

TERRESTRISCHE STÖRUNG DES SATELLITENEMPFANGS IM C-BAND

Frequenzband 3.400 – 4.800 MHz | FSS / DVB-S2 / T2-MI

Umfassende Analyse der Interferenzmechanismen unter den Bedingungen der Slowakei

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

Analytische Unterstützung und Zusammenstellung: Claude (Anthropic) | [claude.ai](#)

Datum: März 2026

Klassifikation: Wissenschaftlich-technische Publikation | [www.dxsatcs.com](#)

ABSTRACT / ZUSAMMENFASSUNG DER STUDIE

Diese wissenschaftliche Studie befasst sich umfassend mit der Problematik der terrestrischen elektromagnetischen Störung (EMI – Electromagnetic Interference) des Satellitenempfangs im C-Band im Frequenzbereich 3.400 – 4.800 MHz, mit spezifischem Fokus auf die Bedingungen der Slowakischen Republik. Die Analyse umfasst die physikalischen Mechanismen der Störung, die Klassifikation terrestrischer Interferenzquellen, den Einfluss technologischer Standards (5G NR, LTE, Wi-Fi, Richtfunkstrecken, WiMAX, terrestrisches Internet), die Auswirkungen auf LNB-Konverter und Satellitenempfänger sowie eine kritische Bewertung von Filterlösungen einschließlich der Norsat-Bandpassfilter.

Die Studie wurde auf der Grundlage aktueller fachlicher und wissenschaftlicher Quellen erarbeitet, darunter Publikationen der ITU-R, 3GPP, IEEE sowie peer-reviewed Forschungsarbeiten (arXiv, PMC, IEEE Xplore), und dient als Referenzmaterial für Fachleute auf dem Gebiet der Satellitenkommunikation, Wellenphysik und EMV (elektromagnetischen Verträglichkeit).

Kernaussage: Die Störung im C-Band in der Slowakei ist multi-quelliger und multi-mechanistischer Natur. Ein einfacher BPF (Bandpassfilter), der hinter dem Feed platziert wird, KANN nicht alle Störformen eliminieren – insbesondere nicht die LNB-Sättigungseffekte noch die Intermodulationsprodukte, die direkt im Inneren des LNB vor der Filterstufe erzeugt werden. Die Lösung erfordert einen systematischen Ansatz auf mehreren Ebenen.

1. EINLEITUNG – DAS C-BAND UND SEINE BESONDERE STELLUNG

1.1 Definition und Frequenzabgrenzung des C-Bandes

Das C-Band stellt im Kontext der Satellitenkommunikation einen der historisch bedeutendsten und stabilsten Frequenznutzer im globalen elektromagnetischen Spektrum dar. Aus der Perspektive der Physik elektromagnetischer Wellen umfasst dieses Band Wellenlängen von ca. 6,25 cm (4.800 MHz) bis 8,8 cm (3.400 MHz).

Im Kontext des Satelliten-FSS (Fixed Satellite Service) werden folgende Teilbänder unterschieden:

- Standard-C-Band (Downlink): 3.400 – 4.200 MHz (verwendet in Europa und Asien)
- Erweitertes C-Band (Extended C-band): 3.400 – 4.800 MHz

- Super-erweitertes C-Band: bis 4.800 MHz (bestimmte regionale Zuteilungen)
- Uplink-C-Band: 5.725 – 6.425 MHz (nicht der terrestrischen Interferenz ausgesetzt)

Der Satellitenempfang im C-Band weist im Vergleich zum Ku-Band (10,7–12,75 GHz) und Ka-Band (17,3–21,2 GHz) einen grundlegenden physikalischen Vorteil auf – minimalen Rain-Fade (Dämpfung durch atmosphärische Niederschläge). Dieses Phänomen ist durch das physikalische Gesetz der Rayleigh-Streuung bedingt, wonach die durch atmosphärische Störungen verursachte Dämpfung mit dem Quadrat der Frequenz zunimmt. Bei 4 GHz ist die durch Niederschläge verursachte Dämpfung rund 100-mal geringer als bei 12 GHz. Genau diese Eigenschaft machte das C-Band historisch zu einem strategischen Band für tropische Regionen und Länder mit hohem Niederschlagsaufkommen.

1.2 Physikalisches Wesen der Satellit-Boden-Verbindung im C-Band

Das C-Band-Satellitensignal aus der geostationären Umlaufbahn (GEO, ~35.786 km) ist durch eine extrem niedrige Leistungsspektraldichte (PSD – Power Spectral Density) gekennzeichnet. Der typische Signalpegel am LNB-Eingang liegt im Bereich:

$$P_{rx} = -90 \text{ bis } -120 \text{ dBm (d. h. } 10^{-9} \text{ bis } 10^{-12} \text{ mW)}$$

Dieser Wert stellt die physikalische Nachweisgrenze dar und wird bestimmt durch:

- Die EIRP des Satelliten (typischerweise 30–50 dBW für das C-Band)
- Die freie Raumausbreitung (Free Space Path Loss, FSPL) über eine Entfernung von ~36.000 km
- Die Gewinne des Antennen- und LNB-Systems

$$FSPL \text{ (dB)} = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(4\pi/c) \approx 196 \text{ dB @ 4 GHz, 36.000 km}$$

Dieser extrem niedrige Signalpegel ist zugleich der Kern des Störproblems: Jede terrestrische Leistungsquelle, die in den LNB-Eingang gelangt, kann um Größenordnungen stärker sein als das gewünschte Satellitensignal.

1.3 Die spezifische Situation in der Slowakei

Die Slowakische Republik liegt im Herzen Europas, wo eine massive Expansion der Mobilfunknetze, des drahtlosen Internets und der C-Band-Dienste stattgefunden hat (und weiterhin stattfindet). Aus regulatorischer Sicht verwaltet das Spektrum das Telekommunikationsamt der Slowakischen Republik (TU SR), das Lizenzen gemäß den europäischen Harmonisierungsentscheidungen des ECC (Electronic Communications Committee) und den BEREK-Verordnungen erteilt.

Das maßgebliche Regulierungsdokument für das C-Band ist die europäische Harmonisierungsentscheidung ECC/DEC/(11)06 über die Nutzung des Bandes 3.400–3.800 MHz für IMT-Dienste (International Mobile Telecommunications), die in direktem Widerspruch zum FSS-Empfang in diesem Teilband steht. In der Slowakei wurden 5G-Lizenzen im 3,5-GHz-Band im Jahr 2020 an alle vier großen Netzbetreiber vergeben.

2. KLASSIFIKATION TERRESTRISCHER STÖRQUELLEN IM C-BAND

Die folgende Analyse stellt eine systematische Klassifikation aller relevanten terrestrischen Störquellen im Bereich 3.400 – 4.800 MHz dar, identifiziert anhand physikalischer Eigenschaften, Frequenzbereich und Interferenzmechanismus.

2.1 5G NR (New Radio) – Bänder n78 und n77

Frequenzbereich: 3.300 – 4.200 MHz (NR-Band n78: 3.300–3.800 MHz, n77: 3.300–4.200 MHz)

5G NR im C-Band stellt derzeit die schwerwiegendste und physikalisch am besten dokumentierte Quelle der Störung des Satellitenempfangs dar. Der technische Standard 3GPP Release 17 definiert zwei wesentliche Frequenzblöcke, die für das C-Band relevant sind: Band n78 (3.300–3.800 MHz) und Band n77 (3.300–4.200 MHz). In der Slowakei erfolgte die Zuteilung im Bereich 3.490–3.510 MHz sowie im Bereich 3.400–3.600 MHz.

Mechanismen der 5G-Interferenz:

a) Direkte In-Band-Interferenz: 5G-Basisstationen (BS) senden im Bereich 3.300–4.200 MHz mit einer EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) von typischerweise 40–80 W pro Antennen-Sektor. Sofern eine 5G-BS auf einer Frequenz arbeitet, die in den Empfangsbereich des LNB (3.400–4.200 MHz) fällt, kommt es zu einer direkten spektralen Kollision. Das 5G-BS-Signal erreicht in einer Entfernung von 1 km am LNB-Eingang Pegel in der Größenordnung von –40 bis –60 dBm – also rund 30 bis 60 dB stärker als das Satellitensignal.

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

b) LNB-Sättigung: Wenn die Eingangsleistung des LNB den 1-dB-Kompressionspunkt (P1dB, typischerweise –10 bis +5 dBm für Standard-LNBs) überschreitet, tritt der Eingangsverstärkertransistor in den nichtlinearen Betrieb ein. In diesem Zustand:

- Der LNB-Gewinn fällt unter den Nennwert (Gain Compression)
- Der Rauschboden (Noise Floor) steigt deutlich an
- Intermodulationsprodukte (IMD) werden erzeugt
- Das Satellitensignal wird vollständig verdeckt, auch wenn es außerhalb der 5G-Frequenz liegt

c) Benachbarter-Kanal-Interferenz (Adjacent Channel Interference): Selbst wenn 5G im Teilband 3.400–3.600 MHz arbeitet und das Satellitensignal bei 3.700–4.200 MHz empfangen wird, können Nebenkeulen-Emissionen der 5G-BS und Intermodulationsprodukte bis in die oberen Bereiche des C-Bandes reichen.

d) Intermodulationsprodukte dritter Ordnung (IMD3): Bei gleichzeitiger Aussendung von zwei oder mehr 5G-Trägern auf den Frequenzen f1 und f2 werden im nichtlinearen Bereich des LNB Intermodulationsprodukte dritter Ordnung auf folgenden Frequenzen erzeugt:

$$IMD3 = 2 \cdot f1 - f2 \text{ und } 2 \cdot f2 - f1$$

Für 5G-Träger bei 3.500 und 3.600 MHz: IMD3 = 3.400 MHz und 3.700 MHz – beide direkt im Satelliten-Empfangsband.

KRITISCHE ERKENNTNIS: LNB-Sättigung und IMD3 werden DIREKT IM INNEREN DES LNB erzeugt, VOR JEDEM EXTERNEN FILTER. Daher KANN ein externer BPF-Filter, der zwischen Feed und LNB platziert wird, diese Effekte NICHT eliminieren. Ein Filter bietet nur dann Schutz, wenn er vor dem Eingangstransistor des LNB positioniert ist – das bedeutet: direkt in den LNB integriert, oder es muss ein spezieller LNA (Low Noise Amplifier) mit ultra-hohem IP3 (Intercept Point) vor dem Standard-LNB eingesetzt werden.

2.2 LTE / 4G – Bänder B42, B43 und benachbarte Bänder

Frequenzbereich: 3.400 – 3.800 MHz (LTE TDD Band 42/43)

LTE TDD Band 42 (3.400–3.600 MHz) und Band 43 (3.600–3.800 MHz) werden für festes drahtloses Internet (FWA – Fixed Wireless Access) in europäischen Ländern eingesetzt. In der Slowakei nutzen Betreiber diese

Frequenzen für festes drahtloses Internet in Gemeinden ohne Glasfaserinfrastruktur.

Die physikalischen Auswirkungen sind identisch mit denen von 5G, jedoch mit geringerer EIRP und größerer Kanalbandbreite (bis zu 100 MHz Kanalbandbreite). Eine Besonderheit von LTE TDD ist die zeitliche Spektrumsaufteilung (TDD – Time Division Duplex), bei der sich Uplink und Downlink periodisch im Millisekundentakt abwechseln. Dies verursacht periodische Impulsinterferenz, die sich am Satellitenempfänger als Impulsrauschen manifestiert.

2.3 WiMAX und proprietäres drahtloses Internet

Frequenzbereich: 3.400 – 3.700 MHz

Der Standard IEEE 802.16 (WiMAX) und proprietäre PTMP-Systeme (Point-to-Multipoint) für festes drahtloses Internet sind in europäischen Ländern weit verbreitet. Viele ISPs (Internet Service Provider) in der Slowakei betreiben nach wie vor PTMP-Systeme (Ubiquiti AirMax, Mimosa, IgniteNet u. a.) im Band 3.400–3.700 MHz. Diese Systeme sind älter als 5G und verfügen häufig nicht über standardisierte Emissionsmasken gemäß den aktuellen ETSI-Normen.

Im Unterschied zu Mobilfunknetzen richten PTMP-Antennen ihre Strahlung häufig horizontal auf Sektoren aus, was zu direkter Line-of-Sight-Interferenz (LOS) mit der Parabolantenne des Satellitenempfängers führen kann, sofern sich der Satellit in der azimuthalen Richtung des PTMP-Sektors befindet.

2.4 Terrestrische Richtfunkstrecken (Microwave Backhaul)

Frequenzbereich: 3.600 – 4.200 MHz und 4.400 – 5.000 MHz

Terrestrische Richtfunk-Punkt-zu-Punkt-Verbindungen (PTP) für das Backhaul von Mobilfunkbetreibern und ISPs sind in vielen Teilbändern im Bereich 3,6–5 GHz zugelassen. Diese Verbindungen verwenden hochdirektive Antennen (Gewinn 30–40 dBi) und arbeiten mit einer EIRP von bis zu 50 dBW.

Das Interferenzrisiko dieser Strecken ist unter normalen Umständen aufgrund ihrer Richtwirkung gering, kann jedoch in folgenden Situationen auftreten:

- Die Satellitenantenne befindet sich in der Hauptkeule (Main Lobe) der Richtfunkstrecke
- Beugung um Gebäude oder Erdoberflächen leitet einen Teil des Signals zur Satellitenantenne
- Mehrwegeausbreitung durch Reflexion an Gebäuden oder feuchten Oberflächen

Das Frequenzband 4.400–4.800 MHz ist für das erweiterte C-Band (Extended C-Band) von besonderer Relevanz, das von einigen Satelliten (z. B. Intelsat, SES) und in Regionen mit abweichendem Frequenzplan genutzt wird.

2.5 Radarsysteme

Frequenzbereich: 3.300 – 3.500 MHz (S-Band) und 4.200 – 4.400 MHz (C-Band-Radar)

Meteorologische und Luftfahrt-Radarsysteme arbeiten in der Nähe des Satelliten-C-Bandes. In der Slowakei sind meteorologische Radaranlagen (SHMÚ) und Flugsicherungsradaranlagen (LPS SR) in Betrieb. Diese Systeme befinden sich typischerweise nicht in dicht besiedelten Wohngebieten, ihre hochenergetischen Impulsemissionen (Spitzenleistung bis MW) können jedoch in geringer Entfernung zu schwerwiegenden Impulsinterferenzen führen – oder sogar zu physischen Schäden an der Eingangsstufe des LNB.

Hinweis: Radarinterferenz äußert sich als kurze, periodische Impulse und nicht als kontinuierliche Störung. Im Spektrumanalysator ist sie als periodische Spitzen sichtbar, deren Wiederholrate der Radarrotationsperiode entspricht (typischerweise 5–10 Sekunden).

2.6 Wi-Fi im C-Band (IEEE 802.11a/n/ac/ax)

Frequenzbereich: 5.150 – 5.850 MHz (5-GHz-Wi-Fi)

Das klassische 5-GHz-Wi-Fi-Band (5.150–5.850 MHz) liegt außerhalb der engen Definition des FSS-C-Bandes (3.400–4.200 MHz), sodass eine direkte In-Band-Interferenz von Wi-Fi mit dem klassischen C-Band aus physikalischen Gründen ausgeschlossen ist.

Wi-Fi kann auf indirektem Weg Störungen verursachen:

- Zweite Oberschwingungen von 2,4-GHz-Wi-Fi können in den Bereich ~4.800 MHz (erweitertes C-Band) fallen
- Dritte Oberschwingungen von 2,4-GHz-Wi-Fi fallen bei ~7,2 GHz – außerhalb des C-Bandes
- Wi-Fi-Router mit fehlerhaftem HF-Design können Breitbandrauschen erzeugen, das bis ins C-Band reicht

Aus wissenschaftlicher Sicht ist der direkte Einfluss von Wi-Fi auf den C-Band-Satellitenempfang minimal – signifikante Interferenzen treten nur in Extremfällen auf (defektes Gerät in unmittelbarer Nähe der Satellitenantenne).

2.7 Terrestrisches Internet im C-Band – FWA im 3,5-GHz-Bereich

Frequenzbereich: 3.400 – 3.800 MHz

Fester Drahtloszugang (FWA) im 3,5-GHz-Band ist derzeit eine der schwerwiegendsten Ursachen für C-Band-Interferenz in der Slowakei und den Nachbarländern. ISPs (mehr als 50 in der Slowakei) betreiben sektorale Basisstationen im Band 3,4–3,7 GHz mit Sendeleistungen von 1–10 W (EIRP 40–50 dBm).

Die physikalischen Mechanismen sind identisch mit denen von 5G und LTE (siehe Abschnitte 2.1 und 2.2), jedoch mit längerer Betriebshistorie und weniger vorhersehbarer spektraler Reinheit (ältere proprietäre Systeme ohne strenge Emissionsmasken).

2.8 DECT, ISM-Geräte und weitere lokale Quellen

Frequenzbereich: 5,8-GHz-ISM (5.725–5.875 MHz) – Oberschwingungsinterferenz

Geräte im 5,8-GHz-ISM-Band (schnurlose Telefone, Babyphones, bestimmte Wi-Fi-Geräte) beeinflussen das C-Band indirekt durch Oberschwingungsemissionen. Darüber hinaus können lokale Quellen wie:

- Elektromotoren und Schaltnetzteile (SMPS) – Breitbandrauschen
- LED- und Leuchtstofflampen mit fehlerhaftem EMV-Design
- Ladegeräte für Elektrofahrzeuge (EV-Ladegeräte) – breitbandige Impulsinterferenz
- Industrieanlagen (FU-Antriebe, CNC-Maschinen)

...zur Erhöhung des System-Rauschbodens beitragen, sind jedoch keine direkten In-Band-Störer im definierten Sinne.

3. PHYSIKALISCHE INTERFERENZMECHANISMEN – ANALYSE

3.1 LNB-Sättigung (Gain Compression)

Die LNB-Sättigung ist der physikalisch schwerwiegendste und häufigste Interferenz-mechanismus im C-Band. Der Eingangsverstärkertransistor des LNB (typischerweise ein HEMT – High Electron Mobility Transistor) besitzt einen definierten 1-dB-Kompressions-punkt (P1dB). Für Standard-C-Band-LNBs liegt P1dB typischerweise im Bereich von –10 bis +5 dBm am Eingang.

$$P_{\text{sat}}(\text{dBm}) = P_{1\text{dB_Eingang}} - G_{\text{LNB}} \quad \text{Für ein LNB mit einem Gewinn von 60 dB und } P_{1\text{dB}} = +5 \text{ dBm: } P_{\text{sat_Eingang}} = -55 \text{ dBm}$$

Eine 5G-BS in 500 m Entfernung erzeugt am LNB-Eingang typischerweise –40 dBm – also 15 dB oberhalb des Sättigungspunkts. Die Folgen sind:

- Gain Compression: der effektive LNB-Gewinn sinkt um 1 dB bis 10 dB
- Rauschzahlverschlechterung: die Rauschzahl steigt um mehrere dB
- Spektrales Nachschwingen (Spectral Regrowth): Entstehung neuer Spektralanteile außerhalb des ursprünglichen 5G-Signals

KRITISCHE ERKENNTNIS: Die LNB-Sättigung tritt AN DER EINGANGSSTUFE auf – also VOR dem Anschlusspunkt eines externen BPF-Filters (Feed–LNB-Schnittstelle). Der BPF-Filter KANN daher die Sättigung NICHT verhindern, wenn er HINTER dem Eingangs-HEMT platziert wird. Die einzige Lösung: Einsatz eines LNB mit integriertem Vorfilter, der VOR der ersten Verstärkungsstufe platziert ist.

3.2 Intermodulationsprodukte (IMD – Intermodulation Distortion)

Das nichtlineare Verhalten des LNB im Sättigungsbereich erzeugt Intermodulations-produkte. Für zwei Eingangssignale auf den Frequenzen f1 und f2 entstehen folgende Produkte:

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

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

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

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

Produkte dritter Ordnung (IMD3) sind physikalisch am bedeutendsten, da sie nahe den Grundfrequenzen liegen und von diesen nur um die Differenz (f2–f1) abweichen. Für 5G-Träger bei 3.500 und 3.600 MHz: IMD3 = 3.400 MHz und 3.700 MHz – beide direkt im C-Band.

3.3 Anhebung des Rauschbodens (Noise Floor Elevation)

Neben Sättigung und IMD kann terrestrische Interferenz den Gesamtsystemrausch erhöhen. Das Phänomen wird beschrieben als:

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

wobei k die Boltzmann-Konstante, T die Temperatur (290 K) und B die Bandbreite ist. Dies führt zu einer Verschlechterung des C/N-Verhältnisses, die sich als erhöhte BER (Bit Error Rate) bei digitalen Signalen (DVB-S2), längeren Einrastzeiten oder vollständigem Verlust des MER (Modulation Error Ratio) äußert.

3.4 Empfängerdesensibilisierung (Receiver Desensitisation)

Desensibilisierung tritt auf, wenn ein starkes terrestrisches Signal (z. B. 5G) die Empfindlichkeit des LNB/Empfängers gegenüber schwächeren Signalen (Satellitensignalen) auch außerhalb seiner eigenen Frequenz verringert. Das Phänomen ist durch die Nichtlinearität aktiver Bauelemente bedingt und wird durch den Parameter IP3 (Intercept Point dritter Ordnung) quantifiziert:

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

Für Standard-LNBs liegt IIP3 typischerweise bei +5 bis +15 dBm. Ein starkes terrestrisches Signal überschreitet diesen Wert und das System tritt in den nichtlinearen Betriebsbereich ein.

3.5 Phasenrauschverschlechterung (Phase Noise Degradation)

Starke terrestrische Signale können die Stabilität des Lokaloszillators (LO) im LNB durch das Phänomen der Rauscheinspeisung (Noise Injection) beeinträchtigen. LO-Phasenrauschen äußert sich als breitbandige Verschmierung (Phase-Noise-Sockel) um jede Trägerfrequenz, was die Phasenreinheit des herunterkonvertierten Satellitensignals verschlechtert. Bei DVB-S2 mit Modulationen höherer Ordnung (16APSK, 32APSK) ist dies besonders kritisch.

4. INTERFERENZ-FREQUENZKARTE – SLOWAKEI

Die folgende Tabelle fasst alle identifizierten Störquellen mit ihren Frequenzbereichen, Interferenztypen und geschätzter Schweregrad unter den Bedingungen der Slowakei zusammen.

Störquelle	Frequenzbereich	Interferenzmechanismus	Schweregrad (SK)
5G NR (n78/n77)	3.300–4.200 MHz	Sättigung, IMD3	■ Kritisch
LTE TDD B42/43	3.400–3.800 MHz	Sättigung, IMD	■ Hoch
FWA / WiMAX PTMP	3.400–3.700 MHz	Sättigung, IMD3	■ Hoch
Richtfunk-PTP-Strecken	3.600–4.200 MHz	Rauschboden, IMD	▲ Mittel
Meteorolog. Radare	3.300–3.500 MHz	Sättigung, LOS	▲ Gering–Mittel
Luftfahrt-Radare	4.200–4.400 MHz	LOS, Beugung	▲ Gering–Mittel
Backhaul-Erdstrecken	4.400–5.000 MHz	LOS, direktiv	■ Gering (ext. C)
Wi-Fi 2,4-GHz-Oberschwing.	~4.800 MHz	2. Oberschw. ~4,8 GHz	■ Minimal
ISM / Schaltnetzteile	Breitband	Rauschboden	■ Minimal

5. KRITISCHE BEWERTUNG DER NORSAT-BPF-FILTER

5.1 Produktbeschreibung und deklarierte Eigenschaften

Norsat International ist ein kanadischer Hersteller von Satellitenkomponenten mit langjähriger Reputation. Die C-Band-BPF-Produktreihe (Bandpassfilter) wurde primär zur Eliminierung von 5G-Interferenz vor dem LNB-Eingang konzipiert. Die Produktlinien 3000-BPF und BPF-C sind als Lösung für von 5G-Interferenz betroffene Betreiber positioniert.

Norsat deklariert für seine BPF-Filter folgende Parameter (verschiedene Modelle):

- Durchlassband (Passband): 3.625–4.200 MHz oder 3.700–4.200 MHz (je nach Modell)
- Sperrdämpfung (Stopband Rejection): 40–60 dB im 5G-Band (3.300–3.600 MHz)
- Einfügedämpfung (Insertion Loss): typischerweise 0,5–1 dB im Durchlassband
- Übergangsband (Guard Band): < 20 MHz (Modell BPF-C-6)

5.2 Technische Einschränkungen eines externen BPF-Filters

Auf der Grundlage der physikalischen Analyse lassen sich folgende grundlegende Einschränkungen eines externen BPF-Filters (zwischen Feedhorn und LNB-Eingang platziert) identifizieren:

Einschränkung 1: Sättigung tritt VOR dem Filter auf

Der externe BPF-Filter ist physikalisch VOR dem LNB-Eingang platziert – jedoch hinter dem Feedhorn. Das Signal durchläuft also den Weg: Satellit → Parabolantenne → Feedhorn → (BPF-Filter) → LNB-Eingang. Der Eingangsverstärker des LNB befindet sich jedoch DIREKT HINTER dem LNB-Eingangsanschluss. Der Filter schützt das LNB also vor In-Band-5G-Signalen im Sperrbereich, ABER wenn:

- Das 5G-Signal im Durchlassband des Filters liegt (z. B. 5G bei 3.700 MHz und Filter ab 3.700 MHz durchlässig)
- Die Gesamtleistung aller Signale (Satellit + 5G + Rauschen) P1dB des LNB überschreitet
- Das 5G-Signal durch nichtlineare Effekte im Koaxialkabel vor dem Filter Produkte im Durchlassband erzeugt

...tritt Sättigung auch mit Filter auf, und der Filter bietet keinen Schutz.

Einschränkung 2: Falsch spezifizierte Grenzfrequenz

In der Slowakei arbeiten die 5G-Netze der Betreiber im Bereich 3.490–3.600 MHz. Wenn die BPF-Durchlassgrenze bei 3.600 MHz oder höher liegt, kann ein Teil des 5G-Spektrums in das LNB gelangen. Das Filtermodell muss präzise entsprechend dem tatsächlichen Frequenzplan der lokalen 5G-Betreiber ausgewählt werden.

Einschränkung 3: Das Nah-Fern-Problem (Near-Far Problem)

Befindet sich die 5G-BS in einer Entfernung von weniger als ca. 200–500 m, kann die Signalstärke so hoch sein, dass selbst eine Sperrdämpfung von 60 dB nicht ausreicht. Für ein 5G-Signal von –40 dBm am Eingang und 60 dB Dämpfung: gefiltertes Signal = –100 dBm – immer noch auf dem Niveau des Satellitensignals oder darüber.

Einschränkung 4: LNB-Nichtlinearität durch Out-of-Band-Signale

Selbst wenn das 5G-Signal nicht im Durchlassband des Filters liegt, ist seine Leistung vor dem Filter ausreichend, um durch parasitäre Kopplung (parasitäre kapazitive und induktive Kopplung) in der mechanischen Feedhorn–Filter–LNB-Einheit außerhalb des elektrischen Signalpfades einzudringen. Dies ist ohne perfekte Abschirmung physikalisch nicht zu unterdrücken.

DIAGNOSE IHRES PROBLEMS: Die Tatsache, dass der Norsat-BPF keine Verbesserung gebracht hat, deutet auf eines oder mehrere der folgenden Phänomene hin: (1) Die Störquelle sind 5G/LTE-Träger

im DURCHLASSBAND Ihres Filters (d. h. oberhalb 3.700 MHz), nicht nur im Sperrbereich. (2) LNB-Sättigung tritt durch Out-of-Band-Signale auf, deren Leistung P1dB überschreitet. (3) Die Interferenz gelangt über das HF-Kabel oder eine mechanische Öffnung (nicht über das Feedhorn). (4) Es gibt eine In-Band-Störquelle, die ein BPF nicht eliminieren kann (z. B. eine terrestrische Richtfunkstrecke bei 3,8 GHz).

5.3 Empfohlene Lösungen auf Basis der wissenschaftlichen Analyse

- 1. Integriertes LNB mit Vorfilter:** Ersatz des Standard-LNB durch ein Modell mit integriertem Bandpass-Vorfilter, der VOR dem Eingangs-HEMT-Transistor platziert ist (z. B. Norsat 3200-BPF-5 oder Norsat 3100N-BPF-5). Damit wird das Sättigungsproblem physikalisch eliminiert.
- 2. Spektralanalyse der lokalen Interferenz:** Vor dem Kauf weiterer Filter ist es unerlässlich, die genauen Frequenzen lokaler Störer mithilfe eines Spektrumanalysators zu ermitteln (z. B. RTL-SDR mit LNA oder professionelles Gerät). Nur so kann der korrekte Filter ausgewählt werden.
- 3. Geometrische Maßnahmen:** Eine Änderung von Azimut und Elevation der Antenne kann in manchen Fällen das Line-of-Sight-Problem mit einer lokalen 5G-BTS eliminieren.
- 4. Abschirmung des Feedhorns:** Anbringung einer HF-Abschirmung um die Feedhorn-LNB-Einheit zur Minimierung parasitärer kapazitiver und induktiver Kopplung.
- 5. Koordination mit dem TU SR:** Wenn die Störung durch nicht lizenzierte Betriebsweise oder Frequenzplanüberschneidung verursacht wird, kann eine Meldung beim Telekommunikationsamt der Slowakischen Republik (TU SR) zu einer regulatorischen Lösung führen.

6. WELLENPHYSIK DER INTERFERENZ – AUSBREITUNGSMODELLE

6.1 Freie Raumausbreitung (Free Space Propagation)

Das grundlegende Gesetz der freien Raumausbreitung beschreibt die Abnahme der Signalintensität mit der Entfernung:

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

wobei d die Entfernung (m), f die Frequenz (Hz) und c die Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^8$ m/s) ist. Für eine 5G-BTS bei 3,5 GHz:

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

6.2 Mehrwegeeffekte (Multipath)

Im städtischen Umfeld der Slowakei (Städte, Wohnsiedlungen) erreichen 5G-Signale die Satellitenantenne nicht nur auf direktem LOS-Weg, sondern auch durch Reflexionen an Gebäuden, Fahrzeugen und der Erdoberfläche. Diese Mehrwegekopien können unterschiedliche Phasen und Amplituden aufweisen, was zu Folgendem führt:

- Frequenzselektivem Schwund (Frequency Selective Fading) – verschiedene Frequenzen im C-Band sind unterschiedlich stark betroffen
- Konstruktiver und destruktiver Interferenz – bestimmte Träger im C-Band sind stärker betroffen als andere
- Polarisationsstreuung – eintreffende terrestrische Signale haben unterschiedliche Polarisierungen und können auch die Kreuzpolarisationskanäle beeinträchtigen

6.3 Beugung (Knife-Edge-Diffraction)

Das Signal einer 5G-BTS kann physikalische Hindernisse (Gebäude, Erhebungen) durch Beugung überwinden. Der Fresnel-Zonenradius für 3,5 GHz und eine Entfernung von 1 km:

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

Das bedeutet, dass Hindernisse kleiner als ca. 9 m das Signal auf dieser Entfernung physikalisch nicht blockieren – das Signal beugt sich um sie herum. Für eine Satellitenantenne auf einem Hausdach erklärt dies, warum auch scheinbar gut abgeschirmte Gebäude die 5G-Interferenz nicht zwingend eliminieren.

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

7.1 Hauptschlussfolgerungen

Auf der Grundlage der umfassenden wissenschaftlichen Analyse lassen sich folgende Schlussfolgerungen formulieren:

1. Der C-Band-Satellitenempfang (3.400–4.800 MHz) ist unter den Bedingungen der Slowakei einer multi-quelligen Störung durch 5G, LTE, FWA und Richtfunkstrecken ausgesetzt.
2. Die physikalischen Interferenzmechanismen sind vielfältig und überlappen sich: LNB-Sättigung, Intermodulationsprodukte IMD3/IMD5, Rauschanhebung und Desensitisierung.
3. Externe BPF-Filter (einschließlich Norsat) weisen physikalische Einschränkungen auf und eliminieren weder LNB-Sättigung noch IMD, die vor dem Filterpunkt erzeugt werden.
4. Eine wirksame Entstörung erfordert den Einsatz eines LNB mit internem Vorfilter, eine Spektralanalyse der lokalen Interferenz sowie einen kombinierten technischen Ansatz.
5. Für Veröffentlichungszwecke auf dem Portal dxsatcs.com wurde diese Analyse auf der Grundlage von ITU-R, 3GPP und peer-reviewed wissenschaftlichen Quellen erarbeitet und kann als wissenschaftlich fundierte Referenz dienen.

Autor: Roman Dávid | www.dxsatcs.com | Analytische Unterstützung: Claude (Anthropic) | März 2026

Quellen: 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