

NGSO satelity na negeosynchronních drahách

Ing. Václav Udatný

VAUD, konzultant v oboru elektronických medií

Satelitní technologie a vývoj komunikačních družic za poslední 2 roky doznaly značný vývoj. Technologie říditelných vyzařovacích paprsků a s ní související připravovaná technologie beam hopping jako rozšíření standardu DVB-S2x nalezne uplatnění na nových negeostacionárních drahách zejména pro B2B použití, B2C pro rychlý internet 5G i IoT. Článek popisuje vývoj od geostacionárních družic a základní principy činnosti MEO satelitů s jejich vysokou datovou propustností (VHTS) až po problematiku související s desítkami plánovanými satelity na nízko oběžných LEO drahách.

1. Úvod

1.1 Definice základních pojmů

Satelity dělíme podle oběžných drah do dvou širokých tříd: i) téměř kruhové dráhy a ii) eliptické dráhy. Satelity na eliptických drahách mají apogeum a perigeum, které se od sebe významně liší a tráví čas v mnoha různých výškách nad zemským povrchem. Dalším kritériem jsou orbity s excentricitou menší než 0,14 jako téměř kruhové, a ty s excentricitou 0,14 a vyšší jako eliptické, přičemž excentricita ε oběžné dráhy satelitu popisuje, jak silně se oběžná dráha odchyľuje od kruhu. Je dána poměrem rozdílu nadmořských výšek k jejich součtu zvýšenému o průměr Země:

$$\varepsilon = \frac{H_{\text{apogea}} - H_{\text{perigea}}}{H_{\text{apogea}} + H_{\text{perigea}} + 2R}, \quad (1)$$

kde $R = 6378$ km (poloměr Země). Dráha s excentricitou nula je kruh.

Téměř kruhové oběžné dráhy s excentricitou menší než 0,14 se rozlišují:

- Podle nadmořské výšky nad povrchem Země:
 - *LEO (low Earth orbit)* – Nízká oběžná dráha Země označuje oběžné dráhy s nadmořskou výškou mezi 100 km a necelými 2000 km, přičemž horní nadmořská výška je vybrána tak, aby zpravidla odpovídala orbitální periodě 2 hodiny.
 - *MEO (medium earth orbit)* – střední oběžná dráha Země označuje oběžné dráhy s nadmořskou výškou větší než 2000 km a menší než 35 700, což odpovídá oběžné dráze mezi 2 a 24 hodinami. Nejvýznamnější oblast tohoto pásma je blízko 20 000 km, což odpovídá polosynchronním oběžným drahám (12hodinový interval).

- *GEO (geosynchronous orbit)* – geosynchronní dráha Země označuje oběžné dráhy s výškou přibližně 35 700 kilometrů, což odpovídá orbitální periodě přibližně 24 hodin.
- *GSO (geostacionární orbit)* – je geosynchronní oběžná dráha, která leží v rovině rovníku Země, což umožňuje satelitům na této dráze vypadat téměř stacionárně při pohledu ze Země.
- Podle sklonu k rovníku:
 - *Equatorial*, rovníkové – nízká rovníková dráha se sklonem 0–20° k Zemi. V případě sklonu 0° se jedná o geostacionární dráhu.
 - *Nonpolar Inclined*, nepolární nakloněná – střední oběžná dráha nízká k Zemi, se sklonem mezi 20–85°.
 - *Polar*, polární – oběžná dráha s nízkým polárním pólem, se sklonem mezi 85–95° a větším než 104°.
 - *SSO (Sun synchronous)*, synchronní se Sluncem – nízká oběžná dráha se sklonem přibližně mezi 95–104°, se synchronním vztahem ke slunci během roku.

Eliptické dráhy se dělí na:

- *Cislunární* s apogeeem větším než 318 200 km.
- *HEO (highly eccentric orbit)* označuje vysoce excentrické oběžné dráhy Země, které mají dobu obletu větší než 25 hodin a excentricitu větší než 0,5.
- *Molniya* označuje oběžné dráhy s periodou mezi 11,5 a 12,5 hodinami, excentricitou mezi 0,5 a 0,77 a sklonem mezi 62–64°.

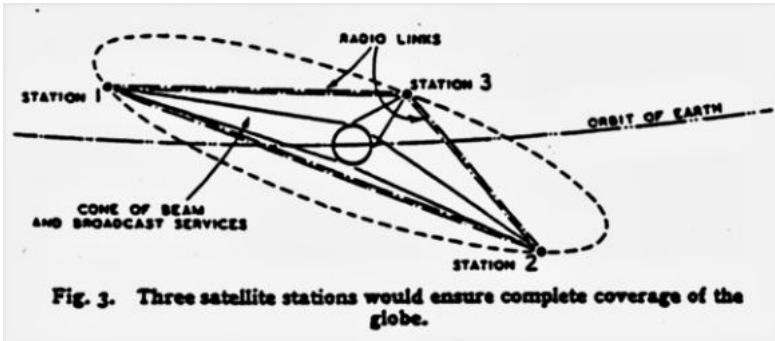
Kromě toho je možno se setkat již dnes s definicemi oběžných drah kolem měsíce, příkladem může být NRHO (*near rectilinear halo orbit*) nebo LLO (*low lunar orbit*).

1.2 Historie telekomunikačních satelitů

První telekomunikační družice pracovaly na eliptických drahách s apogeeem zhruba 6 500 km nad Zemí a byly v dohledu pozemského vysílače a přijímače ovšem pouze několik minut. Představitelem je satelit Telstar vyvinutý společností AT&T, který byl vypuštěn v červenci 1962, a přes který byl v listopadu téhož roku uskutečněn první transatlantický přenos mezi Francií a USA. Elektronika Telstaru byla však brzy poškozena zářením Van Allenových radiačních pásů, což vedlo k deaktivaci satelitu v únoru 1963. Společnost AT&T plánovala vývoj 20–40 satelitů, které by obíhaly v nízkých nadmořských výškách.

Naproti tomu americká společnost Hughes a její konstruktér Rosen upřednostňovali satelit na geostacionární oběžné dráze, 35 785 km (22 236 mil) nad rovníkem, který by měl dobu oběhu (orbitální období) rovnou rotaci Země, a tak se na obloze jevil jako stacionární.

Tato koncepce byla poprvé popsána již v roce 1928 Hermanem Potočnickem, rakouským oficírem řečeným Noordnung, a zpopularizována A. C. Clarkem v roce 1945¹. V uvedeném článku autor uzavírá, že toto i) je jediná možnost jak dosáhnout celosvětového pokrytí pro všechny druhy služeb a ii) umožňuje neomezené použití pásma minimálně 100 GHz a nahrazení tisícovek pozemních sítí za nepoměrně nižší náklady. Princip pokrytí zeměkoule dle původního článku uvádí obrázek 1.



Obrázek 1: Princip pokrytí zeměkoule

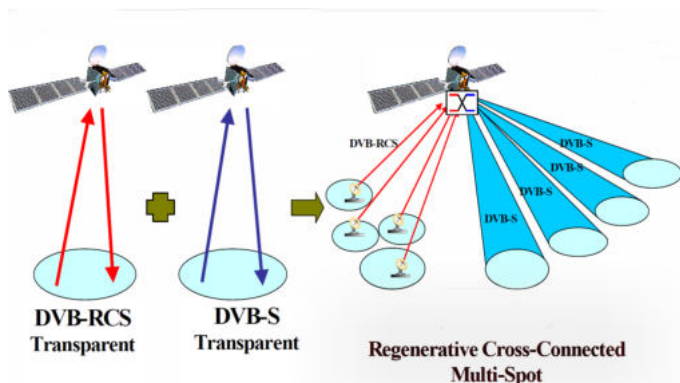
Jako doporučené pozice článek uváděl 30°E pro Evropu a Afriku, 90°W pro Ameriku a 150°E pro Asii a Pacifik a vzájemně budou propojeny radiovými nebo optickými paprsky.

1.3 Vývoj satelitních technologií

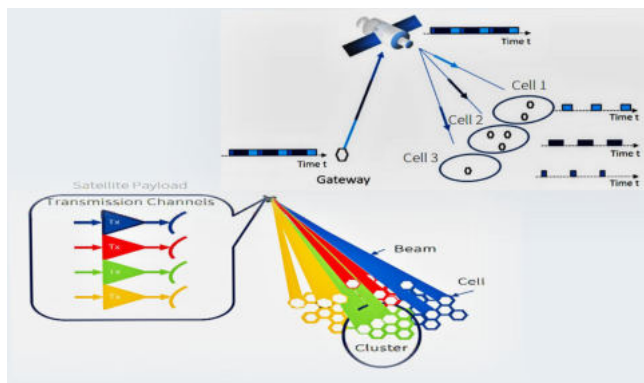
Satelitní technologie se postupem doby posunula. Došlo k většímu uplatnění vlnovodných feritových přepínačů, elektronicky směřovaných antén a OBP (*on-board processing*). Klíčovou vlastností OBP systému je, že užitečné zatížení satelitu je rekonfigurovatelné a poskytuje jedinečnou možnost připojení z „rozvaděče na obloze“. Nabízí plnou flexibilitu směřování mezi uplink /downlink kanály pomocí dynamického řízení kapacit prostřednictvím rekonfigurovatelného vzestupného kanálu. Pracuje s rodinou DVB-S/DVB-S2/DVB-S2x standardů se zpětným kanálem podle DVB-RCS. Výhodou je poskytování celé škály služeb jako interaktivní televize, VOD, běžné internetové spojení přes webová rozhraní. Na rozdíl od transparentní konfigurace (Uživatel-Uživatel, resp. Uživatel-HUB), používající 2 pásma, rekonfigurovatelná konfigurace pracuje jen s jedním a v případě multicastu i s jedním společným uplinkem na více pokrytých oblastí, obrázek 2. Poslední technologií je používání směřovatelných, tvarovatelných a rozdělitelných družicových svazků, které lze dynamicky dálkově přesměřovat podle aktuální potřeby zákazníků.

¹ Extra-Terrestrial Relays. Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage? Publikováno ve Wireless World, říjen 1945 [1].

Další technologií je revize specifikace DVB-S2X, která přidává podporu pro tzv. přeskokování paprsků BH (*beam hopping*). Ve vícesvazkových satelitních systémech umožňuje BH efektivní a flexibilní využití satelitních zdrojů pro aplikace, jako je VoIP, celulární páteří síť, internet věcí, námořní a palubní konektivita lodí nebo pro vládní aplikace.



Obrázek 2: Princip rekonfigurace transpondérů



Obrázek 3: Princip DVB-S2x beam hopping

BH funguje seskupením buněk pokrývajících dané území v klastrech; buňky každého shluku (např. žlutý shluk na obrázku 3) jsou navštěvovány satelitním paprskem (který může být složen z jediného nosného signálu nebo z více nosných signálů, dokonce s různými symbolovými rychlostmi) v postupných periodách ozáření.

Ozařovací periody mohou být cyklické a předem plánované nebo náhodné (tj. bezprostředně následující po požadavku na provoz). Zatímco tedy „normální“ provozní režim přijímače S2x je nepřetržitý, přijímač při přeskokování paprsků (BH) musí pracovat s „nárazovými“ signály, což vyžaduje potřebu dlouhé úvodní prodlevy, ochranné

intervaly (*preamble*), před užitečnou datovou zátěží pro synchronizaci přijímače (frekvence, fáze, synchronizace) a následnou prodlevu (*postamble*), aby se umožnilo přepnutí satelitního paprsku z jedné buňky do druhé [6].

Tato technologie může být použita jak na vícesvazkových GEO satelitech, MEO i LEO konstelacích i pro širokopásmové obousměrné sítě.

2. Geosynchronní (GEO) a geostacionární (GSO) satelity

Sedm let po prvním Sputniku nastal čas geosynchronních družic, které jsou umístěny nad rovníkem ve výši necelých 36 tis. km (odpovídající bodu, kde je přitažlivost Země kompenzována přitažlivostí Slunce) s dobou oběhu 24 hodin, což znamená, že se ze Země jeví, jakoby byly pevně zavěšeny nad daným bodem nad rovníkem (poloze udávaná ve stupních východní nebo západní šířky) a proto jsou také obecně nazývány jako geostacionární (GSO). První komunikační družicí tohoto typu byl testovací satelit *Syncom 1* následně funkční *Syncom 2* se sklonem k rovníku 33° a v roce 1964 první geostacionární *Syncom 3*. Satelit na orbitě provedl řadu manévřů s polohou a rychlostí, aby se vyrovnal s rovníkem ve sklonu $0,1^\circ$ a zpomalil svou rychlost, takže se posunul na západ k plánovanému místu na 180°E , kde byla jeho rychlost ve výšce synchronizována se Zemí. Tyto manévry byly dokončeny do 23. září a *Syncom 3* byl použit v různých přenosových testech, včetně přenosu olympijských her z Tokia v roce 1964. Tabulka 1 ukazuje první geosynchronní satelity včetně jejich umístění a následných posunů na jiné orbitální pozice.

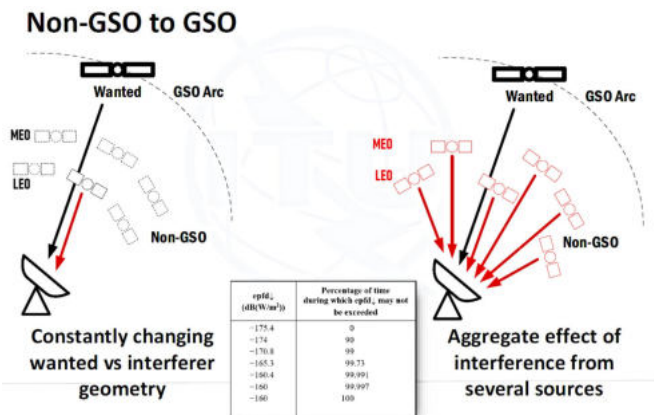
satelit	zahájení provozu	ukončení provozu	umístění
Syncom 1	14. února 1963	únor 1963	–
Syncom 2	26. července 1963	duben 1969	55°W 1963; 26°W 1965
Syncom 3	20. srpna 1964	prosinec 1974	64°W 1964; 180°E 1964; 25°W 1965; 165°E 1966
Early Bird	9. dubna 1965	1971	28°W 1965; 38°W 1965
ATS1	6. prosince 1966	duben 1985	AM 151°W 1966; AM 149°W 1968; POR 170°E 1982;
Intersat II F-2	14. února 1967	květen 1977	POR 174°E 1967; POR $162\text{--}170^\circ\text{E}$ 1969; POR $150\text{--}160^\circ\text{E}$ 1970
Intersat II F-3	25. března 1967	květen 1977	AOR 15°W 1967; AOR 35°W 1972; AR
Intersat II F-4	30. září 1967	květen 1977	POR 176°E 1967; POR 166°W 1971; AOR $30\text{--}42^\circ\text{W}$ 1972
ATS 3	6. listopadu 1967	?	AOR $45\text{--}100^\circ\text{W}$ 1968; AM 69°W 1971; AM 105°W 1977
OPS 2222	6. srpna 1968	?	IOR ?

Tabulka 1: První satelity na GEO

2.1 Mezinárodní ochrana GSO satelitů

V polovině roku 2020 byl počet provozovaných satelitů 2 666, z toho 554 GEO, eliptických 59, 135 MEO a 1 918 LEO. Nejvíce satelitů podle [2] provozují USA (1 327), následovány Čínou (363) a Ruskem (169) Tato čísla zahrnují všechny druhy satelitů včetně vojenských, pokud se je podařilo zjistit. Členské státy OSN podle konvence z roku 1958 mají hlásit Úřadu OSN pro vesmírné záležitosti se sídlem ve Vídni objekty, které vypustily ze svého území, nebo jejichž jsou vlastníky nebo provozovateli. V souladu s Dohodou OSN o využívání kosmického prostoru z roku 1967 se principy využívání orbitálních drah a spektra zabývá ITU (Mezinárodní telekomunikační unie).

Závazný je zde Radiokomunikační řád RR (*radiocommunication regulations*) ITU [3]. Dle článku 9 všechny Správy jsou povinny oznamovat podrobné údaje Byru ITU pro kmitočtovou informaci (IFIC). Článek 21 definuje minimální úhel separace družic na geostacionární dráze v závislosti na kmitočtovém pásmu s tím, že nad 15 GHz limity definovány nejsou. Pro jednotlivá pásma pak jsou definovány hodnoty hustoty výkonových toků PFD (*power flux density*) a článek 22 RR se zabývá možnými intervencemi družic na NGSO s geostacionárními družicemi a uvádí přípustné hodnoty ekvivalentní hustoty výkonového toku EFPD (*equivalent power-flux density*), který bere v úvahu součet všech vyzařování od NE- GSO družic ve směru pokrytí jakéhokoli satelitu na GSO, které požívají ochranu proti škodlivému rušení. Pro tuto ochranu jsou základní limity definovány v článku 22 RR a doporučení ITU-R S.1503-2/3 a ITU na semináři v prosinci 2018 představilo software pro výpočty EFPD (podrobnosti [6]). Představu vzájemných vazeb a limity EFPD pro případ downlinku uvádí obrázek 4.



Obrázek 4: Vlivy na ekvivalentní hustotu výkonového toku (EFPD)

Při tom je nutno si uvědomit, že obdobné poměry platí pro vzestupný směr i mezidružicové spoje ILS (*inter-satellite link*) ve volném prostoru. Polem neoraným jsou ale zatím budoucí koordinační metody a kalkulace mezi GSO a NGSO, a mezi MEO

a LEO, eklipsa (zatmění) stacionárních satelitů se stále zvyšujícím počtem družic NGSO, jejich interference do základnových pozemních stanic, interference uplinku (vysílacího paprsku) NGSO na satelity na geostacionární dráze a obecně zvyšující se úroveň šumu v důsledku zaplnění RF spektra. Dohoda dosažená na WRC-19 stanoví sice regulační postupy pro rozmístování negeostacionárních satelitů, včetně megakonstelací na oběžné dráze Země (LEO), ale pomůže jenom zajistit, aby hlavní mezinárodní kmitočtový registr ITU přiměřeně odrážel skutečné rozmístění těchto satelitních systémů NGSO v určitých frekvenčních pásmech a službách. Použití kmitočtových pásem na nízkých oběžných drahách LEO satelitů je pak ponecháno na individuální kmitočtové koordinaci provozovatelů.

3. NGSO systémy (negeosynchronní orbitální dráha)

Geostacionární dráha se postupně zaplňovala, až celý možný pás nad rovníkem se stává přeplněným. S vývojem nových technologií, nižší cenou za vypuštění levnějších družic a s požadavky na nižší latenci (zpoždění) nastoupil v posledním desetiletí trend satelitů NGSO – družic na negeosynchronních drahách – středních MEO a nízkých LEO.

Základní vlastnosti a srovnání jednotlivých orbitálních systémů uvádí přehledně tabulka 2. Uvedené hodnoty zpoždění představují v praxi dosažené hodnoty u GEO satelitů, případně udávané u MEO satelitů ve výšce 8000 km a u LEO deklarované. Pokud v tomto případě hovoříme o latenci, máme na mysli tzv. obousměrné zpoždění RTT (*round trip time*) v paketových přepínaných sítích. U geostacionární dráhy mezi vysílací a přijímací pozemskou stanicí samotné distanční zpoždění kolísá mezi 238–278 ms v závislosti na vzdálenosti pozemské stanice od satelitu nad rovníkem (36 000 km) nebo nad horizontem nad (42 000 km).

	GEO	MEO	LEO
výška nad Zemí [km]	35 785	20 000–22 000	200–2 000
zpoždění* [ms]	střední (600)	malé (150)	velmi malé (10–50)
pokrytí zemského povrchu	velmi velké	velké	malé
počet satelitů pro plné pokrytí	3	6	tísíce
datové brány	několik pevných	mnoho flexibilních	početné lokální
pohyb antén	stacionární	1 hodina s pomalým sledováním	10 minut s rychlým sledováním
připravenost technologie	vyzkoušená (používaná)	vyzkoušená (používaná)	technologie pro satelitní internet (ve vývoji)
používaná kmitočnová pásma	C, Ku	Ka	Ku, Ka

Tabulka 2: Srovnání jednotlivých orbitálních drah

* Zpoždění je závislé jak na zeměpisné poloze pro GEO, tak na vzdálenosti výstupní brány a terestrických sítích u MEO a LEO

Z toho vyplývá minimální teoretická hodnota RTT okolo 0,5 s v závislosti na konkrétní vzdálenosti pozemské stanice a satelitu. Samotné minimální distanční zpoždění pak u MEO dráhy v uvedené výšce 8000 km by bylo 54 ms (RTT cca 110 ms) a u LEO orbitu, který není stacionární, je distanční zpoždění kolísavé podle pozice a vychází ve výšce 1000 km na 7 ms (RTT cca nad 10 ms). Tak bude obtížné splnit podmínky ultra spolehlivých komunikací s nízkou latencí URLLC (*ultra reliable low latency communications*), jak popisuje IMT 2020 a ITU dále rozvádí v požadavcích na síť pro budoucí generaci dle zprávy ITU FG NET2030 SUB-G2 (10/2019), kde např. pro haptické (hmatové) komunikace a síť je požadována ultra nízká hodnota jednosměrné latence do 5 ms, tedy nepostřehnutelné lidským okem.

3.1 Satelity na střední oběžné dráze (MEO)

Historicky se konstelace MEO používají pro GPS a navigační aplikace, ale v posledních pěti letech byly satelity MEO rozmístěny, aby poskytovaly širokopásmové připojení poskytovatelům telekomunikačních služeb, vládním agenturám a podnikům – a nakonec propojily miliony koncových uživatelů, což podpořil i vývoj nových technologií (*multibeam*, a *hopping spektrum*).

K současným aplikacím patří dodávka 4G LTE a širokopásmového připojení do venkovských, vzdálených a nedostatečně rozvinutých oblastí, kde je pokládka optických vláken buď nemožná, nebo není nákladově efektivní – například výletní nebo obchodní lodě, vrtné plošiny na moři, páteřní propojení (*backhaul*) pro buňkové síť nebo i tábory humanitární pomoci a vojenské weby. Poskytovatelé služeb navíc využívají datové služby z těchto satelitů MEO k rychlému obnovení připojení v oblastech, kde došlo ke ztrátě služby v důsledku výpadů podmořských kabelů vzhledem ke shodnému zpoždění.

Výhody konstelace MEO: Jejich nízká vzdálenost od Země umožňuje poskytování širokopásmového připojení s nízkou latencí, s úrovněmi srovnatelnými se zpožděním optického přenosu. Tento druh přenosu podobného vláknům se stane ještě důležitějším, protože umožňuje vysoce výkonné rozšíření pozemské sítě, 5G backhaul a připojení ke cloudovým službám. Růst satelitní kapacity je stále více podporován širokopásmovým připojením, místo tradičních aplikací zaměřených na video. Kromě toho mohou satelitní konstelace MEO pokrýt většinu Země 6–8 družicemi. Velká oblast pokrytí na jeden satelit vede na přímé jednosměrné spoje přes kontinenty bez nutnosti přenosu mezi satelity. Shodná rovina oběžné dráhy zajišťuje spolehlivý provoz celé konstelace družic, kontinuitu spojení a pozemský sledovací systém, který spolehlivě řídí vysoce výkonné a spolehlivé služby.

Nevýhody konstelace MEO: Protože satelity MEO nejsou stacionární, pro zajištění nepřetržitých služeb je vyžadována konstelace více satelitů. To znamená, že antény na zemi musí sledovat satelit po obloze, což vyžaduje pozemskou infrastrukturu, která je ve srovnání s GEO výrazně složitější. Zatímco satelity MEO již poskytují mnohem nižší latenci ve srovnání s GEO, jejich vyšší oběžná dráha znamená, že nemusí

dosáhnout úplně stejné úrovně zpoždění plánované novými provozovateli LEO, i když rozdíl může být v závislosti na aplikaci nakonec zanedbatelný.

3.1.1 Popis MEO satelitních systémů O3b a mPOWER

O3b Networks ltd. původně vypustilo v letech 2013–2014 celkem 12 satelitů ve výšce 7,8–8,0 km, s průměrnou dobou oběhu 283 min, na rovníkových téměř kruhových drahách. V roce 2016 převzala tento projekt společnost SES a zamýšlí ve spojení se satelity GSO vybudovat komplexní celosvětový systém. V letech 2018–2019 doplnila tuto flotilu satelitů na 20.

O3b satelity pracují na rovníkové dráze a jejich pokrytí zajišťuje dostupnost $\pm 45\text{--}50^\circ$ na sever a jih od rovníku (světlejší pás na obrázku 5), což znamená, že pro nás by bylo signálem dostupné nejbližší město Záhřeb. Vstupní/výstupní brány (*gateways*) znázorněné na obrázku byly postupně upravovány.



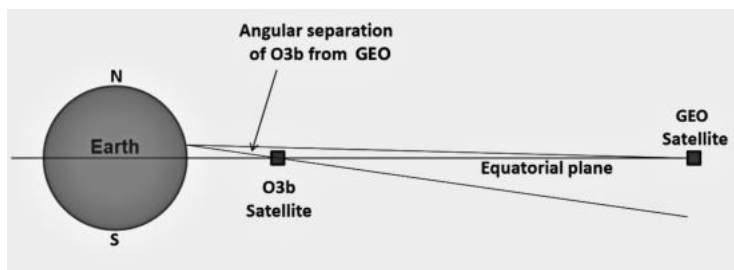
Obrázek 5: Oblast pokrytí O3b

Satelity jsou typu HTS (*high throughput satellites*), gateway brány mají k dispozici 6 transponderů o bitové rychlosti 10 Gb/s a celkový počet satelitů dosahuje kapacity 140 Gb/s přičemž zbývající družice jsou zatím ve *stand-by* provozu. Kmitočtová účinnost je posílena duální ortogonální polarizací jak pro svazky určené pro brány, tak i pro uživatele a opětovným použitím prostorově oddělených kmitočtů (*spatial frequency reuse*).

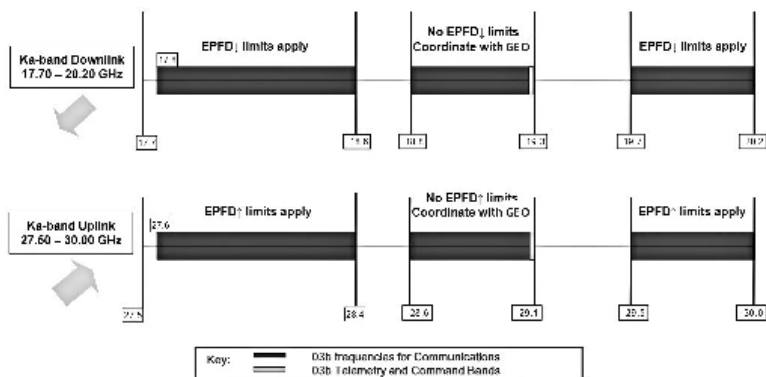
Kmitočty byly projednány již v roce 2012 s ITU [5] a využívají Ka-pásmo tak, aby nevstupovaly do pásem vyhrazených pro komerční GEO družice, které mají určeno 20% celkového Ka-spektra, a pro vládní a vojenské účely v souladu s příslušnými články Radiokomunikačního řádu. Rovníková dráha O3b satelitů však může způsobit potenciální rušení v oblasti rovníku cca v pásu 5° jak ukazuje obrázek 6.

O3b systém proto v oblastech rovníku nevyužívá příslušnou část spektra s ohledem na toto potenciální rušení, což představuje 1 400 MHz spektra na uplinku.

Kmitočtový plán O3b, i s vyznačením oblastí, které připadají v úvahu pro výpočet efektivní hustoty výkonového toku (EFPD) a které se ukládají u Byra ITU (IFIC), je pro vzestupné i sestupné dráhy uveden na obrázku 7. Koordinace byla provedena pouze pro 500 MHz úseky, ve kterých jsou kmitočty přiděleny ITU se shodnými právy pro GSO a NGSO satelity.



Obrázek 6: Znárodnění úhlové separace MEO a GEO satelitů



Obrázek 7: Frekvenční plán MEO satelitů O3b

V roce 2021 se plánuje vypuštění dalších 11 mPOWER [4] družic s velmi vysokou datovou propustností (VHTS). Ty by měly mít 5000 svazků (*beams*) směřovaných zejména na pohybující se lodě s celkovou kapacitou v řádu Tb/s. Konečná konstelace umožní značnou flexibilitu. Může směřovat zákaznický provoz kamkoli, optimalizovat šířky pásma na širší nebo užší a ovládat síťové zdroje tak, aby v případě potřeby si mohli zákazníci dynamicky přidělovat kapacitu spoje v reálném čase. Mělo by dojít i na rozšíření pásma dostupnosti mezi 50°N a 50°S, což by už umožnilo i dostupnost jižní části ČR. Po provozním odzkoušení v polovině roku 2021 by v roce 2022 mělo dojít k zahájení komerčního provozu.

SES je zastáncem multiorbitální strategie, zatím ale bez LEO družic. Ty by však mohly hrát roli v budoucích architekturách a doplňovat širší strategii společnosti na více oběžných drahách zaměřenou na satelity GEO a MEO.

3.2 Satelity na nízké oběžné dráze (LEO)

I když dnes existuje několik konstelací LEO od společností jako Iridium, Globalstar a Orbcomm, slouží především pro hlasové a datové aplikace s nízkou propustností. Mezi registrovanými satelity dle satelitní databáze UCS [2] je i český tříkilogramový VZLUSat-1 na dráze sun-synchronous s dobou oběhu 94,7 min, který byl vypuštěn v červnu 2017 a Lucky 7 z července 2019 s obdobnými parametry.

Nadcházející vlna LEO satelitů má sloužit různým trhům, konkrétně těm, které vyžadují připojení s vysokou propustností, jako je širokopásmové připojení pro zákazníky, mobilní backhaul a podnikový VSAT pro připojení vzdálených pracovišť a zaměstnanců. Protože tyto satelity fungují blíže k Zemi než jiné oběžné dráhy, je jejich oblast pokrytí menší.

Proto začínající operátoři LEO plánují vypustit stovky – nebo v některých případech tisíce a více těchto satelitů na oběžnou dráhu, aby dosáhli globálního nepřetržitého pokrytí. Soubory družic na LEO drahách budou nepřetržitě předávat komunikační signály a zajišťovat provoz v jejich rozsáhlé satelitní síti, aby uživatelům poskytly rozsáhlé a bezproblémové geografické pokrytí.

Hlavní rozdíly těchto nových megakonstelací ve srovnání s jejich výše uvedenými předchůdci z 90. let jsou zvýšený výkon, který je výsledkem využití digitální komunikace, pokročilých modulačních schémat, vícepraprskových antén a propracovanějších schémat opakovaného použití frekvencí, stejně jako snížení nákladů z pokročilých výrobních procesů a na vypouštění. Vedle snížených nákladů a zvýšených technických možností poskytla hlavní pobídky pro rozvoj těchto systémů rostoucí poptávka po širokopásmových datech a projekce růstu trhů mobility (vzdušné, námořní).

Výhody konstelace LEO: tyto satelity se zaměřují na poskytování internetového pokrytí, které může pokrýt celou planetu, a vzhledem k jejich těsné blízkosti Země operátoři očekávají, že nabídnou nejnižší úroveň latence ze všech satelitních oběžných drah. Tato blízkost také znamená, že je levnější a vyžaduje mnohem méně paliva pro vypuštění jednoho satelitu na dráhu LEO, než vypuštění do oběžných drah MEO nebo GEO.

Nevýhody konstelace LEO: vzhledem k vysokému počtu satelitů požadovaných v konstelaci LEO se však očekávají vysoké počáteční náklady na výrobu a spuštění a dražší pozemský hardware ve srovnání s GEO. Životnost těchto malých, asi 150 kg vážících, satelitů je také plánována na mnohem kratší dobu než satelitů určených pro vyšší oběžné dráhy. Vzhledem k tomu, že LEO systém družic dosud nebyl dosud komerčně spuštěn, je otázkou také dostupnost satelitního spektra pro tolik satelitů a koordinace provozu napříč nimi bez přidání latence.

3.3 Vývoj a stav některých leo satelitních systémů

3.3.1 OneWeb

V roce 2017 byl OneWeb první konstelací LEO, která získala souhlas s poskytováním služeb připojení v USA v rámci prvního kola zpracování FCC pro systémy pásem Ku/Ka. Od té doby OneWeb dosáhl značného pokroku v budování svého systému, kdy úspěšně vypustil v únoru 2019 prvních 6 satelitů s Kourou (Guyana Space Centre), které jsou ve výšce 1 000 km. Dalších, více jak 80 družic, následovalo z Bajkonuru avšak již ve výšce převážně 440–470 km nad Zemí na polární dráze (87°) s dobou oběhu 94/105 minut. Posledních 34 satelitů bylo vypouštěno 21. března 2020. Původně bylo plánováno 600 satelitů o váze 145 kg pro pokrytí širokopásmovým internetem.

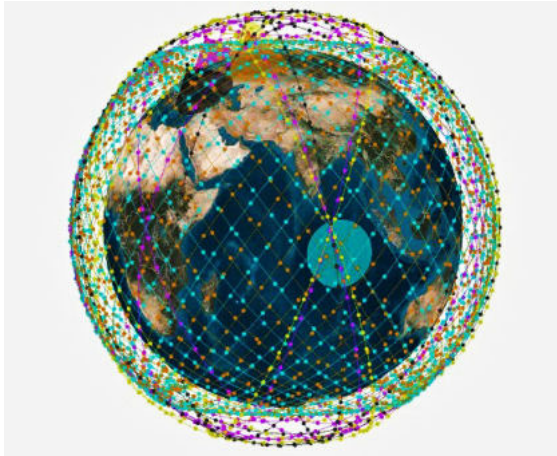
V srpnu 2019 společnost OneWeb splnila požadavky Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) podle článku 22 Radiokomunikačního řádu a uspěla při využívání svých globálních prioritních práv na spektrum v pásmu Ku a Ka. Následně počátkem tohoto roku podala žádost americkému úřadu FCC o rozšíření své konstelace. Tato nová modifikace, která byla částečně spuštěna oznámením FCC o druhém kole řízení pro systémy v pásmech Ku/Ka, usilovala o aktualizaci stávajícího povolení v USA, aby to odpovídalo nejnovějším specifikacím systému. V březnu 2020 byl OneWeb, po neúspěšném jednání s novými investory v důsledku epidemie koronaviru, nucen podat žádost o ochraně před věřiteli. Společnost pokračovala v procesu restrukturalizace a prodeje, který byl završen v červenci konsorciem indické společnosti Bharti Global (součást Mittal Enterprises) a vlády Spojeného království. Bharti plánuje pokračovat v plánech OneWebu na vybudování širokopásmové internetové satelitní sítě, zatímco Spojené království by také chtělo potenciálně využít konstelaci pro služby určování polohy, navigace a časování (PNT) za účelem nahrazení evropského Gallilea, ke kterému Spojené království ztratilo přístup v lednu v důsledku Brexitu.

V květnu 2020 podala rekapitalizovaná společnost OneWeb žádost k americké FCC o zvýšení počtu satelitů pro svou konstelaci na 48 tisíc. V případě, že by i pro ně používala původní dráhu přes 1 000 km, znamenalo by to velký problém pro celou pozemní astronomii, vzhledem k jejich svítivosti při východu a západu slunce.

3.3.2 SpaceX a projekt Starlink

Soukromá společnost SpaceX vypustila v červnu 2020 na oběžnou dráhu na letecké základně Cape Canaveral na Floridě 58 nových satelitů Starlink. V květnu 2021 bylo na oběžné dráze již přes 1 500 satelitů Starlink, přičemž dle rozhodnutí FCC bude možno, aby SpaceX provozoval celkem 2 814 satelitů na oběžných drahách 540–570 km. Družice o váze 227 kg jsou umístěny na nepolárních drahách se sklonem 53° a dobou oběhu 96 minut. Obíhají v 72 orbitálních rovinách a v každé z nich je plánováno 22 družic podle schválené konstelace z roku 2018. Počáteční mega-konstelace Starlink bude mít 12 000 satelitů. Tím to ale nekončí. Společnost SpaceX si podala žádost u FCC o vypuštění dalších až 30 000 satelitů Starlink.

Do většího obecného povědomí se celý projekt Starlink dostal na jaře roku 2020, kdy SpaceX začal vypouštět najednou 60 družic, které byly na mnohem nižší oběžné dráze (200–300 km) než na schválených drahách. Tyto „vláčky“ viditelné pouhým okem i u nás, po dobu před přechodem na provozní orbit, vyvolaly negativní reakce zejména u odborné veřejnosti. Znepokojení vyjádřila i britská Královská astronomická společnost, která upozornila na negativní vliv projektu jak na astronomický výzkum, tak i na významnou a trvalou změnu pohledů na noční oblohu, která je součástí kulturního dědictví lidstva a zaslouží si ochranu.



Obrázek 8: První konstelace Starlink se 4400 satelity [11]

Když společnost Space Exploration Holdings LLC, jako vlastníků povolení FCC pro provoz satelitů Starlink, zažádal o úpravu své licenci NGSO v pásmu Ku/Ka tak, aby satelity, které byly dříve povoleny pro provoz v nadmořských výškách 1110–1325 km, se přesunuly do nadmořských výšek 540–570 km, došlo v rámci veřejné diskuse FCC na další námitky z odborných kruhů. Ty se týkaly jak manévrovacích schopností velkého počtu družic a možnosti zvýšených kolizí s negativním dopadem na úlomky v podobě kosmického smetí, tak i kmitočtové koordinace v Ku-pásmu 10,7–12,7 GHz a 14,0–14,5 GHz. Mezi oponenty tohoto podání byli další existující nebo potenciální provozovatelé MEO a LEO systémů, včetně SES O3bmPOWER, OneWeb nebo Amazon, kteří poukazovali na to, že by tato modifikace ovlivnila rušivé pozadí, zejména v případech eklipsy – koincidence dvou satelitů v jedné přímce. Kromě toho SpaceX zdvojnásobil počet aktivních satelitů komunikujících s každou pozemskou stanicí.

Z pohledu kmitočtové koordinace jediným dostupným předpisem je článek 22 Radiokomunikačního řádu ITU, který chrání geostacionární satelity a článek 21 o přípustných hodnotách EIRP na různých kmitočtech opět z hlediska rušivých interferencí

pro geostacionární satelity. Nepřekvapuje tedy, že společnost SpaceX také potvrdila FCC, že její upravená konstelace NGSO bude splňovat příslušné limity EPFD stanovené v článku 22 Radiokomunikačního řádu ITU, která pod označením Steam jsou uvedena v IFIC databázi ITU [8]. K analýze použila SpaceX schválený výpočetní software podle doporučení ITU-R S.1503-2, přičemž sama SpaceX identifikovala více než 20 takových podání, která nemohla identifikovat údajně proto, že ve Spojených státech obvykle koordinují přímo s operátorem během mezinárodní koordinace a ITU databáze obsahuje pouze příslušné telekomunikační správy. Takže celosvětově zde může být potenciálně více jak 20 rušených frekvencí v rozsazích Ku-pásma i pro DBS.

V podobném duchu odmítá SpaceX všechny ostatní námítky [12] i proto, že SpaceX poprvé v historii vyslal kosmonauty na ISS, což je důkaz, že dbají na případné kolize s vypouštěnými raketami, ale v praxi tak, že ESA (Evropská kosmická agentura) musela upravit trajektorii svého satelitu Aeolus, aby nedošlo ke kolizi se Starlinkem [9]. Neameričtí provozovatelé jsou dle předpovědi SpaceX ti, kteří se pokusí postavit americké systémy před konkurenční nevýhodu.

A tak se bude tento jinak z technologického hlediska velmi zajímavý projekt rozvíjet dál, i když dle dubnového podání ze 30 000 satelitů jich bude přes sedm tisíc obíhat ve výšce pouhých 330 km v jedné rovině ve vzdálenosti pouhých 6 km od sebe [9].

B) Particulars of Operations

The General Provision 1010 applies to all receiving frequency bands.
The General Provision 1900 applies to all transmitting frequency bands.
For the text of these provisions, refer to Section H.

#	Frequency	Polarization	Emission	Tx/Rx Mode	Max EIRP /Carrier	Max EIRP Density	Associated Antenna	Special Provisions (Refer to Section H)	Modulation/ Services
1)	14000.0000 - 14500.0000	L	62MD7W	T	38.20	-3.50	1		BPSK up to 64QAM; Digital Data
2)	10700.0000 - 12700.0000	R	240MD7W	R			1		BPSK up to 64QAM; Digital Data

C) Frequency Coordination

#	Frequency Limits(MHz)	Satellite Arc (Deg. Long.) East Limit West Limit	Elevation (Degrees) East Limit West Limit	Azimuth (Degrees) East Limit West Limit	Max EIRP Density toward Horizon (dBW/4kHz)	Associated Antenna(s)
1)	10700.0000 - 12700.0000	NGSO	25.0 - 25.0	360.0 - 360.0	0.0	1
2)	14000.0000 - 14500.0000	NGSO	25.0 - 25.0	360.0 - 360.0	-37.3	1

D) Point of Communications

The following stations located in the Satellite orbits consistent with Sections B and C of this Entry:

1) 1 to SPACEX (S2983) Non-Geo (U.S.-licensed satellite) [550 x 550km @ 53° & 53.8° Incln, 32 planes per inclination & @ 74° Incln, 18 planes

Obrázek 9: Výňatek z autorizace FCC pozemské stanice pro SpaceX Services Inc. [10]

Nic nestálo v cestě spuštění testovací fáze projektu na podzim 2020, kdy počet satelitů dosáhl 800, což podle zakladatele a generálního ředitele SpaceX Elona Muska stačí k mírnému pokrytí. FCC Komise vydala povolení s kmitočtovou koordinací pro Ku-pásmo pro stovky pozemních stanic, pokrývajících většinu USA včetně Aljašky. Jsou připravené uživatelské terminály UTA-201 s plochými anténami na bázi elektricky řízených fázových polí o průměru 48 cm a pracujícími s elevací 25°. Starlink slibuje,

že bude nabízet rychlosti stahování až 1 Gb/s za sekundu při latencích 25–35 ms. Dosud však nezveřejnil data o rychlostech uploadu, ale podle odhadů bude mnohem pomalejší než rychlost stahování. Je pravděpodobné, že to nedokáže mnohem lépe než 3 Mb/s jako u geostacionárního satelitu.

3.3.3 Další projekty

Kromě již zmíněného oživeného projektu OneWeb se 48 tisíci družicemi, schválila 30. července americká FCC [13] aplikaci společnosti *Kuiper*, ovládanou Amazonem pro využití kmitočtů v Ka pásmu pro FSS a dokonce mobilní satelitní službu v 3 236 satelitní LEO konstelaci. Další společnosti jako *Facebook* a *Telsat* rovněž plánují dostat se na satelitní nebe.

4. Závěrem

Zatímco potřeby širokopásmového připojení byly tradičně uspokojovány technologiemi, jako je vlákno, měď, mikrovlnné spoje a 2G/3G/4G, satelity nyní mohou poskytovat konektivitu s podobným výkonem, včetně rychlostí více gigabitů a nízké latence. Mohou pracovat společně s těmito tradičními způsoby internetového přenosu a v některých případech je zcela nahradit. Tento průmysl „komunikačního vesmíru“ podporovaný silnou poptávkou na trhu, spolu s inovacemi ekosystémů a technologií, vede k investování rizikového kapitálu v řádu miliard dolarů pouze s vidinou návratnosti dalších miliard bez ohledu na to, jak bude naše Země vypadat při pohledu z vesmíru. A to vše při absenci jasných regulačních opatření pro náš nejbližší kosmický prostor.

BH	Beam Hopping
DVB	Digital Video Broadcasting
EIRP	Effective isotropic radiated power
EPFD	Equivalent Power flux density
FCC	Federal Communications Commission
GEO	Geosynchronous orbits
GSO	Geostationary satellite orbits
IFIC	International Frequency Information Circular
ISL	Inter-satellite link
ITU	International Telecommunications Union
LEO	Low Earth orbit
LHCP	Left-handed circular polarization
LoS	Line of sight
MEO	Medium Earth Orbit
NGSO	Non-Geosynchronous satellite orbits
OBP	On-board processing
PFD	Power flux density
RHCP	Right-handed circular polarization
RR	Radiocommunication Regulations

TT&C	Telemetry, Tracking and Command
VOD	Video on demand

Tabulka 3: Akronymy a použité zkratky

5. Zdroje

- [1] <<https://history.nasa.gov/SP-4407/vol3/cover.pdf>>.
- [2] UCS Satellite Database 01/04/2020.
- [3] ITU, Radio Regulations, Geneva, edition 2016.
- [4] <<https://o3bmpower.ses.com>>.
- [5] <https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/md/12/iturka.band/c/R12-ITURKA.BAND-C-0010!!PDF-E.pdf>.
- [6] Seminář ITU WRS 3-1 Prosinec 2018, Ženeva, Švýcarsko: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/space/WRS18space/WRS18-EPFD-06122018.pdf>>.
- [7] DVB BlueBook A171-2 (draft TR 102 376-2 V1.2.1).
- [8] <<https://www.itu.int/en/ITU-R/space/Pages/epfdData.aspx>>.
- [9] <<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/starlink>>.
- [10] <<https://licensing.fcc.gov/myibfs/displayLicense.do?filingKey=-429157>>.
- [11] Inigo del Portilloa, Bruce G. Cameronb, Edward F. Crawleyc: A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband, IAC-18-B2.1.7, Department of Aeronautics and Astronautics, MIT,
- [12] Consolidated opposition to petitions and response to comments of Space Exploration Holdings LLC: <<https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?action=dlattach;topic=46726.0;attach=1957635;sess=0>>.
- [13] <<https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-102A1.pdf>>.

NGSO satelity na negeosynchronních drahách – pokračování a aktualizace

Ing. Václav Udatný

VAUD, konzultant v oboru elektronických medií

Za uplynulý rok, kdy byl článek napsán na neuskutečněnou konferenci Radiokomunikace, došlo k dalšímu rychlému vývoji jak v oblasti satelitů na negeostacionárních drahách, tak i v celkovém směřování výzkumu vesmíru. U příležitosti 50. výročí měsíčního přistání, kdy se svět těší na návrat na měsíční povrch, se i Měsíc v dnešní době stává středem zájmu. Cesta na Měsíc je docela vzrušující a je nezbytným předchůdcem lidské mise na Mars, o které mluví vizionář Elon Musk, který stojí za projektem LEO satelitů Starlink. Tento doplněk článku zmíní některé změny, případně aktualizuje původní text.

Prudký rozvoj satelitní techniky za poslední rok nejlépe dokumentuje tabulka 1. (podle USC Satellite Database). Z této tabulky vyplývá, že největší nárůst představují satelity na LEO dráhách a vypouštěných ve Spojených státech, zatímco ostatní počty zůstávají téměř neměnné s výjimkou Číny.

celkový počet provozovaných satelitů				
ke dni		31.7.2020	31.12.2020	30.4.2021
celkem		2 787	3 372	4 084
z toho	USA	1 425	1 897	2 505
	Rusko	172	176	168
	Čína	382	412	431
z toho	GEO	560	562	560
	MEO	137	139	139
	LEO	2 032	2 612	3 328

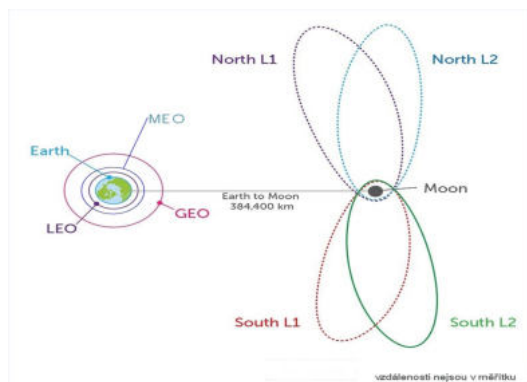
Tabulka 1: Celkový počet provozovaných satelitů k 1.5.2021

Jedním z faktorů způsobujících nárůst počtu satelitů na nízko-oběžných drahách LEO je závod o satelitní širokopásmové služby, zejména satelitní konstelace SpaceX Starlink. Do poloviny roku 2021 společnost SpaceX vypustila 182 satelitů Starlink, což představuje dohromady přes 1 600 družic, zatímco britský OneWeb, podporovaný vládou, vypustil v roce 2021 do 24. srpna 182 komunikačních satelitů dle databáze UNOOSA – agentury OSN [10], kde by dle rezoluce Valného shromáždění 1721 B (XVI) měly být všechny kosmické objekty registrovány. To však neplatí například u satelitů Starlink, nebo 63 objektů vypuštěných z Číny v tomto roce.

1. Definice oběžných drah

V úvodu původního článku je zmíněn popis oběžných drah satelitů, včetně zmínky o NRHO (*near rectilinear halo orbit*). NRHO je velmi nakloněná oběžná dráha kolem Měsíce a nachází se v cislunárním prostoru tj. „na přivrácené straně Měsíce“ a obecně

označuje prostor mezi Zemí a Měsícem. Tento prostor zahrnuje LEO, MEO, GEO a další oběžné dráhy, jako je LLO (*low lunar orbit*) a NRHO, která je zamýšlenou dráhou pro budoucí kosmickou přestupní stanici – vstupní bránu. Tato dráha během 7 dní mění vzdálenost od povrchu měsíce přibližně od 1 600 km až po 68 260 km a má tu vlastnost, že těleso na ní umístěné může sedět na této halo oběžné dráze, téměř jako by ji držela na místě gravitace Země a Měsíce a vyžaduje jen málo energie pro pohyb stanice nebo pro manévrování na jiné oběžné dráhy. Cislunární prostor je zobrazen na obrázku 1.



Obrázek 1: Oběžné dráhy Země a Měsíce (NRHO)

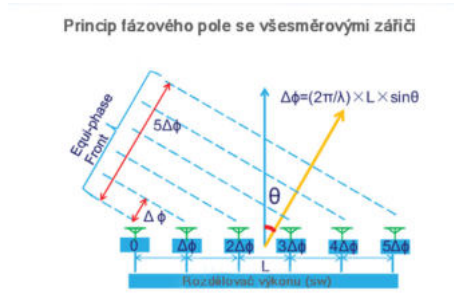
2. Vývoj satelitní technologie/fázové antény

Antény s fázovým polem obsahují více zářičů a používají se pro tvarování paprsků ve vysokofrekvenčních RF aplikacích a pro vojenské aplikace již léta. Ve skutečnosti byly vytvořeny pro použití v radarových systémech, ale jejich aplikace v průběhu let rostly. Nyní se používají jak ve vysílání, komunikaci s kosmickými sondami nebo ve výzkumu počasí, či na rozhraní člověk-stroj. Tento typ antén (*phased array*) se používá také pro nové komerční bezdrátové technologie, jako je 5G a nová Wi-Fi 6, zejména v oblasti centimetrových a milimetrových vln, a má široké uplatnění jako přijímací a vysílací antény v systémech Starlinku, případně jiných družicových nestacionárních konstelací.

Základním principem fázové antény je fázově závislá superpozice dvou nebo více vyzařovaných signálů. Když jsou signály ve fázi, spojí se dohromady a vytvoří signál o větší amplitudě. Když jsou signály v protifázi, navzájem se vyruší. Základní princip je na obrázku 2.

Aktivní elektronicky řízené pole je druhou generací fázovaných antén. Tyto antény využívají typ anténního pole, které přichází s funkcí elektronického řízení pro změnu směru a tvaru vyzařovaných signálů bez fyzického pohybu antény. Za toto elektronické řízení je zodpovědný fázový rozdíl mezi vyzařovanými signály z každého anténního prvku v poli, které představují samostatné softwarově řízené vysílače. Směr je řízen nastavením fázového posunu mezi signály odeslanými různým zářičům. Fázový

posun je řízen umístěním mírného časového zpoždění mezi signály posílané po sobě následujícími prvky v poli. Takové nastavení může vysílat několik rádiových vln o různých kmitočtech současně v různých směrech. Počet vysílačů, resp. anténních prvků, ve fázové anténě se může pohybovat od několika do tisíců. Prakticky dnes používané antény v pozemních terminálech jsou však energeticky náročné s příkonem okolo 100 W.



Obrázek 2: Základní princip antény s fázovým polem

3. Poslední vývoj LEO satelitních systémů obavy z jejich rostoucího počtu

Čísla zmíněná v úvodu tohoto článku mohou zdánlivě vypadat jako ohromující, ale ve skutečnosti naopak vyvolávají vážné obavy z pohledu radioastronomie a řízení vesmírného provozu a kosmického odpadu, nebo vzájemného kmitočtového rušení jednotlivých vzájemně si konkurujících systémů [10].

3.1 OneWeb

Restrukturalizovaná společnost OneWeb, která je částečně vlastněna indickou telekomunikační společností Bharti Group, britskou vládou a s dalšími investicemi společností SoftBank a Eutelsat, v červnu tohoto roku (2021) požádala oficiálně o povolení k provozu nad Indií. Zde se poprvé projevil konkurenční boj mezi jednotlivými konstelacemi. Problémem je, že Elon Musk, Jeff Bezos, ViaSat a další hledají nebo budou hledat stejná oprávnění. Starlink totiž již dříve uvedl, že bude poskytovat od roku 2022 širokopásmové satelitní služby pro Indii. Indické regulační orgány byly požádány skupinou technologických gigantů v rámci zastřešujícího fóra Broadband India Forum, které zahrnuje indické pobočky Facebooku, Amazonu, Microsoftu a Googlu a stávajícího dodavatele širokopásmových satelitních satelitů Hughes Network Systems, aby zamezily zprovoznění SpaceX Starlinku s tím, že SpaceX nemá nutné licence a oprávnění poskytovat satelitní služby v Indii a byla by tak porušena férová konkurence a dodržování existujících regulatorních norem.

Indie pak na aukci vydražila širokopásmové satelitní frekvence v rámci licenci GMPCS (*global mobile personal communication system*) a společnost OneWeb obdr-

žela začátkem srpna 2021 prohlášení, které potvrzuje, že její licence na poskytování satelitních služeb Indii je schválena. Potvrzení pochází od indického ministerstva komunikací a licence GMPCS je na dobu 20 let. Aby však byla licence validována, musí OneWeb dodat ještě prohlášení o shodě, jakož i strukturu poplatků a práva na provozování pozemních terminálů. OneWeb již dříve uvedl, že v Indii zahájí služby v květnu 2022, nicméně očekává, že připojení k některým severním zemím nabídne již koncem roku 2021.

To bylo potvrzeno 1. července 2021, kdy z kosmodromu Vostochnyi vypustil OneWeb dalších 36 satelitů a doplnil tak svou konstelaci na 254 družic, které by měly umožnit konektivitu Velké Británie, Kanady, Aljašky, severní Evropy, Grónska, Islandu a arktických oblastí [7].

3.2 SpaceX, Starlink

SpaceX pokračuje v budování své konstelace Starlink, která je podpořena rozhodnutím Federální Komunikační Komise (FCC) ze dne 27. dubna o schválení změny licence, o kterou požádal SpaceX.

Na základě schválení se velikost konstelace Starlink sníží o jeden satelit, ze 4 409 na 4 408. To zahrnuje 1 584 satelitů, které byly dříve schváleny k provozu na oběžných drahách 550 kilometrů se sklonem 53° , a 10 oprávnění vydaných v lednu pro provoz na polárních drahách. K nim se připojí 2 814 satelitů, dříve schválených pro vyšší oběžné dráhy (1 100–1 300 km), pracujících se sklonem $53,2^\circ$, 70° a $97,6^\circ$ a ve výšce 540–570 km. Maximální výška je omezena na 580 km, což byla podmínka požadována Amazonem, aby se zabránilo blízkosti s jeho satelity projektu Kuiper.

3.2.1 Námítky z pohledu kosmického odpadu a rušení

Návrh SpaceX byl předmětem další intenzivní debaty na FCC, kde bylo předloženo téměř 200 nesouhlasných podání. Mnoho dalších satelitních provozovatelů se postavilo proti požadované úpravě z důvodů od zvýšeného elektromagnetického rušení až po větší riziko kolizí satelitů a vytváření orbitálních trosk.

FCC obecně tato tvrzení odmítla. „Na základě našeho přezkoumání souhlasíme se společností SpaceX, že tato úprava zkvalitní služby pro uživatele SpaceX, a to i v často nedostupných polárních oblastech,“ uvádí se ve zdůvodnění [1]. FCC došel k závěru, že operace v nižší nadmořské výšce budou mít příznivé účinky s ohledem na zmírnění orbitálního odpadu. Rovněž uvedl, že modifikace SpaceX podle posudku Komise nebude představovat významné problémy s frekvenčním rušením.

Zejména dospěl (FCC) k závěru, že povolení SpaceX provozovat více satelitů na této nižší oběžné dráze by celkově nepoškodilo orbitální prostředí. Některé společnosti, jako například Viasat, tvrdily, že satelity Starlink trpí vysokou poruchovostí, což hrozí zvýšením rizika kolizí na nízké oběžné dráze. Míra selhání satelitů SpaceX je totiž záležitostí významného sváru, uvádí FCC v narážce na to, že SpaceX, Viasat a další

v posledních měsících o této záležitosti podávaly hlášení. FCC poznamenal, že podle SpaceX je „míra poruchovosti“ 1,45 % a že 720 z posledních 723 vypuštěných satelitů (k polovině února 2021) bylo po vypuštění manévrovatelné.

FCC uvedl, že „pro SpaceX bude důležité zachovat vysokou míru spolehlivosti svých satelitů, aby se omezilo riziko kolize“. Jako podmínku upravené licence musí SpaceX podávat pololetní zprávy o počtu „konjunkčních událostí“ a těch, které vyžadovaly manévry, aby se zabránilo kolizi, a také satelity, které společnost nechá zlikvidovat. SpaceX by také musel podat hlášení, pokud během jednoho roku dojde ke třem nebo více případům selhání a následné likvidace.

3.2.2 Námitky z pohledu radioastronomů

FCC jako součást odůvodnění také zamítlo žádosti, aby Komise provedla posouzení vlivu na životní prostředí jako součást zákona o národní environmentální politice (NEPA). Někteří astronomové také navrhli, aby Starlink podléhal environmentálnímu hodnocení, kvůli dopadům na životní prostředí, které má flotila satelitů na astronomická pozorování.

FCC dospěla k závěru, že problémy nastolené v námitkách nevyžadují přípravu environmentálního posouzení. Nabízí několik důvodů pro zamítnutí těchto žádostí, od skutečnosti, že Federální letecká správa (FAA) provádí vlastní hodnocení životního prostředí pro vypouštění satelitů Starlink, po „zda NEPA pokrývá sluneční světlo jako zdroj světelného znečištění“ při odrazu na povrchu, který je ve vesmíru. Přesto FCC vyzvala SpaceX, aby nadále úzce spolupracoval s astronomy na zmírnění jasu svých satelitů. I když neshledává, že by záznam, který mají k dispozici, zasloužil přípravu pro posudek o vlivu na životní prostředí podle NEPA, došli k závěru, že by nicméně sloužilo veřejnému zájmu podle komunikačního zákona, aby SpaceX nepřiměřeně nezatěžoval astronomii a další výzkumné snahy.

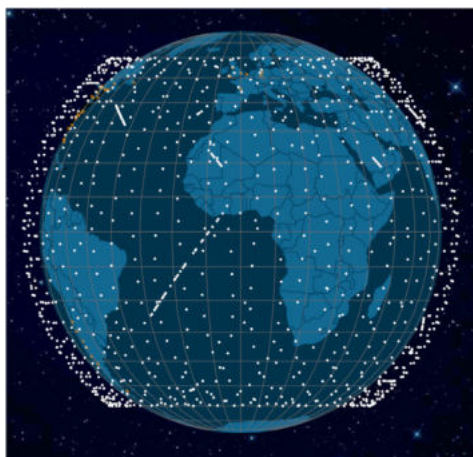
Space X v srpnu požádal o další změnu své licence pro 2. generaci Starlink družic na 9 různých nepolárních nakloněných oběžných drahách ve výšce 340–614 km v celkovém počtu 29 988. Ty by měly být vypouštěny ve vyšší sérii (> 60) než současná generace, měly by být těžší a být vybaveny mezidružicovými laserovými spoji a sníženou odrazivostí pro uspokojení radioastronomů.

3.2.3 Beta testování Starlinku

Od října 2020 bylo na nízké oběžné dráhy vyneseno celkem 16×60 satelitů Starlink. Poslední skupina 26. května, což s předchozími plně naplňuje původní nerozšířenou konstelaci. Služba Starlink zůstává ve fázi beta testování ve Spojených státech a několika dalších zemích, ačkoli Musk navrhl, že by beta test mohl skončit letos v létě, kdy bude konstelace vybudována. Moderátor webového vysílání startu ze 4. května, řekl, že „více než půl milionu lidí zadalo objednávku nebo složilo zálohu na Starlink“. Nezevěřejnil však, kolik lidí službu aktivně využívá [2].

Starlink shromažďuje objednávky na zařízení a službu s omezeným počtem uživatelů na principu, kdo dříve přijde... Satelity Starlink jsou naplánovány tak, aby posílaly internet všem uživatelům v určené oblasti na zemi. Tato označená oblast se označuje jako buňka. Každý individuální terminál Starlink (v zásadě pozemní vysílací/přijímací stanice) je přiřazen k jedné buňce. Pokud je přesunut mimo svou přiřazenou buňku, nebude umožňovat připojení k internetu, neboť satelit je naprogramován tak, aby sloužil pro danou stanici. Toto omezení je způsobené menší oblastí pokrytí LEO satelitů a nejedná se o internetový geofencing [3]. Jedná se tudíž o stanice pevné družicové služby (FSS). Podle údajů Starlinku mají uživatelé během beta verze očekávat rychlost dat v rozmezí 50–150 Mb/s a latenci 20–40 ms ve většině lokalit v průběhu několika příštích měsíců. Jak bude Starlink systém vylepšovat, může také dojít k časovým úsekům bez konektivity. Avšak slibují, že jak vypustí více satelitů, instaluje se více pozemních stanic a zdokonalí síťový software, rychlost dat, latence a doba provozu se dramatickylepší.

Pokrytí, resp. objemutí země ke dni 19.srpna 2021 přibližuje následující ilustrace dnes existující negeostacionární konstelace družic Starlinku, a to v počtu asi 1 600 a nezahrnuje ani dokončenou 1. generaci, kde má být celkem 4 400 objektů.



Obrázek 3: Srpnová konstelace Starlinku s 1 600 družicemi 1. generace, včetně doposud „neusazených vláček“ [4]

3.2.4 Stávající provoz a kmítočtová koordinace

Irská společnost Starlink Internet Services Ltd oznámila poskytování veřejně dostupné služby elektronických komunikací přístupu k internetu v pevném místě pro území ČR od 1. září 2021, jak vyplývá z databáze ČTÚ. Tyto družice se již nad naším územím pohybují v provozním stavu s kmítočty na sestupných drahách v Ka pásmu. V jednu dobu je z Prahy možno vidět 2 až 5 satelitů Starlink ve výškách

547–552 km. Výška jedné nad zemí kolísá v rozsahu 80–100 m v průběhu 1 měsíce [4]. Doba viditelnosti jedné družice je přibližně 1 minuta. Za zmínku stojí, že na rozdíl od obvyklých geostacionárních družic se v tomto případě přijímací/vysílací anténa (terminál za dotovanou cenu 500 USD) orientuje na sever s proměnnými parametry $AZ=310-50^\circ$ a $El=80-44^\circ$. Kmitočet vzestupného paprsku je totiž v Ku pásmu (14,0–14,5 GHz), což vyloučí interference s geostacionárními družicemi, které jsou orientovány na jih. Terminály s anténami na bázi řízeného fázového pole musí sledovat daný satelit tak, jak se pohybuje po obloze a mezi jednotlivými satelity přepínat.

Kromě USA, Kanady a Chile jsou pozemní stanice v Evropě k srpnu autorizovány ve Velké Británii a Francii, v sousedním Německu jsou dvě dosud oficiálně neregistrované, z toho jedna v Usingenu, kde je Teleport operátora Media Broadcast Satellite GmbH. Ovšem licence k provozu ve Velké Británii, které byly dosud uděleny, budou podle britského regulátora Ofcomu podléhat revizi. Rozvoj a budoucí očekávané značné počty LEO satelitů by mohly vést k vzájemným interferencím a tím k nekvalitním službám pro zákazníky a narušení férové konkurence. Proto v srpnu 2021 předložil Ofcom návrh změny licenčních procedur s tím, že pro provoz systému na nízkooběžných drahách zavede nutnost 2 licencí: síťové (*network license*) a přístupového bodu (*gateway license*). Vydávání dalších licencí bylo proto do ukončení konzultační fáze návrhu pozastaveno. Vzhledem k očekávanému počtu různých systémů a množství družic NGSO by mohlo docházet ke škodlivému rušení v případě, když se satelity různých systémů objeví na stejném místě oblohy při pohledu z uživatelského terminálu, jakož i při pohledu z přístupového bodu, resp. velkého hubu operátora, který poskytuje konektivitu dalším pozemním sítím. Proto udělené licence na zařízení musí vzít v úvahu nejenom kmitočet, ale i umístění (zejména vzájemnou vzdálenost) přístupových bran a faktor času. Vzhledem k tomu, že zdroje signálu jsou na zemi, musí příslušná povolení udělit národní regulátor, zatímco koordinace frekvencí ve vesmírném prostoru zůstává stále na mezinárodní úrovni ITU a na jejich kmitočtovém registru (viz bod 2.1. původního článku). Toto je zvláště významné v případě většiny dnešních povolení pro LEO satelity, která byla udělena na základě rozhodnutí amerického FCC.

3.3 Perspektivy nových satelitních konstelací

Následující tabulka, zpracovaná podle dokumentace Ofcomu „Negeostacionární satelitní systémy-aktualizace licencí“ [6] uvádí konstelace satelitních systémů, které se buď spouští nebo plánuje jejich spuštění služeb v příštích 2–3 letech a sloužit spotřebitelům.

Operátoři z celého světa plánují řadu dalších konstelací za účelem poskytnout vyšší rychlosti, nižší latenci, rozšíření globálního pokrytí a lepší služby koncovým uživatelům, zajištění lepší konektivitu pro dopravní průmysl, komunikační páteře pro zařízení IoT i mobilní backhaul. Ke slovu se hlásí i jako nízkonákladový projekt CurvaNet skupiny AirSpace IX [8] nebo až 864 satelitů čínského operátora CASC, jak uvádí server elonx.cz [9].

satelitní LEO systém	spektrum pro gateway (pásmo)	spektrum pro uživatele (pásmo)	počáteční počet satelitů v 1. generaci	výška nad Zemí [km]	latence [ms]	pokrytí latitude [°]	typ služby
Amazon	Ka	Ka	3 236	590–630	30	57S–56J	DTH
Kepler	Ku	Ku	140	575	20–40	globální	IoT
OneWeb	Ka	Ku	648	1 100–1 200	50	globální	páteří
SpaceX	Ka	Ku	4 408	540–570	20–40	globální	DTH
Telesat	Ka	Ku	298	1 015–1 325	50	globální	páteří

Tabulka 2: Plánované satelitní systémy na nízkých oběžných drahách (LEO) v počáteční fázi

Bezpochyby, družice jsou nezbytné pro lepší komunikaci, záchranu životů, organizaci společnosti, zlepšení odpovědnosti, podporu rozvoje infrastruktury a v poslední době na gigabity náročné mediální zábavy. Satelity, byly a jsou ve skutečnosti jen součástí lidského příběhu ve vesmíru.

Arthur C. Clarke, duchovní otec satelitní komunikace, v epilogu ke knize „How the World Was One“ napsal v roce 1970: „Dalším nebezpečím, a možná vážnějším, je, že všechny tyto zázračné nové služby přetíží naši schopnost je absorbovat“ a pokračuje „Satelitní říše už vzkvétaly a padaly a peníze utopené v počátcích podmořských kabelů jsou daleko zastíněny bohatstvím, které se vynořilo při fúzích a startech na odpalovacích rampách... Může přijít čas, kdy lidé ovládnou osudy hvězd.“ Do roku 1995 se to částečně naplnilo a těmi hvězdami byly „ty, které jsme sami vytvořili“. Při pohledu do budoucnosti, si Clarke představoval, že „Obloha se bude i nadále plnit novými hvězdami, jejichž jména by popletla zkušené astronomy – Anik, Palapa, Stacionar, Arabsat, Asiasat, ... Využijme je dobře – vždy si pamatujeme, že informace nejsou znalosti a znalosti nejsou moudro.“ A v úplném závěru se vrací ke starozákonnímu mýtu o Babylónské věži: „Ať je to jen mýtus nebo ne, je zde přízračná symbolika v tom, že dnešní tvůrci satelitních komunikací pilně demolují babylónskou věž – 36 000 km nad rovníkem.“

Lidská budoucnost je satelitní budoucnost. Ale měli bychom se na hvězdy na noční obloze podívat jako na svůj prostředek k nekonečným možnostem vesmíru a nikoli jako na ty, které nám uzavírají oblohu, ze které není úniku.

4. Použité zdroje

- [1] Space news, April 27, 2021: <<https://spacenews.com/fcc-approves-starlink-license-modification/>>.
- [2] <<https://www.spacex.com/updates/>>.
- [3] <<https://www.starlink.com/faq>>.
- [4] <<https://satellitemap.space/>>.
- [5] <http://www.ucsusa.org/satellite_database>.

- [6] Ofcom: Non-geostationary satellite systems – Licensing updates, <https://www.ofcom.org.uk/___data/assets/pdf_file/0015/222450/ngso-licensing-consultation.pdf>.
- [7] <<https://oneweb.net/media-center/oneweb-completes-its-five-to-50-mission>>.
- [8] <<https://airspacex.com/plans-for-new-leo-constellation-curvanet-revealed-by-tom-choi-on-via-satellite-interview/>>.
- [9] <<https://www.elonx.cz/starlink-i-nadale-dela-starosti-astronomum-jak-se-osvedcil-experimentalni-tmavy-satelit/>>.
- [10] <https://www.unoosa.org/oosa/osoindex/index.jsp?lf_id=>>.