

Thesis Summary

The thesis addresses the deployment of drone base stations (DBSs) in Beyond 5G (B5G) networks to provide dynamic and cost-effective coverage in diverse scenarios such as disaster recovery, temporary events, and underserved regions. The unique characteristics of cells operated on drones—compared to their terrestrial counterparts—not only offer advantages but also introduce novel challenges for network performance optimization. Mobility, altitude, and limited on-board energy are all new aspects to be considered when deploying this type of base station (BS). This thesis examines these challenges and the potential of leveraging DBSs. Its core contribution is the development of algorithms to control DBS deployment and optimize the performance of the resulting network, which can cover large service areas and adapt dynamically to variations in ground-node (GN) demands.

Chapter 1 — Introduction

The first chapter categorizes unmanned aerial vehicles (UAVs) by altitude, aerodynamic configuration, size, range, and payload capacity. Clarifying these dimensions helps identify a UAV’s suitability for specific applications in wireless networks. The chapter then outlines the regulatory status in Europe, which plays a major role in enabling the deployment of novel technologies.

More importantly, the chapter defines eight categories of DBS deployment challenges and explains the aspects to be considered in each. The most distinguishing challenge is determining DBS placement in space, uniquely influenced by drone mobility. In total, the challenges include:

1. **Placement (space):** consider obstacle avoidance, interference, path loss, backhaul proximity, energy, cost, and regulation.
2. **Backhaul:** capacity, latency, reliability (weather), interference, energy, security, and compliance.
3. **Energy:** propulsion-dominated consumption; options for replenishment (including on-board PV).
4. **Load balancing and transmit-power control** as key levers for quality of service (QoS), interference, and energy efficiency.
5. **Mobility handling, integration with terrestrial networks, and frequency–time scheduling.**

The thesis focuses mostly on points 1–4, while topics in point 5 remain outside its scope, which centers on other DBS-related aspects of network optimization. It is assumed that frequency–time resource allocation and mobility issues have been sufficiently researched and optimized within the terrestrial-network literature; the principles and techniques can be adapted for DBS network management. This assumption allows DBS-specific research to focus on addressing

novel challenges. Accordingly, aspects related to integrating DBS fronthaul RAN access with terrestrial nodes are neglected, under the assumption that a DBS will serve only a subset of GNs within the coverage area of terrestrial nodes, determined by frequency–time scheduling mechanisms (i.e., GNs are divided into terrestrial and non-terrestrial subsets with different frequency bands or time slots) or spatial user splitting.

The chapter concludes by defining the scope and research methodology.

Chapter 2 — System Model

The second chapter describes the simulation models used throughout the thesis. This serves as a reference for the remaining chapters and provides a view of the different network aspects to consider when designing DBS deployment frameworks, and how to simulate their performance.

First, user distribution and mobility models are introduced, selecting among models appropriate to the service-area scale (e.g., a few streets or a whole city). Two static distributions and two user-mobility models are presented.

Next, fronthaul DBS–GN channel models are described, followed by models for backhaul millimeter-wave (mmWave) and free-space-optics (FSO) links, as well as virtual mmWave links established through a reconfigurable intelligent surface (RIS).

Finally, the chapter concludes with drone energy modeling. Besides energy consumption, a solar-energy harvesting model is introduced and later used in the thesis.

Chapter 3 — Fronthaul-Aware Placement

This chapter addresses planning the deployment of DBSs solely based on fronthaul DBS–GN performance. Two GN-coverage placement algorithms are introduced. The first assumes knowledge of GN locations. The second depends only on historical signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) reports and does not require GN coordinates. Both algorithms determine the drones’ 2D locations. For altitude optimization, a separate approach is adopted to maximize the achieved signal-to-noise ratio (SNR) of all served GNs.

The chapter then introduces a metric for evaluating the deployment performance of DBSs serving vehicular users with beamforming. Under any beam, this metric describes the access probability that a vehicle has to successfully obtain bandwidth, given the vehicle density under that beam. This metric is used in a mixed-integer linear programming (MILP) formulation to select DBS locations and beam–footprint associations to cover streets in a city while satisfying the required access probability and minimizing the number of stations.

Location-aware placement: SINR-EM Given GN locations and fixed DBS powers, the goal is to maximize energy efficiency while accounting for interference. The problem relates to NP-hard p -median/geometric set-covering variants. The chapter introduces *SINR-EM*, a modified EM-clustering algorithm

that replaces Gaussian likelihoods with Softmax-normalized SINR similarity metrics, plus a dynamic SINR dropout parameter to control cluster overlap and outlier pull.

Altitude tuning Altitude fine-tuning uses the environment-specific optimal elevation angle to set DBS heights from coverage radii (derived from the farthest served GN), within permissible bounds.

Results Compared with k-means++, SINR-EM spaces high-power DBSs to reduce overlap/interference, yielding better SINR CDFs. Height tuning improves minimum and mean SNR with small SINR gains.

Location-unaware placement: Multi-agent Double Q-learning A novel multi-agent Q-learning framework is introduced. Without GN coordinates, DBSs select among discrete candidate sites. Each agent (DBS) acts sequentially in an epoch, observing the global state including prior peer actions. The model is:

1. **State:** current DBS locations + quantized per-DBS reliability $\times$ fairness + earlier actions.
2. **Actions:** next destination per DBS.
3. **Reward:** product of system reliability and Jain’s fairness (windowed over SINR histories).

Results: Learning converges and outperforms fixed/alternating baselines on fairness and combined reward, while keeping reliability high. Intelligent motion reduces energy versus fixed hovering and avoids the interference penalties of naive movement. With simple FDMA, median throughput improves and maxima increase under Q-learning movement.

Vehicular beamforming: Access-probability model For a beam covering a street footprint, the chapter refines a published access-probability model. Simulations show tighter agreement with measurements than the earlier model. This model quantifies the quality of a beamforming-enabled DBS for providing V2X coverage.

Beam-footprint association MILP In a city, predefined candidate sites for beamforming-enabled DBSs and predefined street footprints are considered. Depending on candidate-site location, a footprint may lack clear LOS or sufficient access probability. Using the probability model, an MILP selects a subset of sites to cover all footprints while respecting the maximum number of beams per DBS and minimizing the number of required DBSs. *Results:* Against a tailored greedy heuristic, the MILP consistently activates fewer DBSs for the same beam budget.

Chapter 4 — Optimizing Transmission Power

This chapter presents a transmission-power optimization scheme that controls the transmit power of a set of DBSs using an adapted Monte Carlo Tree Search (MCTS) algorithm. The problem is formulated as a game tree starting at a root node with maximum power for all DBSs. Children reduce one DBS’s power by a predefined step; at each iteration, MCTS decides which DBS power to reduce. Redundant DBSs can be turned off by reducing power to zero. The approach is integrated with SINR-EM from Chapter 3 to determine DBS locations.

The goal of transmission-power MCTS (TP-MCTS) is to maximize energy efficiency while satisfying a link-reliability threshold. This is achieved via an appropriate node-scoring model. The selection criterion leverages the upper-confidence bound (UCB) to balance exploration and exploitation. The approach also reuses tree history over time, enabling nodes to recompute scores without rebuilding the tree from scratch, and allows the last winning node to compete with the root to become the new root (best-root selection, BRS).

Results: The SINR-EM + TP-MCTS framework is compared against a particle swarm optimization (PSO) approach that determines 3D DBS locations. TP-MCTS consistently meets the SINR target and boosts energy efficiency, outperforming the PSO solution. The validity of time updates based on BRS is confirmed. Throughout simulations, drones remained separated and clusters did not overlap, avoiding collisions.

Chapter 5 — Backhaul-Aware DBS Placement

This chapter focuses solely on DBS deployment in terms of backhaul connectivity, in contrast to prior chapters targeting only fronthaul optimization. Novel challenges arise compared to terrestrial networks: backhaul links must adapt to DBS mobility, and due to altitude, directive links (mmWave, FSO) can be used but require clear LOS and obstacle avoidance. Since the focus is only backhaul, the deployed drones are termed drone relay stations (DRSs), relaying backhaul traffic.

A mechanism is introduced for determining DRS locations in an urban environment with building obstacles defined geometrically. The goal is to provide connectivity between two points in the area through successive directive DRS links that avoid obstacles.

A visibility-graph-based algorithm is proposed. First, a visibility graph is built using Lee’s algorithm, with edges marked by costs related to throughput. Then, Dijkstra’s algorithm finds the least-cost path.

The algorithm is extended to be solar-aware: DRSs are deployed in sunny spots to maximize PV harvesting. Around each candidate site, a small grid of test points is evaluated using solar-geometry calculations to select sunny points; graph-edge costs penalize shadowed spots.

Finally, a RIS-aware extension is presented. A RIS can create additional graph edges and increase throughput due to beamforming gain, improving reachability and reducing required hops to meet a throughput target.

Results:

- **Madrid square environment:** during daylight, a 617 m route needs 2 hops; at night, 490 m needs 3 hops.
- **Sustainability:** solar panels reduce trips to/from charging stations from 115 to 74/day (35% fewer), saving 4.44 kWh/day in recharge energy (plus travel-energy savings).
- **RIS-aware extension:** in Poznań, 1–2 RIS units improve reachability and reduce hops, raising throughput near the square (with a trade-off: some distant regions see lower end-to-end throughput).

Chapter 6 — DBS Placement with Joint Fronthaul and Backhaul Awareness

This chapter introduces a framework that considers both fronthaul and backhaul aspects. For fronthaul, the goal is to place DBSs so that each GN lies within the coverage disk (defined by a minimum SNR) of at least one DBS. For backhaul, a k -neighbors constraint is leveraged: each DBS must have at least K backhaul neighbors in its vicinity. Assuming FSO backhaul channels, neighbors are determined by a minimum SNR constraint that defines the maximum FSO link distance.

To solve this placement problem, an agglomerative hierarchical clustering (HC) approach is used. Starting with each GN as a cluster, clusters are merged based on UPGMC distances subject to two conditions:

1. merging does not reduce any cluster’s backhaul neighbor count below K ;
2. the merged cluster’s diameter (farthest GN–GN distance) $\leq$ coverage radius.

The height-tuning approach from Chapter 3 can also be applied here to control each DBS’s coverage radius by adapting height.

Results:

- The algorithm satisfies the constraints; a smaller K or larger FSO distance reduces the required number of DBSs.
- Compared with K-means: HC naturally satisfies neighbor and coverage constraints; K-means often violates them.
- After placement, height adjustments shrink/expand DBS coverage radii, increasing achieved SNR and providing margin for GN mobility. A small initial height causes a substantial increase in the DBS count.

Chapter 7 — Designing the Backhaul Network (Final Joint Framework)

After determining DBS placement, the backhaul wireless mesh is established by defining FSO connections between DBSs. Assuming each DBS has a maximum of two FSO transceivers, each DBS has one upstream and at most one downstream link.

An MILP is defined to maximize residual (surplus) backhaul throughput with: one upstream hop per DBS, ≤ 1 downstream per node, flow conservation, per-hop capacity constraints, and all flow arriving at gateways (MBSs). The problem is proved NP-hard by reduction from the Hamiltonian Path problem.

A genetic algorithm (GA) is introduced to solve this problem. The genome encodes concatenated DBS $\rightarrow\cdots\rightarrow$ MBS paths. Fitness is based on surplus throughput in the network, computed from the perspective of edges or nodes.

Results:

- Much higher success probability than random sampling.
- Edge-based surplus yields higher-quality solutions (greater surplus) but with lower success rate.
- Placement by HC increases GA success chances compared with K-means placement.

The chapter concludes by defining the final comprehensive framework, which leverages HC and GA in combination with height optimization. This framework adapts to network dynamics such as GN movement and rate variations.

Unified framework (end-to-end):

1. Place DBSs with HC.
2. Build backhaul with GA. If infeasible, “un-merge” a cluster to add a DBS and retry.
3. Optimize heights to improve SNR/reduce radius.
4. Adapt: on GN mobility, expand radii or re-cluster; on load growth, rerun GA to restore flow conservation.

Streszczenie pracy

Rozprawa dotyczy rozmieszczania dronowych stacji bazowych (DBS) w sieciach Beyond 5G (B5G) w celu zapewnienia dynamicznego i opłacalnego zasięgu w zróżnicowanych scenariuszach, takich jak odbudowa po klęskach żywiołowych, wydarzenia tymczasowe oraz obszary słabo obsłużone. Unikatowe cechy komórek obsługiwanych przez drony — w porównaniu z naziemnymi odpowiednikami — niosą nie tylko korzyści, lecz także wprowadzają nowe wyzwania dla optymalizacji wydajności sieci. Mobilność, wysokość lotu oraz ograniczona energia pokładowa to nowe aspekty, które należy uwzględnić przy wdrażaniu tego typu stacji bazowych (BS). Praca analizuje te wyzwania oraz potencjał wykorzystania DBS. Jej główny wkład stanowi opracowanie algorytmów sterujących rozmieszczeniem DBS i optymalizacją wydajności powstającej sieci, zdolnej do pokrywania dużych obszarów i dynamicznej adaptacji do zmian zapotrzebowania węzłów naziemnych (GN).

Rozdział 1 — Wprowadzenie

Pierwszy rozdział kategoryzuje bezzałogowe statki powietrzne (UAV) według wysokości lotu, konfiguracji aerodynamicznej, rozmiaru, zasięgu oraz udźwigu. Wyjaśnienie tych wymiarów pomaga określić przydatność UAV do konkretnych zastosowań w sieciach bezprzewodowych. Następnie omówiono stan regulacji w Europie, który odgrywa kluczową rolę w umożliwianiu wdrażania nowych technologii.

Co ważniejsze, rozdział definiuje osiem kategorii wyzwań związanych z rozmieszczaniem DBS i wyjaśnia aspekty, które należy rozważyć w każdej z nich. Najbardziej wyróżniającym się wyzwaniem jest wyznaczenie położenia DBS w przestrzeni, unikatowo kształtowanego przez mobilność dronów. Łącznie wyzwania obejmują:

1. **Rozmieszczenie (przestrzeń):** należy uwzględnić omijanie przeszkód, interferencje, straty propagacyjne, bliskość dosyłu (backhaul), energię, koszt oraz regulacje.
2. **Backhaul:** przepustowość, opóźnienie, niezawodność (pogoda), interferencje, energia, bezpieczeństwo oraz zgodność.
3. **Energia:** zużycie zdominowane przez napęd; opcje uzupełniania (w tym pokładowe PV).
4. **Równoważenie obciążenia i sterowanie mocą nadawania** jako kluczowe dzwignie jakości usług (QoS), interferencji i efektywności energetycznej.
5. **Obsługa mobilności, integracja z sieciami naziemnymi oraz harmonogramowanie w dziedzinie częstotliwości—czas.**

Praca koncentruje się głównie na punktach 1–4, natomiast zagadnienia z punktu 5 pozostają poza jej zakresem, który skupia się na innych aspektach optymalizacji sieci z DBS. Przyjmuje się, że alokacja zasobów w dziedzinie częstotliwości—czas oraz mobilność zostały wystarczająco zbadane i zoptymalizowane w literaturze dotyczącej sieci naziemnych; zasady i techniki mogą zostać zaadaptowane do zarządzania sieciami DBS. To założenie pozwala skupić badania specyficzne dla DBS na rozwiązywaniu nowych wyzwań. W związku z tym pominięto aspekty integracji dostępu RAN fronthaul DBS z węzłami naziemnymi, zakładając, że DBS będzie obsługiwać jedynie podzbiór GN w obszarze zasięgu węzłów naziemnych, wyznaczony przez mechanizmy harmonogramowania w dziedzinie częstotliwości—czas (tj. GN są dzielone na podzbiory naziemne i nienaziemne, z różnymi pasmami częstotliwości lub przedziałami czasowymi) lub przestrzenny podział użytkowników.

Rozdział kończy się zdefiniowaniem zakresu i metodyki badań.

Rozdział 2 — Model systemu

Drugi rozdział opisuje modele symulacyjne używane w całej pracy. Służy on jako punkt odniesienia dla pozostałych rozdziałów i przedstawia różne aspekty sieci, które należy uwzględnić przy projektowaniu ram rozmieszczania DBS oraz sposoby symulacji ich wydajności.

Najpierw wprowadza się modele rozmieszczenia użytkowników i mobilności, dobierane odpowiednio do skali obszaru obsługi (np. kilka ulic lub całe miasto). Przedstawiono dwa statyczne rozkłady oraz dwa modele mobilności użytkowników.

Następnie opisano modele kanałów fronthaul DBS–GN, a potem modele łączy backhaul w paśmie fal milimetrowych (mmWave) i optyki w wolnej przestrzeni (FSO), jak również wirtualnych łączy mmWave zestawianych z użyciem rekonfigurowalnej inteligentnej powierzchni (RIS).

Na koniec rozdział omawia modelowanie energii dronów. Oprócz zużycia energii, wprowadzono również model pozyskiwania energii słonecznej, wykorzystany później w pracy.

Rozdział 3 — Rozmieszczenie z uwzględnieniem fronthaul

Ten rozdział dotyczy planowania rozmieszczenia DBS wyłącznie na podstawie wydajności fronthaul DBS–GN. Wprowadza się dwa algorytmy rozmieszczenia pod kątem pokrycia GN. Pierwszy zakłada znajomość położeń GN. Drugi opiera się wyłącznie na historycznych raportach stosunku sygnału do zakłóceń i szumu (SINR) i nie wymaga współrzędnych GN. Oba algorytmy wyznaczają dwuwymiarowe położenia dronów. Optymalizacja wysokości odbywa się osobno, aby maksymalizować osiągnięty stosunek sygnału do szumu (SNR) wszystkich obsługiwanych GN.

Następnie rozdział wprowadza metrykę oceny wydajności rozmieszczenia DBS obsługujących użytkowników pojazdowych z wykorzystaniem formowania wiązki. Dla dowolnej wiązki metryka ta opisuje prawdopodobieństwo dostępu

pojazdu do pasma, dane zagęszczenie pojazdów pod daną wiązką. Metryka ta jest używana w sformułowaniu MILP do wyboru lokalizacji DBS i skojarzeń wiązka–obszar na ulicach miasta przy spełnieniu wymaganego prawdopodobieństwa dostępu i minimalizacji liczby stacji.

Rozmieszczenie z informacją o lokalizacji: SINR-EM Dla znanych położeń GN i stałych mocy DBS celem jest maksymalizacja efektywności energetycznej z uwzględnieniem interferencji. Problem jest powiązany z NP-trudnymi wariantami p -median/geometric set covering. Rozdział wprowadza *SINR-EM*, zmodyfikowany algorytm klasteryzacji EM, który zastępuje rozkłady Gaussa znormalizowanymi miękkim maksimum podobieństwami SINR (Softmax) oraz używa dynamicznego parametru odrzucania SINR do kontrolowania nakładania się klastrow i wpływu wartości odstających.

Strojenie wysokości Dostrajanie wysokości wykorzystuje specyficzny dla środowiska optymalny kąt elewacji do wyznaczania wysokości DBS na podstawie promieni zasięgu (wyprowadzonych z najdalszego obsługiwanego GN), w dopuszczalnych granicach.

Wyniki W porównaniu z k-means++, SINR-EM rozmieszcza DBS o dużej mocy dalej od siebie, ograniczając nakładanie się/zaburzenia, co daje lepsze dystrybuanty SINR. Strojenie wysokości poprawia minimalny i średni SNR przy niewielkich zyskach SINR.

Rozmieszczenie bez informacji o lokalizacji: wieloagentowe podwójne Q-learning Wprowadzono nowy wieloagentowy schemat Q-learning. Bez współrzednych GN, DBS wybierają spośród dyskretnych miejsc kandydackich. Każdy agent (DBS) działa sekwencyjnie w epoce, obserwując stan globalny obejmujący wcześniejsze działania innych agentów. Model:

1. **Stan:** bieżące położenia DBS + skwantowana niezawodność na DBS $\times$ sprawiedliwość + wcześniejsze działania.
2. **Działania:** kolejny cel dla każdego DBS.
3. **Nagroda:** iloczyn niezawodności systemu i sprawiedliwości Jaina (okienkowanej historiami SINR).

Wyniki: Uczenie się zbiega i przewyższa stałe/naprzemienne bazowe strategie pod względem sprawiedliwości i łącznej nagrody, utrzymując wysoką niezawodność. Inteligentny ruch zmniejsza zużycie energii względem stałego zawisu i unika kar interferencyjnych naiwnego przemieszczania. Przy prostym FDMA poprawia się mediana przepływności i rosną maksima dzięki ruchowi sterowanemu Q-learningiem.

Formowanie wiązki dla pojazdów: model prawdopodobieństwa dostępu Dla wiązki pokrywającej odcinek ulicy rozdział doprecyzowuje opublikowany wcześniej model prawdopodobieństwa dostępu. Symulacje wykazują lepszą zgodność z pomiarami niż wcześniejszy model. Metryka ta pozwala ilościowo ocenić jakość DBS z formowaniem wiązki dla zapewnienia pokrycia V2X.

MILP dla skojarzenia wiązka–obszar W mieście rozważa się z góry określone miejsca kandydackie dla DBS z formowaniem wiązki oraz zdefiniowane odcinki ulic. W zależności od lokalizacji, dany odcinek może nie mieć czystej LOS lub wystarczającego prawdopodobieństwa dostępu. Korzystając z modelu prawdopodobieństwa, MILP wybiera podzbiór lokalizacji do pokrycia wszystkich odcinków przy zachowaniu ograniczenia maksymalnej liczby wiązek na DBS i minimalizacji liczby potrzebnych DBS. *Wyniki:* W porównaniu ze specjalizowaną heurystyką zachłanną, MILP konsekwentnie aktywuje mniej DBS dla tego samego budżetu wiązek.

Rozdział 4 — Optymalizacja mocy nadawania

W tym rozdziale przedstawiono schemat optymalizacji mocy nadawania, który steruje mocą nadajników zestawu DBS z wykorzystaniem zaadaptowanego algorytmu Monte Carlo Tree Search (MCTS). Problem sformułowano jako drzewo gry rozpoczynające się w węźle korzenia z maksymalnymi mocami dla wszystkich DBS. Dzieci zmniejszają moc jednego DBS o zdefiniowany krok; w każdej iteracji MCTS decyduje, którą moc zredukować. Zbędne DBS można całkowicie wyłączyć, redukując moc do zera. Podejście zintegrowano z SINR-EM z Rozdziału 3 do wyznaczania lokalizacji DBS.

Celem transmisyjnego MCTS (TP-MCTS) jest maksymalizacja efektywności energetycznej przy spełnieniu progu niezawodności łącza. Osiąga się to poprzez odpowiedni model oceny węzłów. Kryterium selekcji wykorzystuje górne ograniczenie ufności (UCB) do równoważenia eksploracji i eksploatacji. Podejście wykorzystuje również historię drzewa w czasie, umożliwiając węzłom ponowną ocenę bez odbudowy drzewa od podstaw, a ostatni zwycięski węzeł może konkurować z korzeniem o miano nowego korzenia (wybór najlepszego korzenia, BRS).

Wyniki: Połączenie SINR-EM + TP-MCTS porównano z metodą optymalizacji rojem cząstek (PSO), która wyznacza trójwymiarowe położenia DBS. TP-MCTS konsekwentnie spełnia cel SINR i zwiększa efektywność energetyczną, przewyższając rozwiązanie PSO. Potwierdzono zasadność aktualizacji czasowych opartych na BRS. W całych symulacjach drony pozostawały rozdzielone, a klastry się nie nakładały, unikając kolizji.

Rozdział 5 — Rozmieszczenie DBS z uwzględnieniem backhaul

Ten rozdział koncentruje się wyłącznie na rozmieszczeniu DBS pod kątem łączności backhaul, w przeciwieństwie do wcześniejszych rozdziałów, które opty-

malizowały jedynie fronthaul. Pojawiają się nowe wyzwania względem sieci naziemnych: łącza backhaul muszą dostosowywać się do mobilności DBS, a ze względu na wysokość można stosować łącza kierunkowe (mmWave, FSO), wymagające jednak czystej LOS i omijania przeszkód. Ponieważ skupiamy się tylko na backhaul, rozmieszczone drony określa się jako dronowe stacje przekaźnikowe (DRS), które przekazują ruch backhaul.

Wprowadzono mechanizm wyznaczania lokalizacji DRS w środowisku miejskim z budynkami jako przeszkodami zdefiniowanymi geometrycznie. Celem jest zapewnienie łączności między dwoma punktami na obszarze poprzez kolejne kierunkowe łącza DRS omijające przeszkody.

Zaproponowano algorytm oparty na grafie widoczności. Najpierw buduje się graf widoczności metodą Lee, a krawędzie oznacza kosztami powiązanymi z przepustowością. Następnie algorytm Dijkstry wyznacza ścieżkę o najmniejszym koszcie.

Algorytm rozszerzono o świadomość słoneczną: DRS są rozmieszczane w nasłonecznionych miejscach, aby maksymalizować pozyskiwanie energii PV. Wokół każdego miejsca kandydackiego analizuje się małą siatkę punktów testowych z wykorzystaniem obliczeń geometrii słońca w celu wyboru punktów nasłonecznionych; koszty krawędzi uwzględniają kary za miejsca zacienione.

Wreszcie przedstawiono rozszerzenie z RIS. RIS może tworzyć dodatkowe krawędzie w grafie i zwiększać przepustowość dzięki zyskom formowania wiązki, poprawiając osiągalność i zmniejszając liczbę wymaganych skoków do osiągnięcia docelowej przepustowości.

Wyniki:

- **Środowisko placu w Madrycie:** w dzień trasa 617 m wymaga 2 skoków; w nocy 490 m wymaga 3 skoków.
- **Zrównoważenie:** panele fotowoltaiczne redukują liczbę kursów do/z stacji ładowania ze 115 do 74/dzień (35% mniej), oszczędzając 4,44 kWh/dzień energii do ładowania (plus oszczędności energii na dojazd).
- **Rozszerzenie RIS:** w Poznaniu 1–2 jednostki RIS poprawiają osiągalność i redukują liczbę skoków, zwiększając przepustowość w pobliżu placu (kosztem tego, że niektóre odległe obszary notują niższą przepustowość end-to-end).

Rozdział 6 — Rozmieszczenie DBS z łącznym uwzględnieniem fronthaul i backhaul

W tym rozdziale wprowadzono ramy, które uwzględniają zarówno aspekty fronthaul, jak i backhaul. Dla fronthaul celem jest rozmieszczenie DBS tak, aby każdy GN znajdował się w dysku zasięgu (zdefiniowanym przez minimalny SNR) co najmniej jednego DBS. Dla backhaul wykorzystuje się ograniczenie k sąsiadów: każdy DBS musi mieć co najmniej K sąsiadów backhaul w swoim otoczeniu. Zakładając łącza backhaul FSO, sąsiedzi są wyznaczani przez minimalny SNR definiujący maksymalny dystans łącza FSO.

Aby rozwiązać ten problem rozmieszczenia, zastosowano aglomeracyjną klasteryzację hierarchiczną (HC). Rozpoczynając od traktowania każdego GN jako osobnego klastra, klastry są łączone na podstawie odległości UPGMC pod dwoma warunkami:

1. łączenie nie zmniejsza liczby sąsiadów backhaul żadnego klastra poniżej K ;
2. średnica połączonego klastra (najdalsza odległość GN–GN) $\leq$ promień zasięgu.

Metodę strojenia wysokości z Rozdziału 3 można tu również zastosować do kontrolowania promienia zasięgu każdego DBS poprzez adaptację wysokości.

Wyniki:

- Algorytm spełnia ograniczenia; mniejsze K lub większy dystans FSO obniżają wymaganą liczbę DBS.
- W porównaniu z k-means: HC naturalnie spełnia ograniczenia sąsiedztwa i zasięgu; k-means często je narusza.
- Po rozmieszczeniu, korekty wysokości pozwalają zmniejszać/zwiększać promień zasięgu DBS, podnosząc osiągnięty SNR i zapewniając margines dla mobilności GN. Mała początkowa wysokość powoduje istotny wzrost liczby DBS.

Rozdział 7 — Projektowanie sieci backhaul (końcowe łączne ramy)

Po wyznaczeniu rozmieszczenia DBS buduje się bezprzewodową sieć kratową backhaul, definiując połączenia FSO między DBS. Zakładając, że każdy DBS ma maksymalnie dwa transceivery FSO, każdy DBS ma jedno łącze w górę i co najwyżej jedno łącze w dół.

Definiuje się MILP maksymalizujące rezerwową (nadwyżkową) przepustowość backhaul przy: jednym skoku w górę na DBS, ≤ 1 w dół na węzeł, zachowaniu przepływu, ograniczeniach przepustowości na skok oraz doprowadzeniu całego przepływu do bram (MBS). Problem jest NP-trudny przez redukcję z problemu ścieżki Hamiltona.

Wprowadzono algorytm genetyczny (GA) do rozwiązania tego problemu. Genom koduje sklejone ścieżki DBS $\rightarrow \dots \rightarrow$ MBS. Funkcja dopasowania opiera się na nadwyżkowej przepustowości w sieci, liczonej z perspektywy krawędzi lub węzłów.

Wyniki:

- Znacznie wyższe prawdopodobieństwo sukcesu niż losowe próbkowanie.
- Nadwyżka oparta na krawędziach daje wyższej jakości rozwiązania (większa nadwyżka), lecz o niższym odsetku sukcesów.

- Rozmieszczenie przez HC zwiększa szanse sukcesu GA w porównaniu z rozmieszczeniem przez k-means.

Rozdział kończy się zdefiniowaniem końcowych, kompleksowych ram, które łączą HC i GA wraz z optymalizacją wysokości. Ramy te adaptują się do dynamiki sieci, takiej jak ruch GN i zmiany przepływności.

Zunifikowane ramy (end-to-end):

1. Rozmieść DBS metodą HC.
2. Zbuduj backhaul za pomocą GA. W razie niewykonalności “rozłącz” klastery, aby dodać DBS, i ponów próbę.
3. Optymalizuj wysokości, by poprawić SNR/zredukować promień.
4. Adaptuj: przy mobilności GN rozszerz promień lub przeprowadź ponowną klasteryzację; przy wzroście obciążenia uruchom ponownie GA, by odtworzyć zachowanie przepływu.

List of Achievements During PhD Studies

A. Publications:

1. Hoffmann, M., Janji, S., Samorzewski, A., Kułacz, Ł., Adamczyk, C., Dryjański, M., Kryszkiewicz, P., Kliks, A. & Bogucka, H. *Open RAN xApps Design and Evaluation: Lessons Learnt and Identified Challenges*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 42, no. 2, pp. 473–486, 2024.
2. Sroka, P., Kułacz, Ł., Janji, S., Dryjański, M. & Kliks, A. *Policy-Based Traffic Steering and Load Balancing in O-RAN-Based Vehicle-to-Network Communications*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 73, no. 7, pp. 9356–9369, 2024.
3. Janji, S. *Wykorzystanie Powietrznych Przelączalnych Inteligentnych Powierzchni Do Komunikacji Między pojazdowej*. Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekomunikacyjne, vol. 1, pp. 358–361, Aug. 2024. <https://sigma-not.pl/publikacja-150619-2024-4.html>
4. Janji, S., Sroka, P. & Kliks, A. *Enhancing V2X Communications with UAV-mounted Reconfigurable Intelligent Surfaces*. In: Proc. 2024 IEEE PerCom Workshops, pp. 708–713, 2024.
5. Janji, S., Wawrzyniak, P., Formanowicz, P. & Kliks, A. *Integrating UAV-Enabled Base Stations in 3D Networks: QoS-Aware Joint Fronthaul and Backhaul Design*. arXiv preprint, 2024. <https://arxiv.org/abs/2404.17547> [submitted to IEEE Internet of Things Journal]
6. Janji, S. & Kliks, A. *Multi-Agent Q-Learning for Drone Base Stations*. In: Proc. 2023 IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), pp. 261–266, 2023.
7. Janji, S. & Kliks, A. *Drone Base Stations Transmission Power Control and Localization*. In: Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services, LNICS, vol. 492, Springer, pp. 356–377, 2023. https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-34776-4_19
8. Janji, S. & Sroka, P. *RIS-aided Multi-hop Backhauling for 5G/6G UAV-assisted Access Points*. Journal of Telecommunications and Information Technology, vol. 2, pp. 63–69, Jun. 2023. <https://jtit.pl/jtit/article/view/1190>
9. Janji, S. & Sroka, P. *Wykorzystanie Rekonfigurowalnych Inteligentnych Matryc Antenowych w Łączu Dosyłowym Sieci 5G/6G Wykorzystujących Bezzałogowe Statki Powietrzne*. Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekomunikacyjne, vol. 1, pp. 87–90, Aug. 2023. <https://sigma-not.pl/publikacja-144743-2023-4.html>

10. Janji, S. & Kliks, A. *Neural Networks for Path Planning*. arXiv preprint, 2022. <https://arxiv.org/abs/2207.00874>
11. Janji, S., Samorzewski, A., and Kliks, A. *Procedura Rozmieszczenia Mobilnych Przekazników Dosyłowych FSO Zasilanych z OZE*. Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekomunikacyjne, vol. 1, pp. 290–293, Aug. 2022. <https://sigma-not.pl/publikacja-138994-2022-4.html>
12. Janji, S., Samorzewski, A., Wasilewska, M. & Kliks, A. *On the Placement and Sustainability of Drone FSO Backhaul Relays*. IEEE Wireless Communications Letters, vol. 11, no. 8, pp. 1723–1727, 2022.
13. Janji, S. & Kliks, A. *Energy-Efficient User Clustering for UAV-Enabled Wireless Networks Using EM Algorithm*. In: Proc. 2021 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), pp. 1–6, 2021.

B. Awards:

1. 2nd best paper award for young scientists - Konferencja Radiokomunikacji i Teleinformatyki (KRIT'2024)
2. Best xApp award at Mobile World Congress 2023 for the traffic steering xApp which was implemented by the doctoral student. The student was also responsible for designing the O-RAN messages and protocol implementation and implementing the simulator.
3. Best paper award for young scientists - Konferencja Radiokomunikacji i Teleinformatyki (KRIT'2022)
4. Best presentation award: World Wireless Research Forum 49th meeting (WWRF49)

C. Extracurricular Courses and Trainings:

1. COST INTERACTCA20120 the summer training school on “Open-RAN networks: from theory to implementation.”
2. NVIDIA Workshops (2024):
 - (a) Fundamentals of deep learning
 - (b) Accelerating data engineering pipelines
 - (c) AI for anomaly detection
 - (d) AI for predictive maintenance
3. Artificial Intelligence Doctoral Academy (AIDA) - Aristotle University of Thessaloniki:

- (a) (2021) Pattern Recognition - Statistical Learning (incl. Python project, test, and survey paper)
 - (b) (2022) Cloud/Edge Computing for Deep Learning and Big Data Analytics
 - (c) (2023) The Distributed Adaptive Control of Intelligent Action: Sequential Episodic Control
 - (d) (2023) Context-Aware AI Conversational Agents with RAG Architecture
 - (e) (2024) Graph Neural Networks
4. Coursera (2020): Applying Machine Learning to your Data with GCP - Achieving Advanced Insights with BigQuery – Creating New BigQuery Datasets and Visualizing Insights – Exploring and Preparing your Data with BigQuery

D. Work, Internships, and Research:

1. (2023 February – Present) Poznan University of Technology (PUT): Research and Teaching Assistant at the Institute Radiocommunications.
2. RIMEDO Labs company:
 - (a) February - November 2021: Implementation and testing of dynamic spectrum access system.
 - (b) July 2022 - June 2023: Implementing traffic steering xApp (winner of rAppathon 2023 in MWC).
 - (c) Performing a comprehensive comparison of three different open-source RAN intellignet controllers (RICs).
3. (2022 - 2024) Researcher within the National Science Center project: Application of intelligent antenna arrays and holography for wireless signal transmission based on access to contextual information.
4. (May 2023) Short-term scientific mission where the student spent one month at the University of Bologna working on research related to providing connectivity to vehicular users during disasters with the aid of drone base stations.

E. Participation in Organizational Matters:

1. Student volunteer at IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC) 2023. Rome, Italy, 28 May - 1 June.
2. Assisted dr hab. inż. Adrian Kliks in organizing Wireless World Research Forum 49th meeting in Poznan.
3. 2024 January – 2025 January Member of Doctoral Students Council of Faculty of Computing and Telecommunication.

E. Presenations:

1. COST INTERACT Action meetings:
 - (a) 2024 January - Lisbon, Portugal: Deploying drone relay stations that are equipped with reconfigurable intelligent surfaces (RISs) to assist vehicular-to-everything (V2X) communication.
 - (b) 2023 September - Poznan, Poland: Presentation about employing multi-agent Q-learning for drone base stations deployment in urban environments. The paper was selected to be presented in the COST INTERACT newsletter.
 - (c) 2022 June - Lyon, France: Drone relay stations deployment in urban environment, with FSO backhaul and solar energy harvesting.
2. Wireless World Research Forum (WWRF) meetings:
 - (a) 2023 March - Poznan, Poland WWRF49: deployment of reconfigurable intelligent surfaces (RISs) to support backhauling of small cells.
 - (b) 2024 April - Berlin, Germany WWRF Huddle: Deploying drone relay stations that are equipped with reconfigurable intelligent surfaces (RISs) to assist vehicular-to-everything (V2X) communication.
3. Institute of Radiocommunications Seminar Meetings: presented research works in 2021, 2022, 2023, 2024
4. Conferences:
 - (a) Konferencja Radiokomunikacji i Teleinformatyki (KRiT):
 - i. 2024 September - Poznan, Poland: Handling interference using drone relay stations that are equipped with reconfigurable intelligent surfaces.
 - ii. 2023 September - Krakow, Poland: deployment of reconfigurable intelligent surfaces (RISs) to support backhauling of small cells.
 - iii. 2022 September - Warsaw, Poland: Drone relay stations deployment in urban environment, with FSO backhaul and solar energy harvesting.
5. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM). 2024 March - Biarritz, France: Deploying drone relay stations that are equipped with reconfigurable intelligent surfaces (RISs) to assist vehicular-to-everything (V2X) communication.
6. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking And Communications (WiMob). 2023 June - Montreal Canada: Presentation about employing multi-agent Q-learning for drone base stations deployment in urban environments.

7. EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (Mobi-ubiquitous). 2023 Novemeber - Online: drone base stations placement and power control using expectation-maximization (EM) and Monte Carlo tree search (MCTS).