

## Streszczenie

Każda generacja systemów telefonii komórkowej wymaga niezawodnego rozwiązania jeśli chodzi o mobilność czyli przenoszenie połączeń użytkowników pomiędzy sąsiednimi komórkami. Jest to niezbędne, by zapewnić użytkownikowi najwyższą, niezakłóconą jakość usług. Z tego powodu, od dekad prace badawcze i standaryzacyjne na całym świecie skoncentrowane są na poszukiwaniu coraz lepszych mechanizmów mobilności w sieciach komórkowych, tak by zmiana komórki następowała w sposób niezawodny i niezauważalnie dla użytkownika. Jednym z takich rozwiązań opracowanych w ostatnich latach w ramach standaryzacji 3GPP jest warunkowe przeniesienie połączenia (ang. Conditional Handover, CHO). Podstawową zasadą CHO jest rozdzielenie w czasie fazy przygotowania do zmiany komórki i faktycznej zmiany tejże komórki. Pozwala to na skonfigurowanie terminala mobilnego (ang. User Equipment, UE) wcześniej, kiedy warunki radiowe w kanale pomiędzy UE a stacją bazową są nadal dobre. Natomiast zmiana komórki następuje późno, gdy warunki radiowe w kanale pomiędzy komórką docelową, a terminalem mobilnym są już odpowiednio dobre. UE dokonuje weryfikacji tego poprzez ciągle monitorowanie czy spełniony jest warunek do rozpoczęcia CHO. Warunek ten jest konfigurowany przez stację bazową wraz z wszelkimi innymi szczegółami potrzebnymi do zestawienia połączenia radiowego z nową komórką. Warto zaznaczyć, że w ramach CHO możliwe jest jednoczesne skonfigurowanie aż ośmiu sąsiednich komórek jako potencjalnych kandydatów do przeniesienia połączenia dla pojedynczego terminala mobilnego. UE dokonuje ewaluacji warunku przypisanego do każdej z tych komórek.

Dzięki aspektom CHO opisanym powyżej, t.j. separacji fazy przygotowania i przeniesienia połączenia oraz dzięki możliwości skonfigurowania więcej niż jednej sąsiadującej komórki jako kandydata, zastosowanie CHO zmniejsza ryzyko utraty łącza radiowego (ang. RLF) oraz zwiększa rzetelność procedury przeniesienia połączenia. Niemniej jednak, CHO nadal wymaga ulepszeń w niektórych obszarach. Część z tych obszarów została poddana szczegółowej analizie w ramach tej rozprawy doktorskiej.

Pierwsza z tez badawczych sformułowanych w tej rozprawie dotyczyła procedury odzyskania łącza radiowego za pomocą CHO (ang. CHO recovery). W tej procedurze, po utracie łącza radiowego, terminal mobilny może skorzystać z tego, iż został skonfigurowany przez stację bazową do wykonania procedury warunkowego przeniesienia połączenia (CHO). Po spełnieniu pewnych warunków, UE może spróbować zmienić komórkę korzystając z konfiguracji CHO zamiast rozpoczynać procedurę odzyskania łącza radiowego od podstaw (ang. reestablishment). Teza badawcza zakładała, że istnieje maksymalna liczba komórek do skonfigurowania w ramach CHO recovery, która pozwala jednocześnie na efektywne odzyskanie łącza radiowego w możliwie jak największej liczbie przypadków i nie powoduje nadmiernej rezerwacji zasobów radiowych po stronie stacji bazowej. Uzyskane wyniki pokazały, że wystarczy skonfigurować terminalowi mobilnemu dwie lub w niektórych przypadkach maksymalnie cztery sąsiednie komórki, by uzyskać spodziewane zyski w postaci efektywności użycia CHO recovery w przypadku utraty łącza radiowego.

*Żodnej Staniak*

Druga teza sformułowana w tej rozprawie dotyczyła maksymalizacji użycia zasobów radiowych na bezkolizyjny dostęp losowy (ang. CFRA) w trakcie warunkowego przeniesienia połączenia (CHO). Jedną z wad CHO odkrytych trakcie analizy tego rozwiązania jest fakt, iż zasoby radiowe dla CFRA, konfigurowane dla poszczególnych wiązek radiowych, mogą być nieaktualne w momencie, gdy dochodzi do warunkowego przeniesienia połączenia. Wynika to faktu odseparowania fazy przygotowania i faktycznej zmiany komórki w procedurze CHO oraz z tego, że zasoby na dostęp typu CFRA muszą spełniać warunek jeśli chodzi o jakość odbieranego sygnału na danej wiązce radiowej. W związku z tym, w rozprawie zaproponowano metodę raportowania wyników pomiarów radiowych na poszczególnych wiązkach, tak by stacja bazowa mogła dokonać realokacji zasobów CFRA i przypisać je do wiązek, które mają większą szansę zapewnić wysoką jakość sygnału radiowego w momencie rozpoczęcia zmiany komórki. Teza badawcza zakładała, że dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe będzie zwiększenie stopnia użycia dostępu typu CFRA w trakcie warunkowego przeniesienia połączenia, co korzystnie wpłynie na kluczowe wskaźniki efektywności (ang. KPI) dla mobilności, takie jak liczba nieudanych przeniesień połączenia czy czas trwania takiej procedury zmiany komórki. Uzyskane wyniki potwierdziły, że stopień użycia zasobów typu CFRA w trakcie CHO może zostać zauważalnie zwiększony (o 13% w jednym z badanych scenariuszy) dzięki raportowaniu i realokacji zasobów, o której wspomniano powyżej. Zwiększenie stopnia użycia CFRA wpłynęło korzystnie na wskaźniki jakości dla mobilności.

Trzecia z tez badawczych sformułowanych w tej rozprawie powstała przy okazji pracy nad tezą drugą. Aktualizacja zasobów typu CFRA w trakcie warunkowego przeniesienia połączenia przynosi spodziewane zyski (jak założono w tezie drugiej i następnie udowodniono), ale jednocześnie powoduje znaczny wzrost liczby wiadomości sygnalizacyjnych pomiędzy terminalem mobilnym a stacją bazową. Wynika to z konieczności przesłania raportów pomiarowych do stacji bazowej i następującej na ich podstawie aktualizacji przypisania zasobów CFRA do poszczególnych wiązek radiowych. Z tego powodu, dalsze badania zostały ukierunkowane na znalezienie rozwiązania, które spowodowałoby znaczący spadek liczby wiadomości sygnalizacyjnych bez pogorszenia kluczowych wskaźników jakości dla warunkowej mobilności (CHO). Teza badawcza zakładała, że zastosowanie mechanizmu predykcji ruchu terminala mobilnego, wykorzystującego do tego dane historyczne, pozwoli na wytypowanie prawdopodobnej kolejnej komórki, do której zostanie przeniesione połączenie użytkownika. Dzięki temu, możliwe będzie ograniczenie liczby wiadomości sygnalizacyjnych przy zachowaniu wysokich wartości wskaźników jakościowych dla mobilności. Wyniki uzyskane w trakcie badań potwierdziły tę tezę – redukcja liczby wiadomości sygnalizacyjnych pomiędzy terminalem mobilnym a stacją bazową była możliwa dzięki wykorzystaniu prawdopodobieństwa przeniesienia połączenia do każdej z sąsiednich komórek przy podjęciu decyzji dla których wiązek radiowych warto zaktualizować zasoby typu CFRA.

Podsumowując, wszystkie trzy tezy postawione w tej rozprawie zostały potwierdzone przy wykorzystaniu symulacji systemowej w środowisku MATLAB. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w artykułach zaprezentowanych na międzynarodowych konferencjach, takich

jak IEEE PIMRC 2023. Ponadto, wnioski z pracy badawczej opisanej w tej rozprawie mają istotne i praktyczne znaczenie dla firmy Nokia Solutions and Networks, zarówno jeśli chodzi o stację bazową AirScale (dział produktowy) jak i dla działu badawczo - standaryzacyjnego. Rozwiązania zaprezentowane w tej rozprawie mają również szansę stać się częścią globalnego standardu dla sieci komórkowych, tworzonego w ramach konsorcjum 3GPP.

Jędrzej Stajęga