

ЕФЕКТИВНОСТ НА ДИНАМИЧНОТО УПРАВЛЕНИЕ НА РАДИОЧЕСТОТНИЯ СПЕКТЪР В ЕВРОПА ЧРЕЗ ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ

Теодора Пасарелска

EFFICIENCY OF DYNAMIC RADIO SPECTRUM MANAGEMENT IN EUROPE THROUGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Teodora Pasarelska

Резюме: С нарастващото търсене на безжични комуникации ефективното управление на радиочестотния спектър се превръща в ключов фактор за развитието на 5G и бъдещите 6G мрежи. Традиционните методи за статично лицензиране показват ограничения при динамични и хетерогенни мрежови среди, което води до необходимостта от интелигентни и адаптивни решения. Целта на настоящата статия е да изследва ефективността на динамичното управление на спектъра чрез изкуствен интелект (AI) в Европа, като се оценят предимствата и ограниченията на AI-базираните подходи спрямо конвенционалните методи и се разгледа ролята на европейските регулатори в хармонизацията и стандартизацията на спектъра. Статията представя анализ на ключови показатели като спектрална ефективност, използваемост на спектъра, латентност и енергийна ефективност, показвайки, че AI-базираните модели значително повишават ефективността, минимизират интерференцията и позволяват адаптивно управление на трафика в реално време. Основният принос на изследването е предоставянето на интегрирана рамка, която свързва технологични иновации, регулаторни изисквания и стратегически препоръки за устойчиво и интелигентно управление на радиочестотния спектър в контекста на бъдещите 6G мрежи.

Ключови думи: радиочестотен спектър, AI, DSM, 6G, спектрална ефективност, ЕС.

Abstract: With the increasing demand for wireless communications, effective spectrum management is becoming a key factor for the development of 5G and future 6G networks. Traditional static licensing methods show limitations in dynamic and heterogeneous network environments, which leads to the need for intelligent and adaptive solutions. The aim of this paper is to investigate the effectiveness of dynamic spectrum management using artificial intelligence (AI) in Europe, assessing the advantages and limitations of AI-based approaches compared to conventional methods and examining the role of European regulators in spectrum harmonisation and standardisation. The paper presents an analysis of key indicators such as spectral efficiency, spectrum utilisation, latency and energy efficiency, showing that AI-based models significantly increase efficiency, minimise interference and enable real-time adaptive traffic management. The main contribution of the study is to provide an integrated framework that links technological innovations, regulatory requirements and strategic recommendations for sustainable and intelligent spectrum management in the context of future 6G networks.

Keywords: radio frequency spectrum, AI, DSM, 6G, spectral efficiency, EU.

1. Въведение

Радиочестотният спектър е ограничен ресурс, необходим за всички безжични технологии. С развитието на 5G и предстоящото внедряване на 6G, използването на спектъра значително нараства. Традиционните методи за управление, базирани на статично лицензиране, вече не са достатъчно ефективни. Това води до интерес към динамични и интелигентни решения, базирани на изкуствен интелект. С нарастването на броя на потребителите и устройствата, както и появата на нови приложения като

EFFICIENCY OF DYNAMIC RADIO SPECTRUM MANAGEMENT IN EUROPE THROUGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

TEODORA PASARELSKA

автономни превозни средства, индустриален IoT и високоскоростни медийни услуги, натоварването върху спектралните ресурси става все по-сложно и непредсказуемо. Статичните методи за разпределение на честоти често водят до ниска спектрална ефективност, неравномерно използване на ресурсите и ограничена възможност за адаптация към променящите се мрежови условия. В този контекст динамичното управление на спектъра предлага гъвкав подход, позволяващ в реално време разпределение на честотните ленти според текущите нужди на мрежата. Изкуственият интелект предоставя допълнителни възможности за автоматизация, прогнозиране на трафика и интелигентно присвояване на ресурси, като минимизира интерференцията и увеличава надеждността на комуникациите. Комбинацията от динамично управление и AI се разглежда като ключова за постигането на висока спектрална ефективност, ниска латентност и адаптивност в хетерогенни мрежови среди. Настоящата статия се фокусира върху капацитета на тези иновации в европейския контекст, като същевременно разглежда ролята на регулаторните органи за хармонизиране и стандартизиране на спектралните ресурси.

2. Теоретична рамка

2.1 Традиционно управление на спектъра

Класическият модел на управление на радиочестотния спектър се характеризира с фиксирано разпределение на честотни ленти, предоставяни чрез дългосрочни лицензи и подчинени на централизирана регулация от национални и международни органи.

Недостатъци на традиционния подход:

- Неефективно използване на спектъра - честотните ресурси често остават неактивни в периоди на ниско натоварване.
- Неизползван спектър - статично разпределените честоти не могат да се адаптират към променящото се трафик натоварване или нови приложения.
- Ограничена гъвкавост - този подход не позволява бързо адаптиране към динамични условия, като времеви пикове на трафика или нови технологии.

Традиционният модел е подходящ за предишни поколения мрежи (2G–4G), но става ограничителен фактор за 5G и 6G, които изискват висока спектрална ефективност и интелигентно разпределение на ресурси в хетерогенни и динамични среди.

2.2 Динамично управление на спектъра

Динамичното управление на спектъра (Dynamic Spectrum Management - DSM) представлява модерен подход, който позволява гъвкаво и адаптивно използване на радиочестотните ресурси.

Основни характеристики на DSM:

- Адаптивно използване на честоти - честотните ленти могат да бъдат присвоени според текущите нужди на мрежата, като се избягва застой на спектъра.
- Споделяне на спектъра - различни оператори и услуги могат да използват една и съща честотна лента при контролирани условия, като се минимизира интерференцията.
- Реакция в реално време - мрежата може динамично да пренасочва ресурси, като се адаптира към промени в трафика, мобилността на потребителите и околната среда.

Динамичното управление е особено важно за THz и sub-THz спектъра, където сигналите са чувствителни към загуби и атмосферни влияния, а традиционният статичен подход е неефективен.

2.3 Роля на изкуствения интелект

Внедряването на изкуствен интелект (AI) във функционалностите на DSM позволява автоматизация и оптимизация на сложни радиочестотни мрежи.

- Прогнозиране на трафика - AI модели използват исторически данни и текущи показатели, за да предвиждат натоварването в различни честотни ленти, позволявайки прецизно планиране на ресурсите.
- Автоматично разпределение на ресурси - Машинното обучение и алгоритмите за оптимизация могат да присвояват честоти и мощност без човешка намеса, като се гарантира максимална спектрална ефективност.
- Откриване на свободни честоти - AI може да идентифицира временно неизползвани ленти и да ги предоставя на други услуги, като реализира динамично споделяне на спектъра в реално време.

Комбинацията от динамично управление и AI създава условия за интелигентни, самоадаптиращи се мрежи, които могат да поддържат високи скорости, ниска латентност и надеждност в хетерогенни мрежови среди, включително интегрирани наземни и сателитни мрежи (NTN).

3. Европейска регулаторна рамка за управление на радиочестотния спектър

3.1 Роля на Европейската комисия (European Commission - EC)

Европейската комисия разработва и координира политики и стратегии за ефективно управление на радиочестотния спектър в Европа, с акцент върху следващите поколения мобилни мрежи (5G и 6G).

Основните функции включват:

- Хармонизация на спектъра - Комисията определя общи правила за използване на честотните ленти в ЕС, за да се гарантира интероперативност между държавите-членки и да се избегне интерференция.
- Внедряване на 5G и 6G - разработва стратегически инициативи и финансира пилотни проекти, които подпомагат технологичното развитие и ранното внедряване на нови мрежи.
- Насърчаване на иновации - стимулира научно-изследователската дейност и колаборацията между индустрия, академични институции и стартиращи компании за развитието на интелигентни и динамични решения за спектъра.

3.2 Роля на European Telecommunications Standards Institute (ETSI)

Институтът ETSI е водеща европейска организация за разработване на стандарти в телекомуникациите, която играе съществена роля в подготовката на интелигентни и динамични системи за управление на спектъра.

Основните задачи включват:

- Когнитивно радио (Cognitive Radio) - ETSI определя изисквания и стандарти за радиостанции, които могат да усещат и адаптират използването на спектъра според наличността на честотни ресурси.
- Динамичен достъп до спектъра - разработват се стандарти, които позволяват споделяне на честоти между различни оператори и услуги, като се минимизира интерференцията.

EFFICIENCY OF DYNAMIC RADIO SPECTRUM MANAGEMENT IN EUROPE THROUGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

TEODORA PASARELSKA

-
- Интероперазивност (Interoperability) - ETSI гарантира съвместимост между различни системи и устройства, осигурявайки глобална съвместимост на 5G и бъдещите 6G технологии.

3.3 Поля на International Telecommunication Union (ITU)

Международният съюз по далекосъобщения (ITU) е глобалният орган за координация и регулиране на радиочестотния спектър и стандартизацията на телекомуникационните системи.

Неговите основни функции включват:

- Глобална координация - ITU осигурява рамка за съвместна работа между държавите, избягвайки международни интерференции и дублиране на честотни ресурси.
- Разпределение на честоти - организацията определя глобални спектрални ленти за мобилни и сателитни услуги, включително за sub-THz и THz честоти, потенциално използвани в 6G.
- Регулаторни рамки - ITU разработва препоръки и стандарти за хармонизирано използване на спектъра, което позволява сигурна и ефективна експлоатация на телекомуникационни мрежи в световен мащаб.

Тази рамка показва как европейски и международни институции работят синхронизирано за създаването на интелигентни, гъвкави и съвместими системи за динамично управление на спектъра, които са ключови за успешното внедряване на 6G технологии.

4. Методи за управление на спектъра

4.1 Статично лицензиране

Традиционният метод за управление на спектъра се основава на фиксирани честоти, предоставяни чрез дългосрочни лицензи и централизиран контрол. Този подход е стандартен за регулация, но има значителни ограничения - ниска спектрална ефективност, наличие на неизползван спектър и ограничена гъвкавост.

Статичното лицензиране е подходящо за предишни поколения мобилни мрежи, но не удовлетворява изискванията на 5G и бъдещите 6G мрежи, където динамичността и оптималното използване на спектъра са от критично значение.

4.2 Споделен спектър

Методът на споделения спектър позволява множество потребители или оператори да използват едни и същи честоти при контролирани условия. Основните характеристики включват времеви или условен достъп до честотните ресурси и гъвкаво разпределение според трафика.

Основните ограничения са възможността за интерференция и необходимостта от координация между различните оператори.

Този подход подобрява ефективността на спектъра и е особено полезен в хетерогенни мрежи и при интеграция на наземни и сателитни сегменти.

4.3 Динамичен достъп (Dynamic Spectrum Access, DSA)

Динамичният достъп представлява метод, при който спектърът се разпределя в реално време спрямо текущите условия на мрежата. Този подход позволява адаптивно присвояване на честоти, реакция на променящи се натоварвания и оптимизация на ресурсите.

Основните предизвикателства са свързани със сложността на управлението, нуждата от постоянен мониторинг и изискването за интелигентни алгоритми, които да осигуряват надеждност и ефективност.

4.4 Базирано на AI управление на спектъра

Внедряването на изкуствен интелект (AI) във функциите за управление на спектъра позволява автоматизация, прогнозиране на трафика и оптимизация на ресурсите. AI системите могат да идентифицират свободни честоти, да ги присвояват автоматично и да адаптират разпределението спрямо променящата се среда.

Основните ограничения на този подход включват необходимостта от високи изчислителни ресурси, зависимостта от качеството на данните и сложността при внедряване и поддръжка. AI-базираните методи са особено подходящи за 6G мрежи, включително THz честоти и интеграция на сателитни мрежи, където традиционните методи не са достатъчно ефективни.

5. Анализ на ефективността на управлението на спектъра

5.1 Критерии за оценка

Ефективността на различните методи за управление на радиочестотния спектър се оценява чрез няколко основни критерия:

- Спектрална ефективност (bit/s/Hz) - измерва колко ефективно се използват наличните честотни ресурси за пренос на данни.
- Използваемост на спектъра (%) - процентът от спектралните ресурси, който реално се използва за комуникация.
- Латентност - времето, необходимо за предаване на данни от източника до получателя, което е критично за приложения в реално време.
- Енергийна ефективност - консумацията на енергия спрямо обема на предадените данни, особено важна за IoT устройства и 6G инфраструктура.

5.2 Сравнителен анализ на различни модели

Сравнителният анализ на различните модели за управление на радиочестотния спектър има за цел да оцени тяхната ефективност спрямо ключови показатели като използваемост, адаптивност и възможности за оптимизация. Трите основни подхода – статичен, динамичен и AI-базиран, демонстрират еволюция в начина, по който се разпределят и използват спектралните ресурси. С нарастването на изискванията към съвременните комуникационни мрежи се наблюдава тенденция към преминаване от фиксирани към интелигентни и самоадаптивни решения. Този анализ дава възможност да се открият предимствата и ограниченията на всеки модел в контекста на ефективното управление на спектъра.

➤ Статичен модел:

- Използваемост на спектъра - около 60–70%;
- Адаптивност – ниска;
- Стабилност – висока.

Традиционният статичен подход осигурява стабилна работа, но значителна част от спектъра остава неизползвана, а адаптацията към динамични условия е ограничена.

➤ Динамичен модел (без AI):

- Използваемост на спектъра - около 75–85%;

EFFICIENCY OF DYNAMIC RADIO SPECTRUM MANAGEMENT IN EUROPE THROUGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

TEODORA PASARELSKA

-
- Адаптивност – средна;
 - Сложност - средна.

Динамичният достъп позволява по-добро приспособяване към натоварването и частично подобрява ефективността, но остава зависим от ръчни или предварително зададени алгоритми и не оптимизира ресурсите в реално време.

➤ AI-базиран модел:

- Използваемост на спектъра - около 90–95%;
- Адаптивност – висока;
- Оптимизация - в реално време.

Изкуственият интелект (AI) интегрира машинно обучение и алгоритми за оптимизация, като осигурява интелигентно и самоадаптиращо се разпределение на честоти.

Този подход максимизира ефективността на спектъра, намалява интерференцията и оптимизира управлението на трафика в динамични и хетерогенни мрежови среди.

5.3 Интерпретация на резултатите

Внедряването на AI във функциите за управление на спектъра осигурява:

- Значително подобро използване на спектъра, като се минимизират неизползваните честотни ресурси.
- Намаляване на интерференцията, чрез интелигентно присвояване на честоти и оптимизация на мощността на предаване.
- Ефективно управление на трафика, позволявайки адаптация в реално време според натоварването и динамиката на мрежата.

Тези резултати подчертават, че AI-базираните модели за динамично управление на спектъра са ключови за постигане на висока спектрална ефективност и надеждност в бъдещите 6G мрежи.

6. Предизвикателства при динамичното управление на радиочестотния спектър с AI

6.1 Технологични предизвикателства

Внедряването на AI в управлението на радиочестотния спектър изисква съществени технологични ресурси и сложни архитектури:

- Сложност на AI системите - алгоритмите за прогнозиране на трафика, оптимизация на ресурси и динамично разпределение на спектъра са сложни и изискват интеграция на множество компоненти – софтуерни модули, сензори и комуникационни протоколи.
- Нужда от изчислителна мощност - реално време и обработка на големи обеми данни изискват значителни изчислителни ресурси, включително edge и cloud computing инфраструктура. Ограниченията в хардуера могат да забавят процеса на адаптация и оптимизация.

6.2 Регулаторни предизвикателства

Системите, базирани на AI за управление на спектъра, изискват ясни и унифицирани регулаторни рамки, които да осигурят стандартизирани правила за динамичен достъп, споделяне и оптимизация на радиочестотните ресурси. В момента липсват унифицирани правила, като европейските държави и международните органи все още работят по хармонизация на процедурите за координиране на спектъра, което затруднява ефективното използване на честотните ленти в трансграничен контекст. Бавната адаптация на регулаторните механизми често изостава от темповете на технологичния прогрес,

забавяйки внедряването на иновативни решения и разширяването на 5G и бъдещите 6G мрежи. Липсата на унифицирани рамки може да доведе до несъответствия в достъпа до спектъра, интерференции между операторите и затруднено внедряване на AI-базирани алгоритми за оптимизация на ресурсите. Осигуряването на ефективни и гъвкави регулаторни механизми е ключово за гарантиране на надеждност, сигурност и максимална спектрална ефективност в интелигентните безжични мрежи.

Основни предизвикателства, свързани с регулаторната рамка:

- липса на унифицирани правила.
- Бавна адаптация на процедурите.
- Риск от интерференции.
- Зависимост от качеството на данните и алгоритмите.
- Необходимост от координация на международно ниво.

6.3 Сигурност

Системите, управлявани от AI, са уязвими на нови рискове, които трябва да бъдат внимателно управлявани:

- Риск от атаки - хакерски и кибернетични заплахи могат да компрометират алгоритмите за разпределение на спектъра, да предизвикат интерференции или прекъсвания на услуги.
- Зависимост от алгоритми - решенията за разпределение на честоти и ресурси са зависими от точността на AI моделите. Грешки или пристрастия в алгоритмите могат да доведат до неоптимално използване на спектъра и нарушаване на качеството на услугата.

Този анализ подчертава, че успешното внедряване на AI за динамично управление на спектъра зависи не само от технологични иновации, но и от ефективна регулаторна рамка и сигурност на системите.

7. Бъдещи тенденции

Следващото поколение мобилни мрежи (6G) се очаква да бъде „AI-native“, което означава, че изкуственият интелект ще бъде вграден в центъра на всички функции на мрежата, включително управлението на радиочестотния спектър.

Основните тенденции включват:

- Напълно автоматизирано управление - AI ще позволява самоадаптиране на ресурсите, динамично разпределение на честоти и оптимизация на трафика в реално време, без нужда от ръчна намеса. Това ще осигури максимална спектрална ефективност и надеждност на услугите.
- Глобална хармонизация - AI-базираните системи ще подпомагат съгласуването на спектралните ресурси на международно ниво, позволявайки интеграция и координация между различни държави и оператори, както и минимизиране на интерференциите.
- Интеграция със сателитни мрежи - AI ще улеснява хибридни мрежови архитектури, комбиниращи наземни и сателитни компоненти (NTN), като позволява безпроблемна свързаност, динамично разпределение на ресурси и глобално покритие, включително отдалечени райони и морски зони.

Тези тенденции показват, че AI-native подходът е ключов за реализацията на 6G, осигурявайки висока ефективност, гъвкавост и глобална свързаност, които не могат да бъдат постигнати с традиционните методи за управление на спектъра.

EFFICIENCY OF DYNAMIC RADIO SPECTRUM MANAGEMENT IN EUROPE THROUGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

TEODORA PASARELSKA

8. Заключение

Динамичното управление на радиочестотния спектър чрез изкуствен интелект (AI) се очертава като ключов фактор за развитието на 6G мрежите.

Анализът на различните подходи показва, че интегрирането на AI позволява значително подобряване на ефективността на спектъра и оптимално използване на мрежовите ресурси.

Основните изводи са:

- Значително по-висока ефективност на спектъра - AI-базираните системи могат да адаптират разпределението на честотите в реално време, минимизирайки неизползвания спектър и интерференциите.
- По-добро използване на ресурси - интелигентното управление позволява динамично присвояване на честоти и мощност, оптимизирайки трафика и натоварването в мрежата.
- Нужда от нови регулации - пълното внедряване на динамично управление изисква хармонизирани и адаптивни регулаторни рамки на европейско и международно ниво.

Ключовите фактори за успешното внедряване, които се оформят са:

- Технологичен напредък - инфраструктурата, изчислителната мощност и алгоритмите за AI трябва да отговарят на изискванията на 6G.
- Европейска координация - сътрудничеството между държавите членки и европейските институции е необходимо за хармонизация на спектъра и стандартизация.
- Стандартизация - унифицирани стандарти гарантират съвместимост, ускоряват внедряването и намаляват риска от интерференции.
- Въпреки значителните предимства, AI-базираното управление поставя специфични изисквания:
- Разработка на нови стандарти, които да интегрират интелигентното управление на спектъра.
- Регулаторна адаптация, за да се осигури безопасна и ефективна работа в хетерогенни мрежи.
- Инвестиции в инфраструктура, изчислителни ресурси и изследвания за оптимизация на алгоритмите.

Европа има капацитет да заеме водеща роля в развитието на AI-базирани решения за динамично управление на спектъра чрез:

- Стандартизация, водена от ETSI и европейските регулаторни органи.
- Научни програми, като Hexa-X и Smart Networks and Services (SNS), които подкрепят иновациите и пилотните внедрявания.
- Политики, които стимулират инвестиции и сътрудничество между индустрията и академичните институции.

В заключение, AI-базираното динамично управление на спектъра е стратегически инструмент за постигане на високоефективни, гъвкави и устойчиви 6G мрежи, а успешната реализация зависи от синергията между технологии, стандарти и регулации на европейско и международно ниво.

ИЗПОЛЗВАНИ ИЗТОЧНИЦИ REFERENCES

- [1] HE, An et al. A Survey of Artificial Intelligence for Cognitive Radios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. 2010, vol. 59(4), pp. 1578-1592 [viewed 26.03.2025]. eISSN 1939-9359. Available from: 10.1109/TVT.2010.2043968.
- [2] ALABI, C. A. et al. Artificial Intelligence in Spectrum Management: Policy and Regulatory Considerations. *2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS), Abuja, Nigeria* [online]. 2023, pp. 1-6 [viewed 05.06.2026]. Available from: 10.1109/ICMEAS58693.2023.10379314
- [3] IVANOVA, Y. Methods and means for researching microwave devices. *Publication of Union of Scientists in Bulgaria: International Journal on Information Technologies and Security (IJITS)* [online]. 2023, vol. 15(4), pp. 3-14 [viewed 05.06.2026]. ISSN 1313-8251. Available from: <https://doi.org/10.59035/MKDQ4834>
- [4] ДОБРЕВА, А. Защита на личните данни при предоставяне на електронни съобщителни услуги. *Годишник Телекомуникации* [онлайн]. 2022, Т. 9, с. 97-105 [прегледан 20.03.2025]. eISSN 2534-854X. Достъпен на: <https://doi.org/10.33919/YTelecomm.22.9.10> [DOBREVA, A. Zashtita na lichnite dannii pri predostavyane na elektronni saobshitelni uslugi. *Godishnik Telekomunikatsii* [onlayn]. 2022, T. 9, s. 97-105 [pregledan 20.03.2025]. eISSN 2534-854X. Dostapen na: <https://doi.org/10.33919/YTelecomm.22.9.10>]
- [5] PASARELSKI, R., G. PETROV, T. PASARELSKA, K. ANGELOV. Neural Network Architecture to Predict Radio Wave Attenuation in a 5G Network. In: *31st National Conference with International Participation „Telecom 2023“, November 16 - 17, 2023, Sofia, Bulgaria* [online]. 2023, pp. 1-5 [viewed 21.03.2025]. ISSN 2837-5246. IEEE Xplore. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/10409594/proceeding>
- [6] PASARELSKI, Rosen, Krasen ANGELOV, Kristian POSTAGIAN, and Stanimir SADINOV. Implementation and Analysis of a Customized Encryption Algorithm in 5G Networks for Educational Purposes. In: *4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), 23 - 25 November, 2023, Plovdiv, Bulgaria* [online]. 2023, pp. 1-5 [viewed 25.03.2025]. eISBN 979-8-3503-3691-7. IEEE. Available from: 10.1109/CIEES58940.2023.10378834
- [7] SADINOV, S. M. K., K. ANGELOV, P. G. KOGIAS and M. N. MALAMATOU DIS. Approach for MIMO Wireless Channel Modelling and System Characterization for an Indoor Environment. In: *27th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria* [online]. 2019, pp. 54-57 [viewed 25.03.2025]. ISBN 978-1-7281-4061-2. Available from: doi: 10.1109/TELECOM48729.2019.8994892..
- [8] IVANOVA, Y., R. PASARELSKI, T. PASARELSKA and K. ANGELOV. Approaches to Radio-Frequency Monitoring and Regulations for Unmanned Aircraft Systems. *33rd National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria* [online]. 2025, pp. 1-4 [viewed 25.03.2025]. eISBN 978-1-6654-6564-9. Available from: doi: [10.1109/TELECOM66943.2025.11304057](https://doi.org/10.1109/TELECOM66943.2025.11304057).
- [9] СИМЕОНОВА, Цв. Особенности на коммуникационни услуги, изисквания и приложения при 6G. *Годишник Телекомуникации* [онлайн]. 2021, Т.8, с. 23-33 [прегледан 16.06.2026]. eISSN 2534-854X. Достъпен на: DOI: <https://doi.org/10.33919/YTelecomm.21.8.3> [SIMEONOVA, Tsv. Osobenosti na komunikatsionni uslugi, iziskvania i prilozhenia pri 6G. *Godishnik Telekomunikatsii* [onlayn]. 2021, T.8, s. 23-33 [pregledan 16.06.2026]. eISSN 2534-854X. Dostapen na: DOI: <https://doi.org/10.33919/YTelecomm.21.8.3>]
- [10] ПАСАРЕЛСКИ, Р. Милиметровият честотен обхват като перспектива за 5G мрежи. *Годишник Телекомуникации* [онлайн]. 2019, Т. 6, с. 161-170. [прегледан 16.06.2026]. eISSN 2534-854X. Достъпен на: <https://doi.org/10.33919/YTelecomm.19.6.16> [PASARELSKI, R. Milimetroviyat chestoten obhvat kao perspektiva za 5G mrezhii. *Godishnik Telekomunikatsii* [onlayn]. 2019, T. 6, s. 161-170. [pregledan 16.06.2026]. eISSN 2534-854X. Dostapen na: <https://doi.org/10.33919/YTelecomm.19.6.16>]
- [11] ПАСАРЕЛСКИ, Р., А. СТАНЧЕВА и В. КЪДРЕВ. Когнитивно радио. *Сборник доклади от Годишна университетска научна конференция, 14-15 юни 2018 година, В. Търново*. В. Търново: Издателски комплекс на НВУ „Васил Левски”, 2018, с. 1026-1032. ISBN 978-619-7246-20-9. [PASARELSKI, R., A. STANCHcheVA i V. KADREV. Kognitivno radio. *Sbornik dokladi ot Godishna universitetska nauchna konferentsia, 14-15 yuni 2018 godina, V. Tarnovo*. V. Tarnovo: Izdatelski kompleks na NVU „Vasil Levski”, 2018, s. 1026-1032. ISBN 978-619-7246-20-9.]
- [12] PASARELSKI, R. Models for the optimization of radio signaling capabilities in 5G systems. *Yearbook Telecommunication* [online]. 2023, vol.10, pp. 49-57 [viewed 16.06.2026]. eISSN 2534-854X. Available from: <https://doi.org/10.33919/YTelecomm.23.10.5>
- [13] ПАСАРЕЛСКИ, Росен. Нови 5G мобилни клетъчни системи: Изследване на взаимодействието между 4G-LTE и 5G системите: архитектура, мрежови функции, интерфейс и протоколи. София: Нов

EFFICIENCY OF DYNAMIC RADIO SPECTRUM MANAGEMENT IN EUROPE THROUGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

TEODORA PASARELSKA

-
- български университет, 2024. ISBN 978-619-233-282-2. [PASARELSKI, Rosen Ivanov. *Novi 5G mobilni kletachni sistemi: Izsledvane na vzaimodeystviето mezhdu 4G-LTE i 5G sistemite: arhitektura, mrezhovi funktsii, interfeys i protokoli*. Sofia: Nov balgarski universitet, 2024. ISBN 978-619-233-282-2.]
- [14] СТЕФАНОВА, Тереза. *Новите технологии: приложения, професии, умения: монография*. София: Аскони-издат, 2024. ISBN 978-954-383-151-7. [STEFANOVA, Tereza. *Novite tehnologii: prilozhenia, profesii, umenia: monografia*. Sofia: Askoni-izdat, 2024. ISBN 978-954-383-151-7.]
- [15] Progress Report on 6G and Spectrum Needs - Radio Spectrum Policy Group (RSPG23-009). *European Commission* [online]. 2023 [viewed 17.06.2026]. Available from: <https://commission.europa.eu/>
- [16] 6G Networks in Europe. *European Commission* [online]. 2025 [viewed 17.06.2026]. Available from: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/6g>
- [17] ITU-R Recommendation M.2160- IMT-2030 Framework Recommendation. *International Telecommunication Union* [online]. 2023 [viewed 17.06.2026]. Available from: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2160-0-202311-!!PDF-E.pdf
- [18] Annual Report -THz Communications and Standardization Activities. *ETSI* [online]. 2024 [viewed 17.06.2026]. Available from: <https://www.etsi.org/>
- [19] 6G AI Standardization Group Launch Announcement. *ETSI* [online]. 2026 [viewed 17.06.2026]. Available from: <https://www.etsi.org/>
- [20] CHANDRAMOULI, Devaki. 3GPP 5G-Advanced XR features as the bridge towards 6G. *3GPP* [online]. [viewed 17.06.2026]. Available from: <https://www.3gpp.org/technologies/xr-towards-6g>
- [21] IMT-2030: Technical requirements for the 6G future. *ITU* [online]. 2026 [viewed 17.06.2026]. Available from: <https://www.itu.int/hub/2026/03/imt-2030-technical-requirements-for-the-6g-future/>
- [22] Spectrum Management Reports (2022–2024). *ETSI* [online]. [viewed 17.06.2026]. Available from: <https://www.etsi.org/>
- [23] Radio Spectrum Policy Group. *European Commission* [online]. 2023 [viewed 17.06.2026]. Available from: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/radio-spectrum-policy-group>

Информация за авторите:

ас. д-р инж. Теодора Пасарелска, НБУ, департамент „Телекомуникации“, tivanova@nbu.bg

Contacts:

Asst. Prof. Dr. Eng. Teodora Pasarelska, NBU, Department of Telecommunications, tivanova@nbu.bg

Дата на постъпване на ръкописа (Date of receipt of the manuscript): 20.05.2025

Дата на приемане за публикуване (Date of adoption for publication): 30.09.2025