International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

ОПТИМИЗАЦИЯ НА РАДИО КАНАЛА В WI-FI КОМУНИКАЦИИТЕ PTP 5 GHZ НА ГОЛЯМО РАЗСТОЯНИЕ

Иван Златев[1]

[1]*Технически Университет, Габрово, България*
**кореспондиращ автор: idzlatev78@gmail.com*

RADIO CHANNEL OPTIMIZATION IN 5 GHZ WI-FI POINT-TO-POINT (PTP) COMMUNICATIONS OVER LONG DISTANCES

Ivan Zlatev [1],

[1] *Technical University of Gabrovo, Bulgaria*
**Corresponding author: idzlatev78@gmail.com*

Abstract

The present report investigates the technical and regulatory factors that determine the performance, quality, and stability of Point-to-Point (PtP) radio links operating in the 5 GHz frequency band and intended for long-distance data transmission over distances exceeding 5–10 km. Particular attention is given to the fundamental physical mechanisms governing radio-wave propagation, including free-space path loss, the Fresnel zone, and radio link budget analysis.

The study also examines the applicable regulatory constraints governing radiated power levels within the European Union, as well as practical approaches to radio-channel optimization. These include the selection of an appropriate operating frequency and channel bandwidth, the implementation of adaptive modulation and coding techniques, the use of high-gain directional antennas, polarization-based interference mitigation, and interference management through Dynamic Frequency Selection (DFS).

A representative radio link budget is calculated for a 10 km transmission path in order to evaluate the main parameters affecting link performance and reliability. Based on the theoretical analysis and the calculated results, practical recommendations are formulated for the design and deployment of reliable long-range Wi-Fi Point-to-Point links.

Keywords: Wi-Fi, 5 GHz, Point-to-Point (PtP), radio channel, optimization, radio link budget, Fresnel zone, Dynamic Frequency Selection (DFS)

ВЪВЕДЕНИЕ

Радиовръзките от тип точка–точка (PtP) в диапазона 5 GHz са едно от най-разпространените решения за безжично пренасяне на данни на средни и големи разстояния – от свързване на два офиса в рамките на населено място, през магистрален (backhaul) пренос за интернет доставчици, до промишлени, видеонаблюдателни и резервни (backup) комуникационни канали. Тяхната популярност се дължи на съчетанието от сравнително ниска цена на оборудването, бърз монтаж без необходимост от изкопни работи и кабелна инфраструктура, license-exempt (нелицензиран) режим на работа в голяма част от честотния обхват и достатъчна ширина на канала за пренос на десетки до над сто мегабита в секунда.

За разлика от точка–многоточка (PtMP) мрежите, при PtP връзките цялата налична честотна лента и цялото радиовреме се използват от една двойка устройства, което теоретично позволява макси-

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

мална ефективност. На практика обаче постигнатата пропускателна способност, стабилност и обхват зависят от множество взаимосвързани фактора: топография на терена и наличие на пряка видимост (LOS), степен на запушване на зоната на Френел, ниво на околен шум и интерференция от съседни системи, избор на канал и негова ширина, вид и позициониране на антените, както и настройките на радиопротокола на устройствата.

Целта на настоящия доклад е да систематизира основните инженерни принципи за оптимизация на радиоканала при дълги линкове Wi-Fi PtP връзки в обхвата 5 GHz и да предложи практическа методика за проектиране, включваща изчисление на бюджет на радиолинията и конкретни препоръки за конфигурация на оборудването.

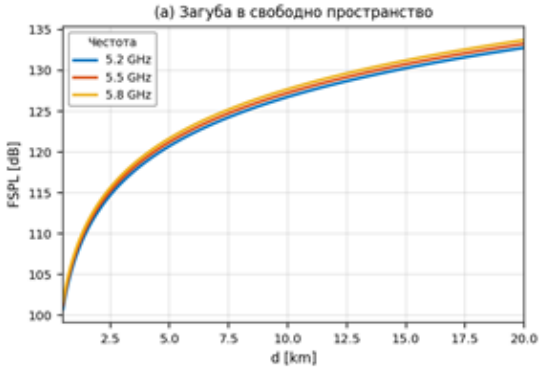
1. ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО НА РАДИОВЪЛНИТЕ НА 5 GHZ.

1.1. Загуба при разпространение в свободно пространство (fspl)

Основният физически фактор, ограничаващ обхвата на всяка радиовръзка, е загубата на мощност при разпространение на електромагнитната вълна в свободното пространство (Free Space Path Loss, FSPL). Тя нараства пропорционално на квадрата на разстоянието и на квадрата на честотата и се изчислява по формулата:

$$\text{FSPL [dB]} = 20\cdot\log_{10}(d[\text{km}]) + 20\cdot\log_{10}(f[\text{MHz}]) + 32{,}44 \quad (1)$$

където d е разстоянието между предавателя и приемника в километри, а f е работната честота в мегахерци. При еднакво разстояние преходът от 2,4 GHz към 5 GHz увеличава загубата с около 6–7 dB, а горната част на обхвата (5,8 GHz) добавя допълнителна загуба спрямо долната (5,2 GHz) – фигура 1.



Фиг. 1. *Симулация на FSPL спрямо разстоянието за 5,2/5,5/5,8 GHz*

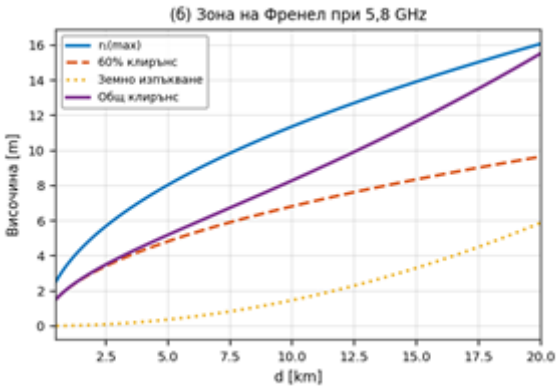
1.2. Зона на Френел и релефа на трасето

Наличието на оптична видимост между двете антени е необходимост, но не и достатъчно условие за качествена връзка. Радиовълната се разпространява в обем, наречен първа зона на Френел“– елипсоид около правата линия между предавателя и приемника, в който запушването от препятствия (сгради, дървета, релеф) внася допълнително дифракционно затихване. Радиусът на първата зона на Френел в произволна точка от трасето и максималният ѝ радиус (в средата на линията) се определят от:

$$r_1 = \sqrt{(\lambda\cdot d_1\cdot d_2 / (d_1 + d_2))}$$

$$r_1(max) = ½ \cdot \sqrt{(\lambda\cdot d)} \quad (2)$$

където λ е дължината на вълната, d е общата дължина на трасето, а d_1 и d_2 са разстоянията от разглежданата точка до двата края на линията. Прието инженерно правило е най-малко 60% от радиуса на първата зона на Френел да остане свободна от препятствия по цялата дължина на трасето. При трасета над 7–10 km допълнително трябва да се отчита и кривината на Земята (земно изпъкване), обичайно чрез модела с ефективен радиус 4/3 от реалния радиус на Земята, за да се определи минималната височина на мачтите (Фигура 2).



Фиг. 2. *Радиус на зоната на Френел, 60% клирънс и земно изпъкване при 5,8 GHz.*

1.3. Енергиен баланс на радиолинията (Link Budget)

Енергийният баланс на радиолинията свързва всички енергийни параметри на връзката и позволява да се оцени предварително дали планираната конфигурация ще осигури необходимия запас за надеждна работа. Основните величини са еквивалентната изотропно излъчена мощност (EIRP), приетата мощност на сигнала и маржът на затихване (fade margin):

$$EIRP\ [dBm] = P(tx) - L(кабел,tx) + G(ант,tx) \quad (3)$$

$$P(rx)\ [dBm] = EIRP - FSPL - L(допълн.) + G(ант,rx) - L(кабел,rx)$$

$$Марж\ на\ затихване\ [dB] = P(rx) - Чувствителност\ на\ приемника \quad (4)$$

Препоръчителната стойност на маржа на затихване зависи от средата: за трасета с пълна пряка видимост между покриви обичайно се приемат около 10 dB, при частична растителност по трасето – 12–20 dB, а при по-неблагоприятни условия (градска среда, сезонна растителност, възможни атмосферни явления) – до 20–25 dB. По-големият марж осигурява устойчивост на връзката при дъжд, мъгла, температурни инверсии (промяна на коефициента на рефракция k и временно „огъване“ на трасето) и сезонното израстване на растителността.

2. Регулаторна рамка за използване на 5 GHz обхвата

Използването на 5 GHz обхвата в Европейския съюз (и в частност в България, съгласно Националния план за разпределение на радиочестотния спектър) се регулира от хармонизирания стандарт ETSI EN 301 893 и свързаните решения на Европейската комисия за радиочестотния спектър (напр. Commission Implementing Decision (EU) 2022/179). Обхватът е разделен на подленти с различни ограничения за максимална излъчена мощност (EIRP) и изискване за динамичен избор на честота (Dynamic Frequency Selection, DFS), чиято цел е да предпази от смущения първичните ползватели на спектъра – метеорологични и авиационни радари.

Таблица 1. регулаторна рамка

Честотен обхват	Максимално EIRP	DFS / Особености	Типично приложение
5150–5350 MHz	23 dBm (200 mW)	Само за вътрешна употреба; DFS над 5250 MHz	Вътрешни WLAN мрежи
5470–5725 MHz	30 dBm (1 W)	Задължителен DFS и TPC	Външни PtP/PtMP връзки – най-често използван за далекобойни линкове
5725–5875 MHz (ISM)	Варира по държави	Без DFS в част от юрисдикциите; по-тесен и по-натоварен обхват	Далекобойни връзки при недостиг на канали в 5470–5725 MHz

За проектиране на надежден дълъг линк PtP връзка обхватът от 5470–5725 MHz обичайно се предпочита поради по-високото допустимо EIRP (30 dBm/1 W), но изисква устройства с коректно реализиран DFS механизъм, тъй като засичане на радарен сигнал предизвиква задължителна смяна на канала и временно прекъсване на връзката. Преди инсталация се препоръчва проверка на актуалните национални изисквания пред съответния регулаторен орган (в България – Комисията за регулиране на съобщенията),

тъй като конкретните гранични стойности и списъкът на разрешените канали периодично се актуализират.

3. ФАКТОРИ, ВЛИЯЕЩИ НА КАЧЕСТВОТО НА РАДИОКАНАЛА

3.1. Избор на канал

Преди монтаж на линка на дълго разстояние е задължително извършването на спектрален анализ на планираната локация, за да се идентифицират заети и силно натоварени канали от съседни системи. Каналите, изискващи DFS, осигуряват по-нисък фонов шум (по-рядко се използват от други оператори поради риска от радарни събития), но внасят риск от принудителна смяна на честотата. Практика при критични далекобойни връзки е използването на нерегулярни DFS канали в комбинация с резервен (fallback) канал, зададен предварително в конфигурацията на радиото.

3.1. Широчина на канала

Ширината на радиоканала е компромис между пропускателна способност и обхват. По-широк канал (40, 80 или 160 MHz) увеличава теоретичната скорост на пренос, но пропорционално увеличава и шумовата лента на приемника, което намалява неговата чувствителност – правилото на практика е около 3 dB загуба на чувствителност при всяко удвояване на ширината на канала. За далекобойни връзки се препоръчват по-тесни канали (10 или 20 MHz), които осигуряват по-голям марж на затихване при същата предавателна мощност (Фигура 3).

3.2. Широчина на канала

При наличие на отразяващи повърхности (водни площи, метални покриви, съседни сгради) част от сигнала достига приемника по няколко пътя с различна фаза, което води до многолъчево затихване (multipath fading) и намаляване на ефективното отношение сигнал/шум. Използването на тясно насочени антени с високо усилване значително намалява приемането на отразени сигнали извън главния лъч. Изборът на поляризация (вертикална, хоризонтална или кръстосана) допълнително позволява намаляване на взаимните смущения между няколко съседни линка, работещи на близки честоти от една и съща локация (честотно/поляризационно повторно използване).

3.3. Атмосферно влияние и сезонни фактори

За разлика от по-високите микровълнови честоти, при 5 GHz затихването от дъжд и мъгла е сравнително малко и рядко е определящ фактор за трасета до няколко десетки километра. По-съществено влияние оказват промените в коефициента на рефракция на атмосферата (к-фактор), които при определени температурни инверсии могат временно да „изкривят“ ефективната права линия на трасето и да намалят клирънса на зоната на Френел, както и сезонното обрастване с растителност по трасето, което трябва да се отчита с допълнителен запас в маржа на затихване.

4. МЕТОДИ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ НА РАДИОКАНАЛА

4.1. Избор и позициониране на антени

Използването на насочени антени (параболични, grid или panel) с усилване от порядъка на 24–34 dBi е основен инструмент за компенсиране на високата загуба при разпространение на голямо разстояние. По-високото усилване обаче стеснява диаграмата на насочване, което изисква прецизно механично центроване (по азимут и елевация) и стабилна мачтова конструкция – отклонение от само няколко градуса при антена с 34 dBi усилване може да доведе до загуба от няколко децибела на всеки край на връзката. Мачтите трябва да осигуряват височина, гарантираща клирънс на зоната на Френел (виж т. 1.2) над всички препятствия по трасето, включително прогнозния растеж на растителността.

4.2. Адаптивна модулация и кодиране (Adaptive MCS)

Съвременните 5 GHz радиостанции автоматично адаптират схемата на модулация и кодиране (Modulation and Coding Scheme, MCS) според текущото отношение сигнал/шум – от устойчивата BPSK 1/2 при слаб сигнал до 256-QAM при отличен сигнал. Инженерна грешка е проектирането на връзката спрямо пиковата (най-високата) MCS стойност; правилният подход е бюджетът на линията да се изчисли спрямо чувствителността, необходима за минимално приемливата за приложението MCS стойност (напр. 64-QAM 2/3 за стабилен видеонаблюдателен трафик), с достатъчен марж на затихване над нея така, че временни влошавания на трасето да не водят до пълно прекъсване на връзката.

4.3. Управление на предавателната мощност

На къси трасета прекомерната предавателна мощност може да доведе до насищане (overload) на входа на приемника и до влошаване на реалната чувствителност, вместо до подобряване на връзката – препоръчва се употреба на автоматично регулиране на мощността (Transmit Power Control, TPC) до нивото, необходимо за постигане на целевия марж на затихване. Тъй като регулаторното ограничение засяга EIRP (сумата от предавателна мощност и усилване на антената), а не самите поотделно, при използване на антена с по-високо усилване предавателната мощност следва да се намали пропорционално. Важно е да се отбележи, че тъй като лимитът важи само за излъчената (предавателна) страна, използването на антена с максимално практично усилване на двата края – при съответно занижена мощност на предавателя за спазване на EIRP – едновременно повишава и приемното усилване, което нетно подобрява приетата мощност и маржа на затихване без нарушаване на регулацията.

4.4. Протокол за достъп до средата

Стандартният механизъм за достъп CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), заложен в 802.11, разчита на кратки времена за изчакване на потвърждения (ACK), които стават критично ограничение при трасета над няколко километра поради нарастващото време за разпространение на сигнала – това води до рязко намаляване на реалната пропускателна способност, дори при отличен бюджет на линията. По тази причина повечето производители на специализирано PtP оборудване заменят стандартния CSMA/CA механизъм със собствени TDMA-базирани протоколи (Time Division Multiple Access) с изрично конфигуриран параметър „разстояние на връзката“, които елиминират колизиите и позволяват линейно поддържане на пропускателната способност дори на трасета над 30–50 km.

4.5. Допълнителни хардуерни и организационни мерки

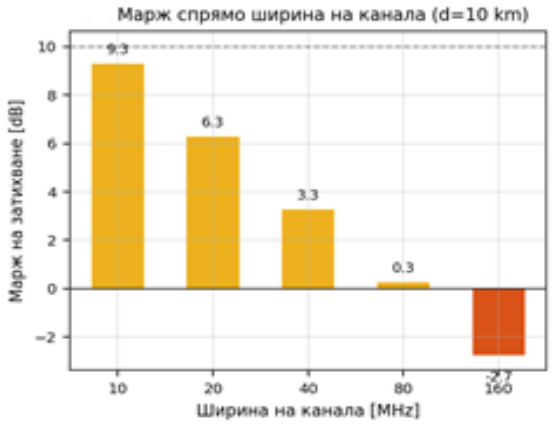
- Използване на нискозагубни коаксиални кабели и конектори с високо качество, особено при разстояние между радиото и антената над няколко метра.
- Монтаж на мълниезащита и правилно заземяване на мачтовата инфраструктура за защита на оборудването.
- Синхронизация по GPS на съседни PtP/PtMP радиостанции на една локация с цел избягване на взаимна интерференция (self-interference) между колокирани сектори.
- Периодичен спектрален мониторинг и актуализация на фърмуера на устройствата за отразяване на промени в регулацията и подобрения в алгоритмите за адаптивна модулация.
- Сезонна проверка на трасето за нова растителност или строителство, засягащи зоната на Френел.

5. Примерено изчислена радиолиния за трасе от 10 km

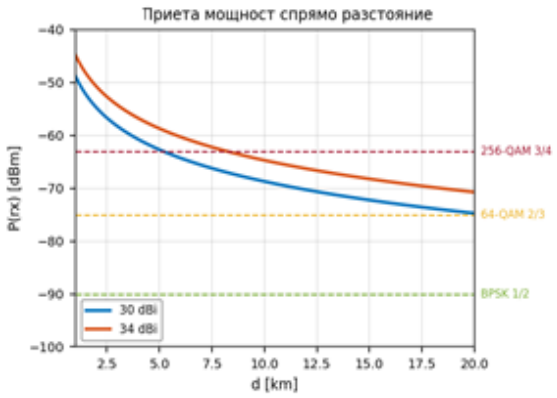
За илюстриране на изложената методика е направено ориентировъчно изчисление на радиолиния при следните изходни параметри: работна честота 5,8 GHz (канал в обхват 5725–5875 MHz), разстояние 10 km, параболични антени с усилване 30 dBi на двата края, загуба в кабелите и конекторите по 1 dB на всеки край и предавателна мощност, ограничена така, че EIRP да не превишава регулаторния лимит от 30 dBm.

Таблица 2. *радиолиния – 10км.*

Параметър	Стойност
Честота	5 800 MHz
Разстояние	10 km
Усилване на антените (всеки край)	30 dBi
Загуба в кабели/конектори (всеки край)	1 dB
EIRP (регулаторно ограничение)	30 dBm (1 W)
FSPL = 20·log₁₀(10) + 20·log₁₀(5800) + 32,44	≈ 127,7 dB
Приета мощност: P(rx) = EIRP − FSPL + G(rx) − L(rx)	≈ −68,7 dBm
Типична чувствителност за 64-QAM 2/3, 20 MHz канал	≈ −75 dBm
Изчислен марж на затихване	≈ 6,3 dB



Фиг. 3*. Марж на затихване спрямо ширина на канала при d = 10 km*



Фиг. 4*. Приета мощност спрямо разстояние за антени 30/34 dBi с прагове по MCS.*

Изчисленият марж от около 6 dB е недостатъчен за трасе с растителност или сезонни промени (Фигура 3). Преминаване към 10 MHz канал добавя около 3 dB, а увеличаване на усилването на антените до 34 dBi (при занижена мощност за EIRP = 30 dBm) добавя още около 4 dB на приемната страна – общо около 13 dB, в препоръчания диапазон. При антени 30 dBi връзката поддържа 64-QAM 2/3 до около 19–20 km (Фигура 4). Проверката на зоната на Френел ($\lambda \approx 5{,}17$ cm) дава $r_1(\max) \approx 11{,}4$ m по средата, 60% клирънс ≈ 6,8 m и земно изпъкване ≈ 1,5 m – обща препоръчителна височина на мачтите около 8–9 m над препятствията.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизацията на радиоканала при далекобойни Wi-Fi PtP връзки в обхвата 5 GHz е многопараметрична инженерна задача, при която нито един-единствен параметър не гарантира сам по себе си качествена връзка. Систематичният подход включва: проверка на пряката видимост и клирънса на зоната на Френел с отчитане на земната кривина; изчисляване на подробен бюджет на радиолинията спрямо реалистична (а не пикова) стойност на модулацията; избор на честота и ширина на канала съобразно регулаторните изисквания и наличния спектър; използване на високоусилващи, прецизно центрирани антени в комбинация

с управление на предавателната мощност за максимално оползотворяване на регулаторния EIRP лимит; и прилагане на TDMA-базирани протоколи вместо стандартния CSMA/CA механизъм при трасета над няколко километра.

При коректно прилагане на изложените принципи 5 GHz обхватът продължава да представлява надеждно и икономически ефективно решение за далекобойни безжични връзки на десетки километри, макар отварянето на допълнителен спектър в 6 GHz обхвата (Wi-Fi 6E/7) да предлага перспектива за бъдещо разширяване на капацитета на подобни системи.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Изследване на технологии и интелигентни приложения за обработка и визуализация на данни в IoT/5G комуникационни мрежи“, договор НИП2026-20. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ITU-R Recommendation P.525 – Calculation of free-space attenuation.
[2] Commission Implementing Decision (EU) 2022/179 of 8 February 2022 on the harmonisation of radio spectrum for wireless access systems in the 5 GHz band. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022D0179
[3] IEEE Std 802.11-2020 – IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems, Local and Metropolitan Area Networks.
[4] Freeman, R. L. Radio System Design for Telecommunications. Wiley.
[5] Outdoor Wi-Fi RF Planning: Path Loss Models, Fresnel Zone Clearance, and Link Budget. SageAxe. https://sageaxe.com/blog/outdoor-wifi-path-loss-fresnel-link-budget
[6]Maximum Transmit Power for Wi-Fi Device in Each Regulatory Domain. RF Essentials. https://rfessentials.com/rf-knowledge-base/what-is-the-maximum-transmit-power-for-a-wi-fi-device-operating-in-each-regulato/
[7] Communications Regulation Commission (CRC) – National Radio Frequency Spectrum Allocation Plan, Republic of Bulgaria.