

**Piotr Rajchowski, Olga Błaszkiwicz, Krzysztof K. Cwalina,
Jarosław Magiera, Alicja Olejniczak, Jarosław Sadowski**
Politechnika Gdańska

PROGRAMOWA REALIZACJA MODUŁÓW SYNCHRONIZACJI CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI TERMINAŁA NB-IOT

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono realizację wybranych modułów funkcjonalnych definiowanego programowo, uniwersalnego wąskopasmowego interfejsu radiowego urządzeń Internetu Rzeczy NB-IoT (Narrowband Internet of Things). Skupiono się na zagadnieniu synchronizacji czasu i częstotliwości, przedstawiając sposób programowej implementacji modułów realizujących wskazaną funkcję. Dodatkowo zawarto opis przeprowadzonych testów funkcjonalnych weryfikujących zdolność utrzymania synchronizacji terminala ze stacją eNodeB (Evolved Node B) w trudnych warunkach propagacyjnych, korzystając z sygnałów radiowych wygenerowanych przez tester radiokomunikacyjny z emulowanym wpływem kanału radiowego.

Słowa kluczowe: NB-IoT, SDR, synchronizacja

WSTĘP

Nieustanny i dynamiczny rozwój technologii 4G-LTE (Long Term Evolution) oraz 5G-NR (New Radio) jest silnie ukierunkowany na zwiększenie pojemności sieci oraz umożliwienie realizowania usług powiązanych z przesyłaniem danych z dużą szybkością oraz z niskim opóźnieniem. Niemniej jednak, w dokumentacji 3GPP (3rd Generation Partnership Project) w wersji 13 opublikowano specyfikację interfejsu radiowego NB-IoT (Narrowband Internet of Things) dedykowanego do realizacji usług w warunkach stacjonarnych oraz w trudnych warunkach propagacyjnych, z przepływnością maksymalną 250 kb/s w łączy w górę. Wprowadzone modyfikacje względem interfejsu radiowego 4G-LTE, zarówno w warstwie fizycznej jak i warstwach wyższych, umożliwiają realizację usług w warunkach o mocno utrudnionej propagacji sygnałów radiowych pozwalając uzyskać parametr maximum coupling loss (MCL) na poziomie 164 dB [1,2].

Aktualnie dostrzec można, iż popularność zyskało podejście do programowej realizacji terminali użytkownika, także tych korzystających z interfejsów radiowych stosowanych w rozwiązaniach telemetrycznych. Realizowane przez autorów artykułu prace badawczo-rozwojowe mają na celu implementację toru odbiorczego oraz nadawczego terminala NB-IoT w formie sprzętowo-programowej struktury, tzw. frameworka [3].

W niniejszym artykule przedstawiono sposób implementacji wybranych modułów toru odbiorczego terminala NB-IoT realizowanego w sposób programowy, bazującego na przyjętej w [3] koncepcji. Skupiono się na przedstawieniu aspektu synchronizacji czasu i częstotliwości przedstawiając poszczególne etapy przetwarzania odebranego sygnału radiowego. Celem niniejszego artykułu nie jest weryfikowanie skuteczności wybranych metod detekcji sygnałów synchronizacyjnych [5], lecz przedstawienie sposobu przetwarzania sygnałów.

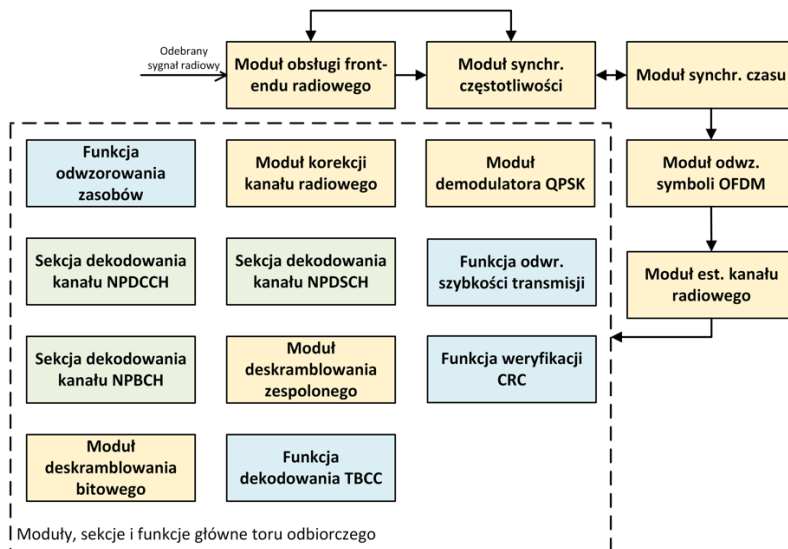
REALIZACJA TORU ODBIORCZEGO TERMINALA NB-IOT

Koncepcja realizacji toru odbiorczego terminala NB-IoT w postaci sprzętowo-programowego frameworka zakłada utworzenie modułów realizujących dedykowaną operację (np. synchronizację częstotliwości) oraz sekcji łączących działanie kilku modułów, np. modułów odpowiedzialnych za proces synchronizacji czasu i częstotliwości. Podczas projektowania frameworka przyjęto, iż każdy z programowych modułów posiadać będzie określony zbiór argumentów wejściowych i wyjściowych co ułatwi wymianę danych pomiędzy nimi.

Na rys. 1 przedstawiono poglądowy schemat toru odbiorczego frameworka NB-IoT. Na schemacie można dostrzec, iż moduły realizujące proces synchronizacji częstotliwości i czasu stanowią pierwszy człon toru odbiorczego, a sygnały wyjściowe przekazywane są do modułu realizującego odwzorowanie symboli OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) a następnie do modułów estymacji wpływu kanału radiowego. Sposób przekazywania danych pomiędzy modułami wymaga użycia różnych punktów styku pomiędzy modułami, tzn. sygnały mogą mieć postać zespolonych ciągów próbek bądź ciągów binarnych o różnych długościach. Tematem niniejszego artykułu jest aspekt synchronizacji czasu i częstotliwości, dlatego też analizie nie będą poddane wiadomości przesyłane w warstwach wyższych.

Realizacja toru odbiorczego w sposób programowy wymaga uwzględnienia w opracowanym oprogramowaniu sposobu odbioru sygnału radiowego interfejsu NB-IoT. Przyjęto, iż moduł obsługi front-endu radiowego (rys. 1) odpowiedzialny będzie za akwizycję wektorów 19200 zespolonych próbek sygnału radiowego odebranego za pomocą urządzenia typu USRP (Universal Software Radio Peripheral), co odpowiada czasowi trwania jednej ramki radiowej przy częstotliwości próbkowania 1,92 MHz.





Rys. 1. Poglądowy schemat blokowy części odbiorczej frameworka NB-IoT

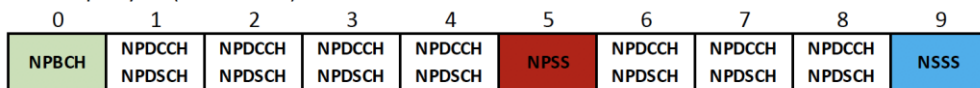
Jako że terminal NB-IoT może rozpocząć odbiór sygnału radiowego w dowolnym czasie t , wymagane jest zastosowanie podejścia uniezależniającego pracę front-endu radiowego od dalszego przetwarzania sygnałów interfejsu. Przyjęto zatem, iż zastosowane zostaną dwa naprzemienne bufory usprawniające proces synchronizacji czasu i częstotliwości i umożliwiające skompensowanie występującego przesunięcia początku odebranej ramki radiowej względem oczekiwanego jej położenia na osi czasu. Bufory te przetwarzane są przez moduł synchronizacji czasu.

REALIZACJA MODUŁÓW SYNCHRONIZACJI CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI

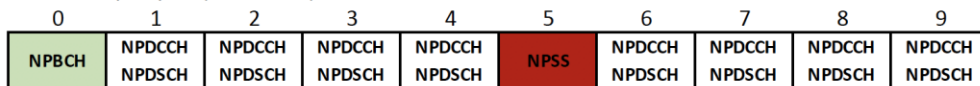
Moduł synchronizacji czasowej wraz z modulem synchronizacji częstotliwościowej biorą udział w procesie wykrycia sygnału NB-IoT w strumieniu próbek sygnałów docierających do odbiornika, ustaleniu identyfikatora stacji bazowej N^{Cell}_{ID} oraz ustalenia kluczowych parametrów jego pracy. W łączu w dół przewidziano dwa sygnały synchronizacyjne NPSS (Narrowband Primary Synchronization Signal) oraz NSSS (Narrowband Secondary Synchronization Signal). Są one umieszczone w dwóch podramkach ramki 10 ms, jednakże sygnał NPSS został ulokowany w każdej kolejnej ramce, w podramce o indeksie 5 zaś sygnał NSSS w podramce nr 9 każdej parzystej ramki radiowej. Rozlokowanie sygnałów NPSS oraz NSSS, jak i pozostałych kanałów dla łączu w dół, przedstawiono na rys. 2.



Ramka parzysta (even frame)



Ramka nieparzysta (odd frame)

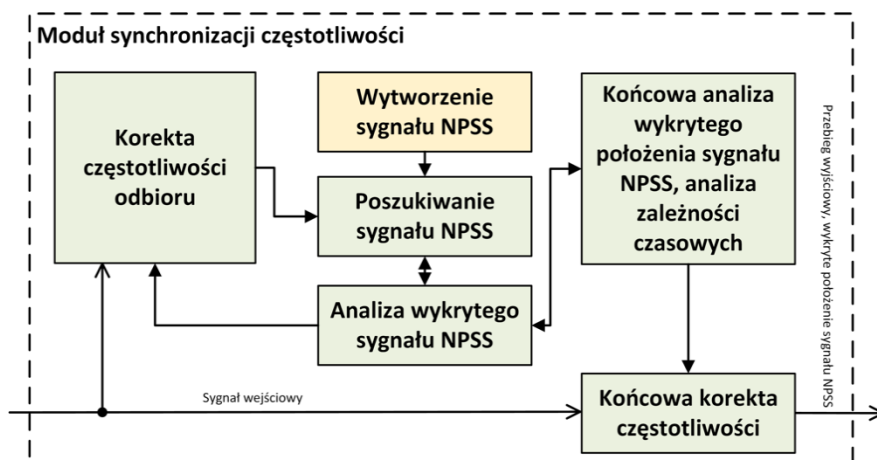


Rys. 2. Rozlokowanie sygnałów NPSS, NSSS oraz kanałów transportowych dla łącza w dół dla dwóch ramek radiowych interfejsu NB-IoT

Mając powyższe na uwadze na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy zaprojektowanego modułu synchronizacji częstotliwości. Na podstawie wykrycia obecności sygnału NPSS w sygnale odebrany możliwe jest dokonanie estymacji błędu częstotliwości odbioru (tzw. carrier frequency offset). Krok zmiany częstotliwości podczas poszukiwania zasobów NB-IoT w odebrany sygnale radiowym wynosi 100 kHz, i jest narzucony przez zapisy standardu [1,2]. Proces poszukiwania należy realizować w zakresie od -900 kHz do +900 kHz względem częstotliwości środkowej zarejestrowanego sygnału (podany zakres częstotliwości wynika z przyjętej częstotliwości próbkowania 1,92 MHz). W sytuacji, kiedy w odebrany sygnale nie zostanie wykryty sygnał NB-IoT konieczne jest dokonanie modyfikacji częstotliwości odbioru sygnału radiowego w urządzeniu radia programowalnego USRP i powtórzenie procesu przeszukiwania. Po każdorazowym przesunięciu częstotliwości odbioru (cyfrowym bądź sprzętowym) konieczne jest wykonanie poszukiwania obecności sygnału NPSS wytworzonego przez stację eNodeB (Evolved Node B) np. używając metody bazującej na korelacji skrośnej z lokalnie wytworzoną postacią sygnału NPSS. W drugim kroku synchronizacji należy dokonać dodatkowego, dokładnego przesunięcia częstotliwości w zakresie min od -7,5 kHz do +7,5 kHz, gdyż w zależności od rozmieszczenia zasobów NB-IoT w paśmie sygnałów LTE może występować przesunięcie częstotliwości środkowej sygnału NB-IoT względem ustalonego rastra 100 kHz o +/- 2,5 kHz lub +/- 7,5 kHz z krokiem wybranym w zależności od efektywności pracy dalszych elementów toru przetwarzania sygnałów w odborniku, w szczególności bloku estymacji i kompensacji wpływu kanału radiowego. Po każdorazowym wprowadzeniu tzw. hipotezy odchyłki częstotliwości i wykonaniu operacji poszukiwania sygnału NPSS konieczne jest zapamiętanie wyznaczonej estymaty obecności sygnału NPSS dla zastosowanej metody (np. wartości maksimum wyniku korelacji) aby w końcowym procesie analizy uzyskanych wyników wskazać wartość najbardziej prawdopodobną przyjmując określone kryterium oceny – np. globalne maksimum korelacji. Przypisana danemu maksimum hipoteza odchyłki częstotliwości stanowić będzie estymowaną odchyłkę częstotliwości odbioru, która musi zostać skompensowana. Dodatkowo maksimum wyniku korelacji wskazuje początek sygnału NPSS w sygnale odebrany. Niniejsze dane stanowią

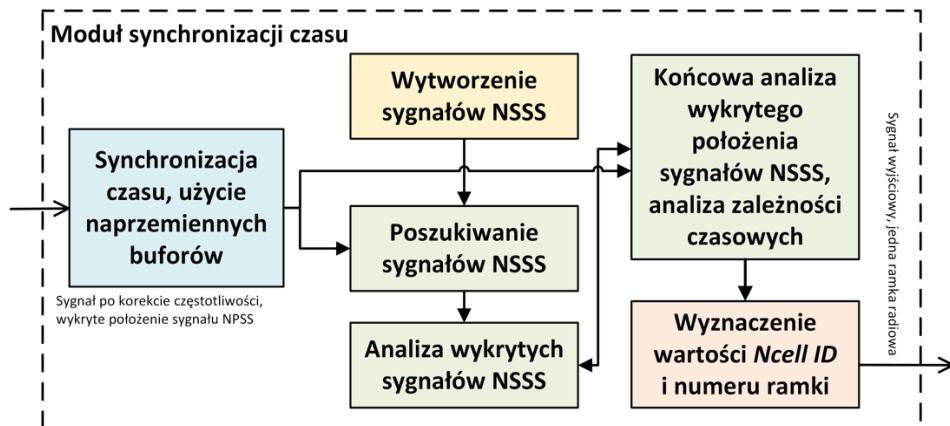


wyjście modułu estymacji odchyłki częstotliwości i są przekazywane do bloku korekcji. Skorygowany sygnał wyjściowy należy traktować jako przygotowany do procesu synchronizacji czasu. Schemat blokowy modułu synchronizacji częstotliwości przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy modułu synchronizacji częstotliwości

Na podstawie wykrytego położenia sygnału NPSS w sygnale odebrany możliwe jest dokonanie synchronizacji czasu, bazując na rzeczywistym i oczekiwanym położeniu sygnału synchronizacyjnego w ciągu 19200 próbek. Z racji znanego i niezmiennego położenia sygnału NPSS określone jest przesunięcie liczby próbek do pierwszej próbki w pierwszej szczelinie (10012 próbek, przy częstotliwości próbkowania 1,92 MHz) i na podstawie zawartości dwóch naprzemiennych buforów możliwe jest uformowanie jednej zsynchronizowanej czasowo i częstotliwościowo ramki radiowej. Niniejsze operacje, realizowane są przez moduł synchronizacji czasu, który został przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy modułu synchronizacji czasu

Przyjęto, iż wykrycie sygnału NSSS, a co za tym idzie identyfikatora komórki, opierać się będzie na wykonaniu korelacji skrośnej fragmentu (tj. min. 1508 próbek) sygnału odebranego z lokalnie wytworzonymi 2016 postaciami referencyjnych sygnałów NSSS. Do procesu korelacji trafić powinien fragment sygnału rozpoczynający się nie później niż 7680 próbek dalej względem pierwszej próbki sygnału NPSS (wliczając przedrostki cykliczne), tj. od próbki nr 17692. Wartości maksimum korelacji każdej z 2016 postaci sygnałów NSSS poddawane są analizie w bloku analizy wyniku korelacji sygnałów. Następnie poszukiwane jest wystąpienie wzorca sygnału NSSS. Jak zostało to przedstawione na rys. 2 sygnał NSSS przesyłany jest w podramce nr 9 w co drugiej ramce, czyli w interwale 20 ms. Niniejsza organizacja czasowa może przyczynić się do konieczności przeanalizowania co najmniej 20 ms sygnału (dwa kolejne 10 ms cykle odbioru) przed wstępnym wyznaczeniem identyfikatora komórki oraz numeru ramki. Wykrycie jednej dominującej (z czterech obecnych) postaci sygnału NSSS odpowiadającego danemu N^{Cell}_{ID} umożliwia określenie numeru ramki jako wartość modulo 8 (tj. trzy najmniej znaczące bity numeru ramki) [1,2].

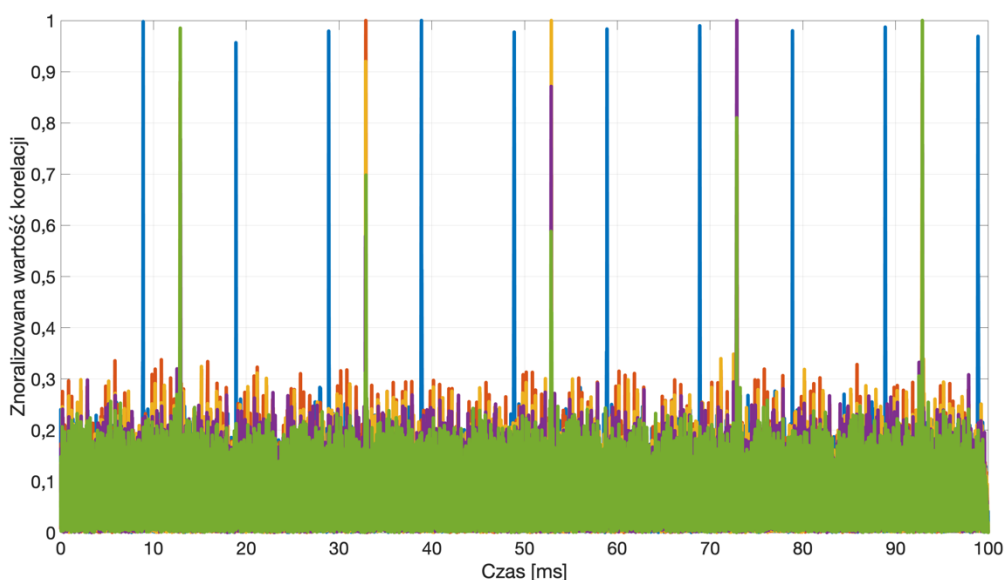
Poprawność realizacji procesu synchronizacji częstotliwości i czasu, mającego bezpośredni wpływ na dalsze operacje realizowane w torze odbiorczym, jest silnie uzależniona od prawidłowej detekcji sygnału NPSS, a także NSSS. Dlatego też kluczowym elementem modułu synchronizacji częstotliwości i czasu (rys. 3 i 4) jest blok odpowiedzialny za weryfikowanie zależności czasowych wykrywanych sygnałów synchronizacyjnych. Jeśli zależności czasowe pomiędzy sygnałami synchronizacyjnymi spełniają przyjęte kryterium oceny możliwe jest prawidłowe wyznaczenie identyfikatora komórki oraz numeru ramki radiowej.



BADANIA MODUŁÓW W WARUNKACH LABORATORYJNYCH

W celu weryfikacji poprawności działania opracowanych modułów synchronizacji czasu i częstotliwości zarejestrowano sygnały testowe stacji eNodeB, które to były generowane przez tester radiokomunikacyjny Rohde&Schwarz CMW500, bądź pochodziły z rzeczywistej sieci LTE-800 operatora T-Mobile (częstotliwość środkowa 811 MHz, pasmo 10 MHz). Jako front-end radiowy zastosowano urządzenie USRP serii X310 dokonujące próbkowania sygnału radiowego z częstotliwością 1,92 MHz.

Przyjęto, iż moduły programowe nie posiadają wiedzy a priori o częstotliwości środkowej bloku zasobów NB-IoT, a także nieznane są jego parametry. Konieczne było zatem przeprowadzenie detekcji wzorcowego sygnału NPSS stosując cykliczne przesuwanie częstotliwości środkowej w rastrze 100 kHz, a następnie z przyjętym zakresem odchyłki $\pm 7,5$ kHz (z krokiem 10 Hz). Na rys. 5 przedstawiono wykryte sygnały NPSS (kolor niebieski) oraz NSSS (kolory: zielony, fioletowy, żółty, pomarańczowy) przedstawione jako maksimum funkcji korelacji skrośnej w funkcji czasu. W celu lepszego zobrazowania powtarzalności występowania sygnałów synchronizacyjnych przedstawiono okno czasowe 100 ms.



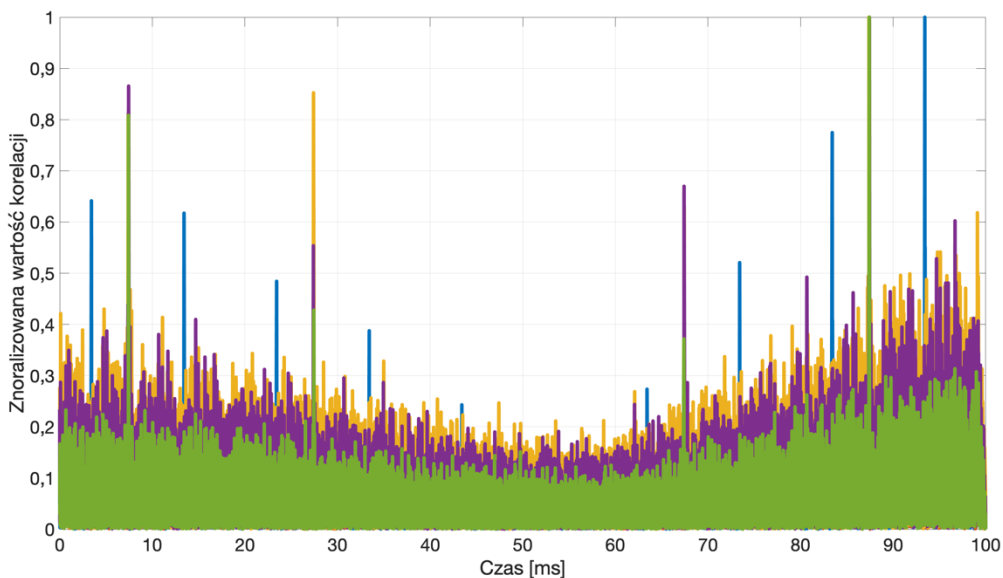
Rys. 5. Wykryte sygnały synchronizacyjne NPSS oraz NSSS w sygnale wygenerowanym z użyciem testera radiokomunikacyjnego [3]

Na przebiegu widoczne jest regularne występowanie sygnału NPSS (o stałej postaci w każdej ramce) oraz czterech postaci sygnału NSSS, gdzie dana



postać sygnału przypisana danemu N_{ID}^{Cell} i numerowi ramki modulo 8 powtarzana jest z interwałem 80 ms.

Przedstawione wyniki detekcji sygnałów synchronizacyjnych odpowiadają wygenerowanemu przez tester radiokomunikacyjny sygnałowi o widmowej gęstości mocy -60 dBm/15 kHz i SNR (Signal to Noise Ratio) równym 10 dB oraz emulowanym pełnym obciążeniem interfejsu NB-IoT (transmisja danych na wszystkich podnośnych przez cały czas trwania rejestracji sygnałów). Podczas dalszego etapu badań zweryfikowano zdolność detekcji sygnałów synchronizacyjnych przy emulowanym wpływie kanału radiowego z użyciem profilu EPA5 (Extended Pedestrian A). Na rys. 6 widoczne jest, iż możliwe jest dostrzeżenie przypadków, gdzie nie wykryto sygnałów synchronizacyjnych z powodu chwilowego obniżenia mocy sygnału użytecznego na skutek zaniku. Przypadki te obrazują konieczność dopasowania części decyzyjnej bloku analizy zależności czasowych pomiędzy wykrywanymi położeniami tychże sygnałów, a także dobranie bezwładności np. podejmowania decyzji o konieczności wykonania ponownego wyszukiwania sygnału interfejsu NB-IoT.



Rys. 6. Detekcja sygnału synchronizacyjnego NPSS w sygnale z emulowanym wpływem kanału radiowego typu EPA5

W kolejnym kroku zweryfikowano zdolność detekcji sygnałów emitowanych przez rzeczywistą stację eNodeB. Na podstawie przeprowadzonej analizy odebranego sygnału wykryto, iż interfejs radiowy NB-IoT w sieci T-Mobile został skonfigurowany do pracy w tzw. trybie „inband” [2]. Zatem blok zasobów NB-IoT może znajdować się w miejscu bloków zasobów nr 4, 9, 14, 19, 30, 35, 40, 45 inter-



fejsu LTE o szerokości kanału 10 MHz. Wykryto, iż blok zasobów NB-IoT w sieci T-Mobile umieszczony posiada identyfikator nr 9. Wymaga to przesunięcia częstotliwości o -2895,5 kHz (uwzględniając przysunięcie sygnału NPSS oraz korektę częstotliwości odbioru) względem częstotliwości środkowej 811 MHz, aby móc poprawnie dokonać odbioru sygnału interfejsu NB-IoT.

PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przedstawiono sposób realizacji operacji w programowych modułach toru odbiorczego terminala NB-IoT realizujących proces synchronizacji częstotliwości i czasu. Opisano sposób przetwarzania sygnałów synchronizacyjnych na przykładzie zrealizowanego sprzętowo-programowego frameworka. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych wskazano czynniki degradujące jakość procesu synchronizacji terminala NB-IoT ze stacją eNodeB.

FINANSOWANIE

Praca została zrealizowana w ramach projektu pt. „Definiowany programowo, uniwersalny interfejs radiowy inteligentnych urządzeń Internetu Rzeczy”, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, umowa nr POIR.01.01.01-00-1025/19-00 z dnia 28.05.2020 r.

BIBLIOGRAFIA

- [1] 3GPP, 3rd Generation Partnership Project; LTE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical channels and modulation, 3GPP TS 36.211, V14.14.0., 2020
- [2] Liberg. O i inni: Cellular Internet of Things, From Massive Deployments to Critical 5G Applications, Academic Press, 2020
- [3] Błaszkiwicz O., Magiera J., Olejniczak A., Rajchowski P., Sadowski J., Ambroziak S., Cwalina K.: Definiowany programowo uniwersalny interfejs radiowy inteligentnych urządzeń internetu rzeczy, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, wol. 1, wyd. 5, 2021, DOI: 10.15199/59.2021.5.2
- [4] Hossam Fattah, 5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT), CRC Press, 2019



- [5] Błaszkiwicz O., Rajchowski P., Sadowski J., Analiza metod synchronizacji w sieci NB-IoT, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, artykuł przyjęty do publikacji, 2022

IMPLEMENTATION OF THE SOFTWARE-DEFINED NB-IOT RADIO INTERFACE

ABSTRACT

In the article the implementation of selected functional modules of the software-defined universal NB-IoT (Narrowband Internet of Things) radio interface was presented. The problem of time and frequency synchronization was pointed and the implementation the software modules realizing this synchronization process was discussed. Additionally, the sample results of performed functional tests aimed in verifying the ability of maintaining the synchronization of the terminal with the eNodeB station. The tests were realized by using the radio signals generated by the radiocommunication tester with an emulated radio channel influence to simulate various environmental conditions.