

VEDECKÁ ŠTÚDIA

POZEMNÉ RUŠENIE SATELITNÉHO PRÍJMU V C PÁSME

Frekvenčné pásmo 3 400 – 4 800 MHz | FSS / DVB-S2 / T2-MI
Komplexná analýza interferenčných mechanizmov v podmienkach Slovenska

Autor: Roman Dávid | [www.dxsatcs.com](#)

Analytická podpora a zostavenie: Claude (Anthropic) | [claude.ai](#)

Dátum: Marec 2026

Klasifikácia: Odborne-vedecká publikácia | [www.dxsatcs.com](#)

ABSTRAKT / ZHRNUTIE ŠTÚDIE

Táto vedecká štúdia sa komplexne zaoberá problematikou pozemného elektromagnetického rušenia (EMI – Electromagnetic Interference) satelitného príjmu v C pásme v rozsahu frekvencií 3 400 – 4 800 MHz, so špecifickým zameraním na podmienky Slovenska. Analýza pokrýva fyzikálne mechanizmy rušenia, klasifikáciu pozemných zdrojov interferencie, vplyv technologických štandardov (5G NR, LTE, Wi-Fi, mikrovlnné spoje, WiMAX, pozemný Internet), dopad na funkciu LNB konvertorov a satelitných prijímačov, a kritické zhodnotenie filtračných riešení vrátane bandpass filtrov Norsat.

Štúdia je zostavená na základe aktuálnych odborných a vedeckých zdrojov vrátane publikácií ITU-R, 3GPP, IEEE a peer-reviewed výskumných prác (arXiv, PMC, IEEE Xplore) a je určená ako referenčný materiál pre odborníkov v oblasti satelitných komunikácií, vlnovej fyziky a EMC (elektromagnetickej kompatibility).

Kľúčové zistenie: Rušenie v C pásme na Slovensku je multi-zdrojové a multi-mechanizmové. Jednoduchý BPF (Band Pass Filter) umiestnený za feedom NEMÔŽE eliminovať všetky formy rušenia - najmä nie LNB saturačné efekty ani intermodulačné produkty generované priamo vo vnútri LNB pred filtračným stupňom. Riešenie vyžaduje systematický prístup na viacerých úrovniach.

1. ÚVOD - C PÁSMO A JEHO ŠPECIFICKÉ POSTAVENIE

1.1 Definícia a frekvenčné vymedzenie C pásma

C pásmo v kontexte satelitných komunikácií reprezentuje jeden z historicky najdôležitejších a najstabilnejších frekvenčných užívateľov globy elektromagnetického spektra. Z hľadiska fyziky elektromagnetického vlnenia ide o pásmo s vlnovými dĺžkami od cca 6,25 cm (4 800 MHz) po 8,8 cm (3 400 MHz).

V kontexte satelitnej FSS (Fixed Satellite Service) sa rozlišujú tieto sub-pásma:

- Štandardné C pásmo (downlink): 3 400 – 4 200 MHz (používané v Európe a Ázii)
- Rozšírené C pásmo (Extended C-band): 3 400 – 4 800 MHz
- Super-rozšírené C pásmo: až po 4 800 MHz (niektoré regionálne alokácie)
- Uplink C pásmo: 5 725 – 6 425 MHz (nevystavený pozemnej interferencii)

Satelitný príjem v C pásme vykazuje v porovnaní s Ku pásmom (10,7–12,75 GHz) a Ka pásmom (17,3–21,2 GHz) zásadnú fyzikálnu výhodu – minimálny rain-fade (útlm spôsobený atmosférickými zrážkami). Tento jav je podmienený fyzikálnym zákonom Rayleighovho rozptylu, kde útlm atmosférického rušenia rastie so štvorcem frekvencie. Na 4 GHz je útlm spôsobený zrážkami rádovo 100-krát nižší ako na 12 GHz. Práve táto vlastnosť činila C pásmo historicky strategickým pre tropické oblasti a krajiny s vysokým zrážkovým úhrnom.

1.2 Fyzikálna podstata satellite-ground link C pásma

Satelitný signál v C pásme prichádzajúci z geostacionárnej dráhy (GEO, ~35 786 km) je charakterizovaný extrémne nízkou hustotou výkonovej spektrálnej hustoty (PSD – Power Spectral Density). Typická úroveň signálu na vstupe LNB je v rozsahu:

$$P_{rx} = -90 \text{ až } -120 \text{ dBm (t.j. } 10^{-9} \text{ až } 10^{-12} \text{ mW)}$$

Táto hodnota je fyzikálnym dolným limitom detekovateľnosti a je daná:

- EIRP satelitu (typicky 30–50 dBW pre C pásmo)
- Voľným priestorovým stratám (Free Space Path Loss) na vzdialenosť ~36 000 km
- Ziskami antény a LNB systému

$$FSPL \text{ (dB)} = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(4\pi/c) \approx 196 \text{ dB @ 4 GHz, 36 000 km}$$

Tento extrémne nízky signál je zároveň podstatou problému rušenia: akýkoľvek pozemný zdroj výkonu, ktorý sa dostane do vstupu LNB, môže byť rádovo miliónkrát silnejší ako žiadaný satelitný signál.

1.3 Špecifická situácia na Slovensku

Slovenská republika sa nachádza v strede Európy, kde prebehla (a prebieha) masívna expanzia mobilných sietí, bezdrôtového Internetu a služieb v C pásme. Z hľadiska regulácie frekvencií spravuje spektrum Telekomunikačný úrad SR (TU SR), ktorý vydáva licencie v súlade s európskymi harmonizačnými rozhodnutiami ECC (Electronic Communications Committee) a nariadeniami BEREC.

Kľúčovým regulačným dokumentom pre C pásmo je európske harmonizačné rozhodnutie ECC/DEC/(11)06 o použití pásma 3 400–3 800 MHz pre služby IMT (International Mobile Telecommunications), ktoré je v priamom konflikte s FSS príjmom v tomto sub-pásme. Na Slovensku boli licencie 5G v pásme 3,5 GHz udelené v roku 2020 všetkým štyrom hlavným operátorom.

2. KLASIFIKÁCIA POZEMNÝCH ZDROJOV RUŠENIA C PÁSMA

Nasledujúca analýza predstavuje systematickú klasifikáciu všetkých relevantných zdrojov pozemného rušenia v rozsahu 3 400 – 4 800 MHz, identifikovaných na základe fyzikálnych vlastností, frekvenčného rozsahu a mechanizmu interferencie.

2.1 5G NR (New Radio) - Pásmo n78 a n77

Frekvenčný rozsah: 3 300 – 4 200 MHz (NR Band n78: 3 300–3 800 MHz, n77: 3 300–4 200 MHz)

5G NR v C pásme predstavuje v súčasnosti najzávažnejší a fyzikálnym analýzám najlepšie zdokumentovaný zdroj rušenia satelitného príjmu. Technický štandard 3GPP Release 17 definuje dva hlavné frekvenčné bloky relevantné pre C pásmo: Band n78 (3 300–3 800 MHz) a Band n77 (3 300–4 200 MHz). Na Slovensku prebiehalo prideľovanie v pásme 3 490–3 510 MHz a v rozsahu 3 400–3 600 MHz.

Mechanizmy 5G interferencie:

a) Priama in-band interferencia: 5G základňové stanice (BS – Base Station) vysielajú v rozsahu 3 300–4 200 MHz s EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) typicky 40–80 W na anténový sektor. Pokiaľ 5G BS pracuje na frekvencii, ktorá padá do pásmového rozsahu LNB (3 400–4 200 MHz), nastáva priama spektrálna kolízia. Signál 5G BS na vzdialenosť 1 km dosiahne na vstupe LNB úrovne rádovo –40 až –60 dBm – teda rádovo 30 až 60 dB silnejší ako satelitný signál.

$$\Delta P = P_{5G_rx} - P_{sat_rx} \approx 30 \text{ až } 60 \text{ dB presilenia}$$

b) LNB saturácia: Keď výkon na vstupe LNB prekročí bod 1 dB kompresie (P1dB, typicky –10 až +5 dBm pre štandardné LNB), zosilňovací tranzistor vstupuje do nelineárneho režimu. V tomto stave:

- Zisk LNB poklesne pod nominálnu hodnotu (gain compression)
- Šumový podlažie (noise floor) sa výrazne zvýši
- Generujú sa intermodulačné produkty (IMD)
- Satelitný signál je úplne pokrytý, aj keď leží mimo 5G frekvencie

c) Susedný kanál (adjacent channel) interferencia: Aj keď 5G pracuje v subpásme 3 400–3 600 MHz a satelitný signál je prijímaný na 3 700–4 200 MHz, postranne lalokovaté (sidelobe) emisie 5G BS a intermodulačné produkty môžu siahť až do vyšších častí C pásma.

d) Intermodulačné produkty IMD3: Pri súčasnom vysielaní dvoch či viacerých 5G nosných na frekvenciách f_1 a f_2 sa v nelineárnej oblasti LNB generujú intermodulačné produkty tretieho rádu na frekvenciách:

$$IMD3 = 2 \cdot f_1 - f_2 \text{ a } 2 \cdot f_2 - f_1$$

Pre 5G nosné na 3 500 a 3 600 MHz: $IMD3 = 3 400 \text{ MHz}$ a $3 700 \text{ MHz}$ – priamo v satelitnom prijímacom pásme.

KRITICKÉ ZISTENIE: Saturácia LNB a IMD3 sú generované PRIAMO VO VNÚTRI LNB, PRED akýmkoľvek externým filtrom. Preto externý BPF filter umiestnený medzi feed a LNB NEMÔŽE eliminovať tieto efekty. Filter môže chrániť iba vtedy, keď je postavený pred vstupným tranzistorom LNB – to znamená: integrovať ho priamo do LNB, alebo použiť špeciálny LNA (Low Noise Amplifier) s ultra-vysokým IP3 (intercept point) pred štandardným LNB.

2.2 LTE / 4G - Pásmo B42, B43 a susedné pásmo

Frekvenčný rozsah: 3 400 – 3 800 MHz (LTE TDD Band 42/43)

LTE TDD Band 42 (3 400–3 600 MHz) a Band 43 (3 600–3 800 MHz) sú používané pre pevný bezdrôtový Internet (FWA – Fixed Wireless Access) v európskych krajinách. Na Slovensku sú tieto frekvencie využívané operátormi pre pevný bezdrôtový Internet v obciach bez optickej infraštruktúry.

Fyzikálne efekty sú rovnaké ako pri 5G, avšak s menším EIRP a širším kanálom (do 100 MHz channel bandwidth). Špecifikom LTE TDD je časové zdieľanie spektra (TDD – Time Division Duplex), kde sa uplink a downlink periodicky striedajú s frekvenciou desiatok milisekúnd. Toto spôsobuje periodické rázové rušenie, ktoré sa prejavuje ako impulzné rušenie na satelitnom prijímači.

2.3 WiMAX a proprietárny bezdrôtový Internet

Frekvenčný rozsah: 3 400 – 3 700 MHz

Štandard IEEE 802.16 (WiMAX) a proprietárne PTMP (Point-to-Multipoint) systémy pre pevný bezdrôtový Internet sú v európskych krajinách výrazne rozšírené. Mnohí ISP (Internet Service Providers) na Slovensku stále používajú PTMP systémy (Ubiquiti AirMax, Mimosa, IgniteNet a iné) v pásme 3 400–3 700 MHz. Tieto systémy sú staršie ako 5G a často nemajú štandardizované emisné masky podľa aktuálnych ETSI noriem.

Na rozdiel od mobilných sietí, PTMP antény často mierujú horizontálne na sektory, čo môže viesť k priamej line-of-sight (LOS) interferencii s parabolickou anténou satelitného prijímača, pokiaľ sa satelit nachádza v azimutálnom smere PTMP sektoru.

2.4 Mikrovlnné pozemné spoje (Microwave Backhaul)

Frekvenčný rozsah: 3 600 – 4 200 MHz a 4 400 – 5 000 MHz

Pozemné mikrovlnné spoje (Point-to-Point PTP links) pre backhaul mobilných operátorov a ISP sú autorizované v mnohých sub-pásmach v rozsahu 3,6 – 5 GHz. Tieto spoje využívajú vysoko smerové antény (gain 30–40 dBi) a pracujú s EIRP až 50 dBW.

Riziko ich interferencie je za normálnych okolností nízke vďaka ich smerovosti, avšak môže nastať v týchto situáciách:

- Satelitná anténa sa nachádza v hlavnom laloku (main lobe) mikrovlnného spoja
- Difrakcia okolo budov či povrchu zeme privádza časť signálu na satelitnú anténu
- Multipath propagácia spôsobená reflexiou od budov alebo vlhkých povrchov

Frekvenčné pásmo 4 400–4 800 MHz je zvlášť relevantné pre rozšírené C pásmo (extended C-band), ktoré je používané niektorými satelitmi (napr. Intelsat, SES) a pre regióny s iným frekvenčným plánom.

2.5 Radarové systémy

Frekvenčný rozsah: 3 300 – 3 500 MHz (S pásmo) a 4 200 – 4 400 MHz (C pásmo radar)

Meteorologické a letecké radarové systémy pracujú v blízkosti satelitného C pásma. Na Slovensku sú prevádzkované meteorologické radary (SHMÚ) a letecké trasovacie radary (LPS SR). Tieto systémy sa typicky nenachádzajú v hustých obytných zónach, ale ich high-power impulzné emisie (peak power až MW) môžu pri bližšom umiestnení spôsobiť závažné impulzné rušenie – dokonca fyzické poškodenie vstupného stupňa LNB.

Poznámka: Radarové rušenie sa prejavuje ako krátkodobé, periodické impulzy, nie ako kontinuálne rušenie. Na spektrálnom analyzátore je viditeľné ako periodické spiky s repetíciou zodpovedajúcou radarovému otáčaciemu periodu (typicky 5–10 s).

2.6 Wi-Fi v C pásme (IEEE 802.11a/n/ac/ax)

Frekvenčný rozsah: 5 150 – 5 850 MHz (5 GHz Wi-Fi)

Klasické Wi-Fi pásmo 5 GHz (5 150–5 850 MHz) leží mimo úzkej definície FSS C pásma (3 400–4 200 MHz), takže priama in-band interferencia Wi-Fi s klasickým C pásmom je z fyzikálnych príčin vylúčená.

Wi-Fi môže spôsobiť rušenie nepriamym spôsobom:

- Druhé harmonické emisie Wi-Fi na 2,4 GHz môžu padnúť do pásma ~4 800 MHz (extended C pásmo)
- Trojné harmonické emisie z 2,4 GHz Wi-Fi padnú na ~7,2 GHz – mimo C pásma
- Wi-Fi routery s defektným RF dizajnom môžu generovať širokopásmový šum zasahujúci až do C pásma

Z vedeckého hľadiska je priamy vplyv Wi-Fi na C pásmo satelitný príjem minimálny – významné rušenie nastáva iba v extrémnych prípadoch (defektné zariadenie v tesnej blízkosti satelitnej antény).

2.7 Pozemný Internet v C pásme - FWA v 3,5 GHz

Frekvenčný rozsah: 3 400 – 3 800 MHz

Fixný bezdrôtový prístup (FWA) v 3,5 GHz pásme je v súčasnosti jednou z najzávažnejších príčin rušenia C pásma na Slovensku a v okolitých krajinách. ISP providéri (viac ako 50 na Slovensku) prevádzkujú sektorové základňové stanice v pásme 3,4–3,7 GHz s vysielačím výkonom 1–10 W (EIRP 40–50 dBm).

Fyzikálne mechanizmy sú identické s 5G a LTE (pozri sekciu 2.1 a 2.2), avšak s dlhšou historickou prevádzkou a menej predvídateľnou spektrálnou čistotou (staršie proprietárne systémy bez prísnych emisných masiek).

2.8 DECT, ISM zariadenia a ďalšie lokálne zdroje

Frekvenčný rozsah: 5,8 GHz ISM (5 725–5 875 MHz) – harmonické rušenie

Zariadenia v 5,8 GHz ISM pásme (bezdrôtové telefóny, baby monitory, niektoré Wi-Fi) nepriamo ovplyvňujú C pásmo cez harmonické emisie. Zároveň lokálne zdroje ako:

- Elektromotory a spínané zdroje (switched-mode power supplies) – broadband noise
- LED a fluorescenčné osvetlenie s defektným EMC dizajnom
- Nabíjačky elektrických osobných vozidiel (EV chargers) – širokopásmové impulzné rušenie
- Priemyselné zariadenia (VFD invertory, CNC stroje)

môžu prispievať k zvýšeniu noise floor systému, avšak nie sú priamymi in-band rušiteľmi v definovanom zmysle.

3. FYZIKÁLNE MECHANIZMY RUŠENIA - ANALÝZA

3.1 Saturácia LNB (LNB Saturation / Gain Compression)

Saturácia LNB je fyzikálne najzávažnejším a najčastejším mechanizmom rušenia v C pásme. Vstupný zosilňovací tranzistor LNB (typicky HEMT – High Electron Mobility Transistor) má definovaný 1 dB kompresný bod (P1dB). Pre štandardné C pásmo LNB je P1dB typicky v rozsahu –10 až +5 dBm na vstupe.

$$P_{\text{sat}}(\text{dBm}) = P1\text{dB}_{\text{input}} - G_{\text{LNB}}$$

Pre LNB s gainom 60 dB a P1dB = +5 dBm: $P_{\text{sat_vstup}} = -55 \text{ dBm}$

5G BS na vzdialenosť 500 m produkuje na vstupe LNB typicky –40 dBm – teda 15 dB nad saturačným bodom. Výsledkom je:

- Gain compression: efektívny zisk LNB klesá o 1 dB až 10 dB
- Noise figure degradácia: šumová schéma vzrastá o niekoľko dB
- Spectral regrowth: vznik nových spektrálnych zložiek mimo pôvodného 5G signálu

KRITICKÉ ZISTENIE: Saturácia LNB nastáva NA VSTUPNOM STUPNI - teda PRED miestom, kde je externý BPF filter pripojený (feed-LNB rozhranie). BPF filter teda NEMÔŽE zabrániť saturácii, ak je na vstupe LNB umiestnený AŽ ZA vstupným HEMT. Jediné riešenie: použitie LNB so vstavaným predfilterom (integrated pre-filter) umiestneným PRED prvým zosilňovacím stupňom.

3.2 Intermodulačné produkty (IMD - Intermodulation Distortion)

Nelineárne správanie LNB v oblasti saturácie generuje intermodulačné produkty. Pre dva vstupné signály na frekvenciách f_1 a f_2 vznikajú produkty:

$$2 \cdot f_1 - f_2 \text{ (IMD3)}$$

$$2 \cdot f_2 - f_1 \text{ (IMD3)}$$

$$3 \cdot f_1 - 2 \cdot f_2 \text{ (IMD5)}$$

$$3 \cdot f_2 - 2 \cdot f_1 \text{ (IMD5)}$$

Produkty tretieho rádu (IMD3) sú fyzikálne najzávažnejšie, pretože ležia blízko k fundamentálnym frekvenciám a sú mimo ich pásmo iba o rozdiel ($f_2 - f_1$). Pre 5G nosné na 3 500 a 3 600 MHz: IMD3 = 3 400 MHz a 3 700 MHz – obe priamo v C pásme.

3.3 Zvýšenie šumového podlažia (Noise Floor Elevation)

Okrem saturácie a IMD môže pozemné rušenie zvýšiť celkový šum systému. Jav je opísaný ako:

$$NF_{\text{total}} = NF_{\text{LNB}} + 10 \cdot \log_{10}(1 + P_{\text{interference}} / kTB)$$

kde k je Boltzmannova konštanta, T teplota (290 K), B je šírka pásma. Toto vedie k degradácii C/N pomeru, čo sa prejavuje ako zvýšený BER (Bit Error Rate) pri digitálnom signáli (DVB-S2), dlhšie zámky či úplná strata MER (Modulation Error Ratio).

3.4 Desenzitizácia prijímača (Receiver Desensitization)

Desenzitizácia nastáva, keď silný pozemný signál (napr. 5G) zníži citlivosť LNB/prijímača na slabšie signály (satelitné) aj mimo svoju frekvenciu. Jav je podmienený nelinearitou aktívnych prvkov a je kvantifikovaný parametrom IP3 (Third-Order Intercept Point):

$$IIP3 = P_{\text{in}} + (P_{\text{fund}} - P_{\text{IMD3}}) / 2$$

Pre štandardné LNB je IIP3 typicky +5 až +15 dBm. Silný pozemný signál túto hodnotu prekračuje a systém vstupuje do nelineárneho režimu.

3.5 Fázový šum (Phase Noise Degradácia)

Silné pozemné signály môžu ovplyvniť stabilitu lokálneho oscilátora (LO) v LNB cez jav noise injection. Fázový šum LO sa prejavuje ako širokopásmové rozmazanie (phase noise skirt) okolo každej nosnej frekvencie, čo degraduje fázovú čistotu downkonvertovaného satelitného signálu. Pre DVB-S2 v moduláciách vyššieho rádu (16APSK, 32APSK) je toto zvlášť kritické.

4. FREKVENČNÁ MAPA RUŠENIA - SLOVENSKO

Nasledujúca tabuľka sumarizuje všetky identifikované zdroje rušenia s ich frekvenčnými rozsahmi, typmi rušenia a odhadnutou závažnosťou v podmienkach Slovenska.

Zdroj rušenia	Frekvenčný rozsah	Mechanizmus rušenia	Závažnosť (SK)
5G NR (n78/n77)	3 300–4 200 MHz	Saturácia, IMD3	█████ Kritická
LTE TDD B42/43	3 400–3 800 MHz	Saturácia, IMD	████ Vysoká
FWA / WiMAX PTMP	3 400–3 700 MHz	Saturácia, IMD3	████ Vysoká
Mikrovlnné spoje PTP	3 600–4 200 MHz	Noise floor, IMD	███ Stredná
Meteorologické radary	3 300–3 500 MHz	Saturácia, LOS	██ Nízka–stredná
Letecké radary	4 200–4 400 MHz	LOS, difrakcia	██ Nízka–stredná
Pozemné spoje backhaul	4 400–5 000 MHz	LOS, smerové	██ Nízka (ext. C)
Wi-Fi 2,4 GHz harmonické	~4 800 MHz	2. harm. ~4,8 GHz	█ Minimálna
ISM / spínané zdroje	Broadband	Noise floor	█ Minimálna

5. KRITICKÉ ZHODNOTENIE NORSAT BPF FILTROV

5.1 Popis produktu a jeho deklarované vlastnosti

Norsat International je kanadský výrobca satelitných komponentov s dlhoročnou reputáciou. Ich produktová rada C-band BPF (Band Pass Filter) je navrhnutá primárne na elimináciu 5G rušenia pred vstupom LNB. Produkty rady 3000-BPF a BPF-C sú pozicionované ako riešenie pre operátorov postihnutých 5G interferenciou.

Norsat deklaruje pre svoje BPF filtre nasledovné parametre (rôzne modely):

- Passband: 3 625–4 200 MHz alebo 3 700–4 200 MHz (v závislosti od modelu)
- Stopband rejection: 40–60 dB v pásme 5G (3 300–3 600 MHz)
- Insertion loss: typicky 0,5–1 dB v pásme
- Guard band: < 20 MHz (model BPF-C-6)

5.2 Technické obmedzenia externého BPF filtra

Na základe fyzikálnej analýzy možno identifikovať tieto fundamentálne obmedzenia externého BPF filtra (umiestneného medzi feedom antény a vstupom LNB):

Obmedzenie 1: Saturácia nastáva PRED filtrom

Externý BPF filter je fyzikálne umiestnený PRED vstupom LNB – ale za feedhornom. Signál teda prechádza cestou: Satelit → Parabola → Feedhorn → (BPF Filter) → LNB input. Avšak vstupný zosilňovač LNB je PRIAMO ZA vstupným portom LNB. Filter teda chráni LNB pred in-band 5G signálom v pásme stopband, ALE ak:

- 5G signál leží vo passband filtra (napr. 5G na 3 700 MHz a filter púšťa od 3 700 MHz)
- Spoločná mocnosť všetkých signálov (satelit + 5G + noise) prekonáva P1dB LNB
- 5G signál generuje produkty vo passband filtra cez non-linear effects v medenom kábli pred filtrom

... potom saturácia nastáva aj s filtrom a filter nepomôže.

Obmedzenie 2: Nesprávne špecifikovaná cutoff frekvencia

Na Slovensku sú 5G siete operátorov v rozsahu 3 490–3 600 MHz. Ak BPF filter má pasívnu hranicu pri 3 600 MHz alebo vyššie, môže prepúšťať časť 5G spektra do LNB. Model filtra treba presne vyberať podľa reálneho frekvenčného plánu miestnych 5G operátorov.

Obmedzenie 3: Near-far problém

Ak sa 5G BS nachádza vo vzdialenosti menšej ako ~200–500 m, sila signálu môže byť tak vysoká, že aj 60 dB stopband rejection filtra nie je dostatočný. Pre –40 dBm 5G signál na vstupe a 60 dB rejection: filtered signal = –100 dBm – stále na úrovni satelitného signálu alebo vyššie.

Obmedzenie 4: LNB nelinearita spôsobená out-of-band signálmi

Aj keď 5G signál nie je v passband filtra, jeho mocnosť pred filtrom je dostatočná na to, aby cez parazitné spráženie (parasitic coupling) vo feedhorn-filter-LNB mechanickom sústroji presiakla časť signálu mimo elektrickej cesty. Toto je fyzikálne nepotlačiteľné bez dokonalého tienenia.

DIAGNOSTIKA VÁŠHO PROBLÉMU: Skutočnosť, že Norsat BPF nepriniesol zlepšenie, naznačuje jeden alebo viac nasledovných javov: (1) Zdrojom rušenia sú 5G/LTE nosné vo PASSBAND vášho filtra (tj. nad 3 700 MHz), nie iba v stopband. (2) LNB saturácia nastáva cez out-of-band signals so silou prekračujúcou P1dB. (3) Interferencia prichádza cez RF kábel alebo mechanickú apertúru (nie cez feedhorn). (4) Existuje in-band zdroj rušenia, ktorý BPF nemôže eliminovať (napr.

pozemný mikrovlnný spoj na 3,8 GHz).

5.3 Odporúčané riešenia na základe vedeckej analýzy

1. Integrovaný LNB s predfilterom: Nahradenie štandardného LNB modelom s integrovaným bandpass predfilterom umiestneným PRED vstupným HEMT tranzistorom (napr. Norsat 3200-BPF-5 alebo Norsat 3100N-BPF-5). Toto fyzikálne eliminuje saturačný problém.
2. Spektrálna analýza lokálneho rušenia: Pred nákupom ďalších filtrov je nevyhnutné zistiť presné frekvencie lokálnych rušiteľov pomocou spektrálneho analyzátora (napr. RTL-SDR s LNA, alebo profesionálne zariadenie). Len takto možno vybrať správny filter.
3. Geometrické opatrenia: Zmena azimutu/elevácie antény môže v niektorých prípadoch eliminovať line-of-sight problém s lokálnym 5G BTS.
4. Tienenie feedhornu: Pridanie RF tienenia (shielding) okolo feedhorn-LNB zostavy pre minimalizáciu parazitnej kapacitnej a indukčnej väzby.
5. Koordinácia s TU SR: Ak je rušenie spôsobené nelicencovanou prevádzkou alebo prekrytím frekvenčného plánu, oznámenie Telekomunikačnému úradu SR môže viesť k regulačnému riešeniu.

6. VLNOVÁ FYZIKA RUŠENIA - PROPAGAČNÉ MODELY

6.1 Voľné priestorové šírenie (Free Space Propagation)

Základný zákon voľného priestorového šírenia popisuje pokles intenzity signálu so vzdialenosťou:

$$FSPL(dB) = 20 \cdot \log_{10}(4 \cdot \pi \cdot d \cdot f / c)$$

kde d je vzdialenosť (m), f je frekvencia (Hz), c je rýchlosť svetla ($3 \cdot 10^8$ m/s). Pre 5G BTS na 3,5 GHz:

$$FSPL @ 100 \text{ m} = 73,3 \text{ dB} \quad | \quad FSPL @ 1 \text{ km} = 93,3 \text{ dB} \quad | \quad FSPL @ 5 \text{ km} = 107 \text{ dB}$$

6.2 Efekty mnohonásobného odrazu (Multipath)

V urbánnom prostredí Slovenska (mestá, sídliská) prichádzajú 5G signály k satelitnej anténe nielen priamou LOS cestou, ale aj reflexiami od budov, vozidiel a zemského povrchu. Tieto multi-path kópie môžu mať rôzne fázy a amplitúdy, čo vedie k:

- Frekvenčne selektívnemu úniku (frequency selective fading) – rôzne frekvencie v pásme C sú ovplyvnené rôzne
- Konštruktívnej a deštruktívnej interferencii – niektoré nosné v C pásme sú viac postihnuté ako iné
- Polarizačnému rozptylu – prichádzajúce pozemné signály majú rôzne polarizácie a môžu zasahovať aj krížové polarizačné kanály

6.3 Difrakcia (Knife-Edge Diffraction)

Signál 5G BTS môže prekonávať fyzické prekážky (budovy, vrcholy) cez difrakciu. Fresnelova zóna pre 3,5 GHz a vzdialenosť 1 km:

$$r_{\text{Fresnel}} = \sqrt{(\lambda \cdot d)} = \sqrt{(0,086 \cdot 1000)} \approx 9,3 \text{ m}$$

Toto znamená, že prekážky menšie ako ~9 m fyzicky neblokujú signál na tejto vzdialenosti – signál difrakuje okolo nich. Pre satelitnú anténu na streche budovy toto vysvetľuje, prečo aj zdanlivo dobre tienené budovy nemusia eliminovať 5G rušenie.

7. ZÁVER A ODPORÚČANIA

7.1 Hlavné závery

Na základe komplexnej vedeckej analýzy možno formulovať tieto závery:

1. C pásmo satelitného príjmu (3 400–4 800 MHz) je v podmienkach Slovenska vystavené multi-zdrojovému rušeniu zo strany 5G, LTE, FWA a mikrovlnných spojov.
2. Fyzikálne mechanizmy rušenia sú viaceré a prekrývajú sa: saturácia LNB, intermodulačné produkty IMD3/IMD5, zvýšenie šumu a desenzitizácia.
3. Externé BPF filtre (vrátane Norsat) majú fyzikálne obmedzenia a neeliminujú saturáciu LNB ani IMD generovanú pred filtračným bodom.
4. Efektívne riešenie vyžaduje použitie LNB s interným predfilterom, spektrálnu analýzu lokálneho rušenia a kombinovaný technický prístup.
5. Pre publikačné účely na portáli dxsatcs.com je táto analýza zostavená na základe ITU-R, 3GPP a peer-reviewed vedeckých zdrojov a môže slúžiť ako vedecky podložená referencia.

Autor: Roman Dávid | www.dxsatcs.com | Analytická podpora: Claude (Anthropic) | Marec 2026

Zdroje: ITU-R Reports M.2109, S.2199, S.2368 | 3GPP TS 38.101 | IEEE ICC 2018 | arXiv 2312.16079 | Norsat Technical Docs | Rohde & Schwarz Application Notes