈路中斷（Outage）。

另外，兩者在射頻與天線相關的指標也有幾乎重疊之處，包括：

(1) 飽和輸出功率與回退度（P_{sat} and OBO/IBO）

對於上行（UL 或 RL）發射機的功率放大器（SSPA/GaN BUC）。在傳輸高階調變（如 DVB-S2X 32APSK 或 3GPP NTN OFDM 16QAM）時，為防止非線性失真，輸出功率回退（Output Back-Off, OBO）量測值須穩定維持在 3 至 6 dB 之間，且非線性交互調變失真（IMD3）須≤ -30 dBc。

(2) 動態功率控制範圍與步進精度（TPC Range & Step Accuracy）

發射端射頻前端必須支援至少 30 dB 的閉迴路動態功率控制範圍，以因應突發雨衰，其硬體功率調整步進精度（Step Size Accuracy）須≤ 0.5 dB，防止因功率過調而干擾相鄰波束。

(3) 天線增益與溫度比（G/T 值）

接收端（LNB 與天線整合系統）在指定的操作頻段（如 Ku/Ka Band）與最大仰角範圍內，整體射頻前端的 G/T 最低基準值（例如 Ka 頻段終端）通常要求≥ 12 dB/K，且 LNB 的雜訊指數（Noise Figure, NF）在全溫範圍內須≤ 1.2 dB。

(4) 全溫度增益平坦度（Gain Flatness over Temperature）

在整個射頻操作頻寬與-40℃至+85℃的工作溫度內，BUC/LNA 的頻帶內增益平坦度（Gain Flatness）在任意 500 MHz 內變化須≤ 1.5 dB。

(5) 瞬時頻寬操作（Instantaneous Bandwidth, IBW）

元件（如濾波器、雙工器）必須支援超寬頻操作，Ka 頻段元件的瞬時頻寬（IBW）須≥ 1 至 2 GHz，且帶外抑制（Out-of-band Rejection）在邊界 50 MHz 外須≥ 40 dBc，以

適應 3GPP 寬頻載波聚合或 DVB 多載波 MF-TDMA。

(6) 本地振盪器（LO）相位雜訊遮罩（Phase Noise Mask）

針對高頻段(Ka/Q/V 頻段)混頻器與頻率合成器，其相位雜訊在 10 kHz 偏移(Offset)下須≤-85 dBc/Hz，在 1 MHz 偏移下須≤-115 dBc/Hz，否則無法通過 3GPP NTN 或 DVB-S2X 的高階星座圖解調符合性。

(7) 主動陣列天線的等效全向輻射功率（EIRP Capacity）

當有採用相位陣列（Phased Array）天線時，其 EIRP 會受到主波束在不同掃描角的增益的影響，在最大掃描角（如±60°）下，其 EIRP 衰減（相對於 0°）須≤3 dB，且交叉極化隔離度（Cross-Polarization Isolation）須≥ 25 dB。

8.3.2 地面接取設備與衛星實務建議

(1) 晶片組與射頻前端：實作「開迴路（Open-Loop）與閉迴路混合型」時頻補償

地面通訊晶片（如標準 5G 手機或標準 DVB 接收晶片）是假設基站固定不動，依靠鎖相迴路（PLL）進行閉迴路動態追蹤。但在 LEO 衛星與地面接取設備互動時，延遲與都卜勒頻移的變化率（Doppler Rate）極快，單靠傳統閉迴路追蹤會導致晶片頻繁失鎖（Out-of-Lock)，造成 Uu 介面或回傳鏈路（RL）失效。因此製造商在研發終端設備（UE 或 RCST）時，必須在基頻晶片韌體中實作「開迴路與閉迴路混合補償架構」，硬體必須先利用絕對時間、定位數據與衛星曆書（Ephemeris）進行數學計算，在數位域完成「開迴路預補償」(扣除 90%以上因相對運動引起的時延與頻移)，剩餘的微幅漂移再交由傳統閉迴路（如 3GPP 的延展型步進 TA 與 AFC）進行精細鎖定。

(2) 多波束（Multi-beam）動態干擾優化：導入高階動態功率控制（TPC）

無論是 3GPP 還是 DVB 系統，衛星酬載通常使用多波束（Multi-beam）技術覆蓋地面。當衛星終端（UE 或 RCST）位於波束邊緣（Beam Edge）或發生雨衰時，若終端一味地盲目拉高發射功率（UL 或 RL)，會對相鄰波束或相同頻率時槽的其他用戶造成嚴重的同頻干擾(Co-channel Interference)。因此製造商在開發發射端射頻前端(BUC/HPA)時，控制軟體必須實作與基頻鏈路適應（ACM/AMC）相關的「動態閉迴路功率控制演

算法」。系統必須以小於 1 dB 的步進（Step Size）即時調整發射功率，在確保鏈路能克服大氣衰減（滿足最低目標功率要求）的同時，仍不超過預設的雜散干擾遮罩（Spurious Mask），以維持多波束環境下的頻譜效率。

(3) 功放線性度：導入數位預失真（DPD）與波峰因素降低（CFR）

衛星通訊為了拉高傳輸率，DVB-S2X 或 3GPP NTN 皆採用高階調變，這類訊號具有極高的峰值對平均功率比（PAPR），如果設計的 BUC/PA 一直工作在接近飽和點（P_{sat}）輸出，會導致嚴重的頻譜洩漏（Spectral Regrowth），直接違反標準的雜散發射（Spurious Emission）規範。因此製造商在設計射頻前端基板與微波電路時，必須在基頻或中頻（IF）端與射頻放大端之間，導入數位預失真（DPD）演算法與 CFR（波峰因素降低）技術，透過軟硬體主動反向補償 GaN/GaAs 功率放大器的非線性轉移曲線。這能讓 PA 的線性工作區間向上提升 2 至 3 dB，在維持合規的前提下提高輸出功率。

(4) 熱與高頻增益波動：實作動態自動增益補償（AGC）電路

衛星戶外單元（ODU）工作環境如溫度從冬天的-20°C升到夏天的+70°C時，射頻主動元件的晶體管增益會發生高達 6 dB 以上的漂移，這會導致 DVB 的 ACM 或 3GPP 的 AMC 演算法誤判通道品質，導致空中介面的調變機制頻繁在 QPSK 和 32APSK 之間轉換，造成鏈路極不穩定。因此製造商在升降頻電路（BUC/LNB）開發上，必須內建帶有溫度傳感器的「閉迴路熱增益補償電路（Temperature-Compensated AGC）」。研發團隊需在出廠測試時，對每個射頻模組進行全溫度的增益特性量測，並將補償參數寫入 EEPROM。在實際運作時，依據即時溫度動態調整可變衰減器（Voltage Variable Attenuator, VVA），確保全溫度增益波動≤±1 dB。

(5) 超高頻段（Ka/V Band）的基板與封裝（SiP/AoC）效應

隨著 3GPP NTN 與 DVB 邁向 Ka 甚至 Q/V 頻段，傳統的 PCB 材質（如 FR4）在高頻下損耗變大。同時，晶片封裝引腳產生的寄生電容與電感會改變濾波器與微帶線的阻抗匹配（Impedance Matching），導致電壓駐波比（VSWR）惡化與頻帶內增益漣波（Ripple）。因此封裝與硬體晶片廠在研發毫米波元件時，應改採用 PTFE（聚四氟乙烯）基材的高頻板（如 Rogers 生產的），並導入例如天線整合晶片（Antenna on Chip, AoC）的系統級封裝（System in Package, SiP）技術。在電路模擬階段，必須將打線（Wire-bonding）或倒

裝晶片（Flip-chip）的寄生參數完全納入 3D 電磁場模型中進行整體最佳化設計，確保射頻介面的輸入／輸出反射損耗（Return Loss）≥ 15 dB。

(6) 管理面區別「Alignment」與「Calibration」告警

如第 6.3.2 節所述，本章提及的地面接取設備與後端設備在管理面的軟體設計上，Alignment（對準）與 Calibration（校正）兩種告警必須完全獨立。

9. 地面接取設備內部單元介面

本章延續第 4.6 節，包括對應地面設備通用的「戶外單元（Outdoor Unit, ODU）與室內單元（Indoor Unit, IDU）介面」與對應 3GPP RAN 基站的「無線電單元（Radio Unit, RU）與基頻單元（Baseband Unit, BBU）介面」所調查的標準內容以及相關建議。

9.1 通用戶外單元（ODU）與室內單元（IDU）介面

用於地面接取設備的通用戶外單元（ODU）與室內單元（IDU）介面示意如圖 50，介面包括類比中頻（Analog IF）連結、IEEE-ISTO 數位中頻互通（DIFI）、開放天線數據機管理介面協定（OpenAMIP）、與開放升頻器數據機介面協定（OpenBMIP）。

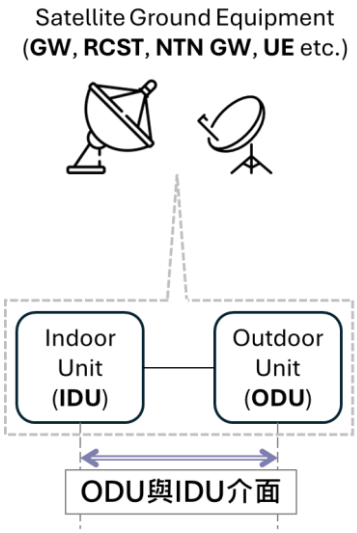


圖 50、地面接取設備的 ODU 與 IDU 的介面

9.1.1 類比中頻（Analog IF）連結

(a) 設備或單元

戶外單元（Outdoor Unit, ODU）、室內單元（Indoor Unit, IDU）。

(b) 主要內涵

在衛星通訊與地面站網路架構中，由於高頻 RF 訊號在實體線纜中傳輸時會面臨極高的能量損耗，因此傳統架構必須在室內基頻設備與室外天線設施之間建立一個過渡性的傳輸介面。類比中頻（Analog Intermediate Frequency, Analog IF）連結的主要用途，在於將天線端接收到的高頻微波訊號，透過降頻技術轉換至較低頻段（通常為 L-Band）的類比中頻進行長距離傳輸，上行方向則反向執行升頻。此設計的動機是為了跨越天線與機房之間的設施分界，確保中頻訊號能在實體線路中以相對較低的衰減率傳送至終端數據機進行解調與處理，同時藉由同軸電纜疊加直流電源與控制指令，將多項功能整合於單一線纜，以簡化早期地面站的佈線複雜度。類比中頻連結的訊號流程，以典型的 Ku 頻段接收鏈路為例：衛星下行訊號（10.7～12.75 GHz）由接收線路的本地震盪器（通常為 9.75 GHz 或 10.6 GHz）進行混頻，差頻輸出即為 L-Band 中頻訊號（950～2150 MHz），再透過同軸電纜傳輸至室內，由數據機接收後進行後續處理。

傳統類比中頻架構（見圖 51 上半部之傳統類比架構示意）為一種高度依賴實體佈線的「硬體定義」系統。因應現今非地面網路與多軌道星系的發展，地面設備需具備處理高通量、低延遲以及頻繁換手的能力，既有的類比傳輸模式在以下幾個層面顯現出其物理與架構上的限制：

(1) 設施分界的物理限制與訊號衰減

類比中頻連結受限於同軸電纜的物理特性，訊號在長距離傳輸後衰減會隨頻率升高而增大，導致頻譜斜率變形。為了補償此衰減，系統必需額外配置中頻放大器與等化器，這不僅增加了 SNR 惡化的風險，也限制了天線與機房的佈署距離，難以因應現代基站與資料中心空間解耦的建置需求。

(2) 硬體定義導致的擴充性瓶頸

傳統架構下，每一條實體線路僅能承載特定的訊號路徑。面對大規模星系所需的多波束、多頻段同時運作需求，地面站必須佈建龐大且複雜的中頻線路矩陣。這種物理性的一對一連結方式，使得系統在新增載波或變更任務時必須重新配置硬體與線路跳接，缺乏動態資源調度的彈性。

(3) 設備互通性問題

類比連結除了傳輸 I/Q 訊號，通常還需透過同一線路承載參考時脈、直流電源及專屬的控制指令。由於各廠商對於控制協定的定義不一且多未公開，導致特定廠牌的 IDU 數據機往往僅能與同廠牌的 ODU 設備互通，形成嚴重的廠商鎖定（Vendor Lock-in）問題，使營運商在系統升級與備品採購上受到明顯限制。

(4) 環境干擾與相位雜訊

類比電纜容易受環境電磁干擾（EMI）影響，且訊號在經過多次類比變頻與放大的過程中會累積顯著的相位雜訊（Phase Noise），對採用高階調變技術的現代通訊系統而言，相位雜訊的累積會直接惡化星座圖收斂品質，成為頻譜效率提升的限制因素。

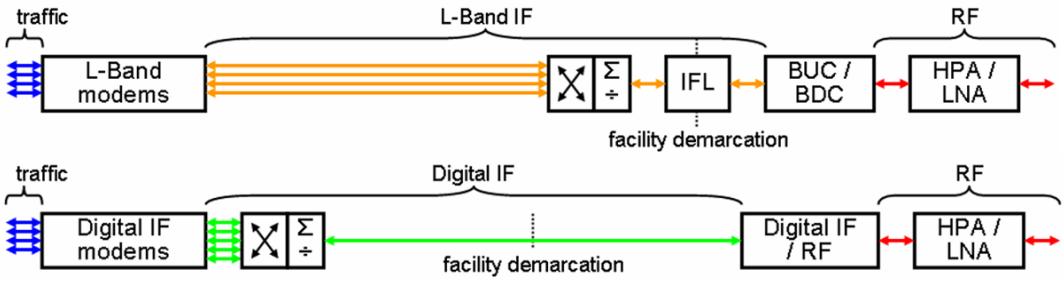


圖 51、傳統類比中頻 vs.數位中頻架構

(c) 相關文獻來源

(1) Digital IF for MILSATCOM terminals

A. J. Vigil, "Digital IF for MILSATCOM terminals: CONOPS and standardization for the next decade and beyond", IEEE MILCOM, 2010-11。該文件提及數位中頻在軍事衛星通訊終端的運作概念與未來標準化發展方向；其中內容探討如何透過標準化數位介面取代傳統類比訊號，藉此打破專屬硬體限制、提升不同設備間的互通性，並為未來十年的衛星地面架構奠定基礎。

(2) Digital Transformation of the Ground Segment

Kratos Defense & Security Solutions, "Digital Transformation of the Ground Segment," Satellite Evolution Global", 2023-05。該文件提及衛星地面段朝向全數位化與虛擬化發展

的核心趨勢；其中主要說明硬體與軟體解耦及雲端化架構的導入，並探討如何透過標準化數位介面來大幅提升地面站系統部署的靈活性、可擴展性與整體維運效率。

(3) ETSI TR 103 611

ETSI, TR 103 611, "Satellite Earth Stations and Systems (SES); Seamless integration of satellite and/or HAPS systems into 5G and related architecture options", Version 1.1.1, 2020-06。該文件提及衛星與高空平台系統（HAPS）與 5G 網路無縫整合的技術架構；其中針對多種網路架構選項進行定義與評估，並說明非地面網路（NTN）節點如何與 5G 核心網及無線接取網路（RAN）進行協同運作與介面整合。

(d) 技術指標

(1) 頻鏈路頻率響應平坦度（IF Link Frequency Response Flatness）

量測 950–2150 MHz L-Band 中頻頻段內，經 IFL 同軸電纜與中頻放大器、等化器補償後的振幅響應，全頻段內漣波須≤ 1.5dB，以避免頻譜傾斜造成高階調變星座圖劣化。

(2) 群延遲失真（Group Delay Distortion）

中頻鏈路在操作頻寬內任意 36MHz 視窗中的群延遲變化量須 ≤3ns，避免因非線性相位響應造成符號間干擾（ISI）。

(3) 同軸線供電穩定度（DC Power-over-Coax Stability）

透過中頻同軸線疊加傳輸的 ODU 供電（通常 24V/48V DC），在 IDU 端輸出電壓漣波須≤ 2%，且線路壓降在最大佈線長度下不得導致 ODU 端電壓低於元件最低操作電壓門檻。

(4) 相位雜訊累積容限（Cumulative Phase Noise Budget）

訊號歷經 LNB/BUC 降升頻與中頻放大器級聯後，在 10 kHz 偏移下的相位雜訊須 ≤ -80 dBc/Hz，以滿足現代高階調變（如 32APSK 等級）的解調容限。

9.1.2 IEEE-ISTO 數位中頻互通（DIFI）

(a) 設備或單元

戶外單元（Outdoor Unit, ODU）、室內單元（Indoor Unit, IDU）。

(b) 主要內涵

DIFI 標準的制定動機，在於從介面層面徹底解決類比中頻架構所固有的三項系統性限制：訊號傳輸距離受同軸電纜損耗約束、多鏈路擴充需實體佈線、以及跨廠商設備間缺乏統一控制介面標準。DIFI 將類比中頻訊號轉換為標準 UDP/IP 封包後透過乙太網路傳輸，使訊號傳輸不再受同軸電纜物理特性的約束，傳輸距離可延伸至光纖基礎設施所及的範圍。

在互通性方面，DIFI 的核心目標是實現隨插即用（Plug-and-Play）的跨廠商互通能力，任何符合規範的 Digitizer 與軟體數據機均可直接對接，無需考量品牌來源。此一目標進一步帶動了地面站架構向「軟體定義」方向演進，當訊號以標準 IP 封包存在於網路中，虛擬化技術便可將多個天線的數位中頻串流彙整至統一的伺服器運算資源池（Resource Pool）進行管理，依衛星過頂排程動態分配運算資源，支援地端即服務（Ground Station as a Service, GSaaS）的商業模式轉型。

DIFI 標準（IEEE-ISTO Std 4900-2021）是針對軍用標準 VITA 49.2 進行減法工程優化而來的實務規範。原生標準因過度追求靈活性，保留了過多的選填欄位，導致不同廠商間即便標榜符合 VITA 標準也無法互通。DIFI 為此強制將 VITA 49.2 中許多「應選（May）」欄位改為「必選 （Shall）」或「禁止（Shall Not）」，並嚴格規定傳輸層必須建立在 UDP over IP 之上，定義明確的 MTU 規範，同時禁止 VITA 49.2 中的複雜分段機制，改以連續序列號進行封包完整性驗證，徹底消除了互通性的模糊空間。

(1) 雙封包機制架構

DIFI 採用「資料封包」與「情境封包」分離傳輸的雙流設計，兩者透過 VRT 標頭中的 Stream ID 建立關聯，由接收端合併還原完整的訊號。資料封包負責承載離散化 I/Q 樣本。根據 v1.3.0 標準，封包類型涵蓋：Packet Class 0x0001（標準連續訊號，適用於 SCPC）、

Packet Class 0x0002/0x0005（針對不同量化位元寬度優化），以及 v1.3.0 新增的 Packet Class 0x0007/0x0008，支援 TDMA 之突發訊號。情境封包負責傳遞訊號的中繼資料（Metadata），使接收端數據機能夠自動解析並設定解調參數，無需人工介入。其中 Information Class 0x0001 傳輸核心參數，包括中心頻率、取樣率、頻寬等等，使接收端能實現軟體定義的自動化配置。v1.3.0 新引入的 0x01XX 類別，進一步讓設備能動態宣告其支援版本與同步精度，允許設備在連線初始化階段自動完成版本與能力協商。

(2) 高精度時序同步與相位抖動控制

在數位中頻架構下，Digitizer 與軟體數據機之間的時序同步品質直接影響了系統的訊號完整性。DIFI 在每個封包標頭中嵌入精確時間戳記，時間解析度最高可達飛秒（fs）等級。實務佈署上，業界通常以 IEEE 1588v2 PTP（Precision Time Protocol）在 IP 網路層達成亞微秒級的全網同步。若網路設備的時序品質不足，產生的 Jitter 將導致相位雜訊惡化，影響高階調變的解調效能。

(3) 組織識別碼（OUI）機制

所有 DIFI 封包均包含一組三元識別碼：OUI、Information Class ID 與 Packet Class ID。DIFI 聯盟獲配之 OUI 為 0x6A621E，所有符合規範的封包皆以此作為組織識別基礎。此設計確保了接收端在解析封包前即可確認封包的組織歸屬與預期結構，在多廠商、異質設備串接的環境中實現邏輯層的功能映射唯一性，避免混用不同標準封包時產生的解析錯誤。

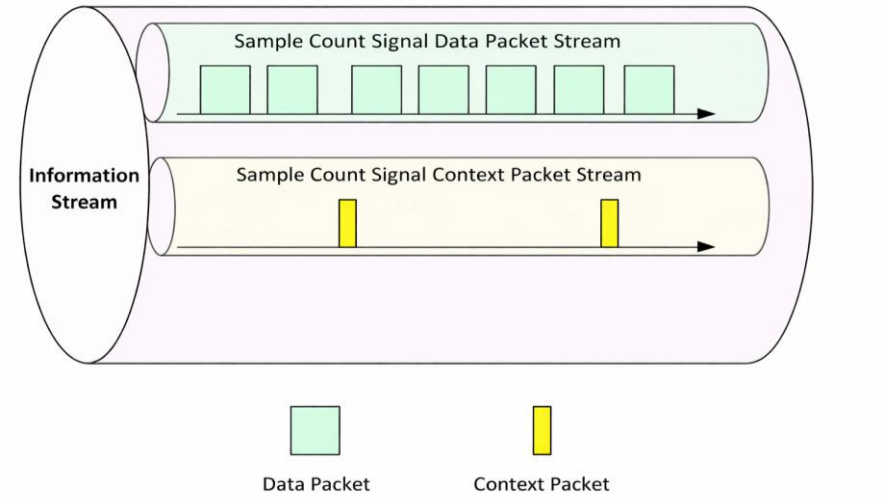


圖 52、DIFI v1.3.0 雙封包機制的架構示意

(c) 相關文獻來源

(1) IEEE-ISTO Std 4900-2021

DIFI Consortium, IEEE-ISTO Std 4900-2021, "Digital IF Interoperability Standard", Version 1.3.0, 2025-07。該文件提及數位中頻系統中不同廠牌設備間的互通性標準；其中定義了基於 VITA 49 協定的資料與控制封包格式，並說明如何透過標準化介面，實現衛星地面站中 Digitizer 與數據機之間的軟硬體解耦與射頻訊號 IP 化傳輸。

(2) ANSI/VITA 49.2-2017 (R2024)

VITA, ANSI/VITA 49.2-2017 (R2024), "VITA Radio Transport (VRT) Standard", 2024-09。該文件提及軟體定義無線電（Software Define Radio, SDR）與數位射頻系統中的資料傳輸通訊協定；其中定義了封包化射頻資料、情境與控制訊息的標準封包結構，並說明如何精確標記訊號的時間與頻譜特徵，為數位中頻架構提供底層的封包封裝基礎。

(3) IEEE Std 1588-2019

IEEE, IEEE Std 1588-2019, "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems", 2020-06。該文件提及網路化測量與控制系統中的精確時間同步協定；其中定義了如何在分散式網路節點間實現亞微秒等級的高精準度時鐘同步，並說明其機制以確保數位中頻封包在乙太網路傳輸時，能維持精確的時間戳記與相位對齊。

(d) 技術指標

(1) 封包處理線速能力（DIFI Packet Wirespeed Capability）

Digitizer 端封裝 I/Q 樣本為 UDP/IP 封包、軟體數據機端解封裝還原的處理能力，在 10 或 25 Gbps 以太網路傳輸滿載下須達硬體線速，且封裝與解封裝引入的額外處理延遲須≤ 10μs。

(2) UDP/IP 封裝耗費（Encapsulation Overhead）

VRT 標頭（含 Stream ID、時間戳記等固定欄位）佔用頻寬的比例，在典型封包長度

下須控制在總傳輸量的 3%至 5%以內。

(3) 時間戳記同步精度（Timestamp Synchronization Accuracy）

DIFI 封包標頭雖可標示至飛秒等級解析度，惟實務上依賴 IEEE 1588v2 PTP 於 IP 網路層達成的全網同步精度須≤ 1 μs（次微秒級），網路設備引入之封包時序抖動（PDV）須≤ 100 ns，以避免解調端相位雜訊劣化。

(4) 封包完整性與遺失率容忍度（Packet Loss Tolerance）

DIFI 以連續序列號取代 VITA 49.2 複雜分段機制進行完整性驗證，接收端須能偵測任意封包遺失並於情境封包重新同步前，容忍之連續 I/Q 資料遺失率須≤ 10^{-6}，避免影響高階調變解調效能。

9.1.3 開放天線數據機介面協定（OpenAMIP）

(a) 設備或單元

戶外單元（Outdoor Unit, ODU）、室內單元（Indoor Unit, IDU）。

(b) 主要內涵

隨著全球低軌衛星（Low Earth Orbit, LEO）與中軌衛星（Medium Earth Orbit, MEO）通訊技術快速發展，移動式衛星通訊（Satcom-on-the-Move, SOTM）的應用場域已由傳統海事航運擴展至航空寬頻及地面載具等多元應用。然而，早期衛星通訊系統中的天線控制單元（Antenna Control Unit, ACU）與衛星數據機（Satellite Modem）之間，多採用各廠商自行定義的通訊協定。此類封閉式架構使不同廠牌設備之間難以互通，系統整合商必須針對不同設備組合開發專屬驅動程式，不僅增加系統整合的複雜度，也提高後續維護成本。為了解決上述問題，開放天線數據機介面協定（Open Antenna Modem Interface Protocol, OpenAMIP）應運而生。OpenAMIP 最初由 iDirect 提出，旨在建立一套標準化且非專有的通訊協定，其核心目標是打造「隨插即用」（Plug-and-Play）的整合環境，使不同供應商的衛星數據機與天線系統能透過標準化介面進行即時資訊交換，進而提升設備互通性與系統整合效率。

OpenAMIP 是一套以 ASCII 字串為基礎的指令交換協定，主要涵蓋下列功能：

(1) 狀態監測與參數回報

ACU 持續向數據機回報天線當前的物理狀態，包含鎖定狀態（Lock Status）、指向角度以及接收訊號強度指標（RSSI）。使衛星數據機能即時掌握天線狀態，並評估通訊鏈路品質。

(2) 定位與搜索指令

衛星數據機向 ACU 傳送目標衛星的位置資訊（如經緯度及軌道位置）與通訊頻率參數。ACU 依據上述資訊執行自動搜尋、捕獲及衛星追蹤程序，以完成天線對星作業。

(3) 傳輸授權控制

數據機會根據天線回報的指向精度，發送允許傳輸（Keep Alive）或禁止傳輸的指令，確保終端設備符合國際衛星組織的射頻安全規範。

(4) 平台運動補償

針對高速移動載具等高動態環境，OpenAMIP 支援傳遞高更新率的姿態資料，即時進行波束追蹤與掃描損耗（Scan Loss）補償，提升移動式衛星通訊系統的鏈路穩定性與追蹤精度。

(c) 相關文獻來源

(1) OpenAMIP Standard

ST Engineering iDirect, "OpenAMIP Standard", Version 1.17, Revision F, 2020-10。該文件定義天線控制單元與衛星數據機之間基於 IP 與 ASCII 訊息的開放式通訊協定介面，可支援設備狀態監測、衛星搜尋與追蹤、傳輸授權控制，以及動態波束指向等功能，提升不同廠牌設備之間的互通性與系統整合能力。

(d) 技術指標

OpenAMIP 的即時性與時序關鍵指標如下：

(1) 失鎖保護切斷時間

當天線失去衛星鎖定（Lock）狀態時，衛星數據機必須於 100 ms 內停止射頻發射，以符合射頻干擾防護及衛星營運商的安全規範。

(2) 狀態變更回報時延

當天現控制單元或衛星數據機偵測到狀態變更時，應於 10 ms 內完成狀態訊息傳送，以確保雙方控制資訊維持同步。

(3) 追星指令回應時間

當天線控制單元接收到衛星數據機所發送的 F(Find Satellite)尋星指令後，應於 10ms 內回覆目前天線狀態，以利後續執行衛星搜尋與追蹤程序。

9.1.4 開放升頻器數據機介面協定（OpenBMIP）

(a) 設備或單元

戶外單元（Outdoor Unit, ODU）、室內單元（Indoor Unit, IDU）。

(b) 主要內涵

開放升頻器數據機介面協定（Open Block Upconverter Modem Interface Protocol, OpenBMIP）為 ST Engineering iDirect 所提出並維護的開放式管理介面協定，其主要目的在於建立衛星數據機（Satellite Modem）與升頻器（Block Upconverter, BUC）或收發器（Transceiver）之間的標準化通訊介面，以提供設備監控與控制功能。透過 OpenBMIP，系統可精確校正終端發射功率，確保符合衛星通訊法規及射頻安全要求，同時降低不同廠牌設備整合的複雜度，並簡化系統部署與現場安裝流程。其核心功能包含：

(1) 射頻功率與發射校正

衛星數據機可透過 OpenBMIP 讀取 BUC 內部 EEPROM 所儲存的校正檔，其檔案格式支援 XML 及 GZIP，內容包含不同頻率、工作溫度及極化條件下的增益值與類比與數位轉換器（Analog-to-Digital Converter, ADC）校正資料。衛星數據機依據上述校正資料

動態調整中頻輸出位準，以確保 BUC 輸出的射頻功率符合系統需求及法規限制。

(2) 狀態監測與運作控制

衛星數據機定期（通常為 1～2 秒）傳送 Heartbeat 訊息，監測 BUC 的功率放大器（Power Amplifier, PA）狀態、內部工作溫度、局部振盪器（Local Oscillator, LO）鎖定狀態及散熱風扇運作狀態，並支援即時故障與暫存故障（Latched Faults）資訊的讀取及重置。衛星數據機可對功率放大器啟用／靜音（Enable/Mute）控制、局部振盪器頻率切換、極化模式（Vertical/Horizontal/Right-Hand Circular/Left-Hand Circular, V/H/R/L）設定，以及中頻低通諧波濾波器（IF Lowpass Harmonic Filter）低頻段（Lowband）與高頻段（Highband）切換控制。

(3) 中頻纜線校正管理

支援衛星數據機向外部代理控制器或 BUC 請求中頻纜線（Inter-Facility Link, IFL）校正權限（REQIFLCAL），並回報 IFL 纜線損耗及校正進度（IFLCALSTATUS），以提升發射功率校正的準確性。

(4) 韌體與檔案傳輸管理

支援標準化檔案傳輸機制，可用於校正檔的讀取與寫入（GCALIBFILE/SCALIBFILE），以及 BUC 韌體的遠端更新、降版與重新啟動（PREP_UPGRADE/BUC_RST），以提升設備維護與版本管理效率。

(c) 相關文獻來源

(1) OpenBMIP Standard

ST Engineering iDirect, "OpenBMIP Standard", Version 11, Revision F, 2023-10。該文件定義衛星數據機與升頻器或收發器之間的應用層通訊協定，內容涵蓋通訊指令、訊息框架格式、實體層介面、校正檔案格式，以及檔案傳輸機制，可支援設備監控、發射功率校正、韌體更新及遠端管理等功能。

(d) 技術指標

(1) 實體層與傳輸層介面

序列傳輸模式採用 RS-422 介面，鮑率（Baud Rate）為 38,400 bps、8 個資料位元（Data Bits）、1 個停止位元（Stop Bit）、無同位元檢查及無流量控制；乙太網路模式採用 UDP/IP 作為傳輸協定，控制指令預設使用 UDP 埠號 6001 進行通訊。

(2) 逾時機制（Timeouts）

ASCII 字元間傳輸逾時為 2 秒；衛星數據機發送請求後，若 5 秒內未收到 BUC 回應，則視為通訊逾時。

9.2 3GPP RAN 無線電單元（RU）與基頻單元（BBU）介面

用於 3GPP RAN 的無線電單元（RU）與基頻單元（BBU）介面示意如圖 53，介面包括通用公共無線電介面（CPRI）與增強型通用公共無線電介面（eCPRI）。

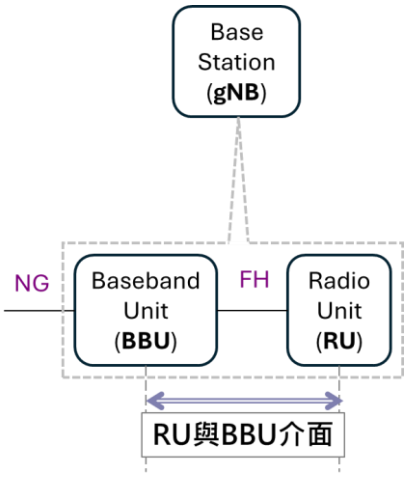


圖 53、3GPP RAN 的 RU 與 BBU 的介面

9.2.1 通用公共無線電介面（CPRI）

(a) 設備或單元

無線電單元（Radio Unit, RU）、基頻單元（Baseband Unit, BBU）。

RU 的實體部署通常為戶外單元，亦稱遠端射頻單元（Remote Radio Head, RRH），於 CPRI 架構中對應無線設備單元（Radio Equipment, RE）；BBU 的實體部署通常為室內單元，於 CPRI 架構中對應無線設備控制單元（Radio Equipment Control, REC）。

(b) 主要內涵

在行動通訊技術由 4G 的長期演進技術（Long Term Evolution, LTE）演進至 5G 的過程中，無線接取網路（Radio Access Network, RAN）架構逐漸由傳統集中式基站發展為分散式與集中化架構。早期基地台多將 BBU 與 RU 整合於同一站點，並透過同軸電纜連接射頻前端設備。隨著傳輸距離增加，高頻射頻訊號容易產生饋線損耗，不僅降低系統鏈路預算，亦影響基地台的能源效率與佈建成本。

為提升無線資源管理彈性、降低資本支出（Capital Expenditure, CAPEX）及營運支出（Operating Expenditure, OPEX），並因應高頻段與大頻寬系統對高速資料傳輸及高同步性的需求，Ericsson、Nokia、Huawei 及 NEC 等設備商共同制定了通用公共無線電介面（Common Public Radio Interface, CPRI）規範。CPRI 的核心目標在於建立一套標準化且具高度同步性的前置連結（Fronthaul），使基頻處理與射頻功能得以分離，並透過光纖作為傳輸媒介，連接負責數位基頻訊號處理的 REC 與負責射頻訊號收發的 RE，實現高速、低延遲且高精度同步的 IQ 資料傳輸。此種基頻與射頻分離（Baseband-RF Separation）架構，不僅有效降低射頻饋線損耗，更奠定前置網路標準化的基礎，促使行動網路逐步朝向集中式無線接取網路（Centralized Radio Access Network, C-RAN）及後續 O-RAN 架構發展，大幅提升基站部署彈性、擴充性及維運效率。

CPRI 規範主要定義前置連結的實體層與傳輸層相關技術，包括：

(1) IQ 數據傳輸

IQ 資料傳輸為 CPRI 最核心的功能，主要負責傳輸無線訊號的同相（In-phase, I）與正交（Quadrature, Q）取樣資料，使基頻處理功能與射頻功能得以分離。由於 IQ 資料屬於即時性資料流，CPRI 須透過高速且固定速率的串列傳輸介面，提供低延遲、高同步性的資料傳輸，以滿足無線通訊系統對即時訊號處理的需求。

(2) 控制與管理

除 IQ 資料傳輸外，CPRI 亦提供控制與管理通道，供 REC 與 RE 交換控制及管理資訊，包括設備初始化、參數設定、告警事件回報、狀態監測及維護管理等功能。控制與管理訊息通常透過乙太網路或高階資料鏈結控制（High-Level Data Link Control, HDLC）等機制進行傳輸。

(3) 同步與定時

CPRI 提供高精度的時脈同步與定時機制，確保 REC 與 RE 之間維持頻率同步及相位同步。此同步能力可支援 LTE 及 5G 系統中的多輸入多輸出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）技術、波束成形、載波聚合（Carrier Aggregation, CA）及跨基站協調（Coordinated Multi-Point, CoMP）等應用，以提升系統效能與無線通訊品質。

(c) 相關文獻來源

(1) CPRI Specification

CPRI Industry Group, "Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification", CPRI Specification Version 7.0, 2015-10。該文件由 Ericsson、Nokia、Huawei、NEC 及 Alcatel-Lucent 參與的 CPRI 產業聯盟制定，定義 REC 與 RE 之間的標準化前置連結，內容涵蓋實體層、資料鏈結層、同步機制及 IQ 資料傳輸等規範，為 CPRI 介面的技術依據。

(2) IEEE 期刊論文

Mugen Peng, et al., "Recent Advances in Cloud Radio Access Networks: System Architectures, Key Techniques, and Open Issues", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume 18, No. 3, pp. 2282-2308, 2016-03。該論文探討 C-RAN 的系統架構及關鍵技術，分析將傳統基地台功能拆分為 BBU 與 RRH 後，前置連結所面臨的頻寬需求、IQ 資料壓縮、CoMP 及低延遲傳輸等技術挑戰，並說明 CPRI 於 C-RAN 前置構中的應用與限制，為後續 eCPRI 及 O-RAN 的發展奠定重要基礎。

(d) 技術指標

(1) 傳輸速率與線路編碼

CPRI 定義 Option 1 至 Option 10 共 11 種傳輸速率等級。

其中，Option 1 至 Option 7（614.4 Mbps～9,830.4 Mbps）採用 8B/10B 線路編碼（Line Coding）。Option 7A（8,110.08 Mbps）及 Option 8 至 Option 10（10,137.6 Mbps～24,330.24 Mbps）則採用 64B/66B 線路編碼，最高傳輸速率為 24.33 Gbps，且 64B/66B 模式支援 RS 前向錯誤更正（Reed-Solomon Forward Error Correction, RS-FEC）機制。

(2) 同步精度

CPRI 具備高精度的頻率同步與定時能力，其鏈路抖動（Jitter）對基地台頻率精度的最大允許貢獻值不得超過 ±2 ppb（parts per billion），且 RE 同步迴路的最大截止頻率（Cutoff Frequency）為 300 Hz。

(3) 延遲時間要求

自過去 3G 起的通用陸地無線接取頻分雙工（Universal Terrestrial Radio Access Frequency Division Duplex, UTRA-FDD）就開始有內環功率控制（Inner Loop Power Control）等功能有時間延遲限制，在基站加入 CPRI 後其鏈路的最大往返延遲（Round-Trip Delay）不得超過 5 μs，且 RE 完成時脈同步的建立時間應小於 10 s。

9.2.2 增強型通用公共無線電介面（eCPRI）

(a) 設備或單元

無線電單元（Radio Unit, RU）、基頻單元（Baseband Unit, BBU）。

RU 的實體部署通常為戶外單元，亦稱遠端射頻單元（Remote Radio Head, RRH），於 CPRI 架構中對應無線設備單元（Radio Equipment, RE）；BBU 的實體部署通常為室內單元，於 CPRI 架構中對應無線設備控制單元（Radio Equipment Control, REC）。

(b) 主要內涵

在 CPRI 運用多年之後，適用於 5G 世代的增強型通用公共無線電介面（Enhanced CPRI, eCPRI）提供新一代的相關技術如下：

(1) 切換功能劃分

相較於傳統 CPRI 直接傳輸未壓縮的 IQ 資料，eCPRI 透過功能劃分（Functional Split）機制，將部分實體層功能分配至 RU 執行，以降低前置網路所需傳輸的資料量，進而大幅降低前置的頻寬需求，提升傳輸效率。

(2) 封包交換傳輸

eCPRI 採用封包交換（Packet Switching）架構，並以標準乙太網路作為傳輸媒介，取代傳統 CPRI 採用的點對點時分多工（Time Division Multiplexing, TDM）串列傳輸架構。此設計可充分利用現有乙太網路基礎設施，提高前置網路的部署彈性、資源共享能力及擴充性。

(3) 動態頻寬分配

不同於傳統 CPRI 固定以線路速率（Line Rate）持續傳輸 IQ 資料，eCPRI 依據實際使用者訊務流量（Traffic Load）及業務需求動態調整傳輸資料量，使前置頻寬得以有效利用，降低網路負載，並提升整體頻寬使用效率。

(4) 支援大頻寬與巨量 MIMO 天線

eCPRI 專為 5G 行動通訊系統設計，可支援大頻寬、高資料速率及巨量多輸入多輸出（Massive Multiple-Input Multiple-Output, Massive MIMO）技術，同時適用於毫米波（Millimeter Wave, mmWave）等高頻通訊應用，而傳統 CPRI 的頻寬無法支援。

(c) 相關文獻來源

(1) eCPRI Specification

CPRI Industry Group, "eCPRI Specification", Version 2.0, 2019-05。該文件為 Ericsson、Nokia、Huawei、NEC 等參與的 CPRI 產業聯盟，所發布之新一代介面標準。

(d) 技術指標

(1) 實體層傳輸速率

支援 10 Gbps、25 Gbps、40 Gbps、100 Gbps 乙太網路介面。

(2) 延遲時間要求

最大往返延遲須≤ 5 μs。

(3) 時間同步

須支援 IEEE 1588v2 PTP 或同步乙太網路（Synchronous Ethernet, SyncE）。

9.3 地面接取設備內部單元介面的開發建議

以下說明上述介面的共通技術指標與實務開發建議。

9.3.1 地面接取設備內部單元介面共通技術指標

無論是類比中頻或是數位中頻架構，戶外單元（ODU）與室內單元（IDU）之間的介面皆須滿足以下共通指標：

(1) 同步與時脈精度（Synchronization & Clock Accuracy）

DIFI 依賴 IEEE 1588v2 PTP、CPRI 依賴其原生高精度時脈恢復機制、eCPRI 依賴 IEEE 1588v2 PTP 或 SyncE，三者皆須將 ODU-IDU 或 RU-BBU 的時序抖動控制在次微秒甚至奈秒等級，避免因時序失準造成 MIMO 同步失敗或高階調變相位雜訊惡化。

(2) 封裝耗費與線速處理能力（Encapsulation Overhead & Wirespeed）

DIFI 與 eCPRI 皆採用 IP 與乙太網路封包化取代固定速率鏈路，DIFI 的封裝標頭佔用頻寬比例須控制在 3%至 5%以內；eCPRI 則依據實際使用者流量動態調整傳輸資料量，RU 與 BBU 端的運算與交換平台在封包速率滿載下皆須達硬體線速，不因封包化架構引入額外處理瓶頸。CPRI 因採固定位元速率傳輸，此指標以 Line Rate 符合度（須符合 CPRI Option 1-10 之標準速率）取代封裝負擔的評估。

(3) 控制面回應延遲（Control Plane Response Latency）

OpenAMIP 與 OpenBMIP 用於 ACU 與 BUC 狀態回報與指令下達。OpenAMIP 採用 ASCII 指令，其對星指令回應與狀態變更回報延遲須控制在 10 ms 內，以支援即時波束追蹤與掃描損耗補償。OpenBMIP 則支援 XML 及 GZIP 等校正檔格式，其通訊逾時機制為秒級（如 5 s 逾時）。兩者在指令封包傳輸時皆須具備容錯或逾時重傳機制，避免天線失鎖或升頻器參數不同步。

9.3.2 地面接取設備內部單元實務建議

(1) 類比走向數位中頻的漸進式部署

既有衛星地面站多仍採用類比中頻架構，建議廠商以在 ODU 端導入 Digitizer 作為過渡方案，可將既有類比 ODU 與新一代軟體數據機之間進行從類比中頻至 DIFI 封包的轉換，實現漸進式升級。

(2) 軟體定義數據機運算資源與網卡選擇

DIFI 架構下 IDU 端運算平台需承擔封包化 I/Q 資料流的即時處理，建議依最大取樣率換算所需頻寬並預留餘裕，優先選用支援 10 Gbps 或 25 Gbps 之 Intel 或 Broadcom 晶片 PCIe 網卡，並確保與既有交換器埠速相容。

(3) 天線與升頻器控制協定符合性測試套件

建議廠商在開發 ACU 或 BUC 韌體時，依 OpenAMIP 與 OpenBMIP 規範建立自動化符合性測試套件，涵蓋狀態回報格式、指令逾時重傳、多廠牌互通情境模擬，避免因非公開私有指令擴充導致廠商鎖定問題。

(4) 將前置連結從 CPRI 升級至 eCPRI 之路徑規劃

考量 CPRI 固定位元速率架構在頻寬效率與長距離拉遠上的限制，建議新建置站點優先評估 eCPRI 封包化架構，而既有 CPRI 站點則預留協定轉換閘道器（CPRI-to-eCPRI Gateway）之升級路徑，避免前置網路架構鎖定於單一世代技術。

(5) PTP 對時網路架構設計

DIFI、CPRI、eCPRI 均高度仰賴網路層時序同步品質，建議於 ODU 與 IDU、或 RU 與 BBU 之間的路徑上部署具備邊界時鐘功能之交換器，並將 Grandmaster 時鐘來源與網路拓撲跳數納入時序預算的評估。

(6) 管理面區別「Alignment」與「Calibration」告警

如第 6.3.2 節所述，本章提及之地面接取設備內部單元介面在管理面的軟體設計上，Alignment 與 Calibration 兩種告警必須完全獨立。

10. 衛星內部次系統／單元介面

本章延續第 4.7 節，包括對應衛星用的「衛星本體與酬載次系統介面」、「衛星酬載內部單元介面」、與「冗餘架構的容錯運用」所調查的標準內容以及相關建議。

由於衛星通常視為一種系統（與本文件提及的通訊系統不同），以衛星本體和次系統組成，而次系統可能再以多個單元組成，形成階層式的關係，所以存在次系統介面與單元介面。通訊用的衛星酬載（Payload）是作為一個次系統，此衛星酬載與地面的接取設備、後端設備等即構成衛星通訊系統，衛星通訊系統通常不包括衛星本體與衛星內部的其他次系統。對於此衛星酬載的製造商，不只是要重視與地面接取設備或後端設備介面的相容性，作為衛星的一份子，也要與衛星本體的設計相容才可能運作。

10.1 衛星本體與酬載次系統介面

衛星本體與酬載次系統介面示意如圖 54，介面包括基本電氣、機構與熱介面、CCSDS 遙測與命令標準、MIL-STD-1553 高可靠度匯流排、SAE 時間觸發乙太網路(TTEthernet)、ECSS SpaceWire 與 SpaceFibre、ANSI/VITA SpaceVPX 背板介面整合。

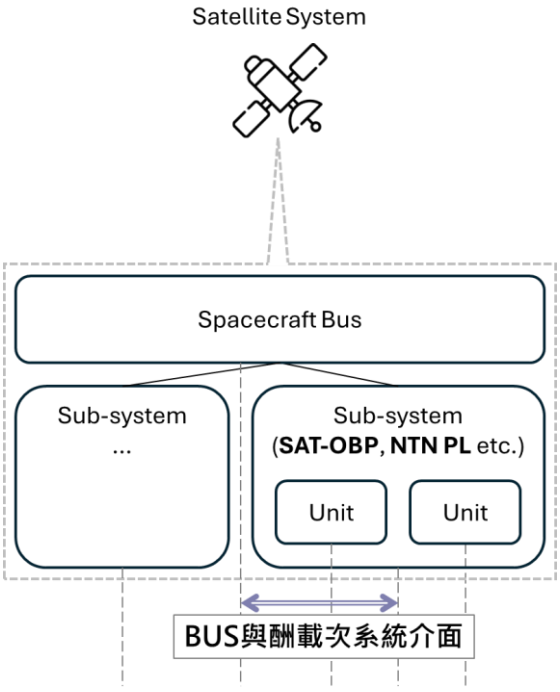


圖 54、衛星本體（BUS）與酬載次系統介面

10.1.1 基本電氣、機構與熱介面

(a) 設備或單元

衛星本體（Spacecraft Bus, BUS）、衛星酬載（Payload）。

(b) 主要內涵

相較於地面設備，衛星的設計有其操作環境下對於機構強度、熱控等嚴苛問題必須解決，又有體積、重量等限制，要設計任何功能時，與其他功能會有很緊密的牽制關係，故作為次系統的酬載會面對多種介面的要求。衛星本體與次系統介面通常分為三大類型：電氣介面、機構介面與熱介面，本節先提出基本常見的介面。而因應近年來對於提高數據處理能力與降低整合成本的發展趨勢，後面幾節調查更多的介面標準。

(1) 電氣介面（Electrical Interface）

電氣介面負責衛星內部的電力配送、主動控制、狀態監視以及高速數據傳輸，主要有三個層面包括供電介面（Power Interface）、遙測與控制（Telemetry & Command）、與數據介面（Data Interface）。

供電介面的基本重點有電壓架構與電氣隔離。傳統上 BUS 提供給次系統或酬載的電源多為固定電壓，如小型衛星或低軌衛星常見的 28V 直流電（DC）或立方衛星（CubeSat）常用的 5V 與 3.3V。為避免酬載的突波（Surge）或短路回授並摧毀衛星本體電源，介面設計必須包含光電耦合器（Optocoupler）或隔離型變壓器，確保兩端在接地迴路（Ground Loop）上完全隔離。

遙測與控制是 BUS 中的電腦或是數據處理（Data Handling, DH）次系統要控制酬載次系統的基本管道，傳統上可用的基本電氣 I/O 包括離散式輸入／輸出（Discrete I/O）與類比遙測（Analog Telemetry）。離散式輸入／輸出可發送脈衝訊號（Pulse）來控制繼電器開關（也稱為乾接點）或讀取高低電位來確認設備是否開機；類比量測則用於讀取非離散的物理數值，例如利用特定電阻變化的熱敏電阻（Thermistor）來量測溫度。

數據介面是負責傳輸可管理酬載的訊息與酬載產生的數據（例如科學用酬載的觀測數據、通訊用酬載的狀態資訊，可傳輸給 BUS 電腦或是 DH 次系統）。傳統上需要組合

幾種傳輸 I/O 以自定義所需的數據介面，相關選項包括通用非同步收發器（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART）、積體電路間（Inter-Integrated Circuit, I2C）匯流排、序列周邊介面（Serial Peripheral Interface, SPI）、控制器區域網路（Controller Area Network, CAN）匯流排、以及由美國國防部發布的高可靠度匯流排 MIL-STD-1553B 等。然而，在不斷提高數據傳輸能力且仍要維持可靠度的需求趨勢下，數據介面的制訂更加複雜化，也就陸續出現相關標準，如歐洲太空標準化合作組織（European Cooperation for Space Standardization, ECSS）發布的 SpaceWire 與 SpaceFibre、以及時間觸發乙太網路（Time Triggered Ethernet, TTEthernet）等，以簡化衛星的系統整合。

(2) 機構介面（Mechanical/Structural Interface）

機構介面決定次系統與單元如何在物理上安全地固定於衛星結構體上，並承受火箭發射時的嚴酷力學環境，主要層面包括物理鎖固與對準、負荷傳遞（Load Path）。

物理鎖固與對準的層面要定義包括鎖固面（Mounting Interface）與對準銷（Alignment Pin）。鎖固面是定義單元底座與衛星結構框架或蜂巢板（Honeycomb Panel）接觸的幾何尺寸、螺孔位置、螺絲規格與鎖緊扭力。對準銷（Alignment Pin）是針對有需要高精度指向的酬載（如光學相機、高增益指向天線）時，機構介面必須設計精密對準銷，確保設備在經歷劇烈震動後，其指向角度誤差在數十角秒（Arcsecond）等級內。

負荷傳遞的層面要定義發射負荷承受與剛性要求（Stiffness）。機構介面的規畫要考慮次系統與單元自身的質量，並平滑地將火箭發射時的隨機震動（Random Vibration）、正弦震動（Sinusoidal Vibration）以及分離時的衝擊力（Pyroshock）傳遞至衛星主結構，避免局部應力集中導致結構變形或螺絲鬆脫，也要確保次系統與單元的最低固有頻率（First Natural Frequency）避開火箭發射時的共振頻段（通常要求高於 100 Hz）。

(3) 熱介面（Thermal Interface）

在太空中由於沒有空氣對流（Convection），熱量只能透過傳導（Conduction）與輻射（Radiation）來散出。熱介面影響次系統與單元在太空中時，其中的高功率零件（如功率放大晶片、電源模組）是否會因過熱而燒毀，主要層面有接觸熱阻與導熱（Thermal Resistance & Conduction）、熱隔離與溫控（Thermal Isolation & Control）。

接觸熱阻與導熱的層面要定義熱阻降低接觸面與熱導管（Heat Pipe）。由於看起來很

平整的金屬表面在微觀下仍充滿空隙，在真空環境下這些空隙會變成隔熱層，因此要將接觸面的熱阻降低的話，零件與衛星結構板的接觸面必須塗抹熱導膠或鋪設填隙材（Thermal Interface Material, TIM）如銦箔或導熱矽膠片。而對於極高發熱量的零件，熱介面可接觸熱導管，將熱量快速輸送至衛星外側的輻射散熱面（Radiator）。

熱隔離與控溫的層面要定義多層絕緣（Multi-Layer Insulation, MLI）、加熱器（Heater）與感測器佈線。對於需要精密控溫的次系統與單元，其外殼與外界須規劃 MLI 介面，以阻絕外部太陽輻射或衛星內部其他高溫零件的熱輻射影響。另外也依視情況在次系統與單元結構上規劃佈置加熱片與溫度感測器（如 PT100 等熱敏電阻）的空間與電氣迴路，以便讓 BUS 電腦實現主動溫控。

(c) 相關文獻來源

(1) ECSS-E-ST-20C

ECSS, ECSS-E-ST-20C, "Space engineering - Electrical and electronic" Revision 2, 2022-04。該文件為歐洲與全球航太工程中電氣介面的基礎標準；其中 Clause 5 Electrical power 定義衛星本體主母線電壓（如 28 V）、分配架構與電氣過載防護要求；Clause 6 Electromagnetic compatibility (EMC) 規範電氣隔離、接地迴路（Ground Loop）與屏蔽防護。

(2) ECSS-E-ST-32C

ECSS, ECSS-E-ST-32C, "Space engineering - Structural general requirements" Revision 1, 2008-11。其中 Clause 4.3 Functionality、Clause 4.4 Interface 詳列次系統與單元底座鎖固面、剛性（Stiffness，如避開火箭發射共振的最低固有頻率）以及對準（Alignment）的需求。

(3) ECSS-E-ST-32-10C

ECSS, ECSS-E-ST-32-10C, "Space engineering - Structural factors of safety for spaceflight hardware", Revision 2, Corr. 1, 2019-08。其中 Clause 4.1 Applicability of structural factors of safety 規範在隨機震動、正弦震動與衝擊力下，介面螺絲與結構接觸面必須採用的安全限度。

(4) ECSS-E-ST-31C

ECSS, ECSS-E-ST-31C, "Space engineering - Thermal control general requirements", 2008-11。其中 Clause 4.2 Performance、Clause 4.3 Requirements towards other subsystems 有定義接觸面熱阻與填隙材的熱導需求，與規範 MLI 的熱學性質與包覆介面標準。

(5) AIAA 技術專書

David Gilmore, "Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I: Fundamental Technologies", 2002-12。該書籍可作為衛星熱控制工程師的教科書等級指南；其中 Chapter 16 Thermal Contact Resistance 探討熱傳與接觸熱阻的物理機制，與間隙材料的效應。

(d) 技術指標

(1) 電氣隔離度與接地阻抗（Isolation & Grounding Impedance）

衛星本體與酬載的電源迴路與機構的地（Chassis Ground）之間的直流隔離電阻須 ≥ 10 MΩ（在 500 V 直流電壓下測試）；接地迴路的高頻阻抗須≤ 10 mΩ。

(2) 最低固有頻率（Minimum First Natural Frequency）

為避開火箭發射時的低頻正弦共振（通常為 10 Hz 至 50 Hz 之間），次系統與單元經結構鎖固後的最低固有頻率須≥ 100 Hz（立方衛星則通常要求≥ 150 Hz）。

(3) 準靜態與動態過載（Quasi-Static & Dynamic Loads）

鎖固介面必須承受火箭發射時的最大加速度負荷（通常設計值為 15 G 至 30 G 的極限），且安全限度（Margin of Safety）須≥ 0.2。

(4) 對準誤差容忍度（Alignment Tolerance）

對於指向敏感單元（如相機、超高增益天線），裝配對準銷與鎖固面在承受發射衝擊（如高達 1000 G@1000 Hz）後，物理指向偏移須≤ 0.05° 。

(5) 接觸熱阻（Contact Thermal Resistance）

在真空環境下（氣壓≤ 10^{-5} Torr），次系統與單元金屬底座與機構散熱板之間的接觸

熱阻須≤ 0.01 K·m^2/W。

(6) 操作與非操作溫度界限（Operational & Non-Operational Temperature Limits）

重要功能的晶片接面溫度（Junction Temperature）在最惡劣高溫環境（Hot Case）下須≤85 ℃，在最惡劣低溫環境（Cold Case）下非操作溫度須≥-40 ℃，且必須維持≥10 ℃的熱設計限度（Thermal Margin）。

(7) 散熱與熱通密度（Dissipation & Heat Flux Density）

高功率零件（如升頻器或功率放大器）的底座熱通密度須≤2 W/cm^2，若超過此數值，必須導入輔助導熱路徑。

10.1.2 CCSDS 遙測與命令標準

(a) 設備或單元

衛星本體（Spacecraft Bus, BUS）、衛星酬載（Payload）。

(b) 主要內涵

太空資料系統諮詢委員會（Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS）標準主要規範衛星與地面系統之間的資料封裝、鏈路傳輸、同步、錯誤控制及指令確認機制，使不同衛星、地面站及設備供應商所開發的系統，可以採用一致的資料格式進行通訊。CCSDS 並非單一通訊格式，而是由太空封包、遙測與遙控傳輸訊框、同步、通道編碼及可靠傳輸程序等多項標準所組成的分層通訊架構。

(1) 遙測（Telemetry, TM）下傳

在 TM 下傳方面，衛星內部的姿態、電力、溫度、設備狀態、事件紀錄及酬載資料，通常會先依照太空封包協定（Space Packet Protocol, CCSDS133.0-B）封裝成太空封包（Space Packet）。太空封包主要由主要標頭（Packet Primary Header）及資料欄位組成，其中主要標頭包含封包類型、應用程序識別碼（Application Process Identifier, APID）、封包序號及封包資料長度等資訊。

應用程序識別碼可用來區分不同衛星次系統、酬載或應用程序所產生的資料，例如電力次系統、姿態控制次系統及通訊酬載可分別使用不同的 APID。封包序號則可供地面系統確認封包接收順序，並判斷是否發生資料遺失、重複或順序錯誤的情形。

完成封包化後，遙測封包會依照遙測太空資料鏈路協定（TM Space Data Link Protocol, CCSDS 132.0-B），配置至不同的主通道或虛擬通道，並組成遙測傳輸訊框（TM Transfer Frame）。虛擬通道可將衛星平台遙測、酬載資料及其他應用資料進行邏輯上的區隔，使多種資料來源可以共用同一條下行鏈路，同時仍可由地面接收系統分別識別及處理。

在透過射頻鏈路下傳前，遙測傳輸訊框尚須依照遙測同步與通道編碼標準（TM Synchronization and Channel Coding, CCSDS 131.0-B）進行同步標記、資料擾碼及錯誤偵測或更正編碼。同步標記可協助地面接收端辨識每一個傳輸訊框的起始位置，而錯誤更正編碼則可降低鏈路雜訊、訊號衰減及干擾所造成的位元錯誤，提高遙測資料下傳的可靠度。

實際採用的通道編碼方式可能包括 Reed-Solomon、卷積碼（Convolutional Code）、低密度同位元檢查碼（Low-Density Parity-Check Code, LDPC）或其他 CCSDS 所規範的編碼方式。編碼方式、傳輸訊框長度及相關參數，應依任務資料傳輸率、鏈路預算、位元錯誤率需求及地面站解碼能力進行選擇。

(2) 遙控指令（Telecommand, TC）上傳

在 TC 上傳方面，地面控制中心所產生的設備控制、操作模式切換、參數設定、軟體更新及酬載操作指令，可先依照太空封包協定封裝為指令封包，再依照遙控太空資料鏈路協定（TC Space Data Link Protocol, CCSDS 232.0-B）組成遙控傳輸訊框（TC Transfer Frame）。

遙控傳輸訊框可依任務需求配置不同的虛擬通道及傳輸服務，使一般操作指令、緊急控制指令及鏈路管理資訊，能採用不同的傳輸方式與錯誤處理機制。衛星接收到遙控傳輸訊框後，會依照虛擬通道及封包識別資訊，將指令資料傳送至對應的衛星次系統或酬載設備執行。

遙控傳輸訊框在送入射頻上行鏈路前，須依照遙控同步與通道編碼標準（TC

Synchronization and Channel Coding, CCSDS 231.0-B），進一步組成通訊鏈路傳輸單元（Communications Link Transmission Unit, CLTU）。CLTU 通常包含起始序列（Start Sequence）、經 BCH 或 LDPC 編碼的資料區段，以及結束序列（Tail Sequence），使衛星接收端可以辨識指令資料的起始位置、執行錯誤偵測或更正，並將正確的遙控傳輸訊框交由上層指令處理系統。

對於可靠度要求較高的重要遙控指令，可搭配第一型通訊操作程序（Communications Operation Procedure-1, COP-1）。COP-1 是一種閉迴路確認與重傳機制，地面端負責傳送及管理遙控訊框，衛星端則檢查訊框序號及接收狀態，並透過通訊鏈路控制字（Communications Link Control Word, CLCW）回報接收結果。

當遙控訊框發生遺失、順序錯誤或未被衛星接受時，地面端可依據 CLCW 所回報的狀態重新傳送，使遙控指令能依照正確順序交付，並降低指令遺漏、重複執行或錯誤執行的風險。對於涉及衛星模式切換、電源控制、軟體更新或安全模式操作等重要指令，通常應採用具備確認與重傳功能的傳輸程序。

(3) 介面管制（Interface Control）

在實務設計上，衛星端與地面系統應共同定義 APID、太空載具識別碼（Spacecraft Identifier, SCID）、虛擬通道識別碼（Virtual Channel Identifier, VCID）、封包長度、傳輸訊框長度、時間碼格式、遙測通道編碼方式、遙控 CLTU 格式、COP-1 操作模式及異常處理流程。

上述通訊參數應納入衛星通訊介面管制文件（Interface Control Document, ICD），並透過地面鏈路模擬測試，驗證封包產生與解析、遙測訊框解碼、遙控指令接收、指令回報及錯誤重傳等功能，以確保衛星端與地面站對 CCSDS 標準的實作方式及參數設定一致。

(c) 相關文獻來源

(1) CCSDS Blue Books

CCSDS, "Blue Books: Recommended Standards"。該系列文件為藍皮書，屬於 CCSDS 正式發布的建議標準，用以規範通訊協定、資料格式及處理程序。

(2) CCSDS Green Books

CCSDS, "Green Books: Informational Reports"。該系列文件為綠皮書，提供通訊架構、設計原理及標準應用方式的補充說明。

(d) 技術指標

(1) 太空封包格式與識別（Space Packet Format & Identification）

遙測及遙控指令資料應依 CCSDS 133.0-B 太空封包協定進行封裝。太空封包主要標頭長度應為 6 個八位元組（48 bits），封包資料欄位長度應介於 1 至 65536 個八位元組；應用程序識別碼（APID）應為 11 bits，封包序號應為 14 bits，並依模數 16384 連續遞增，以供接收端識別資料來源、確認封包順序及偵測封包遺失。

(2) 遙測傳輸訊框格式（TM Transfer Frame Format）

遙測資料應依 CCSDS 132.0-B 組成遙測傳輸訊框。其主要標頭長度應為 6 個八位元組，其中 SCID 應為 10 bits、VCID 應為 3 bits，主通道訊框計數器及虛擬通道訊框計數器應各為 8 bits。同一實體通道於特定任務階段內應採用固定的訊框長度，以確保衛星端與地面端可正確同步及解析資料。

(3) 遙控指令傳輸訊框格式（TC Transfer Frame Format）

遙控指令應依 CCSDS 232.0-B 組成遙控傳輸訊框。其主要標頭長度應為個八位元組，包含 10-bit SCID、6-bit VCID、10-bit 訊框長度欄位及 8-bit 訊框序號；單一遙控傳輸訊框之總長度不得超過 1024 個八位元組。訊框序號應依各虛擬通道分別管理，以供接收端執行順序檢查及重傳控制。

(4) 訊框錯誤偵測（Frame Error Detection）

遙測及遙控傳輸訊框可配置訊框錯誤控制欄位（Frame Error Control Field, FECF），其長度應為 16 bits，並採用循環冗餘檢查（CRC）計算。若任務決定使用 FECF，則同一實體通道於該任務階段所傳送的所有訊框均應採用一致的 FECF 設定；接收端對 CRC 驗證失敗之訊框應予以拒收，不得交付上層資料處理程序。

(5) 遙測同步與通道編碼（TM Synchronization & Channel Coding）

遙測下行鏈路應依 CCSDS 131.0-B 執行訊框同步及通道編碼。未編碼、卷積碼、Reed-Solomon、串接碼或碼率約為 7/8 的 LDPC 編碼資料，應使用 32-bit 同步標記，十六進位值為 1ACFFC1D。所選用之編碼方式、碼率、碼字長度及同步標記格式，應在同一實體通道及任務階段內保持一致。

(6) 遙控指令同步與通道編碼（TC Synchronization & Channel Coding）

遙控指令上行鏈路應依 CCSDS 231.0-B 將遙控傳輸訊框組成通訊鏈路傳輸單元（CLTU）。採用 BCH 編碼時，CLTU 起始序列應為 16 bits，每一 BCH 碼字應為 64 bits，其中包含 56 bits 資訊、7 bits 同位檢查碼及 1 bit 填補位元，並於結尾配置 64-bit 結束序列；亦可依任務需求選用 LDPC（12864）或 LDPC（512256）編碼。

(7) 指令確認與自動重傳（Command Acknowledgement & Retransmission）

涉及衛星模式切換、電源控制、軟體更新或安全操作之重要遙控指令，應採用 COP-1 順序控制服務。COP-1 訊框序號應為 8 bits，並依模數 256 遞增；衛星端應透過通訊鏈路控制字（CLCW）回報下一個預期訊框序號，以及等待（Wait）、重傳（Retransmit）與鎖定（Lockout）狀態。重傳次數上限、逾時時間及滑動視窗大小應依任務鏈路延遲與可用通聯時間訂定。

(8) 端對端資料傳輸驗證（End-to-End Data Transfer Verification）

於地面設備、射頻鏈路模擬器及衛星端設備之整合測試中，合法遙測與遙控封包之產生、傳輸、解析及路由成功率應為 100%；APID、SCID、VCID、封包長度或訊框長度不符，以及 CRC 驗證失敗或含不可更正錯誤之資料，均應被正確辨識並拒收。測試亦應確認封包遺失、重複、順序錯誤、CLCW 回報及 COP-1 自動重傳功能均符合系統設計要求。

10.1.3 MIL-STD-1553 高可靠度匯流排

(a) 設備或單元

衛星本體（Spacecraft Bus, BUS）、衛星酬載（Payload）。

(b) 主要內涵

MIL-STD-1553B 為美國國防部所制定之數位式指令／回應分時多工資料匯流排標準，主要規範匯流排傳輸線、介面電子電路、通訊運作方式、資料流向、訊息格式及電氣特性。其設計重點在於提供具確定性、容錯能力及抗雜訊能力的資料傳輸介面，使飛機、飛彈及太空載具中的飛行電腦、導航、姿態控制、電力及酬載等次系統，可透過共同匯流排交換控制指令、設備狀態及即時資料。

(1) MIL-STD-1553B

DoD U.S., MIL-STD-1553B, "Digital Time Division Command/Response Multiplex Data Bus", 1978-09。該文件為 MIL-STD-1553B 的基本標準，規範數位式指令／回應分時多工資料匯流排之通訊架構、匯流排控制器、遠端終端機、匯流排監視器、訊息格式、傳輸媒介及電氣介面等要求。

(2) MIL-STD-1553B, Notice 2

DoD U.S., MIL-STD-1553B, Notice 2, 1986-09。該文件為 MIL-STD-1553B 的重要修訂文件，補充及修正廣播指令、模式指令、遠端終端機操作、匯流排控制及相關介面要求。既有設備規格若標示符合「MIL-STD-1553B Notice 2」，原則上應以基本版本搭配 Notice 2 作為設計及驗證依據。

(3) MIL-STD-1553C

DoD U.S., MIL-STD-1553C, "Digital Time Division Command/Response Multiplex Data Bus", 2018-02。該文件為目前美國國防後勤局列示的有效版本，整合過往修訂內容，並延續 MIL-STD-1553 匯流排的功能、電氣與介面要求。MIL-STD-1553B 已於 2008 年取消，因此新建專案應確認契約或系統規格所指定的適用版本。

(c) 技術指標

(1) 資料傳輸率與編碼方式（Data Rate & Encoding）

MIL-STD-1553B 匯流排的資料傳輸率應為 1.0 Mbps，其長期頻率準確度及穩定度應維持於±0.1%（±1,000 Hz）以內，1 秒期間的短期穩定度應維持於±0.01%（±100 Hz）以內。資料應採用曼徹斯特雙相位準編碼（Manchester II Bi-phase Level），每一位元週期的中央均須產生訊號過零轉換，以提供資料與時脈同步功能。

(2) 字格式與同位元檢查（Word Format & Parity Check）

每一個指令字（Command Word）、資料字（Data Word）及狀態字（Status Word）均應由 3 個位元時間的同步波形、16-bit 資訊欄位及 1-bit 同位元檢查位元組成，總長度為 20 個位元時間，即 20 μs。遠端終端機位址與訊息容量（RT Addressing & Message Capacity）。所有字均應採用奇同位元檢查（Odd Parity）。若接收端偵測到同步波形錯誤、曼徹斯特編碼錯誤、位元數量錯誤或同位元檢查錯誤，應將該字判定為無效，不得將其資料交付至上層功能。

(3) 遠端終端機位址與訊息容量（RT Addressing & Message Capacity）

遠端終端機位址欄位應為 5 bits，各遠端終端機（Remote Terminal, RT）應配置唯一位址。十進位位址 0～30 可作為個別遠端終端機位址，因此單一匯流排最多可配置 31 個遠端終端機。

(4) 回應時間與訊息間隔（Response Time & Intermessage Gap）

遠端終端機接收到有效指令後，應於 4.0～12.0 μs 內開始傳送狀態字。若匯流排控制器（Bus Controller, BC）等待至 14.0 μs 仍未偵測到預期回應，得將該遠端終端機判定為無回應。

(5) 匯流排電纜與特性阻抗（Bus Cable & Characteristic Impedance）

主匯流排及分支線應使用雙芯、雙絞、具屏蔽層及外被的電纜。線對間分布電容應 ≤ 30 pF/ft，每英尺至少應具有 4 個完整絞距，電纜屏蔽覆蓋率應≥ 75%。電纜於 1 MHz 下的標稱特性阻抗應介於 70～85 Ω，傳輸損耗應≤ 1.5 dB/100 ft。實際系統所選用之電纜

型號、長度及阻抗值，應記錄於匯流排介面管制文件中。

10.1.4 SAE 時間觸發乙太網路（TTEthernet）

(a) 設備或單元

衛星本體（Spacecraft Bus, BUS）、衛星酬載（Payload）。

(b) 主要內涵

國際汽車工程師學會（International Society of Automotive Engineers, SAE）的時間觸發乙太網路（Time-Triggered Ethernet, TTEthernet）主要依據 SAE AS6802A，在 IEEE 802.3 乙太網路架構上加入容錯時脈同步、時間觸發排程、流量隔離及故障處理機制，使時間觸發型（Time-Triggered, TT）、速率限制型（Rate-Constrained, RC）及盡力而為型（Best-Effort, BE）等不同關鍵等級的資料，可共用同一套交換式乙太網路。系統透過端系統、交換器、同步主節點及壓縮主節點建立共同時間基準，讓關鍵資料依預先規劃的時間視窗傳送，提供可預測的延遲時間與抖動，同時避免一般乙太網路訊務影響關鍵通訊，適合應用於衛星、太空載具及其他高可靠度即時控制系統。

(c) 相關文獻來源

(1) SAE AS6802A

SAE, AS6802A, "Time-Triggered Ethernet", Revised 2023-02。該文件為現行 TTEthernet 核心標準，規範容錯時脈同步、同步群組建立、群組分裂偵測、系統啟動、重新啟動及自我穩定等機制，並定義共同時間與時間觸發傳輸之間的關係。

(2) IEEE Std 802.3

IEEE, IEEE Std 802.3-2022/Cor 1-2024, "IEEE Standard for Ethernet", 2025-01。該文件規範乙太網路的媒體存取控制層、實體層、訊框格式、傳輸速率及電氣或光纖介面。TTEthernet 使用符合 IEEE 802.3 的標準乙太網路訊框與實體鏈路。

(3) NASA 技術報告 1

NASA, "Integrated Formal Analysis of Time-Triggered Ethernet", 2012-03。該文件針對 TTEthernet 的同步與啟動協定進行形式化分析，可作為高可靠度及安全關鍵系統驗證方法的補充參考。

(4) NASA 技術報告 2

NASA, "On TTEthernet for Integrated Fault-Tolerant Spacecraft Networks", 2015-09。該文件說明 TTEthernet 在太空載具容錯網路、資料排程、服務品質及多關鍵等級資料整合方面的應用，可作為衛星系統架構規劃與測試設計之參考。

(d) 技術指標

(1) 乙太網路實體介面與傳輸速率（Physical Interface & Data Rate）

TTEthernet 應採用符合 IEEE 802.3 的全雙工、雙向、點對點交換式乙太網路介面。太空系統可依任務頻寬及硬體需求採用 10 Mbps、100 Mbps 或 1 Gbps，傳輸媒介可選用銅線或光纖；同一實體鏈路兩端的傳輸速率、編碼方式及實體層介面應完全一致。

(2) 訊務類型與優先順序（Traffic Classes & Priority）

網路應依資料即時性及關鍵等級，將訊務區分為 TT、RC 與 BE。TT 應依預先規劃的時間表傳送，提供確定性的延遲時間與抖動；RC 應透過預留頻寬及速率管制，提供有上限的延遲時間及抖動；BE 應使用 TT 與 RC 流量未占用的剩餘頻寬，不提供傳輸時間保證。協定控制訊框（Protocol Control Frame, PCF）應具有最高處理優先權，其次為 TT 流量；TT 與 RC 流量均應優先於 BE 流量，避免一般網路資料影響時間關鍵訊息。

(3) 時脈同步精度（Clock Synchronization Precision）

所有參與時間觸發通訊的端系統及交換器應建立共同時間基準。同步精度應定義為任兩個正確同步設備之間的最差時脈偏移量，並訂定為：

$$|T_i - T_j| \leq P_{sync}$$

其中 P_{sync} 為專案規定的最大同步誤差。系統應在正常狀態及規定的故障情境下持續

符合此要求。SAE AS6802A 未規定統一的同步精度數值，因此不得直接將「小於 1 μs」視為所有 TTEthernet 系統的通用要求。

(4) 同步節點與協定控制訊框（Synchronization Nodes & PCF）

同步架構應依系統需求配置同步主節點（Synchronization Master, SM）、壓縮主節點（Compression Master, CM）及同步用戶端（Synchronization Client, SC）。同步主節點產生協定控制訊框，壓縮主節點彙整各同步訊框的到達時間並計算修正值，再將同步結果傳送至各節點。PCF 應使用標準乙太網路訊框，其 EtherType 欄位應設定為 0x891D。

(5) 速率限制型流量管制（RC Traffic Policing）

每一條 RC 虛擬鏈路均應設定頻寬配置間隔（Bandwidth Allocation Gap, BAG）、允許抖動及最大訊框長度。BAG 用以規定同一虛擬鏈路連續兩個訊框之間的最小傳送間隔，以限制該資料流占用的最大頻寬。交換器應監控各 RC 虛擬鏈路的實際傳送速率及訊框長度；若訊框傳送頻率超出 BAG 限制、訊框長度超過設定值或虛擬鏈路識別碼不符，應依流量管制設定予以捨棄或隔離，避免異常流量影響其他關鍵資料。

(6) 乙太網路訊框格式與錯誤檢查（Ethernet Frame & Error Checking）

TTEthernet 訊框應符合 IEEE 802.3 MAC 訊框格式。MAC 訊框長度應介於 64～1,522 個八位元組，其中上限包含 VLAN 標籤；連續兩個訊框之間的訊框間隔應不少於 96-bit time。接收端應檢查訊框長度、資料是否為完整八位元組，以及訊框檢查序列（Frame Check Sequence, FCS）的 CRC 結果。CRC 驗證失敗、訊框過短、訊框過長或格式不符的訊框，均應判定為無效並捨棄。

(7) 頻寬規劃與流量隔離（Bandwidth Planning & Traffic Isolation）

系統應透過離線網路規劃工具，計算各連接埠的 TT 與 RC 預留頻寬、最大訊框長度、傳送週期、BAG 及交換器緩衝區需求。所有關鍵流量的總預留頻寬不得超過實體鏈路可用頻寬，且不得因 RC 或 BE 流量造成 TT 訊框排程衝突。交換器應具備流量管制或監護機制，阻擋在錯誤時間送出、使用錯誤虛擬鏈路或持續占用頻寬的異常訊框，以避免單一故障端系統影響整體網路。

(8) 備援通道與故障容錯（Redundant Channels & Fault Tolerance）

對於高可靠度太空系統，可依任務故障容錯需求配置 1～3 個獨立通訊通道。採用雙通道或三通道備援時，端系統應將相同的 TT 或 RC 訊框複製至各獨立網路，接收端則可採用「第一個有效訊框優先」（First Valid）方式，僅將第一份通過時間、格式及 CRC 檢查的訊框交付上層應用。

10.1.5 ECSS SpaceWire 與 SpaceFibre

(a) 設備或單元

衛星本體（Spacecraft Bus, BUS）、衛星酬載（Payload）。

(b) 主要內涵

ECSS SpaceWire 與 SpaceFibre 標準主要規範太空載具內部設備之間的高速串列資料傳輸介面。SpaceWire 採用全雙工、點對點鏈路與封包交換架構，適合連接感測器、酬載、處理器、大容量記憶體及遙測設備；SpaceFibre 則延伸 SpaceWire 的封包架構，透過高速串列器／解串列器、多通道傳輸、虛擬通道、服務品質及故障偵測、隔離與復原機制，提高資料傳輸率、即時性與可靠度。兩者可依任務需求組成星狀、樹狀或網狀網路，並支援 SpaceWire 與 SpaceFibre 間的協定橋接，適用於衛星平台資料處理及高資料率酬載傳輸。

(c) 相關文獻來源

(1) ECSS-E-ST-50-12C

ECSS, ECSS-E-ST-50-12C, "SpaceWire - Links, Nodes, Routers and Networks", Revision 1, 2019-05。該文件為 SpaceWire 核心標準，規範連接器、電纜、電氣特性、資料／閘控編碼、鏈路初始化、流量控制、封包傳輸、路由器、時間碼及網路架構。

(2) ECSS-E-ST-50-11C

ECSS, ECSS-E-ST-50-11C, "SpaceFibre - Very High-Speed Serial Link", 2019-05。該文

件為 SpaceFibre 核心標準，規範電氣與光纖實體介面、8B/10B 編碼、單通道與多通道鏈路、虛擬通道、服務品質、流量控制、錯誤偵測與重傳，以及路由交換架構。

(3) ECSS-E-ST-50-51C

ECSS, ECSS-E-ST-50-51C, "SpaceWire Protocol Identification", 2010-02。該文件規範 SpaceWire 封包中的協定識別碼（Protocol Identifier），使接收端可辨識 RMAP、CCSDS 封包傳輸或其他上層通訊協定。一般協定識別碼占用 1 個位元組，數值 0x00 用於延伸協定識別碼。

(4) ECSS-E-ST-50-52C

ECSS, ECSS-E-ST-50-52C, "SpaceWire - Remote Memory Access Protocol", 2010-02。該文件規範遠端記憶體存取協定（Remote Memory Access Protocol, RMAP），可用於讀取或寫入遠端節點記憶體、設定 SpaceWire 路由器，以及執行設備控制與資料搬移。

(5) ECSS-E-ST-50-53C

ECSS, ECSS-E-ST-50-53C, "SpaceWire - CCSDS Packet Transfer Protocol", 2010-02。該文件規範 CCSDS 太空封包於 SpaceWire 網路上的封裝與傳輸方式，使 CCSDS 遙測或遙控指令封包可透過 SpaceWire 網路傳送至指定設備。

(6) ECSS-E-ST-50C

ECSS, ECSS-E-ST-50C, "Space Engineering - Communications", Revision 2, 2024-12。該文件為太空通訊系統的通用工程標準，可作為 SpaceWire 與 SpaceFibre 系統需求、介面定義、系統工程及驗證規劃的上位參考文件。

(d) 技術指標

(1) 鏈路架構與資料傳輸率（Link Architecture & Data Rate）

SpaceWire 應採用雙向、全雙工、點對點串列鏈路，使兩端設備可同時傳送與接收資料。一般 SpaceWire 鏈路可操作於 2～200 Mbps；採用阻抗匹配連接器及適當的高速設計時，資料傳輸率可達 400 Mbps 以上。實際最高資料傳輸率應依電纜損耗、資料與閘控

訊號偏移、抖動及連接器特性訂定。鏈路於重置或斷線後，輸出埠應先以 10±1 Mbps 啟動，直到系統設定為其他操作速率；輸出埠可支援的最低資料傳輸率應為 2 Mbps。

(2) 電纜與連接器介面（Cable & Connector Interface）

SpaceWire 電纜應包含 4 組具個別屏蔽的雙絞線，分別傳送兩個方向的資料與閘控差動訊號。四組差動線對之間的訊號偏移應小於 0.1 ns/m；標準中的電纜設計參考條件為 10 m、200 Mbps，但實際允許長度仍應依訊號衰減、偏移及抖動分析結果決定，不宜直接將 10 m 視為所有系統的固定上限。Type A 連接器應採用具有 9 個壓接接點的 Micro-D 連接器；若採用高速 Type B 連接器，其差動接點阻抗應為 100±6 Ω。

(3) SpaceWire 電氣訊號（SpaceWire Electrical Characteristics）

SpaceWire 一般應採用低電壓差動訊號（Low-Voltage Differential Signalling, LVDS），接收端終端阻抗應為 100±10 Ω，外接終端電阻宜使用 100±1 Ω。在 100 Ω 負載下，傳送端差動輸出振幅應介於 247～454 mV。接收端對大於+100 mV 的差動訊號應判定為邏輯 1，對小於−100 mV 的差動訊號應判定為邏輯 0，並應能承受振幅最高 600 mV 的差動輸入訊號。

(4) 編碼與錯誤偵測（Encoding & Error Detection）

SpaceWire 應採用資料／閘控（Data-Strobe, D-S）編碼，接收端可透過資料與閘控訊號的互斥或運算還原時脈。每一個資料字元或控制字元均應配置奇同位元檢查，以偵測傳輸錯誤；當發生同位元錯誤、無效控制字元或鏈路斷線時，鏈路應進入錯誤復原程序並重新初始化。SpaceWire 封包應以正常封包結束標記（End of Packet, EOP）或錯誤封包結束標記（Error End of Packet, EEP）終止；鏈路於封包傳輸期間發生錯誤時，應以 EEP 標示該封包不可視為完整有效資料。

(5) 流量控制（Flow Control）

SpaceWire 應使用流量控制權杖（Flow Control Token, FCT）執行鏈路層流量控制。每收到一個 FCT，傳送端可獲得傳送 8 個一般字元（N-Char）的額度；同一時間最多可有 7 個尚未使用的 FCT，對應最多 56 個字元的傳送額度。當傳送額度歸零時，傳送端不得繼續傳送一般字元，直到收到新的 FCT。

(6) 封包路由與時間碼（Packet Routing & Time-Code）

SpaceWire 封包應由目的位址、承載資料及 EOP/EEP 組成，並可採路徑位址或邏輯位址經由路由器轉送。路由器應依路由表將封包導向指定輸出埠，且不得因單一輸出埠壅塞而不受控地占用其他無關鏈路資源。SpaceWire 時間碼的數值欄位應為 6 bits，範圍為 0～63，並依模數 64 連續遞增。標準規範時間碼的廣播與轉送方式，但未統一規定所有網路的時間同步精度；允許的時間碼傳遞延遲與節點間時間誤差應依衛星任務另行訂定。

10.1.6 ANSI/VITA SpaceVPX 背板介面整合

(a) 設備或單元

衛星本體（Spacecraft Bus, BUS）、衛星酬載（Payload）。

(b) 主要內涵

VITA SpaceVPX 背板介面整合主要以 ANSI/VITA 78.0 SpaceVPX System Standard 為核心，規範太空載具電子系統中可插拔模組、背板、插槽及機箱之間的介面架構。SpaceVPX 延伸自 VPX 與 OpenVPX，目標是在保留模組化與開放式架構的前提下，加入太空任務所需的高可靠度、故障隔離、備援切換及系統管理功能，使不同供應商所開發的運算、控制、儲存、電源與酬載模組能透過標準化背板進行整合。現行版本為 ANSI/VITA 78.0-2026，除雙備援架構外，亦納入單鏈式系統、PCIe 等通訊協定，以及更明確的電源、機構與散熱設計內容。

(c) 相關文獻來源

(1) ANSI/VITA 78.0

VITA, ANSI/VITA 78.0-2026, "SpaceVPX System Standard", 2026。該文件為 SpaceVPX 背板介面整合之核心標準，規範太空電子系統的可插拔模組、背板、插槽、電源、公用訊號、系統管理及故障容錯架構，並包含單鏈式與雙備援系統的設計原則。

(2) ANSI/VITA 46.0

VITA, ANSI/VITA 46.0-2023 + Errata, "VPX Baseline Standard", 2023。該文件規範 VPX 可插拔模組與背板之基本機構、連接器、電源接點、高速差動訊號及介面配置，為 SpaceVPX 實體介面設計的重要基礎文件。

(3) ANSI/VITA 65.0

VITA, ANSI/VITA 65.0-2025, "OpenVPX System Standard", 2025。該文件規範 OpenVPX 系統架構，以及插槽設定檔、模組設定檔、背板設定檔、通訊平面及連接拓樸的定義方式，可作為 SpaceVPX 模組與背板相容性確認之參考。

(4) ANSI/VITA 65.1

VITA, ANSI/VITA 65.1-2025, "OpenVPX System Standard - Profile Tables", 2025。該文件提供插槽、模組與背板設定檔的詳細表格，以及相關連接器模組與設定檔編號，適合用於確認各插槽腳位、連接埠配置及模組互通條件。

(5) ANSI/VITA 46.11

VITA, ANSI/VITA 46.11-2022, "System Management on VPX", 2022。該文件規範 VPX 系統的機箱管理、模組識別、狀態監控、電源控制、重置及故障回報機制，為 SpaceVPX 系統管理與故障隔離設計的重要參考。

(6) ANSI/VITA 48.0; ANSI/VITA 48.2

VITA, ANSI/VITA 48.0-2022, "Mechanical Standard for VPX Ruggedized Enhanced Design Implementation (REDI)", 2022; VITA, ANSI/VITA 48.2-2022, "Mechanical Standard for VPX REDI Conduction Cooling", 2022。該兩份文件規範強固型 VPX 可插拔模組的機構尺寸、插槽間距、固定方式及傳導式散熱介面，可用於 SpaceVPX 模組、機箱與熱傳路徑整合。

(7) ANSI/VITA 62.0

VITA, ANSI/VITA 62.0-2022, "Modular Power Supply Standard", 2022。該文件規範可安裝於 VPX 機箱之模組化電源供應器介面與配置，可作為 SpaceVPX 電源模組、背板供

電及電源架構設計之參考。

(8) ANSI/VITA 68.0

VITA, ANSI/VITA 68.0-2025, "VPX Compliance Channel Standard", 2025。該文件規範 VPX 可插拔模組、連接器與背板高速傳輸通道的訊號完整性共同要求，可用於背板差動訊號通道、損耗及相容性驗證。

(9) ANSI/VITA 66.0; ANSI/VITA 67.0

VITA, ANSI/VITA 66.0-2016 (R2025), "Optical Interconnect on VPX - Base", 2025；VITA, ANSI/VITA 67.0-2019 (R2025), "Coaxial Interconnect on VPX - Base Standard", 2025。該兩文件為盲插式光纖及同軸連接器介面規範，若 SpaceVPX 系統須整合光纖或射頻訊號時的參考。

(10) NASA 技術報告

NASA, "SpaceVPX Interoperability Assessment", 2022-09。該文件針對市售 SpaceVPX 模組與背板之標準符合性、產品互通性、輻射耐受度及供應鏈現況進行評估，可作為實際選用與整合 SpaceVPX 產品時的補充參考。

(d) 技術指標

(1) 設定檔相容性（Profile Compatibility）

各可插拔模組所採用的插槽設定檔（Slot Profile）、模組設定檔（Module Profile）及背板設定檔（Backplane Profile）應相互一致，包含模組尺寸、連接器區段、訊號通道、電源接腳及通訊協定。設定檔與接腳配置的符合率應為 100%；如使用使用者自訂接腳區域，應於介面管制文件中完整定義，不得與標準接腳或其他模組功能衝突。即使模組符合 SpaceVPX，若採用不同通訊協定或自訂接腳配置，仍可能無法互通。

(2) 模組尺寸與背板插槽（Module Form Factor & Backplane Slot）

系統應依任務需求選用 3U 或 6U 可插拔模組，並確認模組長度、插槽間距、導引結構、楔形鎖固裝置、連接器位置及插拔行程均符合所選設定檔。模組安裝後不得發生機

構干涉、連接器未完全接合或鎖固不良等情形。SpaceVPX 係以支援 3U 與 6U 模組的 OpenVPX 架構為基礎。

(3) 背板接腳與電氣連接（Backplane Pin Assignment & Electrical Connection）

背板與模組端的電源、接地、資料面、控制面、延伸面、公用訊號及系統管理接腳應完全對應。完成組裝後，所有使用中接腳的導通測試通過率應為 100%，且不得出現電源對地短路、差動訊號正負端接反、跨插槽誤接或未預期導通等情形。

未使用的接腳應依設定檔規定處理，不得任意連接電源、接地或其他訊號，以避免不同模組插入後發生介面衝突。

(4) 電源供應與啟動順序（Power Supply & Power Sequencing）

各插槽的主電源電壓、待機電源、最大功耗、啟動電流及電源開關順序，應符合所選 SpaceVPX 電源架構及模組設定檔。背板供電容量應涵蓋所有模組的最大穩態功耗、啟動瞬間電流及設計餘裕，且任一模組故障不得造成其他插槽電源超出容許範圍。

針對特定 3U、五輸出 SpaceUM 架構的分析指出，若分別採用 3.3 V、5 V 或 12 V 主電源，單一模組的主電源功率上限約為 66 W、100 W 及 240 W；上述數值僅適用於該特定架構，不應視為所有 SpaceVPX 系統的通用限制。

(5) 高速資料傳輸介面（High-Speed Data Interface）

資料面、控制面及延伸面所採用的通訊協定、差動通道數量、單通道傳輸速率、資料方向及連線拓樸，應由模組端與背板端共同定義。SpaceVPX 並未強制所有系統採用單一通訊協定；實際系統可依設定檔採用 Ethernet、PCI Express、SpaceWire 或其他指定介面。若採用符合 ANSI/VITA 46.30 的高速連接器，連接介面應支援至少 25 Gbaud，可用於 PCIe Gen 4 或 100GBASE-KR4 等高速通訊。實際資料傳輸速率仍應依背板材料、通道長度、連接器、通訊協定及收發器能力訂定。

系統整合測試時，建議將正常操作條件下的高速鏈路位元錯誤率訂為 $\leq 1\times10^{-12}$，且不得發生未說明的封包遺失、鏈路反覆重新建立或資料通道錯接；此數值屬建議驗收門檻，並非所有 VITA 78 設定檔的統一規定。

(6) 公用訊號與系統管理（Utility Signals & System Management）

各插槽應正確支援電源開關、重置、參考時脈、模組識別、狀態監控、故障回報及其他設定檔所要求的公用訊號。Space Utility Management Module（SpaceUM）應能對指定插槽執行獨立的電源控制及狀態監控，避免單一模組故障影響整個公用訊號介面。所有模組的識別資料讀取、電源控制、重置控制及狀態回報功能，於正常條件下的操作成功率應為 100%；通訊中斷、模組無回應或電源異常時，系統應能於專案規定時間內產生故障回報。

(7) 備援與故障隔離（Redundancy & Fault Isolation）

採用雙備援架構時，主要與備援電源、資料通道、控制通道及公用訊號路徑應具有明確且相互獨立的連接方式。SpaceVPX 的設計目標包含高可用度、故障容錯及模組層級的故障隔離；新版標準亦同時涵蓋雙備援及單鏈式架構。

進行單一故障注入測試時，應確認故障模組可被正確辨識與隔離，且不得造成非故障模組永久失效。備援路徑切換成功率應為 100%；故障偵測時間、隔離時間及備援切換時間則應依任務即時性需求訂定。

(8) 訊號完整性（Signal Integrity）

高速差動通道應依所選連接器、背板通道等級及通訊協定，驗證插入損耗、回波損耗、串音、阻抗連續性、眼圖、抖動及位元錯誤率。若採用 VITA 68 符合性通道，模組端、背板、連接器及整體通道均應符合相對應的通道規格，不得僅以單一元件測試結果判定整體鏈路合格。VITA 68 係用於規範 VPX 模組、連接器與背板高速通道的共同訊號完整性要求。各差動訊號對的正負端、通道編號及資料方向應與介面文件一致，測試通過率應為 100%。

(9) 散熱與環境適用性（Thermal Management & Environmental Suitability）

可插拔模組應透過楔形鎖固裝置及機箱導熱面建立完整的傳導散熱路徑。各模組的接面溫度、板卡溫度、導熱介面溫度及機箱基板溫度，均不得超出元件與模組規格所規定的操作範圍。SpaceVPX 雖提供適合強固型及傳導散熱模組的架構，但符合 VITA 78 介面並不等同於已通過太空環境驗證；熱真空、振動、衝擊、輻射及電磁相容性要求仍應

依衛星任務另行訂定與驗證。

(10) 端對端整合驗證（End-to-End Integration Verification）

完整系統應執行模組插入辨識、電源啟動、參考時脈、重置、高速鏈路建立、資料傳輸、系統管理、故障回報及備援切換等端對端測試。所有合法介面操作及正常資料傳輸項目的通過率應為 100%。測試亦應涵蓋模組拔除、單一通道中斷、電源異常、鏈路錯誤、模組無回應及備援切換等故障情境，以確認背板不會將單一模組故障擴散至整套系統。由於不同廠商的 SpaceVPX 產品即使宣稱符合 VITA 78，仍可能存在設定檔、通訊協定及自訂接腳差異，因此應以實際模組與背板進行互通性驗證。

10.2 衛星酬載內部單元介面

衛星酬載內部單元介面有兩種情況：與衛星本體共用上述網路、內部獨立連結或網路。前者的示意如圖 55，後者的示意如圖 56。

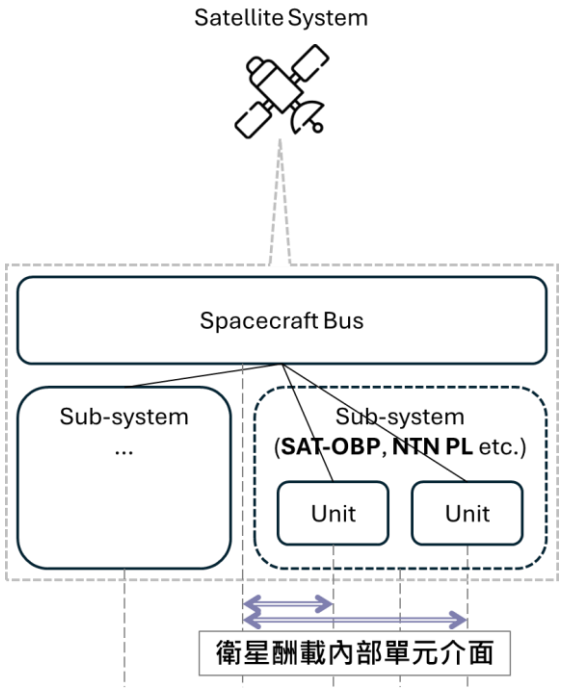


圖 55、與本體（BUS）共用的衛星酬載內部單元介面

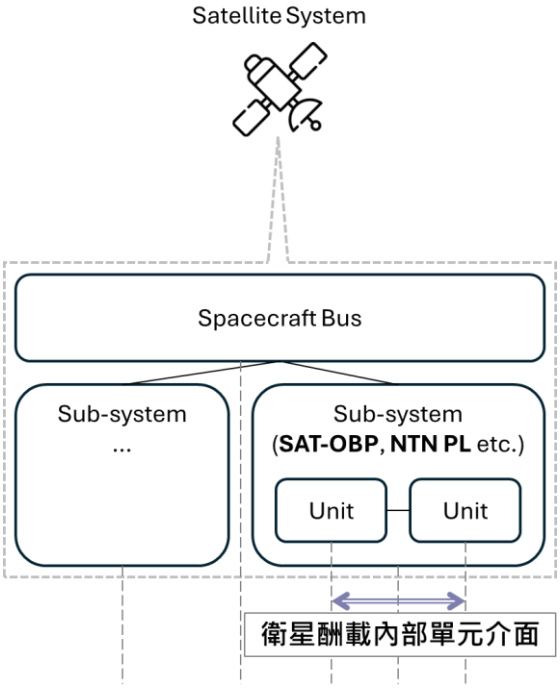


圖 56、獨立的衛星酬載內部單元介面

10.2.1 與衛星本體共用上述網路

(a) 設備或單元

衛星本體（Spacecraft Bus, BUS）、衛星酬載（Payload）內部單元。

(b) 主要內涵

酬載與衛星本體共用網路，是指酬載設備與衛星本體的飛行電腦、資料處理、姿態控制及其他次系統，共同使用 MIL-STD-1553、SpaceWire、SpaceFibre、TTEthernet 或 SpaceVPX 背板等通訊架構。此方式可減少獨立線路、通訊轉換設備及整合介面，但系統須明確規劃節點位址、資料格式、傳輸頻寬、優先順序、時間同步、備援路徑及故障隔離，避免酬載大量資料或設備異常影響衛星本體的關鍵遙測與控制功能。CCSDS 太空封包可作為網路承載的上層資料格式，但實體介面、鏈路控制及路由方式仍須依所選用的機內網路標準定義。

(c) 相關文獻來源

(1) ECSS-E-ST-50C

ECSS, ECSS-E-ST-50C, "Space Engineering - Communications", Revision 2, 2024-12。該文件規範太空載具（Spacecraft）端對端通訊系統、太空網路、通訊功能、效能分析及驗證文件，可作為衛星本體與酬載共用通訊網路的上位依據。

(2) ECSS-E-ST-10-24C

ECSS, ECSS-E-ST-10-24C, "Space Engineering - Interface Management", Revision 1, 2024-11。該文件規範介面的識別、需求定義、核准、管制、實作及驗證程序，並定義介面需求文件與介面管制文件的內容。

(3) ECSS-E-ST-10-06C

ECSS, ECSS-E-ST-10-06C, "Space Engineering - Technical Requirements Specification", 2009-03。該文件規範技術需求的撰寫與管理方式，可用於定義網路傳輸速率、延遲、可靠度、備援及環境條件等需求。

(4) ECSS-E-ST-10-02C

ECSS, ECSS-E-ST-10-02C, "Space Engineering - Verification", Revision 1, 2018-02。該文件規範需求驗證方法、驗證計畫、驗證管制文件及測試報告，可作為共用網路整合驗證的依據。

(5) ECSS-E-ST-50-12C; ECSS-E-ST-50-11C

ECSS, ECSS-E-ST-50-12C, "SpaceWire - Links, Nodes, Routers and Networks", Revision 1, 2019-05；ECSS, ECSS-E-ST-50-11C, "SpaceFibre - Very High-Speed Serial Link", 2019-05。該兩份文件分別規範 SpaceWire 與 SpaceFibre 的實體介面、鏈路、封包、路由、流量控制、虛擬通道及錯誤處理。

(6) ECSS-E-ST-50-16C; SAE AS6802A

ECSS, ECSS-E-ST-50-16C, "Space Engineering - Time-Triggered Ethernet", 2021-09；較

新版為 SAE, AS6802A, "Time-Triggered Ethernet", Revised 2023-02。該文件規範時間觸發乙太網路的參考架構、時間同步、時間觸發通訊及非時間觸發資料共存機制。

(7) MIL-STD-1553C

DoD U.S., MIL-STD-1553C, “Digital Time Division Command/Response Multiplex Data Bus”, 28 February 2018。該文件規範高可靠度指令／回應分時多工匯流排的資料流向、功能格式及電氣介面。

(8) ANSI/VITA 78.0

VITA, ANSI/VITA 78.0-2026, "SpaceVPX System Standard", 2026。該文件規範太空電子系統中具容錯能力的模組、背板、電源、公用訊號、系統管理及通訊介面。

(9) ECSS-E-ST-50-53C; CCSDS 133.0-B-2

ECSS, ECSS-E-ST-50-53C, "SpaceWire - CCSDS Packet Transfer Protocol", 2010-02；較新版為 CCSDS, 133.0-B-2, "Space Packet Protocol", Issue 2, 2020-06。該文件規範 CCSDS 太空封包格式，以及 CCSDS 太空封包於 SpaceWire 網路上的承載方式。

(d) 技術指標

(1) 介面與標準一致性（Interface Compliance）

酬載與衛星本體應採用相同的實體介面、電氣規格、通訊協定、連接器、接腳配置及資料傳輸速率。介面管制文件所列各項介面與實際設備的符合率應為 100%，不得出現接腳誤接、通訊協定不一致或相同位址重複配置等情形。介面定義、核准、管制及驗證程序應依 ECSS 介面管理原則執行。

(2) 節點位址與資料識別（Node Addressing & Data Identification）

各酬載與衛星本體節點應配置唯一的實體或邏輯位址，並明確定義路由、虛擬通道、連接埠、APID、協定識別碼或虛擬鏈路識別資訊。位址、路由及資料識別設定的正確率應為 100%；未定義或不支援的資料封包應予以捨棄並留下錯誤紀錄。SpaceWire 可透過協定識別碼讓多種上層協定共用同一網路而互不混淆。

(3) 頻寬與網路負載（Bandwidth & Network Load）

系統應分別計算衛星本體控制資料、遙測資料、酬載控制資料及酬載任務資料的平均與尖峰傳輸量。所選實體鏈路的有效傳輸能力應大於所有同時傳送資料流量的總和，並保留專案規定的設計餘裕。

(4) 傳輸優先順序與流量隔離（Priority & Traffic Isolation）

衛星本體的安全關鍵及控制資料應具有高於一般酬載資料的傳輸優先順序。採用 SpaceFibre 時可運用虛擬通道及服務品質；採用 TTEthernet 時可運用時間觸發型、速率限制型及盡力而為型資料分流；採用 SpaceVPX 時則應依資料面、控制面及系統管理介面進行區隔。當酬載流量超出規定值時，系統應限制或暫停非關鍵資料，不得影響衛星本體關鍵資料的傳送。正常及最大設計負載下，關鍵資料傳輸成功率應為 100%。

(5) 端對端延遲與抖動（End-to-End Latency & Jitter）

延遲分析應包含來源設備處理、佇列等待、傳輸、路由器或交換器轉送，以及目的設備處理時間。所有關鍵控制資料於正常、尖峰流量及單一故障狀態下，均應符合專案規定的延遲與抖動上限。

10.2.2 內部獨立連結或網路

(a) 設備或單元

衛星酬載（Payload）內部單元。

(b) 主要內涵

酬載內部獨立連結或網路，是指酬載感測器、訊號處理器、控制器、儲存設備及其他內部模組，使用與衛星本體分離的專用通訊介面；酬載僅透過一個或數個明確的外部介面與衛星本體交換指令、狀態及任務資料。此架構可依酬載資料量與即時性選用 SpaceWire、SpaceFibre、乙太網路、SerDes、PCIe 或其他專用介面，並有助於限制酬載內部故障及大量資料流量對衛星本體的影響；但酬載對外介面單元須負責資料彙整、緩衝、格式轉換、速率匹配、時間同步及故障隔離。其內部設計可由酬載供應商自行規劃，

但與衛星本體交界處仍須納入正式介面管制及端對端驗證。

(c) 相關文獻來源

(1) ECSS-E-ST-10-24C

ECSS, ECSS-E-ST-10-24C, "Space Engineering - Interface Management", Revision 1, 2024-11。該文件適用於定義酬載與衛星本體之間的介面邊界、責任分工、介面需求及管制文件。

(2) ECSS-E-ST-50C

ECSS, ECSS-E-ST-50C, "Space Engineering - Communications", Revision 2, 2024-12。該文件規範端對端通訊服務、太空網路架構、功能、效能及驗證要求，可用於酬載內外部通訊架構的整體規劃。

(3) ECSS-E-ST-10-06C

ECSS, ECSS-E-ST-10-06C, "Space Engineering - Technical Requirements Specification", 2009-03。該文件可用於定義酬載內部網路及對外介面的功能、效能、環境與限制條件。

(4) ECSS-E-ST-10-02C

ECSS, ECSS-E-ST-10-02C, "Space Engineering - Verification", Revision 1, 2018-02。該文件規範分析、測試、檢查及設計審查等驗證方法，以及驗證紀錄與測試報告。

(5) ECSS-E-ST-50-12C

ECSS, ECSS-E-ST-50-12C, "SpaceWire - Links, Nodes, Routers and Networks", Revision 1, 2019-05。該文件可作為酬載內部感測器、處理器、儲存設備及資料彙整單元之間的點對點或封包交換網路依據。

(6) ECSS-E-ST-50-11C

ECSS, ECSS-E-ST-50-11C, "SpaceFibre - Very High-Speed Serial Link", 2019-05。該文件提供適用於高資料率酬載內部傳輸，包含多通道、虛擬通道、服務品質、流量控制、錯誤偵測及重新傳送機制。

(7) ECSS-E-ST-50-51C

ECSS, ECSS-E-ST-50-51C, "SpaceWire Protocol Identification", 2010-02。該文件規範 SpaceWire 協定識別方式，使多種應用協定可於同一酬載網路上並行運作。

(8) ECSS-E-ST-50-53C; CCSDS 133.0-B-2

ECSS, ECSS-E-ST-50-53C, "SpaceWire - CCSDS Packet Transfer Protocol", 2010-02；較新版為 CCSDS, 133.0-B-2, "Space Packet Protocol", Issue 2, 2020-06。該文件提供將酬載內部資料轉換或封裝成 CCSDS 太空封包，再交由衛星本體的資料處理或遙測系統傳送的協定。

(d) 技術指標

(1) 酬載對外介面邊界（External Interface Boundary）

酬載對外應明確定義電源、接地、指令、遙測、任務資料、時間同步、重置及離散訊號等介面。衛星本體原則上不應依賴未納入介面文件的酬載內部設計資訊；對外介面與介面管制文件的符合率應為 100%。

(2) 內部網路架構與通訊協定（Internal Network Architecture & Protocol）

酬載應定義內部節點、鏈路、交換器或路由器、資料方向、實體介面及通訊協定。各節點位址、連接埠、資料格式及路由設定不得重複或衝突，設定正確率應為 100%。內部網路可依資料量分層設計，例如以低速控制介面處理設定與狀態資料，並以 SpaceWire、SpaceFibre 或其他高速鏈路傳送大量任務資料。SpaceWire 與 SpaceFibre 分別提供點對點封包鏈路及高速、多虛擬通道傳輸能力。

(3) 資料格式與協定轉換（Data Format & Protocol Conversion）

酬載內部資料轉換為衛星本體所使用的 CCSDS 太空封包或其他資料格式時，應完整保存來源識別、時間標記、資料長度、序號、狀態及錯誤檢查資訊。CCSDS 太空封包及 SpaceWire CCSDS Packet Transfer Protocol 可作為此類資料封裝與傳輸的標準依據。正常條件下，格式轉換、封裝及解封裝成功率應為 100%；不得發生未偵測的資料截斷、欄位錯置、位元組順序錯誤或封包對應錯誤。

(4) 測試與維護介面（Test & Maintenance Interface）

酬載應提供可支援單機測試、整合測試及故障診斷的測試介面或測試模式，使地面測試設備可注入指令、讀取狀態、擷取資料及模擬衛星本體介面。SpaceWire 標準亦將地面測試設備直接連接機內資料處理系統，列為支援系統整合與測試的重要應用方式。

10.3 冗餘架構的容錯運用

衛星酬載在長達數年的太空任務中，面臨著來自太空輻射引發的單一事件效應（Single Event Effect, SEE）以及硬體老化而導致失效的嚴峻挑戰，建立冗餘架構能夠確保當特定次系統或單元發生不可預期的物理損壞或功能異常時，衛星系統能自動或透過地面指令切換至備援路徑，維持基本能力。在實際運用上，主要包含冷備份（Cold Spare）與熱備份（Hot Spare）兩種策略，並透過冗餘切換矩陣（Switch Matrix）實現 N+M 的彈性配置。不只是次系統與元件的冗餘架構，單元內部採用的複雜功能元件也可以採用冗餘架構，包括儲存與邏輯處理元件，可以導入三模組冗餘（Triple Modular Redundancy, TMR），透過多重投票機制即時修正因太空輻射引發的運算錯誤。

於是，冗餘架構的導入亦會直接影響衛星酬載與衛星本體間的電氣、遙測及控制介面的規劃。為確保主要與備援單元能夠於故障發生後順利切換，規劃初期即應使各冗餘次系統或單元具備一致且相容的介面規格，包括電源輸入、資料傳輸、控制訊號、時脈同步及遙測控制等，避免因其間的介面差異而造成備援的部件無法接替主要的部件。此外，冗餘架構的可切換路徑之間應具備適當的電氣隔離與故障隔離機制，例如透過獨立電源供應、隔離式資料介面、雙向隔離開關或交叉切換矩陣，以降低單一故障對其他通道的影響，並須避免短路、過電流或單一故障沿著介面向其他設備擴散。

10.4 衛星內部次系統／單元介面的開發建議

各次系統／單元之詳細介面參數、連接器定義、腳位配置、資料格式及驗證方式，應於相對應介面控制文件（Interface Control Document, ICD）中明確規定。若次系統介面要求與本節規定不同，應經系統工程審查、風險評估及正式變更流程後再進行採用。

10.4.1 衛星內部次系統／單元介面共通技術指標

(1) 機械介面

技術指標	共通要求
機構	各次系統／單元之機構尺寸及操作包絡不得超出配置圖與 ICD 所規定之範圍，並應標示禁入區、活動範圍及接頭操作空間。
質量特性	應提供酬載以及各次系統／單元質量、質心位置及慣性矩資料。實測結果不得超出規定之質量預算及配置限制。
安裝介面	應明確定義安裝面、固定孔位、螺紋規格、鎖附扭矩及防鬆脫方式。
安裝精准度	姿態量測、天線、光學設備及其他方向敏感單元，應規定安裝位置與角度誤差公差，並提供指向。
結構強度	酬載以及各次系統／單元之安裝介面應可承受運送、整合、發射及在軌操作期間之靜態、振動、衝擊及熱應力環境。
共振頻率	酬載以及各次系統／單元安裝後之最低共振頻率應符合衛星結構及運載火箭耦合分析要求，具體數值依任務結構規格訂定。

(2) 電源介面

技術指標	共通要求

輸入電壓	酬載以及各次系統／單元應於衛星電源匯流排規定之正常、瞬時及降電壓範圍內正常運作，不得因合理範圍內之電壓變化產生重置或錯誤操作。
功率需求	應定義酬載以及各次系統／單元待機、正常、峰值、啟動及異常模式之電流與功率需求，並納入系統功率預算。
啟動瞬間電流	酬載以及各次系統／單元啟動時之瞬間電流、持續時間及重複啟動行為應受控，不得造成電源匯流排電壓異常下降或其他設備重啟。
電源時序	具有多組電源軌或特定開關順序之設備，應明確定義上電、斷電、重啟及緊急關閉之時序。
電源保護	酬載以及各次系統／單元應依設計需求具備過電壓、欠電壓、過電流、短路、反接及過溫保護。單一設備短路不得使整體電源系統失效。
接地與回流	電源回流、訊號地、機殼地及絕緣之連接方式應於接地架構中明確定義，避免形成非預期接地迴路。

(3) 資料介面

技術指標	共通要求

實體介面	應明確定義通訊介面型式，例如 CAN、RS-422、RS-485、SpaceWire、Ethernet、SPI、I²C 或其他介面
通訊速率	應定義資料速率、容許誤差、最大使用率、封包長度及資料更新頻率。
通訊協定	應定義節點位址、主從關係、封包格式、位元順序、位元組順序、命令回覆及連線建立方式。
錯誤偵測	傳輸資料應依介面重要性採用 CRC、Checksum、Parity、序號或其他錯誤偵測機制。
逾時與重送	應定義命令回應時間、通訊逾時、重送次數、失聯判定及通訊恢復機制。
頻寬裕度	通訊匯流排於最差操作條件下應保留適當頻寬裕度，不得因資料尖峰導致關鍵命令或遙測資料延遲。

(4) 指令介面

技術指標	共通要求
指令定義	每項指令應具有唯一識別碼，並定義指令參數、適用模式、執行條件、回覆內容及失敗處理方式。
危險指令保護	涉及關機、軟體更新、展開、點火、射頻

	發射或不可逆操作之指令，應具備雙重確認、權限控管或多步驟執行機制。
指令完整性	單元應驗證指令來源、長度、格式、參數範圍及錯誤檢查碼，不符合條件之命令不得執行。

(5) 遙測介面

技術指標	共通要求
遙測項目	各單元至少應提供工作模式、健康狀態、供電狀態、電壓、電流、溫度、錯誤碼及重要功能狀態。
更新頻率	遙測更新頻率應依參數變化速率及任務重要性訂定，並支援週期回報或查詢回報。
有效範圍	每項遙測應定義單位、解析度、量測範圍、精度、資料型態、轉換公式及異常判定門檻。

(6) 熱介面

技術指標	共通要求
熱接觸	熱介面材料、接觸面粗糙度、平整度、鎖附壓力及導熱材料應依熱分析結果規定。
溫度監測	關鍵或高功率單元應設置溫度量測點，並

	提供過溫告警、降額或關閉機制。
工作溫度	各單元應定義操作溫度、非操作溫度及存放溫度範圍。
散熱需求	應提供各操作模式之平均與峰值熱耗散，並定義主要散熱面、熱接觸位置及允許熱阻。

(7) 線束介面

技術指標	共通要求
線材選用	線材規格應依工作電流、電壓、訊號頻率、壓降、溫度、真空放氣及機械環境選用。
降額設計	線材、接腳及連接器之額定電流與電壓應保留適當降額裕度，不得長期於額定極限附近操作。
屏蔽與絞線	差動訊號、敏感類比訊號及高頻訊號應依需求採用雙絞線、同軸線或屏蔽線。
配線隔離	電源、高速數位、射頻、低階類比及敏感感測訊號應適當分離，降低串音及電磁耦合。

(8) 介面設計裕度

各次系統／單元應依衛星整體裕度管理原則進行介面設計，至少包含下列項目：

i. 電壓與電流裕度。

ii. 功率與能源裕度。

iii. 通訊頻寬與處理能力裕度。

iv. 線材及連接器載流能力裕度。

v. 尺寸、質量及質心配置裕度。

vi. 熱耗散及溫度裕度。

vii. 射頻鏈路與訊號品質裕度。

viii. 時序、延遲及同步誤差裕度。

裕度計算應依系統設計階段持續更新，並於系統需求審查、初步設計審查及關鍵設計審查階段確認其符合性。

10.4.2 衛星內部次系統／單元實務建議

針對衛星內部各次系統、單元及酬載之介面設計、製作、整合、測試與操作，提出實務執行建議，以降低介面不相容、接線錯誤、供電異常、通訊失效、電磁干擾及整合延誤等風險。

本節內容原則上屬建議性質。各項建議應依衛星任務目標、系統架構、可靠度需求、成本、時程及可用資源進行調整。建議於專案初期建立完整之介面清單，並為每一項介面配置唯一識別編號。

(1) 介面清單

介面清單宜至少包含：「介面兩端設備名稱」、「介面類型」、「訊號方向」、「連接器與接腳定義」、「電壓、電流及功率」、「通訊協定與資料速率」、「線束編號」、「負責人」、「驗證狀態」。

(2) 單一系統工程窗口

建議指定單一系統工程窗口負責跨次系統介面協調，避免不同單位各自修改介面而未同步通知。

(3) 根據正式文件

介面異動不宜僅透過電子郵件、會議口頭或通訊軟體訊息確認，應正式更新 ICD、圖面、接腳表及驗證文件。

(4) 標示待定責任

介面尚未確定時，應標示為「待定事項」，並記錄責任人、預定完成日期及對系統之影響。

(5) 介面定義凍結

建議於初步設計審查前完成主要介面基線，於關鍵設計審查前完成所有飛行介面之凍結。

(6) 凍結後變更

介面凍結後若需變更，應執行影響分析，至少評估：「電源預算」、「通訊頻寬」、「線束與連接器」、「機構配置」、「熱設計」、「軟體與韌體」、「測試程序」、「已完成之驗證項目」。

(7) 定期會議

建議定期召開跨次系統介面會議，集中處理未決事項及介面衝突。

11. O-RAN 多設備內部單元介面

本章延續第 4.8 節，包括「O-RAN 單元介面基本說明」與對應 3GPP RAN 基站與衛星用的「3GPP NTN O-RAN 單元介面」所調查的標準內容以及相關建議。

在 3GPP 進入 5G 之前，O-RAN 聯盟即為地面網路 RAN 基站的單元切分提供開放標準，那時並非同時也定義成可用於 3GPP NTN，但在此時 3GPP NTN 的發展趨勢下，若是 O-RAN 架構有機會用於 3GPP NTN，也就有機會繼續根據 O-RAN 架構開發基站，用於 3GPP NTN 的地面設備或是衛星酬載，降低設備依賴非開放架構的情況。

由於 O-RAN 的單元切分用於 3GPP NTN 時，將考量不同單元要留在地面設備還是移到衛星裡，就有可能同時有的單元留在地面、有的單元變成星載，形成一種將本來在同一設備內部的單元分散到更多設備內部的架構。在調查這種 O-RAN 多設備內部單元介面之前，需先認識在用於 3GPP 地面網路時，為單一地面設備內拆分的 O-RAN 單元介面；再根據這些定義，釐清這些介面繼續用於多設備內部單元時的差異。

11.1 O-RAN 單元介面基本說明

已用於 3GPP 地面網路之 O-RAN 單元介面的示意如圖 57。

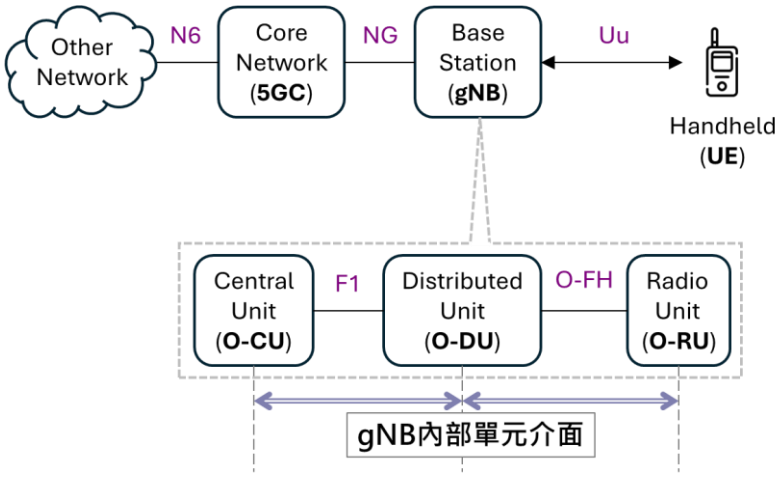


圖 57、3GPP 地面網路系統 O-RAN 單元介面

(a) 設備或單元

開放型中央單元（O-RAN Central Unit, O-CU）、開放型式分散式單元（O-RAN

Distributed Unit, O-DU）、開放型無線電單元（O-RAN Radio Unit, O-RU）。這些單元皆在地面 5G 基站（Next Generation NodeB, gNB）內部。

(b) 主要內涵

O-RAN 架構是拆解傳統封閉基站為開放型的單元，為此定義開放且標準化的內部介面。這有機會打破過去單一電信設備商的壟斷，允許不同廠商的單元實現互通性（Interoperability）。以下對於 O-RAN 中 4 大類的開放介面內涵，以其有涵蓋到的控制面（Control Plane）、用戶面（User Plane）、管理面（Management Plane）以及同步面（Synchronization Plane）來說明。

(1) 開放前置介面（Open Fronthaul Interface, O-FH Interface）

連結 O-RU 與 O-DU，O-RAN 聯盟將其定義在「7-2x 功能切分（Functional Split 7-2x）」架構，本文件第 9.2.2 節的 eCPRI（Enhanced Common Public Radio Interface）便是可用於 O-FH 介面的技術標準。其用戶面負責傳輸同相與正交（In-Phase/Quadrature, I/Q）的數位基頻訊號；控制面傳輸控制訊息，例如波束成形（Beamforming）的控制參數、時頻資源排程（Scheduling）指令；管理面負責 O-RU 的初始設定、軟體更新、效能監視、告警管理以及參數配置，基於 NETCONF 協議與 YANG 資料模型，區分為「混合模式（Hybrid）」與「階層模式（Hierarchical）」，讓 O-DU 或獨立的管理系統對 O-RU 進行管理；而同步面負責確保 O-DU 與 O-RU 之間的時鐘完全同步，例如在時分雙工中避免訊號在上行與下行傳輸時發生碰撞，遵循精確時間協議（IEEE 1588v2 Precise Time Protocol, PTP）以及同步乙太網路（Synchronization Ethernet, SyncE）規範，使得時鐘同步誤差接近奈秒（Nanosecond）等級。

(2) F1 介面（F1 Interface）

連結 O-DU 與 O-CU，F1 介面繼承自 3GPP R15 標準的 2 階切分（Split 2）架構，在 O-RAN 中被予以延續並保持開放。其用戶面是 O-DU 與 O-CU 中的 O-CU-UP 連接用的，基於 3GPP 定義的通用封包無線服務（General Packet Radio Service）的隧道協定（GPRS Tunnelling Protocol User Plane, GTP-U），負責封裝與傳輸用戶的網際網路協定數據；控制面是 O-DU 與 O-CU 中的 O-CU-CP 連接用的，基於 3GPP 定義的 F1AP（F1 Application

Protocol），負責傳輸無線資源控制層（Radio Resource Control, RRC）與下層的控制信令，包含 UE 上下文（Context）管理、系統資訊廣播以及無線承載（Bearer）建立與釋放。

(3) E2 介面（E2 Interface）

連結 O-CU、O-DU 與近即時無線電智慧控制器（Near Real-Time RAN Intelligent Controller, Near-RT RIC），Near-RT RIC 通常不是所有基站各自都具備的單元，它更傾向獨立出來以控制多個基站中的 O-CU 與 O-DU。E2 介面是 O-RAN 為引入網路智慧控制與無線資源最佳化而制定的，它將控制邏輯自上述數據傳輸功能的各面向再分離。主要的控制面內涵在於由 E2AP（E2 Application Protocol）定義基礎的控制流程，例如 Near-RT RIC 如何向 O-DU 與 O-CU 發送訂閱（Subscription）、控制（Control）特定無線資源，以及如何接收報告（Report），以及 E2SM（E2 Service Model）定義的應用場景資料欄位，例如 E2SM-KPM 用於回報網路效能指標（如吞吐量、延遲）、E2SM-RC 則用於執行無線控制（如波束切換、換手控制）。

(4) O1 與 A1 介面（O1 & A1 Interface）

這是 O-RAN 整體營運、管理與智慧編排，將 O-RAN 架構走向 O-RAN Cloud 架構用的兩個介面，O1 介面連結所有 O-RAN 單元與服務管理與編排（Service Management and Orchestration, SMO）框架的設施，而 A1 介面連結 Near-RT RIC 與 SMO 中的非即時無線電智慧控制器（Non-Real-Time RAN Intelligent Controller, Non-RT RIC），SMO 不是基站本身的部件，而是整體 O-RAN 的管理框架，並包括中央 AI 模型。兩個介面的主要內涵在於管理面，O1 介面負責整個網路單元（O-CU、O-DU、O-RU、RIC）的營運、管理與維護（Operation Administration & Maintenance, OAM），包含故障管理、組態管理、帳務管理、效能管理與安全管理，多採用 RESTconf 或 NETCONF 協定；A1 介面用於非即時（即>1 s）的智慧決策，例如 AI 模型在計算後，透過 A1 介面引導 Near-RT RIC 對特定區域的手機進行流量負載平衡或節能排程。

上述 O-FH 與 F1 介面是 O-RAN 對基站設備內部拆分單元的介面，本章後續對於 NTN 系統即針對這兩個介面的差異做調查，而 E1、O1 與 A1 介面則是 O-RAN 架構中基站單元對外的 RIC 與 SMO 框架的介面，不在本章討論的範疇。

(c) 相關文獻來源

(1) ETSI TS 103 982

O-RAN WG1, ETSI TS 103 982, "O-RAN Architecture Description", Version 14.0.0, 2026-03。該文件是 O-RAN 整體系統架構的最高層描述文件，主要介紹 SMO 框架與各單元，與列出相關介面，類似 3GPP TS 38.300 在 NG-RAN 中的定位。

(2) ETSI TS 103 859

O-RAN WG4, ETSI TS 103 509, "Open Fronthaul Interface Specification", Version 7.0.2, 2022-09。該文件將傳統私有 RU 與 DU 介面標準化為控制、用戶、同步及管理面。

(3) 3GPP TS 38.401

3GPP, TS 38.401, "5G; NG-RAN; Architecture description", Version 19.3.0, 2026-06。該文件定義的介面被 O-RAN 介面沿用。

(4) 3GPP TS 38.473

3GPP, TS 38.473, "F1 Application Protocol (F1AP)", Version 19.3.0, 2026-07。該文件定義連結 O-DU 與 O-CU 之 F1 介面的控制面。

(5) ETSI TS 104 039

O-RAN WG3, ETSI TS 104 039, "E2 interface: Application Protocol (E2AP)", Version 4.0.0, 2024-10。該文件定義 Near-RT RIC 對 O-DU 與 O-CU 的 E2 介面的近即時控制。

(6) ETSI TS 103 983

O-RAN WG2, ETSI TS 103 983, "A1 interface: General Aspects and Principles", Version 3.1.0, 2024-01。該文件定義 Non-RT RIC 對 Near-RT RIC 之間 A1 介面的策略面。

11.2 3GPP NTN O-RAN 單元介面

3GPP NTN O-RAN 單元介面分為採用通透型衛星時地面 gNB 內部單元介面（延續前一節所述的 O-FH 與 F1），以及採用再生型衛星時可能拆分到多設備時，O-FH 與 F1

會出現的 3 個情況：NTN PL 內部 O-RU 與 O-DU 的 O-FH、NTN GW 與 NTN PL O-DU 的 F1 over SRI、以及 NTN GW 與地面 O-CU 的 F1。

11.2.1 採用通透型衛星時，地面 gNB 內部單元的 O-FH 與 F1

採用通透型衛星時，地面 gNB 內部單元的 O-FH 與 F1 示意如圖 58。

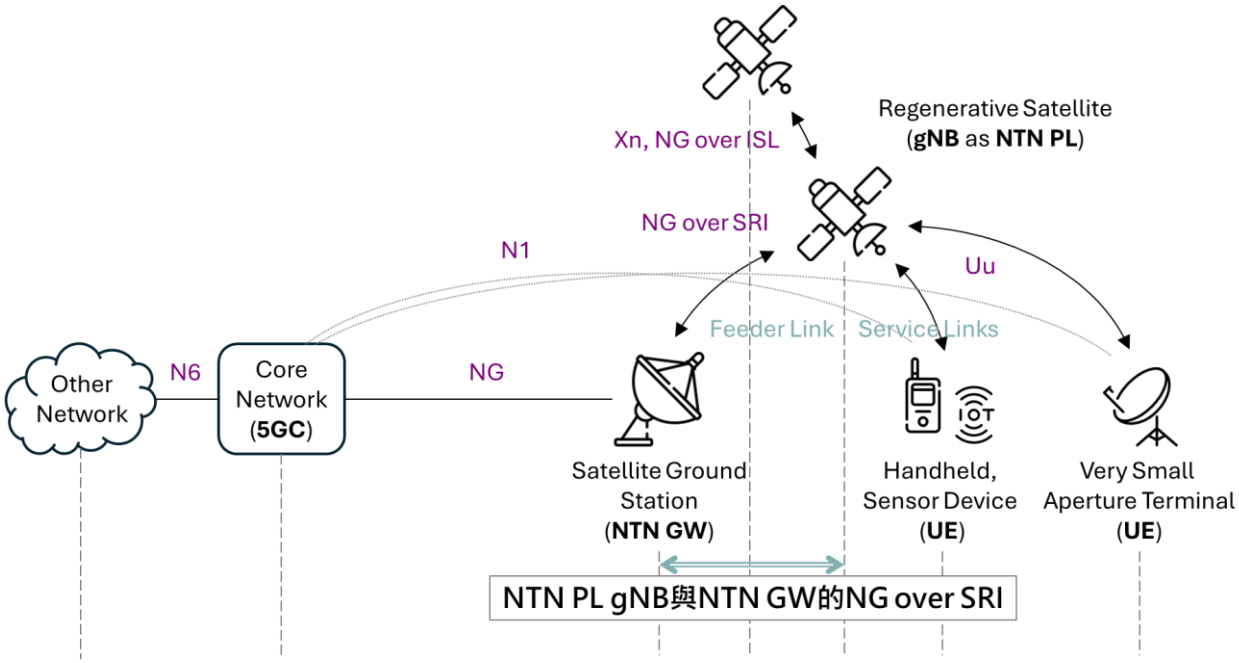


圖 58、3GPP NTN 通透型系統 O-RAN 的地面 gNB 內部單元的 O-FH 與 F1

(a) 設備或單元

開放型中央單元（O-RAN Central Unit, O-CU）、開放型式分散式單元（O-RAN Distributed Unit, O-DU）、開放型無線電單元（O-RAN Radio Unit, O-RU）。這些單元皆在地面 5G 基站（Next Generation NodeB, gNB）內部。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 的通透型架構下，雖然衛星在空中僅做訊號中繼，所有基站功能仍完全保留在地面，但因為太空鏈路引進超長傳輸延遲（低軌衛星單向約 5 ms 至 10 ms、同步軌道衛星高達 270 ms）與極大的都卜勒頻移（Doppler Rate）變動率，這使得地面 gNB 內部各 O-RAN 單元介面（F1、O-FH）雖然維持標準協議名稱，但其內部信號處理機制

與資料欄位內涵出現改變。

(1) O-FH 介面的內涵

在地面 O-RU 與 O-DU 之間，同樣採用本文件第 9.2.2 節的 eCPRI，但這時 O-FH（基於 7-2x 功能切分）必須承載特殊的時頻補償與衛星波束動態控制資訊，其在控制面與用戶面的演進包括都卜勒與時延動態預補償與衛星動態波束對應（Dynamic Beam Mapping）。在用戶面傳輸 eCPRI 數位基頻 I/Q 訊號前，都卜勒與延遲補償機制必須與控制面聯動，控制面內涵引進基於衛星精確星曆（Ephemeris Data）與地面站實體位置的動態偏置參數。介面必須於微秒（μs）級將動態計算出的匯集鏈路（Feeder Link）時間提前量（Timing Advance, TA）與頻率預偏值注入 eCPRI 控制訊框內，在硬體底層直接扣除衛星運動引起的頻移與延遲。低軌衛星移動時，在地面的點波束（Spot Beam）會掃過不同區域，控制面中新增大量針對星上陣列天線幾何指向與地面波束覆蓋區相互對應的波束索引（Beam Index）與天線波束成形權重（Beamforming Weights）描述，以引導 O-RU 即時調配數位基頻訊號的射頻對應。

而在同步面需要具備非對稱鏈路時間差補償。傳統地面 O-RAN 的同步面假設 O-DU 與 O-RU 內部延遲是雙向對稱的，對於 eCPRI 透過 PTP 達成時鐘同步，但到 NTN GW 內部的高精度基準時鐘必須考慮到匯集鏈路的天線射頻前端硬體電路、大功率的功率放大器暫存器處理、以及雙工器之間存在微幅的非對稱群延遲（Asymmetric Group Delay），同步面的內涵必須納入這些硬體校正校準參數（Calibration Parameters），確保地面 gNB 到 NTN GW 時間基準誤差維持在≤±1.5 μs 的限制內。

最後在管理面，O-DU 或外部設施透過 NETCONF/YANG 管理 O-RU 時，其資料模型增加新的 NTN 專屬配置物件（Configuration Object），包含地面站天線追蹤馬達狀態、匯集鏈路頻段切換、升頻器與高功率放大器的動態增益遮罩等。

(2) F1 介面的內涵

連接 O-DU 與 O-CU 的 F1 介面，維持使用 3GPP 的 GTP-U 與 F1AP 協定，但其內涵機制需要針對「超長太空延遲」進行變動。在用戶面需要放大封包緩衝區與混合式自動重傳請求（Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ）行程（Processes），傳統 5G 因為效率的需要，HARQ 最多支援 16 個行程，但在 NTN 巨大的往返時間下，16 個行程很容

易用完而讓管線卡在等待確認（ACK/NACK），NTN 的 F1 用戶面（F1-U）與下層 MAC 聯動，將硬體 HARQ 行程擴充至 32 個，這意味著 F1-U 的緩衝區必須呈數倍增長，用以留存大量尚未收到確認的 GTP-U 封包以免緩衝區溢位（Buffer Overflow）。

在控制面需要放大協定計時器與隨機接取窗口，由於太空距離引發巨大傳輸延遲，傳統地面 15 ms 內必須完成的非存取層（Non Access Stratum, NAS）或 RRC 確認信令若直接在 NTN 中使用會容易被判定逾時（Timeout）而斷線，因此 F1 控制面（F1-C）的信令大幅調高並解除 3GPP 規範中的多項計時器常數（例如 T300、T301、T310 被允許展延數秒），F1-C 在發系統資訊給 O-DU 以及 UE 時，F1AP 內涵包含「Cell 特定時間提前量（Cell-Specific TA）」與「衛星軌道星曆（Satellite Ephemeris）」資訊，使 UE 能先自行計算並預補償它與衛星之間的服務鏈路（Service Link）延遲，O-CU 再引導 O-DU 擴張長達數十 ms 的隨機接取接收窗讓 UE 可順利接入。

(c) 相關文獻來源

對於 3GPP NTN O-RAN 採用通透型衛星時，目前無論 3GPP 或 O-RAN 聯盟仍在討論與更新文件，並未出現新的專門文件，故可以參考的文件同第 11.1 節(c)所列的標準文件，以及在第 7～8 章皆有提到 NTN 架構的 3GPP TR 38.821 技術報告。

(d) 技術指標

(1) 地面 O-FH 延遲與抖動（Latency & Jitter）

數位 IQ 與即時控制面要求單向延遲≤ 25 μs 至 100 μs，抖動為奈秒級（如< 32 ns）。

(2) 地面 O-FH 同步精確度（Synchronization Accuracy）

搭配 IEEE 1588v2 PTP 協定時，需求相位誤差在±1.5 μs 以內。

(3) 地面 O-FH 數據傳輸率（Data Throughput）

傳輸未解調的數位 IQ 時，需要的傳輸率將更多倍於原始基頻訊號的頻寬，例如 100 MHz 訊號頻寬通常需要前置鏈路採用 10 Gbps～25 Gbps 的乙太網路。

11.2.2 採用再生型衛星時，NTN PL 內部 O-RU 與 O-DU 的 O-FH

採用再生型衛星時，NTN PL 內部 O-RU 與 O-DU 的 O-FH 示意如圖 59。

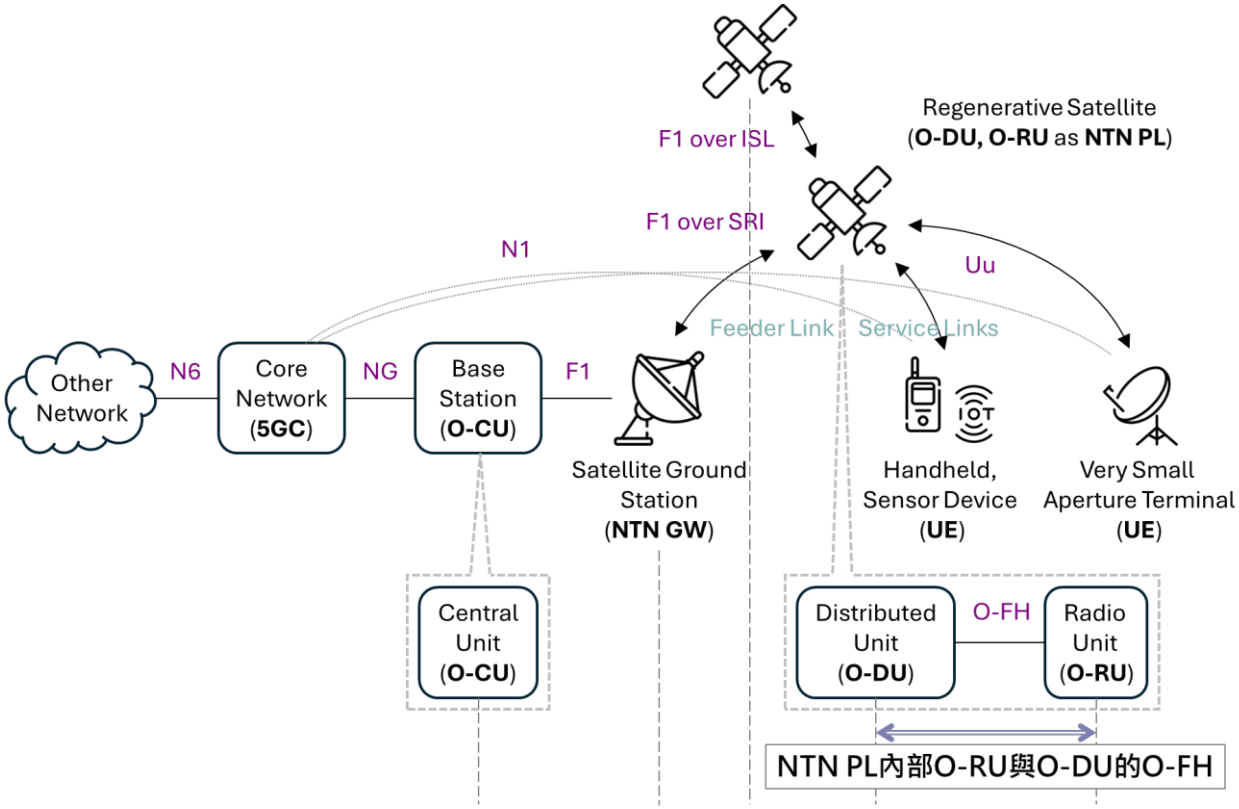


圖 59、3GPP NTN 再生型系統 O-RAN 的 NTN PL 內部 O-RU 與 O-DU 的 O-FH

(a) 設備或單元

開放型式分散式單元（O-RAN Distributed Unit, O-DU）、開放型無線電單元（O-RAN Radio Unit, O-RU）。這些單元位在 NTN 酬載（NTN Payload, NTN PL）內部。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 與 O-RAN 下的再生型衛星架構中，當 5G 基地台功能（Split 7.2x 架構）放在衛星酬載內部時，亦即 O-RU 與 O-DU 均位於同一顆衛星的結構當中。傳統地面前置連結 O-FH 主要解決的是「長距離光纖傳輸、標準化介面與多廠商互通」問題；然而，在再生型衛星內的環境下，O-FH 的主要內涵轉變成「在高密度、抗輻射、動態波束控制的衛星內匯流排運用與時間同步機制」需求，包括高密度 IQ 資料串流與星內匯

流排優化、奈秒級星內時脈與相位對齊、以及環境狀況下的健康與故障隔離。

(1) 高密度 IQ 資料串流與星內匯流排優化

在衛星上的 O-DU 需要將處理後的數位 IQ 數據傳送給 O-RU 轉為射頻訊號發射。O-FH 依然採用 O-RAN 標準的 eCPRI 封裝格式，但底層實體傳輸由地面光纖介面（SFP+）替換為如本文件第 10.1.5、10.1.6 節提及的衛星用高速背板介面（如 SpaceVPX/ VITA 78、SpaceFibre 或背板光纖 VITA 66/67）。由於是在衛星箱體內部傳送，傳輸距離極短（通常在數十公分至數米內），因此 O-FH 獲得極低的固定的傳輸延遲（微秒等級），並利用星載匯流排的硬體流量控制（Flow Control）實現的零封包遺失。但為了減輕衛星內背板匯流排的功耗與發熱量，O-FH 的用戶面可採用 BFP（Block Floating Point）或 9-bit/12-bit 的適應性 I/Q 壓縮技術，在傳輸頻寬與訊號品質之間取得平衡。

(2) 奈秒級星內時脈與相位對齊

衛星上 O-DU 可作為 Master Clock（因為直接連結星上 GNSS 接收器或高精度原子鐘），O-RU 透過 O-FH 的同步面與 O-DU 使用高精度的 PTP 時間同步封包。大型衛星酬載可能由多個 O-RU 貼片天線板組裝而成。O-FH 同步面內涵包含衛星背板時序自動校正機制，將 O-DU 到各個 O-RU 天線單元間的時脈偏差（Time Alignment Error, TAE）控制在±130 ns 以內，確保波束合成時不會發生相位抵銷。

(3) 環境狀況下的健康與故障隔離

太空中充滿高能粒子與強輻射，硬體容易發生單事件翻轉（Single Event Upset, SEU），在特殊狀況下的管理機制依賴能有高度存活率的硬體設計非常關鍵，故傾向管理面不採用複雜的資訊結構與處理元件。傳統地面 O-RAN 使用基於 NETCONF/YANG 的龐大管理面資訊結構進行設備配置，但在衛星內為節省運算資源與記憶體，O-FH 的管理面將被大幅減化，採用輕量化的二進位協定進行 O-RU 的參數初始化與控制。O-FH 的管理面具備即時監測 O-RU 晶片健康度的功能，一旦 O-RU 因輻射導致暫停無法自行恢復，O-DU 須能透過管理面獨立重置（Reset）該 O-RU。

(c) 相關文獻來源

對於 3GPP NTN O-RAN 採用再生型衛星時，目前無論 3GPP 或 O-RAN 聯盟仍在討

論與更新文件，並未出現新的專門文件，故可以參考的文件同第 11.1 節(c)所列的標準文件，以及在第 7～8 章皆有提到 NTN 架構的 3GPP TR 38.821 技術報告。

(d) 技術指標

(1) 星載低延遲（On-board Low Latency）

當以星載背板匯流排或點對點卡板接線（如 PCIe、SpaceVPX、Optical）作為 O-FH 鏈路時，原則上內部延遲可達到微秒級甚至次微秒級（如< 10 μs）。

(2) 傳輸率功耗（Watt per Gbps）

由於衛星本體供電資源受限，O-FH 傳輸必須優化每 Gbps 的功耗（Watt/Gbps）。

(3) 抗輻射（Radiation Tolerant）的錯誤率

星載匯流排或接線特有的高傳輸率必須經過太空總離子劑量（TID）與單粒子事件效應（SEE）的相關測試，其位元錯誤率（BER）必須維持≤ 10^{-12}。

11.2.3 採用再生型衛星時，NTN PL O-DU 間的 F1 over ISL

採用再生型衛星時，NTN PL O-DU 間的 F1 over ISL 示意如圖 60。

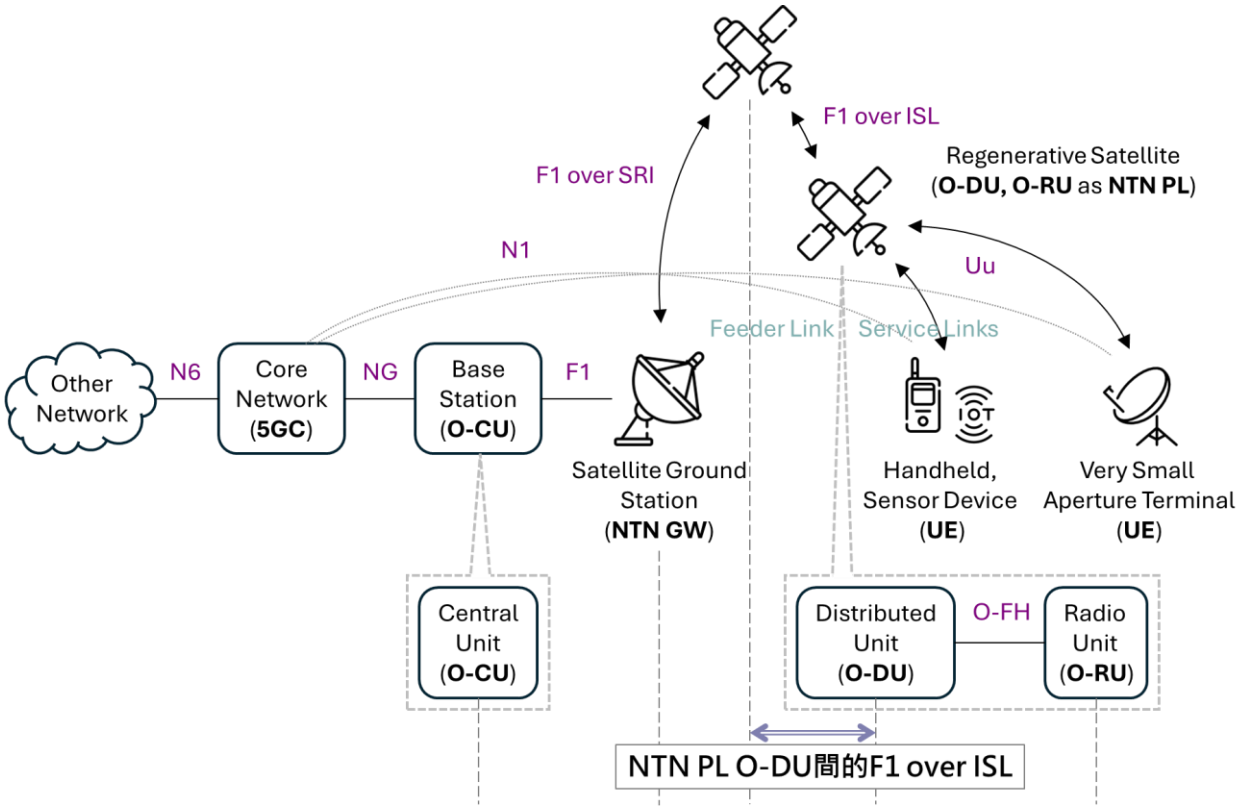


圖 60、3GPP NTN 再生型系統 O-RAN 的 NTN PL O-DU 間的 F1 over ISL

(a) 設備或單元

開放型式分散式單元（O-RAN Distributed Unit, O-DU）。其中 O-DU 位在不同衛星的 NTN 酬載（NTN Payload, NTN PL）內部。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 與 O-RAN 的再生型衛星可以在太空中構成網狀網絡（Mesh Network）架構，多顆低軌衛星之間可以透過基於雷射光學的衛星間鏈路（ISL）相互串連。此時，若某顆衛星有用戶手機的連線，但該衛星無直接可用的匯集鏈路與地面 NTN GW 連接，O-DU 就必須將 F1 介面的封包透過 ISL 通過一顆或多顆衛星，直到有匯集鏈路連接的目標衛星，再傳給地面的 O-CU，因此在衛星的 O-DU 間衍生出 F1 over ISL 介面。F1 over ISL 的主要內涵包括鏈路適應、多跳封包排序、動態路由與信令維持。

(1) 衛星間鏈路適應（ISL Adaptation）

地面的 F1 用戶面（F1-U）帶有龐大的 GTP-U/UDP/IP 標頭，於是在 F1 over ISL 介

面中，O-DU 的傳輸適應單元會先對 GTP-U 封包執行高壓縮率的強健性標頭壓縮（RoHC），將其封裝進輕量化的星際傳輸協議，如 CCSDS 或 Space Ethernet 訊框，以此雙重標頭壓縮（Double Header Compression）減少標頭佔用。由於衛星間鏈路同時承載多種數據（如衛星本身的控制信令、ISL 路由協議、F1 數據等），需要星載路由器讀取 5G QoS 標示（QFI），將 F1 控制面（F1-C）的控制信令（F1AP）列為最高優先級，防止因太空網際流量擁塞而導致上層的 RRC 斷線。

(2) 多跳抖動（Multi-hop Jitter）下的封包排序

由於 LEO 衛星群是相對高速運動，衛星間的距離與動態幾何角度隨時在變，導致 F1 封包在 ISL 上的往返時間（RTT）呈動態波動，為了防止 F1-U 數據在跨越數顆衛星後因路由變更或動態抖動導致封包亂序（Out-of-order），地面的 O-CU-UP 需要配置極大的 PDCP 重組緩衝記憶體（Buffer），配合 18-bit 長序號（SN），使得經由 F1 over ISL 傳回的封包能回復順序送到 5GC。

(3) 星座拓撲路由（Constellation Topology Routing）感知

在 LEO 衛星群中各 ISL 也有可能因為相對角變換、地球遮擋或雷射對準失去鎖定而無法持續連線，星載路由器不僅執行傳統路由也需要與 O-DU 聯動，當前往地面 O-CU 的首選 ISL 即將斷開時，路由器會觸發無感備用路徑切換（Proactive Path Switching），讓 O-DU 在 ISL 斷線前將 F1 數據訊務無縫重改選另一個 ISL。且為防止在這個過程中的單點封包遺失導致整個 F1 連線失效，需要 ISL 本身的資料鏈路層應逐跳（Hop-by-hop）都有 ARQ 重傳機制，在 ISL 就直接修正封包遺失。

(4) 衛星間換手（Inter-Satellite Handover）的信令維持

用戶手機在 LEO 衛星飛越過程中，必須在衛星之間換手，也會因此變更不同的 ISL，各 O-DU 必須維護 F1 控制面（F1-C）信令 F1AP，以維持與地面 O-CU 的控制路徑與穩定。由於 F1AP 使用 SCTP，因應多跳動態路由過程中產生的毫秒級中斷，SCTP 需放寬 Heartbeat 頻率和重傳計時器（T300/T301），讓地面 O-CU-CP 和衛星上的 O-DU 之間不至於誤判斷線；且 F1AP 的內涵要支援星座拓樸變更通知，讓地面 O-CU-CP 動態更新 O-DU 的 F1 終端節點（Endpoint）IP 位址，以維持控制的路徑。

(c) 相關文獻來源

對於 3GPP NTN O-RAN 採用再生型衛星時，目前無論 3GPP 或 O-RAN 聯盟仍在討論與更新文件，並未出現新的專門文件，故可以參考的文件同第 11.1 節(c)所列的標準文件，以及在第 7～8 章皆有提到 NTN 架構的 3GPP TR 38.821 技術報告。

(d) 技術指標

(1) 動態延遲與都普勒補償（Dynamic Delay & Doppler Compensation）

衛星間距離隨軌道運動變動，ISL 的傳輸延遲會在 5～50 ms 之間動態漂移，多普勒頻移也很顯著，F1 協定堆疊需具備動態往返間（RTT）緩衝能力。

(2) ISL 的位元錯誤率（Bit Error Rate）

採用 ISL 的位元錯誤率（BER）通常要達 10^{-9} 或更低，若 ISL 是無線電技術而不是雷射光學技術，則會因此需要更大耗費的 FEC 而降低傳輸率，故應採用光學的 ISL。

(3) F1 用戶面的傳輸率耗費（Overhead in Throughput）

由於星群中多跳傳輸使得 ISL 頻寬資源相對寶貴，F1-U 採取 GTP-U 標頭壓縮才能減少相關浪費，提高有效傳輸率。

11.2.4 採用再生型衛星時，NTN GW 與 NTN PL O-DU 的 F1 over SRI

採用再生型衛星時，NTN GW 與 NTN PL O-DU 的 F1 over SRI 示意如圖 61。

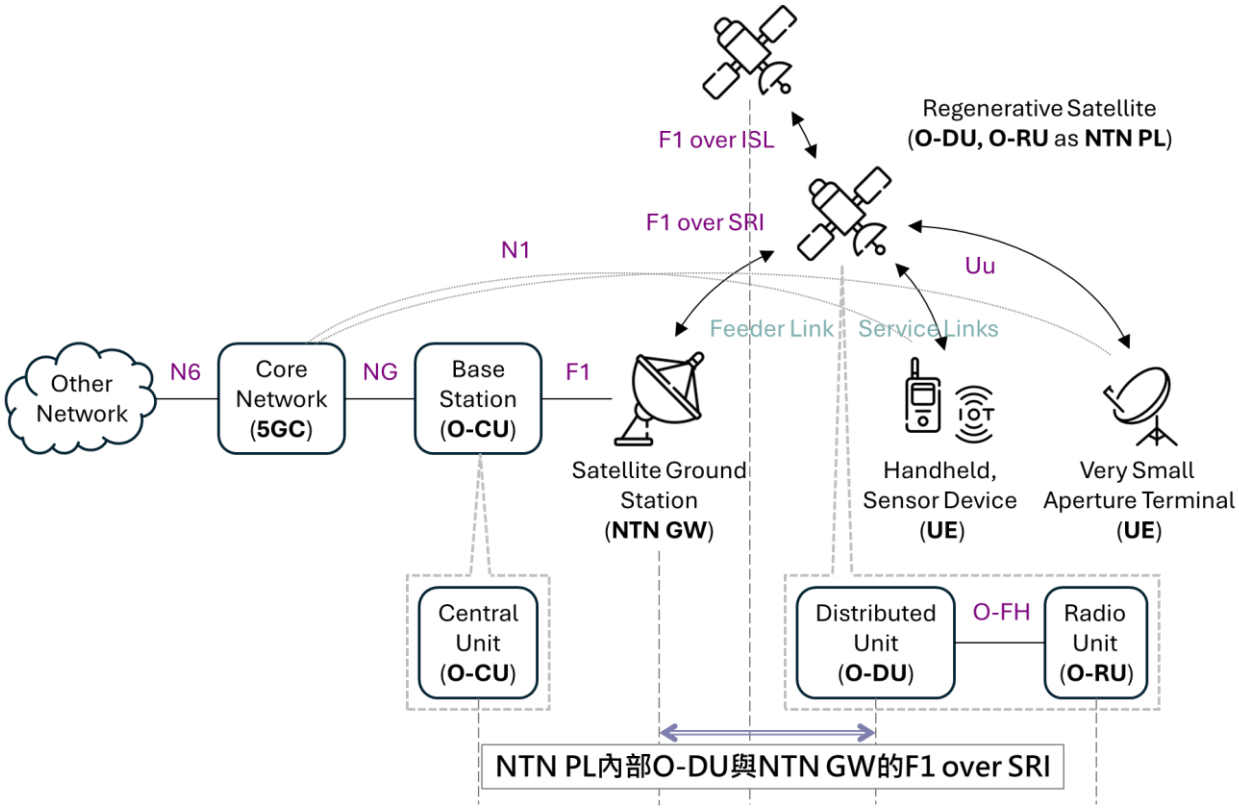


圖 61、3GPP NTN 再生型系統 O-RAN 的 NTN PL O-DU 與 NTN GW 的 F1 over SRI

(a) 設備或單元

開放型式分散式單元（O-RAN Distributed Unit, O-DU）、NTN 閘道（NTN Gateway, NTN GW）。其中 O-DU 位在 NTN 酬載（NTN Payload, NTN PL）內部。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 與 O-RAN 結合的再生型衛星架構中，最主流的部署型態為 Split 2 架構（O-DU 在衛星上，O-CU 在地面）。在這種模式下，O-DU 與 O-CU 之間的通訊鏈路會經過橫跨太空與地面的匯集鏈路（Feeder Link），由於這段鏈路採用衛星專用的無線電傳輸技術（Satellite Radio Interface, SRI），因此 3GPP 與 O-RAN 將此處的資料傳輸協定稱為 F1 over SRI（即利用 SRI 作為底層承載標準 F1 介面）。

(1) 傳輸層協定封裝與轉化（Protocol Encapsulation & Translation）

在地面上，O-CU 發出的封包是標準的 F1-C（F1AP/SCTP/IP）與 F1-U（FTP-U/UDP/IP）。然而，昂貴且受限的太空無線電與光的通訊頻寬無法直接承受傳統地面的

標頭耗用。NTN GW 接收地面 O-CU 的 IP 封包後，透過 SRI 數據機（如通用串流封裝 GSE/DVB-S2X），將 F1 訊包拆解並重組為高效率的衛星物理層訊框（DVB Frames）；衛星酬載上的 SRI 數據機將接收到的射頻訊號解編碼後，還原出標準的 F1AP 控制信令與 GTP-U 數據封包，最後經由衛星內部匯流排（如 SpaceVPX 背板）傳送至 O-DU 中。

(2) 太空鏈路標頭壓縮（Header Compression）

為了避免標頭佔用過多匯集鏈路頻寬，F1 over SRI 導入高壓縮率的適應機制包括 F1-U 標頭縮小與 F1-C 信令優化。F1-U 封包在經過 NTN GW 傳送至太空前，會執行 強健性標頭壓縮（Robust Header Compression, RoHC）或 UDP/IP 標頭拆掉，將龐大的 GTP-U/UDP/IP 標頭壓縮至原本大小的數分之一，大幅提升匯集鏈路的效能；而信令採用輕量化的資訊元素（IE）對齊，減少在太空中傳輸非必要的重複欄位。

(c) 相關文獻來源

對於 3GPP NTN O-RAN 採用再生型衛星時，目前無論 3GPP 或 O-RAN 聯盟仍在討論與更新文件，並未出現新的專門文件，故可以參考的文件同第 11.1 節(c)所列的標準文件，以及在第 7～8 章皆有提到 NTN 架構的 3GPP TR 38.821 技術報告。

(d) 技術指標

(1) 匯集鏈路延遲適應（Feeder Link Latency Adaptation）

F1-C 依賴 SCTP 傳輸協定的重傳計時器（RTO）T3-rtx 與視窗大小，必須適應匯集鏈路的超大往返時間（RTT），LEO 為 10～50 ms、GEO 則高達 240～270 ms。

(2) 鏈路可用度（Link Availability）

匯集鏈路本身具備的適應性編碼與調變（ACM）切換能力，需使得 F1-U 的 GTP-U 協定的封包遺失率（Packet Loss Rate）維持在$< 10^{-5}$。

(3) 匯集鏈路換手（Feeder Link Handover）中斷時間

匯集鏈路發生衛星換手時，需使得 F1-C 的 SCTP 傳輸協定在路徑改變的中斷時間< 30 ms，讓 SCTP 的 Heart-Beat 與 Keep-Alive 機制不發生誤判。

11.2.5 採用再生型衛星時，NTN GW 與地面 O-CU 的 F1

採用再生型衛星時，NTN GW 與地面 O-CU 的 F1 示意如圖 62。

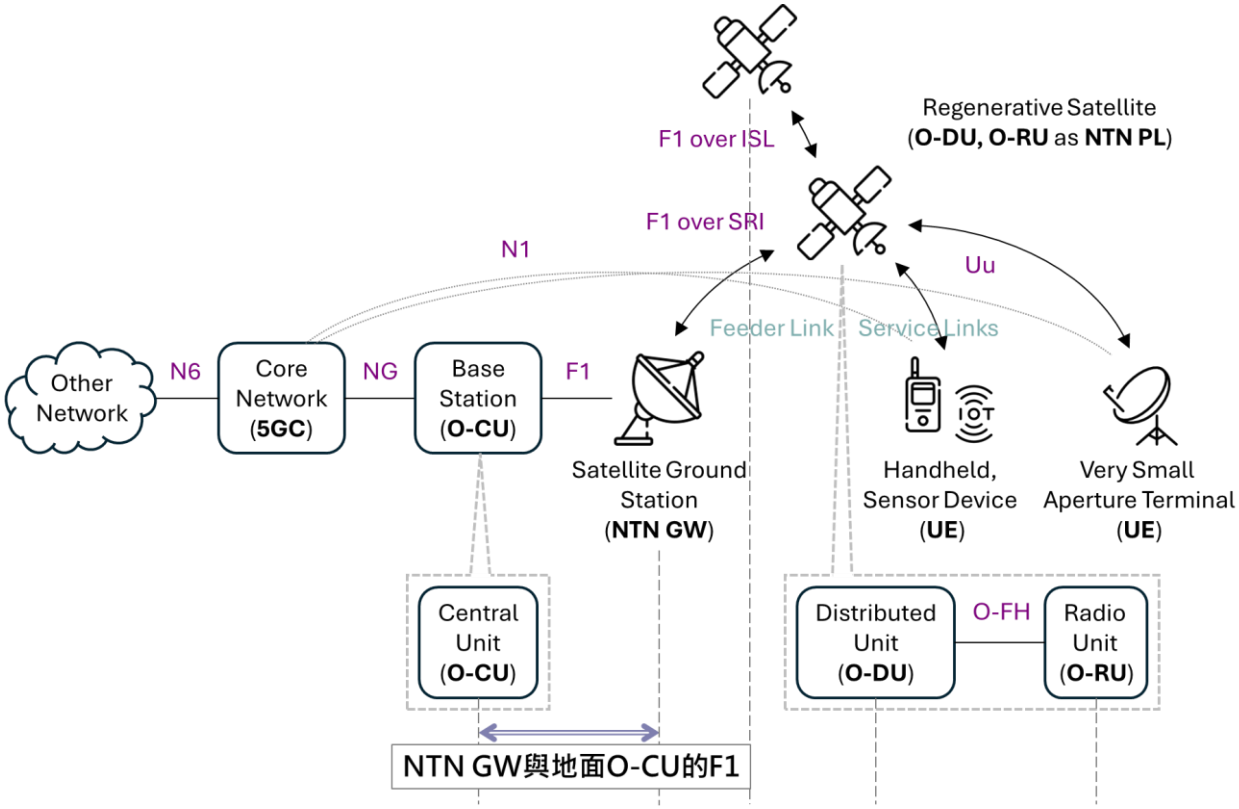


圖 62、3GPP NTN 再生型系統 O-RAN 的 NTN GW 與地面 O-CU 的 F1

(a) 設備或單元

NTN 閘道（NTN Gateway, NTN GW）、開放型中央單元（O-RAN Central Unit, O-CU）。其中 O-CU 位於地面。

(b) 主要內涵

在 3GPP NTN 與 O-RAN 結合的再生型衛星架構中，最主流的部署型態為 Split 2 架構（O-DU 在衛星上，O-CU 在地面）。在這種模式下，F1 介面必須跨越地面 NTN GW 與匯集鏈路（Feeder Link），連通地面的 O-CU 與太空中的衛星 O-DU。由於 F1 介面從傳統地面的高頻寬、低延遲光纖轉變為太空無線與無線光通訊鏈路，其介面通訊內涵與傳輸機制需要演進。

(1) Cell 管理（Cell Management）與換手、延遲適應

F1-C 在地面 O-CU-CP 與衛星上 O-DU 之間傳輸，基於 F1AP 與 SCTP/IP 協定，其演進包括衛星上的 Cell 建立與配置（DU & Cell Management）、地空換手與連線控制（Handover & Mobility Control）、以及 F1-C 計時器與傳輸層（SCTP）適應。

對於衛星上的 Cell 建立與配置，需要對衛星上資源初始化、與動態波束與軌道星曆發送。地面 O-CU-CP 透過 F1-C 的 F1 Setup 與 gNB-DU Configuration Update 程序，遠端配置衛星上 O-DU 的 Cell 參數（如點波束覆蓋頻段、SSB 發射週期、PRACH 隨機存取資源）；F1AP 訊息內涵擴充 NTN 專屬資訊元素（Information Element, IE），地面 O-CU 會透過 F1-C 將動態計算的衛星星曆（Ephemeris Data）與地面服務波束對應表傳到衛星上 O-DU，使其能向地面手機廣播完整的系統資訊。

對於地空換手與連線控制，匯集鏈路換手（Feeder Link Handover）是當 LEO 再生型衛星飛離當前地面站涵蓋區，需要將匯集鏈路切換至下一個地面 NTN GW 時，地面 O-CU-CP 必須透過 F1-C 執行跨地面站的 F1 介面重設與連線遷移，確保 UE 的 RRC 連線狀態不因地空鏈路變更而中斷。

對於 F1-C 計時器與傳輸層（SCTP）適應，傳統地面的 F1AP 控制程序假設往返時間（RTT）小於 1 ms，跨越太空鏈路後，RTT 拉長至 10 ms～270 ms（視 LEO 或 GEO 而定）。因此 F1-C 內涵調整了 SCTP Heartbeat 頻率與重傳計時器（T300 系列），避免 F1 介面被地面 O-CU 誤判為斷線。

(2) 標頭壓縮（Header Compression）與封包重組

F1-U 負責在地面 O-CU-UP 與衛星上 O-DU 之間傳送用戶的實際封包，基於 GTP-U/UDP/IP 協定，其演進包括擴充型封包資料聚合協定（Packet Data Convergence Protocol, PDCP）快取與亂序重組（Reordering）、以及太空鏈路標頭壓縮與封裝（Header Compression & Encapsulation）。

對於 PDCP 快取與亂序重組，需要應對太空鏈路抖動的協定機制。當 GTP-U 封包經由地面 NTN GW 發射上衛星時，可能因太空環境、匯集鏈路換手或多軌道衛星間鏈路（ISL）路由變更，導致 GTP-U 封包發生嚴重延遲或順序顛倒。地面 O-CU-UP 的 PDCP 層內涵大幅擴充封包重組緩衝區（Reordering Buffer），並引入長達 18-bit 的序號（SN），

確保跨太空傳送的封包能被無損且依序轉發至 5G 核網。

對於太空鏈路標頭壓縮與封裝，由於匯集鏈路的頻寬極其昂貴，地面 NTN GW 或 O-CU-UP 在將 GTP-U 封包向太空傳送前，會執行強健性標頭壓縮（Robust Header Compression, RoHC）或 UDP/IP 標頭抽離，將 GTP-U 封包瘦身後，再交由 NTN GW 的 SRI Modem（如 DVB-S2X/RCS2 封裝）發射，以提升匯集鏈路的實際效能。

(3) 地面 NTN GW 的「F1 傳輸橋接 (Transport Bridge)」

在再生模式下，地面 NTN GW 不作為 5G 協定的端點，此時是作為 F1 介面下的物理層與數據鏈路層轉接橋梁，其內涵包括數據流轉化（Protocol Conversion）和動態 QoS 映射（QoS Mapping）。NTN GW 地面標準乙太網路上的 F1 封包（SCTP、GTP-U），轉換為適應太空中繼傳輸的衛星無線電介面（Satellite Radio Interface, SRI）訊框結構，並且 NTN GW 會讀取 F1-U 封包中的 5G QoS 標示（QFI），在地面站內部將高優先級的控制信令（F1-C）與語音數據（F1-U）放入高優先級發射佇列，確保太空鏈路擁塞時，F1-C 控制鏈路不致中斷。

(c) 相關文獻來源

對於 3GPP NTN O-RAN 採用再生型衛星時，目前無論 3GPP 或 O-RAN 聯盟仍在討論與更新文件，並未出現新的專門文件，故可以參考的文件同第 11.1 節(c)所列的標準文件，以及在第 7～8 章皆有提到 NTN 架構的 3GPP TR 38.821 技術報告。

(d) 技術指標

(1) 匯集鏈路延遲適應（Feeder Link Latency Adaptation）

與前一節同樣是指 F1-C 依賴 SCTP 傳輸協定對於匯集鏈路的適應能力。

(2) NTN GW 後置延遲與抖動（Latency & Jitter）

NTN GW 後置（Backhaul）是指與 O-CU 的連結，這時是乘載 F1 介面的地面部分，該連結的規劃應使得延遲在 5～30 ms、抖動< 5 ms。

11.3 O-RAN 多設備內部單元介面的開發建議

以下說明上述介面的共通技術指標與實務開發建議。

11.3.1 O-RAN 多設備內部單元介面共通技術指標

(1) 同步與時間精確度（Synchronization & Timing Accuracy）

所有 O-RAN 單元（無論 O-RU、O-DU、O-CU 部署於何處）均須滿足 3GPP 與 O-RAN 所要求的 UTC 時間基準。在 NTN 環境下，共通時間偏差容忍極限為±1.5 μs（尤其是 TDD 系統）與≤ 130 ns（針對天線單元相位對齊）。

(2) 端對端用戶面延遲（E2E User-Plane Latency）

所有分拆介面（O-FH 與 F1）加總後的用戶面處理延遲，不能導致整個 NTN 的訊務延遲超過 3GPP 訂定的延遲上限：LEO 為< 50 ms、GEO 則為< 300 ms。

(3) 控制與用戶面可用度（Availability）

F1-C 控制面依賴的 SCTP 在受到衛星換手、SRI 的延遲與氣候相關衰減的影響時，不可發生連線中斷，而控制面與用戶面內容的可用度至少為 99.99%。

(4) 安全性加密耗費（Encryption Overhead）

O-RAN 規範 O-FH 與 F1 介面均須具備控制面與用戶面的加密，如採用乙太網路的 MACsec 或 IPsec。建議加解密對介面頻寬的耗費< 5%與處理延遲< 10 μs。

11.3.2 O-RAN 多設備內部單元實務建議

包括在地面與星載的 O-FH、經過地空 SRI 的 F1，考慮 NTN 使用到較複雜 O-RAN 架構時，建議在系統研發、軟硬體設計與協定堆疊調校時採取以下策略：

(1) 傳輸適應（Transport Adaptation）

對於再生型系統的星載 O-FH，O-RU 與 O-DU 在設計時可考慮刪減不必要的 eCPRI 訊息的冗餘標頭，或是將數位 I/Q 以高壓縮比的 BFP（Block Floating Point）壓縮，可以

降低背板傳輸與信號處理的功耗。對於 F1 over SRI 介面，O-DU 與 O-CU 系統軟體中 SCTP 的預設參數容易因為經過匯集鏈路的往返時間（RTT）導致逾時（Timeout），必須將 sctp_rto_min 參數調大到 300 ms～1000 ms，將緩衝區 sctp_wmem、sctp_rmem 參數加大，並開啟 SCTP Dynamic Address Reconfiguration（亦即 Multi-homing）以支援 NTN GW 的匯集鏈路在衛星換手時能維持連線。

(2) 星載太空等級硬體（Space Grade Hardware）

建議在再生型系統的 NTN PL 內部的 O-RU 與 O-DU 不再使用現有乙太網路光纖連接，改採 SpaceVPX（ANSI/VITA 78）架構，其可搭配 PCIe 4/5 或 SpaceFibre 做為 O-FH 的實體層，相較於常見光電轉換（如 SFP+）插座的架構可降低功耗並有更高的可靠度。而在 O-RU 與 O-DU 中負責 O-FH、F1 加解密以及 O-FH 數位化 I/Q 的相關處理器 IC，必須具備硬體層級 3 倍模組冗餘（Triple Modular Redundancy, TMR）與加密用金鑰復原機制，避免單粒子事件翻轉（Single Event Upset, SEU）後的功能失效。

(3) 多源互補同步（Multi-Source Synchronization）

地面的單元依靠 GNSS 接收機或 IEEE 1588v2 PTP 同步，星載的單元則可利用衛星有搭配 GNSS 接收機的原子鐘（Rubidium or Cesium Clock）配置。在太空中沒有機會或難以持續以 PTP 順利同步時，依賴原子鐘長時間 Holdover，能在 24 小時內的相位誤差 < 1.5 μs。O-RAN 單元應及早設計成可接受多重來源同步，便於彈性部署。

(4) 軟體化實現（Softwarization）

在 O-DU 與 O-CU 的開發規畫上，應盡可能遵循 O-RAN 聯盟的建議採取 100%軟體化，以便因應未來從通透型系統演進到再生型系統的任務需求。經由容器化（Containerized）的設計，彈性地將部署在地面的 O-DU 再編譯移植至星載計算平台上，畢竟衛星酬載硬體與地面用硬體平台不會相同，但在未來會繼續提高算力。

12. 測試標準

本章延續第 4.9 節，包括對 DVB 與 3GPP 等提出之衛星通訊系統中「通訊設備與單元測試」與相關組織用於「衛星酬載額外測試」所調查的標準內容。

12.1 通訊設備與單元測試

地面接取設備與衛星酬載都需要進行通訊系統中的符合性測試，本節調查的範圍包括：衛星通訊系統間無線電共存的監理標準與 GSOA SOMAP、DVB 規格書中的符合性測試、3GPP RAN5 符合性測試、以及 O-RAN 測試規格。

12.1.1 監理標準與 GSOA SOMAP

(a) 主要內涵

衛星通訊設備製造商在研發終端設備時，必須理解國際規範與業界測試標準對於防干擾背後邏輯的脈絡。從根本來看，ITU、FCC、及歐洲電信標準協會（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）等監理機構，其規範核心皆在維護軌道資源與頻譜安全，防止終端設備產生離軸干擾或對其他系統運作造成影響。例如 ITU 透過功率通量密度（Power Flux Density, PFD）與等效功率通量密度（Equivalent Power Flux Density, EPFD）來限定低軌衛星對地球靜止軌道的聚合干擾；FCC 47 CFR Part 25 則針對離軸等效全向輻射功率（Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP）密度掩模與移動中地球站（Earth Station in Motion , ESIM）的靜音機制把關。這些規範落實到硬體設計上，要求天線控制單元（Antenna Control Unit, ACU）必須維持小於 0.2 度的指向精度，且在發生偏角超過 0.5 度或失去鎖定時，能在 100 ms 內自動切斷發射，同時旁波瓣增益須符合 ITU-R S.580-6 以抑制旁波束溢散。

正因為監理法規對於干擾預防提出了這些技術規定，全球主要衛星營運商（如 SES、Intelsat 等）組成的全球衛星營運商聯盟（Global Satellite Operator's Association, GSOA）為了在商業網絡運作中切實落實上述法規要求，並確保其軌道資產與頻譜收益不受不良終端破壞，進而將規範的精神具體化，制定出衛星營運商最低天線性能要求（Satellite

Operator Minimum Antenna Performance Requirements, SOMAP）這套實務測試體系。換言之，SOMAP 規格並非額外疊加的門檻，而是營運商為了驗證設備是否「真正符合法規精神」所延伸出的一套強制性測試數據量測機制。

在 SOMAP 體系中，營運商將法規抽象的干擾門檻，轉化為非常具體的量測要求：廠商必須提供廣角（±180 度、1 度步進）與窄角（±10 度、0.1 度步進）的高解析度場型圖，以此精確計算對地球靜止軌道弧段的實質干擾風險；針對非拋物面或相控陣列天線，SOMAP 要求提交-90 度至 90 度的偏斜角驗測，以確保載具旋轉時旁波瓣不會突破 FCC 或 ITU 的離軸掩模；同時，SOMAP 要求量測實際天線罩對增益與 G/T 值的影響，並規定波束中心須達 25 dB 以上的交叉極化隔離度，以確保鄰近轉發器頻道不被覆蓋。廠商若能將 SOMAP 具體測試對應法規的邏輯在其研發初期即一併考慮，更有機會實現兼具能進入業界且同時符合法規的產品化方式

(b) 相關文獻來源

(1) ITU RR Article 22

ITU, Radio Regulations (RR) Article 22, "Space services", Section II, Edition of 2024。該文件制定保護 GSO 系統免受 NGSO 干擾之硬性限制；其中 Table 22-1A 至 22-1E 詳列了隨時間百分比變化之數值門檻。

(2) ITU RR Article 21

ITU, Radio Regulations (RR) Article 21, "Terrestrial and space services sharing frequency bands above 1 GHz", Section V, Edition of 2024。該文件規範限制地面站對地表產生的功率通量密度（PFD）限值，以保障地面微波與固定服務不受空間電台干擾。

(3) ITU-R S.1503-4

ITU-R, Recommendation S.1503-4, "Functional description to be used in developing software tools for determining conformity of non-geostationary-satellite orbit fixed-satellite service systems or networks with limits contained in Article 22 of the Radio Regulations", 2023-09。該文件說明評估 NGSO 系統是否符合第 22 條（Article 22）EPFD 門檻的演算法與軟體工具架構，為製造商於設計初期模擬聚合干擾之權威依據。

(4) ITU-R S.580-6

ITU-R, Recommendation S.580-6, "Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites", 2004-01。該文件規範地球站天線的旁波瓣輻射場型，用以抑制離軸能量溢散並促進軌道間隔之有效利用。

(5) FCC 47 CFR Part 25

FCC, 47 CFR Part 25 "Satellite Communications", 2026。其中§25.218 Off-axis EIRP density envelopes for FSS earth stations 規範 FSS 固定衛星服務地球站在 C、Ku、Ka 頻段下的離軸等效全向輻射功率（EIRP）密度掩模（Density Mask）；§25.228 Operating requirements for ESIMs 針對 ESIM 提出嚴格運作規範，包含天線指向精度以及偏角過大或失鎖時之 100 毫秒內自動停止發射（Cessation of Emission）機制。

(6) ETSI EN 301 459

ETSI, EN 301 459, "SES; Harmonised Standard for Satellite Interactive Terminals (SIT) and Satellite User Terminals (SUT) transmitting towards satellites in geostationary orbit, operating in the 29,5 GHz to 30,0 GHz frequency bands covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU", Version 2.1.1, 2016-05。該文件針對 29.5～30.0 GHz 頻段地球靜止軌道衛星用戶終端（SUT/SIT）之歐盟 RED 指令（2014/53/EU）協調標準，明確規範離軸輻射、雜散輻射與載波抑制之測試方法。

(7) ETSI EN 303 979

ETSI, EN 303 979, "SES; Harmonised Standard for Earth Stations on Mobile Platforms (ESOMP) transmitting towards satellites in non-geostationary orbit, operating in the 27,5 GHz to 29,1 GHz and 29,5 GHz to 30,0 GHz frequency bands covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU", Version 2.1.1, 2016-05。該文件針對 27.5-30.0 GHz 頻段非地球同步軌道的移動平台地球站（Earth Stations on Mobile Platforms, ESOMP）之協調標準，規範移動狀態下之自動靜音（Muting）與自動關斷保護機制。

(8) GSOA SOMAP

GSOA, "Satellite Operator Minimum Antenna Performance Requirements (SOMAP)"。該

文件是由 SES、Intelsat 等營運商聯合制定之業界進入門檻。

12.1.2 DVB 規格書中的符合性測試

(a) 主要內涵

在 DVB 規格（如 DVB-S2/RCS2）中，符合性測試（Conformance Test）用以驗證發射端與接收端是否符合相關標準（如 ETSI EN 302 307 系列）之必要程序，確保設備之互通性（Interoperability）與訊號品質符合規範要求。其測試範圍通常涵蓋基頻處理、調變編碼（MODCOD）、訊號結構（Frame Structure）、頻譜特性與接收性能等項目。

於發射端（Tx）符合性測試方面，重點包括：基頻封包（BBFRAME）格式與封裝正確性、調變方式（如 QPSK、8PSK、16APSK、32APSK）與對應編碼率設定之符合性、符元率與頻率穩定度、輸出頻譜遮罩（Spectral Mask）與誤差向量幅度（EVM）與調變品質等，以確保訊號在標準允許範圍內。於接收端（Rx）符合性測試方面，則著重於在不同信號條件下之解調與解碼能力，包括最小載波對雜訊比（C/N）門檻、封包錯誤率（PER）或位元錯誤率（BER）性能、捕捉與追蹤能力（Acquisition & Tracking），以及對不同 MODCOD 配置之相容性。

此外，符合性測試亦常包含通道模型測試（如 AWGN 條件）與邊界條件驗證，以確認系統於不同環境下之穩定性。相關量測通常需搭配向量訊號分析儀（VSA）、頻譜分析儀及 DVB 專用測試設備進行。整體而言，DVB 符合性測試之目的在於確保通訊系統各模組之實作符合標準規範，並具備跨設備之互通能力，為系統整合與實際部署之重要驗證依據。

(b) 相關文獻來源

(1) DVB V&V

DVB Project, "Verification & Validation (V&V)"。該文件說明 V&V 主要目的是驗證規格完整性、協定一致性、實作可行性、以及多廠商互通性，以避免規格上的模稜兩可、實作差異、甚至廠商壟斷等問題。

(2) ETSI EN 302 307-1

ETSI, EN 302 307-1, “Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB-Satellite Transmission System (DVB-S2)”, Version 1.4.2, 2014-11。該規格文件同時提供的符合性測試重點包括 Bit Error Rate（BER）、Frame Error Rate（FER）、Modulation and Coding（MODCOD）、Adaptive Coding and Modulation（ACM）、Variable Coding and Modulation（VCM）。

(3) ETSI EN 301 545-2

ETSI, EN 301 545-2, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard", Version 1.5.1, 2026-04。該規格文件同時提供的符合性測試重點，包括實體層的 Burst Timing、Synchronization、媒介接取控制（MAC）層的 Terminal Login、Slot Allocation、Resource Control，回傳鏈路（Return Link）程序的 Acquisition、Synchronization、Capacity Request，適用於驗證衛星終端（RCST）與閘道（GW）。

12.1.3 3GPP RAN5 符合性測試

(a) 主要內涵

3GPP 之 RAN5 主要負責無線接取網路設備之符合性測試（Conformance Test）規範制定，其標準適用於使用者設備（User Equipment, UE）及基站（eNB 與 gNB）之射頻（RF）、協定（Protocol）與性能（Performance）驗證，以確保不同廠商設備間之互通性與符合系統規範要求。相關測試依據 3GPP 技術規範（如 TS 38.xxx 與 TS 36.xxx 系列）進行，並與 ETSI 所發布之測試規範（如 TS 38.521、TS 38.523 等）相互對應。

在射頻（RF）符合性測試方面，主要驗證發射與接收之無線性能，包括發射功率、頻譜遮罩（Spectrum Emission Mask）、鄰道洩漏功率比（ACLR）、誤差向量幅度（EVM）、接收靈敏度與阻塞（Blocking）等指標，以確保設備於不同頻段與通道條件下之射頻特性符合規範。

在通訊協定（Protocol）符合性測試方面，則針對 RRC、MAC、PDCP 等通訊協定進

行訊息流程與狀態轉換之驗證，確認設備能正確執行連線建立、維持與釋放等程序。此外，性能（Performance）測試則評估系統於特定場景下之吞吐量、延遲與連線穩定性等表現。

(b) 相關文獻來源

(1) 3GPP TS 38.521

3GPP, TS 38.521-1, "5G; NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone", Version 19.5.1, 2026-07。該文件是 FR1 RF 符合性測試標準，用來驗證 UE 的 RF 發射和接收是否符合 5G NR 規範。

(2) 3GPP TS 38.521-2

3GPP, TS 38.521-2, "5G; NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone", Version 19.3.0, 2026-06。該文件是 FR2 RF 符合性測試標準，用來驗證 25 GHz 以上毫米波 UE 的 RF 發射和接收。

(3) 3GPP TS 38.521-3

3GPP, TS 38.521-3, "5G; NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 3: Range 1 and Range 2 Interworking operation with other radios", Version 19.5.0, 2026-06。該文件是 UE RRM 符合性測試標準。

(4) 3GPP TS 38.523-1

3GPP, TS 38.523-1, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 1: Protocol", Version 19.3.0, 2026-03。該文件是 UE RRC 和 NAS 協定符合性測試標準。

(5) 3GPP TS 38.523-2

3GPP, TS 38.523-2, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 2: Applicability of protocol test cases", Version 19.5.0, 2026-06。該文件是 UE Applicability 測試，透過實作符合性聲明（ICS）決定測試範圍以避免所有 UE 執行所有

測試。

(6) 3GPP TS 38.523-3

3GPP, TS 38.523-3, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 3: Protocol Test Suites", Version 18.7.0, 2026-06。該文件提供 Protocol Test Suites 作為認證測試基礎。

(7) 3GPP TS 38.508-1

3GPP, TS 38.508-1, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 1: Common test environment", Version 19.3.0, 2026-04。該文件定義共同測試環境，規範測試平台與測試配置的一致性。

(8) 3GPP TS 38.508-2

3GPP, TS 38.508-2, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 2: Common Implementation Conformance Statement (ICS) proforma", Version 19.4.0, 2026-07。該文件定義 UE 的實作符合性聲明（ICS）。

(9) 3GPP TS 38.509

3GPP, TS 38.509, "LTE; 5G; 5GS; Special conformance testing functions for User Equipment (UE)", Version 18.1.0, 2026-01。該文件提出特殊測試功能，定義特殊控制介面與測試輔助機制顯示，供測試儀器與 UE 執行進階驗證。

12.1.4 O-RAN 測試規格

在 O-RAN 架構中，其測試規格主要由 O-RAN 聯盟制定，用以確保多供應商設備在開放介面下之互通性（Interoperability）與系統整合能力。O-RAN 測試規範涵蓋開放前傳介面（Open Fronthaul）、近即時控制介面（E2 Interface）、管理與編排介面（O1 Interface）等，並定義相應之符合性測試（Conformance Test）與互通性測試（Interoperability Test, IOT）要求，以驗證各功能模組（如 O-RU、O-DU、O-CU 及 RIC）之行為符合規範。

在前置連結（Open Fronthaul）測試方面，主要依據 O-RAN 所定義之功能分割

（Functional Split），驗證分散式單元（O-DU）與射頻單元（O-RU）之間之資料傳輸正確性、同步機制（如時間與頻率同步）及頻寬效率，並檢查封包結構（如基於 eCPRI）與資料對齊是否符合規範。

在控制與管理介面方面，E2 介面測試著重於近即時 RAN 智慧控制器（RIC）與網路功能之間之訊息交換與控制流程，而 O1 介面則驗證網路管理、監控、設定與資源編排之功能正確性與一致性。

O-RAN 測試規格亦涵蓋射頻性能與系統層級測試，包含發射與接收性能、延遲與吞吐量表現，以及多供應商設備整合下之系統穩定性驗證。測試通常於實驗室或整合驗證環境中進行，透過標準化測試設備與場景（如通道模擬、同步訊號來源等）建立一致之驗證條件。

12.2 衛星酬載額外測試

衛星酬載作為太空任務的核心功能次系統，其硬體可靠度直接決定服務的連續性與時限。為此，衛星酬載從地面整合、發射階段到軌道運作的生命週期中，需要有環境耐受性驗證與品質保證的規範可遵循，以確保其不僅能在地面實驗室達到設計性能，更能在太空極端輻射、劇烈溫差變化及發射時的高能動力學環境下維持功能正常。

本節基於「環境耐受性驗證」與「品質保證」的領域調查現有相關標準，做為衛星酬載測試與製造的參考。前者側重於物理結構與熱控設計的邊際測試，確保硬體能承受火箭發射的隨機振動與軌道上的熱真空循環；後者則著重於微觀的製程控制，透過嚴格的汙染管控、低釋氣材料篩選及 EEE 零件可靠度分級，防止不可見的製造缺陷在長期的任務中演變為災難性失效。調查內容包括：ECSS 太空硬體環境與品保、ANSI/AIAA 太空相關測試、NASA 技術標準（NASA-STD）中的環境標準、美國國防部軍用與 ITU-R 電磁干擾／電磁相容性（EMI/EMC）規範、GEA 國際印刷電路（IPC）製造品保。

12.2.1 ECSS 太空硬體環境與品保

(a) 主要內涵

在太空任務之硬體環境與品質保證方面，通常 ECSS 所制定之相關標準（如 ECSS-E、ECSS-Q 與 ECSS-S 系列），以規範衛星系統於發射與在軌運作期間所需承受之環境條件，以及硬體設計、製造與驗證過程中之品質要求。

ECSS-E 系列定義機械、熱與真空等條件，包括發射階段振動（Random Vibration）、衝擊（Shock）與加速度負荷，以及在軌之熱循環（Thermal Cycling）、熱真空（Thermal Vacuum）與輻射環境（Radiation）等，以確保設備仍能維持功能與性能之穩定。

在品質保證（Product Assurance, PA）方面，ECSS-Q 系列標準涵蓋設計保證、製程控制、材料與零組件選用、可靠度分析及驗證與確認（Verification & Validation）等要求。相關措施包括失效模式與效應分析（Failure Mode and Effect Analysis, FMEA）、可靠度與壽命評估、關鍵項目管制（Critical Items Control）、以及零件等級管理（如電氣與機械零件篩選與鑑定）。此外，對於材料與製程亦需符合低釋氣（Outgassing）等汙染管控要求，以避免有物質凝結於高頻天線饋源或敏感電子元件上，進而引發功率衰減或短路。

(b) 相關文獻來源

(1) ECSS-E-ST-10-03C

ECSS, ECSS-E-ST-10-03C, "Space Engineering - Testing", Revision 1, 2022-05。該文件是 ECSS 最重要的太空硬體測試標準，規範衛星與太空設備在發射前的地面驗證與環境試驗要求，涵蓋振動、聲學、衝擊、熱循環、熱真空、電磁相容性（EMC）、性能測試與功能測試，是 ECSS 環境驗證體系的核心標準。

(2) ECSS-Q-ST-20C

ECSS, ECSS-Q-ST-20C, "Space Product Assurance - Quality Assurance", Revision 2, 2018-02。該文件為 ECSS 品保體系的總綱文件，確保產品製造過程符合規範、可追溯、可稽核等 ECSS 的品質保證核心。

(3) ECSS-Q-ST-30C

ECSS, ECSS-Q-ST-30C, "Space Product Assurance - Dependability", Revision 1, 2017-02。該文件為可靠度與可用度標準，用於驗證設備是否能完成任務生命週期要求。

(4) ECSS-Q-ST-40C

ECSS, ECSS-Q-ST-40C, "Space Product Assurance - Safety", Revision 1, 2017-02。該文件用來管理人員安全、設備安全與任務安全。

(5) ECSS-Q-ST-60C

ECSS, ECSS-Q-ST-60C, "Space Product Assurance - Electrical, Electronic and Electromechanical (EEE) Parts", Revision 4, 2024-11。該文件用來確保各種積體電路、接頭、繼電器、電容器等太空電氣零件符合太空環境需求。

(6) ECSS-Q-ST-70C

ECSS, ECSS-Q-ST-70C, "Space Product Assurance - Materials, Mechanical Parts and Processes", Revision 2, 2019-10。該文件用來確保材料、機械零件與製程符合太空環境需求。

(7) ECSS-Q-ST-70-02C

ECSS, ECSS-Q-ST-70-02C, "Space Product Assurance - Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials", 2008-11。該文件描述熱真空下材料總質量損失（Total Mass Loss, TML）的量測標準。

12.2.2 ANSI/AIAA 太空相關測試

(a) 主要內涵

在太空系統之測試與驗證方面，美國國家標準協會（American National Standards Institute, ANSI）與美國航太學會（American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA）所制定之相關標準，提供衛星與太空載具於設計驗證與環境測試之方法與準則，常作為

與 ECSS 及美國國家航空暨太空總署（National Aeronautics and Space Administration, NASA）規範相互參考之依據。該類標準主要涵蓋系統層級測試流程、環境試驗條件定義及驗證方法之建立，以確保硬體與系統於發射與在軌運作環境下具備足夠之可靠度與性能。但相較於 ECSS 則較少關於品質保證的內容。

在測試內容方面，ANSI/AIAA 相關標準通常涵蓋機械環境測試（如振動、衝擊與加速度載荷）、熱環境測試（如熱循環與熱真空試驗）、以及功能與整合測試等項目，並對測試條件、試驗程序及判定準則提供建議與指引。此外，亦包含對測試資料分析、驗證流程（Verification Process）及測試文件化（Documentation）之要求，以確保測試結果具備可追溯性與一致性。

(b) 相關文獻來源

(1) ANSI/AIAA S-080

AIAA, ANSI/AIAA S-080A-2018, "Space Systems - Metallic Pressure Vessels, Pressurized Structures, and Pressure Components", 2018。該文件是 ANSI/AIAA 最重要的太空測試標準之一，適用於航太飛行器、衛星、火箭、推進系統中的金屬壓力容器與壓力管路的驗證，是商業衛星及運載火箭產業的重要參考依據。

(2) ANSI/AIAA S-081

AIAA, ANSI/AIAA S-081B-2018, "Space Systems - Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPV)", 2018。該文件是專門針對複合材料纏繞壓力容器的驗證。

(3) AIAA S-110

AIAA, AIAA S-110-2005, "Space Systems - Structures, Structural Components, and Structural Assemblies", 2005。該文件是太空結構工程標準，適用於衛星、酬載與發射火箭。

12.2.3 NASA-STD 環境標準

(a) 主要內涵

在太空系統之環境規範方面，NASA 所制定之 NASA-STD 系列標準，提供衛星與太空載具於發射與在軌運作期間所需承受之環境條件與設計準則，為國際間廣泛參考之環境設計依據。相關標準（如 NASA-STD-7001、NASA-STD-7002 及 GSFC-STD 系列）主要涵蓋機械、熱與自然環境之定義，並作為設計驗證與測試規劃之依據。

在機械環境，NASA-STD 規範發射過程中之振動（如正弦振動與隨機振動）、聲學負荷（Acoustic Loading）及衝擊（Shock）條件，並提供對應之試驗方法與測試等級建議，以確保結構設計具備足夠之強度與安全限度（Safety Margin）。

在熱與真空環境，則涵蓋在軌運行之熱循環（Thermal Cycling）、熱真空（Thermal Vacuum）條件及熱平衡分析要求，以驗證系統於極端溫度與無對流環境下之穩定性。此外，亦包含輻射環境（如總劑量效應與單粒子效應）之設計考量，以評估電子元件在太空輻射條件下之可靠度。

NASA-STD 常用於建立系統層級之環境設計（Environmental Design）的基準，並作為測試規劃與驗證流程之依據，與 ECSS 或其他國際標準相互搭配使用。

(b) 相關文獻來源

NASA-STD 是由多個環境標準文件共同組成，以下以 NASA-STD-7001 系列以及 NASA 的環境驗證（Environmental Verification）實務文件為例。

(1) NASA-STD-7001C

NASA, NASA-STD-7001C, "Payload Vibroacoustic Test Criteria", Revision C, 2026-07。該文件是用來建立酬載驗證用的發射聲學環境、隨機振動環境標準，建立最大預期飛行負荷、Qualification Margin 與 Acceptance Margin 等的驗證架構。

(2) GSFC-STD-7000B

NASA, GSFC-STD-7000B, "General Environmental Verification Standard (GEVS) for

GSFC Flight Programs and Projects", Revision B, 2021-04。該文件對於飛行計畫與專案提供太空硬體在預期任務環境下，進行測試、分析或模型驗證的基準。

12.2.4 軍用與 ITU-R EMI/EMC 規範

(a) 主要內涵

電磁相容（Electromagnetic Compatibility, EMC）與防止電磁干擾（Electromagnetic Interference, EMI）太空系統之設計與驗證通常參考美國國防部軍用（Military, MIL）及 ITU-R 所制定之相關標準。

軍用系列標準（如 MIL-STD-461 與 MIL-STD-464）主要規範設備之電磁發射（emission）與耐受性（susceptibility）要求，涵蓋傳導與輻射干擾測試項目，並定義測試方法與判定準則，以確保各子系統在共同運作時不會產生不可接受之干擾。

在頻譜管理與無線電干擾控制方面，ITU-R 則提供全球性之頻率分配與無線電系統共存規範，包含頻段使用、發射功率限制及干擾保護準則等，確保衛星系統與其他無線電服務之間能有效避免頻譜衝突與互相干擾。

(b) 相關文獻來源

(1) MIL-STD-461

DoD U.S., MIL-STD-461G, "Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment", Revision G, 2015-12。該文件為美國國防部最重要的設備級 EMC 標準，用於軍用電子設備、航空電子、衛星、飛彈、艦艇與地面系統。

(2) MIL-STD-464

DoD U.S., MIL-STD-464C, "Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems", Revision C, 2010-12。該文件為美國國防部的系統級 EMC 標準，相較於 MIL-STD-461 是系統級與設備的標準，MIL-STD-464 是系統級的。

有關 ITU-R 的文獻，參見第 5 章各節的(c)。

12.2.5 GEA IPC 製造品保

(a) 主要內涵

太空系統通常參考航太電子組裝與印刷電路板（Printed Circuit Board, PCB）製造相關之業界標準，以確保產品於嚴苛環境下之可靠度與一致性。其中全球電子協會（Global Electronics Association, GEA）管理的國際印刷電路（International Printed Circuit, IPC）IPC（Association Connecting Electronics Industries）標準（如 IPC-A-610、IPC J-STD-001 等）廣泛用於電子組裝品質之驗收與製程控制，規範焊接品質、元件安裝、外觀檢驗及可接受準則，並依應用等級（如航太高可靠度等級）訂定更嚴格之要求。

(b) 相關文獻來源

(1) IPC-A-610

GEA, IPC-A-610J, "Acceptability of Electronic Assemblies", Revision J, 2024。該文件是全球最廣泛採用的電子組裝驗收標準，用來判斷成品是否符合品質要求。

(2) IPC J-STD-001

GEA, IPC J-STD-001J, "Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies", Revision J, 2024。該文件為電子組裝與焊接製程的核心標準，相較於 IPC-A-610 是用於如何判斷產品是否合格，J-STD-001 是用於如何製造出合格產品，其建立製造品質、製程品質、焊接品質與控制機制。

(3) IPC-2221

GEA, IPC-2221C, "Generic Standard on Printed Board Design", Revision C, 2023。該文件為設計品質標準，相對於製造品質而言，IPC-2221 是為製造而考慮的設計（Design for Manufacturability）的重要基礎。

(4) IPC-7711/7721D

GEA, IPC-7711/7721D, "Rework, Modification and Repair of Electronic Assemblies", Revision D, 2023。該文件為部分重做（Rework）、維修（Repair）與修改（Modification）的標準，確保有瑕疵的物件在改善處理後品質仍符合產品等級要求。

13. 資安指引與標準

本章延續第 4.9 節，包括對美國與台灣衛星通訊資安所調查的指南與標準內容。

13.1 美國政府 SPD-5 指引

(a) 主要內涵

美國政府於 2020 年發布的第五號太空政策指引（Space Policy Directive-5, SPD-5），是美國首份專門針對太空系統網路安全（Cybersecurity for Space Systems）的綜合性指引。其核心目標在於建立跨政府與產業的統一標準，以保護太空資產免受日益增長的網路威脅。以下是 SPD-5 的主要技術與政策內涵：

(1) 網路安全基本原則（Core Principles）

SPD-5 要求太空系統的營運商與設計者應遵循以下指導方針，將安全融入整個生命週期。網路安全必須從衛星與地面站的設計階段就開始介入，而非事後補強。這涵蓋開發、測試、發射到軌道運作的所有環節。建議採用基於風險的方法（如 NIST 網路安全框架）來保護太空系統。確保命令與控制（Command and Control, C2）鏈路、數據鏈路以及處理單元具備抵禦未授權存取的能力。

(2) 核心防禦內涵（Key Security Requirements）

SPD-5 具體列出太空系統應具備的技術防禦能力，主要包括：防止惡意接管衛星控制權。這包含使用強身分驗證與加密技術來確保只有授權的地面站能發送指令。雖然干擾屬於物理層威脅，但 SPD-5 將其納入網路安全範疇。系統必須能偵測並緩解針對通訊鏈路的「干擾（Jamming）」與「欺騙（Spoofing）」。營運商應審查硬體與軟體供應商，確保衛星組件中沒有植入惡意後門或漏洞。對下行數據（Downlink）與星間鏈路（ISL）進行加密，防止數據被竊聽或篡改。

(3) 公私部門合作（Public-Private Collaboration）

SPD-5 強調政府與私營航太企業（如 SpaceX、Blue Origin 等）之間的協作。鼓勵商

業營運商加入太空資訊分享與分析中心（Space Information Sharing and Analysis Center, Space ISAC），及時通報發現的網路漏洞或攻擊行為。雖然 SPD-5 是行政指令，但它旨在將商業標準與國防安全需求對齊，使商業衛星也能達到保護國家安全的高度。

(4) 操作韌性與恢復（Operational Resilience）

指引要求系統具備在遭受攻擊後「快速恢復」的能力。衛星應具備一定的機載處理能力，在地面控制站失聯或遭受攻擊時，能進入安全模式或自主運作。建立多個地理分散的地面站，防止因單一地面點受損而導致整個星座失效。

(b) 相關文獻來源

(1) SPD-5

The White House U.S., "Space Policy Directive-5 (SPD-5) Cybersecurity Principles for Space Systems", 2020-09。該文件是美國針對太空系統（Space Systems）資安的國家層級政策文件，建立衛星、地面站、發射系統、太空資料及供應鏈的資安原則。

13.2 NASA 太空資產保護標準

(a) 主要內涵

NASA 對於太空資產的保護標準，是透過多個主題文件共同形成保護的架構，其中最常被引用的是資訊與資訊系統安全（Security of Information and Information Systems），並搭配安全計畫程序需求。這些標準旨在確保任務的存續性（Survivability）與韌性（Resilience），防止未經授權的控制或關鍵功能的喪失。以下是主要技術與管理內涵：

(1) 指令鏈路保護（Command Link Protection）

這是 NASA 保護標準中最優先的要求，目的在於防止「接管」衛星。所有上行指令必須經過加密認證，確保只有 NASA 授權的地面站可以發送指令。針對關鍵任務，要求使用 FIPS 140-2/3 標準的加密模組。要求鏈路具備一定的抗干擾（Anti-jamming）與抗欺騙（Anti-spoofing）設計。

(2) 位置、導航與計時（PNT）韌性

NASA 強調衛星不能過度依賴單一系統（如 GPS）進行定位。系統需具備使用多種定位、導航與計時（Positioning, Navigation, and Timing, PNT）來源的能力，或在 GPS 信號消失時能透過慣性導航、星蹤儀（Star Tracker）自主維持姿態。必須具備偵測 GPS 欺騙信號的機制。

(3) 硬體與供應鏈安全（Supply Chain Risk Management, SCRM）

為了防止硬體木馬或劣質組件，NASA 執行嚴格的供應鏈標準。遵循 SAE AS6171 等標準，對所有電子、電氣及機電（EEE）零件進行來源追蹤與測試。對於飛行軟體（Flight Software）進行獨立驗證與確認，確保代碼中無惡意後門。

(4) 關鍵功能防護與隔離

將衛星的「核心生存功能」（如熱控、通訊、動力）與「酬載」進行邏輯與物理隔離。即使衛星酬載受到網路攻擊，衛星仍能維持飛行安全。當監測到異常的指令序列或未經授權的存取嘗試時，系統必須能自動進入安全模式，切斷非必要鏈路並等待地面的命令來進行修復。

(5) 地面段與支持基礎設施

保護範疇不僅限於太空軌道，也涵蓋了地面網路。任務操作中心（Mission Operations Center, MOC）必須與公共網際網路實體隔離或建立嚴格的防火牆保護。包含對地面天線場、數據中心與通訊線路的物理保護，防止物理性的破壞或接取。

(b) 相關文獻來源

(1) NASA NPR 2810.1F

NASA, Procedural Requirements (NPR) 2810.1F, "Security of Information and Information Systems", Revision F, 2022-01。該文件是 NASA 資訊安全與網路安全核心標準，適用於飛行系統、地面系統、任務系統、操作技術與資訊系統，涵蓋從設計、發射到運行的整個生命週期。

(2) NASA NPD 2810.1F

NASA, Policy Directive (NPD) 2810.1F, "NASA Information Security Policy", Revision F, 2022-01。該文件屬於政策層級文件，建立 NASA 的資安政策，並要求落實執行 NPR 2810.1F。

(3) NASA NPR 1600.1A

NASA, Procedural Requirements (NPR) 1600.1A, "NASA Security Program Procedural Requirements", Revision A, 2013-08。該文件建立實體安全、個人安全、設施安全與任務保護等機制，與 NPR 2810.1F 共同構成 NASA 太空資產保護體系。

13.3 NIST 安全框架

(a) 主要內涵

美國國家標準與技術研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）的網路安全框架（NIST Cybersecurity Framework, NIST CSF）應用於衛星通訊時，需要將傳統的資安治理流程與太空系統的特殊物理環境（高延遲、長距離、軌道動力學）相結合。根據美國政府 SPD-5 指令的建議，NIST 亦發布太空系統網路安全介紹與相關的 Profile 文件，定義衛星通訊安全的核心內涵。

(1) NIST 框架的六大核心功能

NIST CSF 包括在框架中心的治理功能與 5 個連續步驟的功能如下：

治理（GOVERN, GV）：於 CSF 2.0 版新增，強調資安不再只是 IT 部門的技術問題，而是高層管理階層的戰略責任。落實資安策略對應的規範與標準，採購對於第三方軟硬體與軌道運營商執行風險審查，並在共同運用的衛星系統中界定資安責任。

識別（IDENTIFY, ID）：不僅是地面站，還包括軌道上的衛星本體（Bus）與衛星酬載（Payload）的軟硬體。須識別衛星零組件的來源，防止在製造過程中被植入惡意硬體（如硬體木馬），並考慮 ITU 頻率規定與各國對衛星數據傳輸的合規要求。

保護（PROTECT, PT）：確保只有授權的地面站能發送上行指令（Uplink Commands）。

對指揮與控制鏈路（Command and Control, C2）進行強加密，並對下行的用戶數據進行傳輸層加密。在物理層保護衛星通訊不受 RF 干擾（Jamming）或 GPS 欺騙。

偵測（DETECT, DE）：監測衛星遙測數據（Telemetry）中是否有異常跡象，例如非預期的姿態調整或功率波動，這可能代表系統已被入侵。透過地面站的入侵偵測系統（Intrusion Detection System），即時監看星地鏈路間的異常流量的連續性監測。

回應（RESPOND, RS）：當主控制鏈路無法控制衛星時，切換至備用頻段（如從 Ka 頻段切換至 S 頻段）以維持衛星基本運作。並且快速判斷衛星的鏈路失效或次系統故障是環境因素（如太陽耀斑）還是網路攻擊所致。

復原（RECOVER, RC）：設計衛星的「安全模式（Safe Mode）」，在遭到攻擊後能重啟飛行軟體並恢復原始工廠設定。也包括當匯集鏈路中斷時，透過星座（Constellation）中的其他衛星進行流量重新路由，確保能夠繼續通訊服務。

(2) 衛星通訊特有的 NIST 實施重點

將衛星系統拆分為「飛行段（Flight Segment）」、「地面段（Ground Segment）」與「用戶段（User Segment）」，並在 NIST 框架下建立嚴格的邊界防護，防止攻擊從用戶端蔓延至核心控制端。衛星通訊對定位、導航與計時（Positioning, Navigation, and Timing, PNT）非常要求，NIST 框架強調必須保護時間同步訊號的準確性，防止因時間欺騙導致訊框（Frames）失去同步。隨著再生型衛星普及，衛星本身具備處理數據能力。NIST 框架要求將衛星視為「軌道資料中心」，實施與地面資料中心同等級的處理保護。

(b) 相關文獻來源

(1) The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0

NIST, “The NIST Cybersecurity Framework (CSF)”, 2.0, 2024-02。該文件亦是 NIST 的白皮書 Cybersecurity White Paper (CSWP) 29，新版本在安全框架新增治理功能，以強化供應鏈風險管理、企業風險治理與高階管理層責任。

13.4 台灣 TAICS 資安標準

(a) 主要內涵

台灣資通產業標準協會（Taiwan Association of Information and Communication Standards, TAICS）對於衛星通訊的資安標準，有衛星使用者終端（Satellite User Terminal, Satellite UT）之資訊安全要求以及相對應之安全測試項目與測試方法，以及給衛星地面站（Ground Station），含衛星遙測追蹤和指令控制站（Telemetry Tracking & Command Station, TT&C）與閘道（Gateway）在內之資訊安全指引。

其中衛星使用者終端不只對於低軌道，新版納入同步軌道、中軌道的衛星使用者終端，其資訊安全要求區分 3 個不同風險從低到高的安全等級，並對這些安全構面：實體安全、韌體安全及更新、系統安全、傳輸通訊安全、身分鑑別機制安全、網頁服務安全、日誌紀錄安全之下所盤點的多個安全分項，對應至上述 3 個安全等級，並詳細敘述各安全分項的要求內容。以此資訊安全要求的結構，為所有安全分項對應安全測試項目，標明等級、測試布局、方法、與判定標準等，對於產品製造商、系統營運商以及資安檢測實驗室，可作為產品出廠前或導入第三方檢測時的標準技術依據。

而衛星地面站（Ground Station）之資訊安全指引，根據 TT&C 與 Gateway 類別，將盤點的安全要求項目對應至 TT&C 站或 Gateway 內的對象，並詳敘所有安全要求項目的要求內容。可用來增進衛星地面站設備之資安防衛能力，也導入相關防護設計概念與技術，以提升通訊的機密性、資料完整性以及可用性。

(b) 相關文獻來源

(1) TAICS TS-0055

TAICS, TS-0055, "衛星使用者終端資安標準", V2.0, 2025-11。該文件建立衛星使用者終端資安標準，作為後續檢測與驗證依據，新版將適用範圍由 LEO 擴大至 MEO 與 GEO 衛星使用者終端。

(2) TAICS TS-0056

TAICS, TS-0056, "衛星使用者終端資安測試規範", V2.0, 2025-11。該文件為 TS-0055

的測試規範，主要說明測試項目、測試方法與測試結果判定。

(3) TAICS TR-0036

TAICS, TR-0036, "衛星地面站資安指引", V1.0, 2025-06。該文件建議衛星地面站資安、防護與驗測的要求。

14. 結論與展望

本文件對於衛星通訊系統提出以階層式對象「系統」、「設備」和「單元」的相容性關聯去分類介面，整理成如下所列的介面類型，做為研析各種介面主題的章節基礎：

(1) 無線電技術共存

(2) 營運系統對外介面

(3) 地面接取設備與後端設備介面

(4) 地面接取設備與衛星介面

(5) 地面接取設備內部單元介面

(6) 衛星內部次系統／單元介面

(7) O-RAN 多設備內部單元介面

前 4 個介面類型是研析當今全球系統共通的 ITU 無線電規範，與兩大衛星通訊系統的標準 DVB-S/RCS 與 3GPP NTN 架構中，系統、設備關聯的各介面主題，後 3 個介面類型是研析其它用於設備的標準如數位中頻（DIFI）、增強型公共無線電介面（eCPRI）、衛星內部介面、與開放型無線接取網路（O-RAN）等架構中，單元關聯的各介面主題。在對應介面類型的各章節中，從各介面主題的主要內涵、相關文獻來源、技術指標與開發建議等說明，便於認識這些介面在相容性定義的相近與差異之處。

並於最後兩章對於提及的設備與單元，提供測試標準的介紹，包括通訊設備與單元測試、衛星酬載額外測試，以及美國與台灣現有的資安指引與標準介紹。

如此，已幾乎涵蓋衛星通訊系統中最重要的各式開放標準。目前在台灣已有落地的服務 SES、Eutelsat 等都是已採用或正在推動上述的開放標準，儘管這些服務中也有傳統設備採用早期的私有系統架構與介面定義。然而，仍有全球知名的衛星通訊服務如早期 OneWeb（此時已納入 Eutelsat 旗下）與 Starlink 仍有採取私有的系統架構與介面定義，特別是 Starlink 有自主垂直整合的私有架構與介面定義。本文件未涵蓋這些介面主題，實為遺珠之憾，若有機會再做更多主題的調查與評估，就更為完備。

參考資料

(1) ITU, "Radio Regulations (RR) Volume 1: Articles", Edition of 2024.
(2) ITU-R, Recommendation S.1503-4, "Functional description to be used in developing software tools for determining conformity of non-geostationary-satellite orbit fixed-satellite service systems or networks with limits contained in Article 22 of the Radio Regulations", 2023-09.
(3) ITU, Radio Regulations (RR) Article 5, "Frequency allocations", Edition of 2024.
(4) ITU, Radio Regulations (RR) Article 1, "Terms and definitions", Edition of 2024.
(5) ITU, Radio Regulations (RR) Article 9, "Procedure for effecting coordination", Edition of 2024.
(6) ITU, Radio Regulations (RR) Article 11, "Notification and recording of frequency assignments", Edition of 2024.
(7) ITU, Radio Regulations (RR) Article 22, "Space services", Section II, Edition of 2024.
(8) ITU, Resolution 169 (WRC-19) "Use of the frequency bands 17.7-19.7 GHz and 27.5-29.5 GHz by earth stations in motion communicating with geostationary space stations in the fixed-satellite service", 2019.
(9) ITU, Resolution 156 (WRC-15) "Use of the frequency bands 19.7-20.2 GHz and 29.5-30.0 GHz by earth stations in motion communicating with geostationary space stations in the fixed-satellite service", 2015.
(10) ITU, Resolution 902 (WRC-03) "Provisions relating to earth stations located on board vessels which operate in fixed-satellite service networks in the uplink bands 5 925-6 425 MHz and 14-14.5 GHz", 2003.
(11) ITU-R, Recommendation S.1857 "Methodologies to estimate the off-axis e.i.r.p. density levels and to assess the interference towards adjacent satellites resulting from pointing errors of vehicle mounted earth stations in the 14 GHz frequency band", 2010-01.
(12) ETSI, TR 103 611, "Satellite Earth Stations and Systems (SES); Seamless integration of satellite and/or HAPS systems into 5G and related architecture options", Version 1.1.1, 2020-06.
(13) FCC, 47 CFR Part 25 "Satellite Communications", 2026.
(14) ETSI, EN 301 790, "DVB; Interaction channel for satellite distribution systems", Version 1.5.1, 2009-05.

(15) ETSI, TR 101 790, "DVB; Interaction channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines for the use of EN 301 790", Version 1.5.1, 2009-05.
(16) ETSI, TS 101 545-1, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 1: Overview and System Level specification", Version 1.4.1, 2026-01.
(17) 3GPP, TS 23.501, "5G; System architecture for the 5G System (5GS)", Version 19.8.0, 2026-06.
(18) 3GPP, TS 23.502 "5G; Procedures for the 5G System (5GS)", Version 19.8.0, 2026-06.
(19) 3GPP, TR 38.821, "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)", Version 16.2.0, 2023-04
(20) 3GPP, "Non-Terrestrial Networks (NTN)" Official Website. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/technologies/ntn-overview.
(21) ETSI, EN 301 545-2, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 2: Lower Layers for Satellite standard", Version 1.5.1, 2026-04.
(22) ETSI, TR 101 545-4, "DVB; Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 4: Guidelines for Implementation and Use of EN 301 545-2", Version 1.2.1, 2026-01
(23) 3GPP, TS 38.300 "5G; NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2", Version 19.3.0, 2026-06.
(24) 3GPP, TS 38.413 "5G; NG-RAN; NG Application Protocol (NGAP)", Version 19.3.0, 2026-06.
(25) 3GPP, TS 29.281 "5G; General Packet Radio System (GPRS) Tunnelling Protocol User Plane (GTPv1-U)", Version 19.2.0, 2025-09.
(26) 3GPP, TS 24.501 "5G; Non-Access-Stratum (NAS) protocol for 5G System (5GS); Stage 3", Version 19.7.0, 2026-06.
(27) ETSI, EN 300 421, "DVB; Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services", Version 1.1.2, 1997-08.
(28) ETSI, EN 302 307-1, "DVB; Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2", Version 1.4.1, 2014-11
(29) 3GPP, TS 38.401 "5G; NG-RAN; Architecture description", Version 19.3.0, 2026-06.
(30) 3GPP, TS 38.331 "5G; NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification", Version 19.3.0, 2026-06.
(31) 3GPP, TS 38.211 "5G; NR; Physical channels and modulation", Version 19.4.0, 2026-06.

(32) 3GPP, TS 38.212 "5G; NR; Multiplexing and channel coding", Version 19.4.0, 2026-06.
(33) 3GPP, TS 38.213 "5G; NR; Physical layer procedures for control", Version 19.4.0, 2026-06.
(34) 3GPP, TS 38.321 "5G; NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification", Version 19.3.0, 2026-06.
(35) 3GPP, TS 38.322 "5G; NR; Radio Link Control (RLC) protocol specification", Version 19.3.0, 2026-06.
(36) 3GPP, TS 38.323 "5G; NR; Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification", Version 19.1.0, 2026-01.
(37) A. J. Vigil, "Digital IF for MILSATCOM terminals: CONOPS and standardization for the next decade and beyond", IEEE MILCOM, 2010-11.
(38) Kratos Defense & Security Solutions, "Digital Transformation of the Ground Segment," Satellite Evolution Global", 2023-05.
(39) DIFI Consortium, IEEE-ISTO Std 4900-2021, "Digital IF Interoperability Standard", Version 1.3.0, 2025-07.
(40) VITA, ANSI/VITA 49.2-2017 (R2024), "VITA Radio Transport (VRT) Standard", 2024-09.
(41) IEEE, IEEE Std 1588-2019, "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems", 2020-06.
(42) ST Engineering iDirect, "OpenAMIP Standard", Version 1.17, Revision F, 2020-10.
(43) ST Engineering iDirect, "OpenBMIP Standard", Version 11, Revision F, 2023-10.
(44) CPRI Industry Group, "Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification", CPRI Specification Version 7.0, 2015-10.
(45) Mugen Peng, et al., "Recent Advances in Cloud Radio Access Networks: System Architectures, Key Techniques, and Open Issues", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume 18, No. 3, pp. 2282-2308, 2016-03.
(46) CPRI Industry Group, "eCPRI Specification", Version 2.0, 2019-05.
(47) ECSS, ECSS-E-ST-20C, "Space engineering - Electrical and electronic" Revision 2, 2022-04.
(48) ECSS, ECSS-E-ST-32C, "Space engineering - Structural general requirements" Revision 1, 2008-11.
(49) ECSS, ECSS-E-ST-32-10C, "Space engineering - Structural factors of safety for spaceflight hardware", Revision 2, Corr. 1, 2019-08.

(50) ECSS, ECSS-E-ST-31C, "Space engineering - Thermal control general requirements", 2008-11.
(51) David Gilmore, "Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I: Fundamental Technologies", 2002-12.
(52) CCSDS, "Blue Books: Recommended Standards".
(53) CCSDS, "Green Books: Informational Reports".
(54) DoD U.S., MIL-STD-1553B, "Digital Time Division Command/Response Multiplex Data Bus", 1978-09.
(55) DoD U.S., MIL-STD-1553B, Notice 2, 1986-09.
(56) DoD U.S., MIL-STD-1553C, "Digital Time Division Command/Response Multiplex Data Bus", 2018-02.
(57) SAE, AS6802A, "Time-Triggered Ethernet", Revised 2023-02.
(58) IEEE, IEEE Std 802.3-2022/Cor 1-2024, "IEEE Standard for Ethernet", 2025-01.
(59) NASA, "Integrated Formal Analysis of Time-Triggered Ethernet", 2012-03.
(60) NASA, "On TTEthernet for Integrated Fault-Tolerant Spacecraft Networks", 2015-09.
(61) ECSS, ECSS-E-ST-50-12C, "SpaceWire - Links, Nodes, Routers and Networks", Revision 1, 2019-05.
(62) ECSS, ECSS-E-ST-50-11C, "SpaceFibre - Very High-Speed Serial Link", 2019-05.
(63) ECSS, ECSS-E-ST-50-51C, "SpaceWire Protocol Identification", 2010-02.
(64) ECSS, ECSS-E-ST-50-52C, "SpaceWire - Remote Memory Access Protocol", 2010-02.
(65) ECSS, ECSS-E-ST-50-53C, "SpaceWire - CCSDS Packet Transfer Protocol", 2010-02.
(66) ECSS, ECSS-E-ST-50C, "Space Engineering - Communications", Revision 2, 2024-12.
(67) VITA, ANSI/VITA 78.0-2026, "SpaceVPX System Standard", 2026.
(68) VITA, ANSI/VITA 46.0-2023 + Errata, "VPX Baseline Standard", 2023.
(69) VITA, ANSI/VITA 65.0-2025, "OpenVPX System Standard", 2025.
(70) VITA, ANSI/VITA 65.1-2025, "OpenVPX System Standard - Profile Tables", 2025.
(71) VITA, ANSI/VITA 46.11-2022, "System Management on VPX", 2022.
(72) VITA, ANSI/VITA 48.0-2022, "Mechanical Standard for VPX Ruggedized Enhanced Design Implementation (REDI)", 2022.
(73) VITA, ANSI/VITA 48.2-2022, "Mechanical Standard for VPX REDI Conduction Cooling", 2022.
(74) VITA, ANSI/VITA 62.0-2022, "Modular Power Supply Standard", 2022.
(75) VITA, ANSI/VITA 68.0-2025, "VPX Compliance Channel Standard", 2025.

(76) VITA, ANSI/VITA 66.0-2016 (R2025), "Optical Interconnect on VPX - Base", 2025.
(77) VITA, ANSI/VITA 67.0-2019 (R2025), "Coaxial Interconnect on VPX - Base Standard", 2025.
(78) NASA, "SpaceVPX Interoperability Assessment", 2022-09.
(79) ECSS, ECSS-E-ST-10-24C, "Space Engineering - Interface Management", Revision 1, 2024-11.
(80) ECSS, ECSS-E-ST-10-06C, "Space Engineering - Technical Requirements Specification", 2009-03.
(81) ECSS, ECSS-E-ST-10-02C, "Space Engineering - Verification", Revision 1, 2018-02.
(82) ECSS, ECSS-E-ST-50-16C, "Space Engineering - Time-Triggered Ethernet", 2021-09.
(83) CCSDS, 133.0-B-2, "Space Packet Protocol", Issue 2, 2020-06.
(84) O-RAN WG1, ETSI TS 103 982, "O-RAN Architecture Description", Version 14.0.0, 2026-03.
(85) O-RAN WG4, ETSI TS 103 509, "Open Fronthaul Interface Specification", Version 7.0.2, 2022-09.
(86) 3GPP, TS 38.473, "F1 Application Protocol (F1AP)", Version 19.3.0, 2026-07.
(87) O-RAN WG3, ETSI TS 104 039, "E2 interface: Application Protocol (E2AP)", Version 4.0.0, 2024-10.
(88) O-RAN WG2, ETSI TS 103 983, "A1 interface: General Aspects and Principles", Version 3.1.0, 2024-01.
(89) ITU, Radio Regulations (RR) Article 21, "Terrestrial and space services sharing frequency bands above 1 GHz", Section V, Edition of 2024.
(90) ITU-R, Recommendation S.580-6, "Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites", 2004-01
(91) ETSI, EN 301 459, "SES; Harmonised Standard for Satellite Interactive Terminals (SIT) and Satellite User Terminals (SUT) transmitting towards satellites in geostationary orbit, operating in the 29,5 GHz to 30,0 GHz frequency bands covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU", Version 2.1.1, 2016-05.
(92) ETSI, EN 303 979, "SES; Harmonised Standard for Earth Stations on Mobile Platforms (ESOMP) transmitting towards satellites in non-geostationary orbit, operating in the 27,5 GHz to 29,1 GHz and 29,5 GHz to 30,0 GHz frequency bands covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU", Version 2.1.1, 2016-05.
(93) GSOA, "Satellite Operator Minimum Antenna Performance Requirements (SOMAP)".

(94) DVB Project, "Verification & Validation (V&V)".
(95) 3GPP, TS 38.521-1, "5G; NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone", Version 19.5.1, 2026-07.
(96) 3GPP, TS 38.521-2, "5G; NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone", Version 19.3.0, 2026-06.
(97) 3GPP, TS 38.521-3, "5G; NR; User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 3: Range 1 and Range 2 Interworking operation with other radios", Version 19.5.0, 2026-06.
(98) 3GPP, TS 38.523-1, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 1: Protocol", Version 19.3.0, 2026-03.
(99) 3GPP, TS 38.523-2, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 2: Applicability of protocol test cases", Version 19.5.0, 2026-06.
(100) 3GPP, TS 38.523-3, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 3: Protocol Test Suites", Version 18.7.0, 2026-06.
(101) 3GPP, TS 38.508-1, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 1: Common test environment", Version 19.3.0, 2026-04.
(102) 3GPP, TS 38.508-2, "LTE; 5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 2: Common Implementation Conformance Statement (ICS) proforma", Version 19.4.0, 2026-07.
(103) 3GPP, TS 38.509, "LTE; 5G; 5GS; Special conformance testing functions for User Equipment (UE)", Version 18.1.0, 2026-01.
(104) ECSS, ECSS-E-ST-10-03C, "Space Engineering - Testing", Revision 1, 2022-05
(105) ECSS, ECSS-Q-ST-20C, "Space Product Assurance - Quality Assurance", Revision 2, 2018-02.
(106) ECSS, ECSS-Q-ST-30C, "Space Product Assurance – Dependability", Revision 1, 2017-02.
(107) ECSS, ECSS-Q-ST-40C, "Space Product Assurance - Safety", Revision 1, 2017-02.
(108) ECSS, ECSS-Q-ST-60C, "Space Product Assurance - Electrical, Electronic and Electromechanical (EEE) Parts", Revision 4, 2024-11.
(109) ECSS, ECSS-Q-ST-70C, "Space Product Assurance - Materials, Mechanical Parts and Processes", Revision 2, 2019-10.
(110) ECSS, ECSS-Q-ST-70-02C, "Space Product Assurance - Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials", 2008-11.

(111) AIAA, ANSI/AIAA S-080A-2018, "Space Systems - Metallic Pressure Vessels, Pressurized Structures, and Pressure Components", 2018.
(112) AIAA, ANSI/AIAA S-081B-2018, "Space Systems - Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPV)", 2018.
(113) AIAA, AIAA S-110-2005, "Space Systems - Structures, Structural Components, and Structural Assemblies", 2005.
(114) NASA, NASA-STD-7001C, "Payload Vibroacoustic Test Criteria", Revision C, 2026-07.
(115) NASA, GSFC-STD-7000B, "General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects", Revision B, 2021-04.
(116) DoD U.S., MIL-STD-461G, "Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment", Revision G, 2015-12.
(117) DoD U.S., MIL-STD-464C, "Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems", Revision C, 2010-12.
(118) GEA, IPC-A-610J, "Acceptability of Electronic Assemblies", Revision J, 2024.
(119) GEA, IPC J-STD-001J, "Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies", Revision J, 2024.
(120) GEA, IPC-2221C, "Generic Standard on Printed Board Design", Revision C, 2023.
(121) GEA, IPC-7711/21D, "Rework, Modification and Repair of Electronic Assemblies", Revision D, 2023.
(122) The White House U.S., "Space Policy Directive-5 (SPD-5) Cybersecurity Principles for Space Systems", 2020-09.
(123) NASA, Procedural Requirements (NPR) 2810.1F, "Security of Information and Information Systems", Revision F, 2022-01.
(124) NASA, Policy Directive (NPD) 2810.1F, "NASA Information Security Policy", Revision F, 2022-01.
(125) NASA, Procedural Requirements (NPR) 1600.1A, "NASA Security Program Procedural Requirements", Revision A, 2013-08.
(126) NIST, “The NIST Cybersecurity Framework (CSF)”, 2.0, 2024-02
(127) TAICS, TS-0055, "衛星使用者終端資安標準", V2.0, 2025-11.
(128) TAICS, TS-0056, "衛星使用者終端資安測試規範", V2.0, 2025-11.
(129) TAICS, TR-0036, "衛星地面站資安指引", V1.0, 2025-06.

版本修改紀錄

版本	時間	摘要
v1.0	2026/10/14	初版

TAICS

台灣資通產業標準協會

地　址・台北市中正區重慶南路二段51號3樓
電　話・+886-2-23567698
Email・secretariat@taics.org.tw
www.taics.org.tw