

Rozdział IX:

Standard LTE jako perspektywa rozwoju technologii GSM-R

mgr inż. Grzegorz Olczyk

Akademia Leona Koźmińskiego, ul. Jagiellońska 55/57, 03 – 301 Warszawa

golczyk@kozminski.edu.pl

STRESZCZENIE

Global System for Mobile Communications-Railway – GSM-R jest standardem telekomunikacyjnym opierającym się na transmisji głosu i danych w sieciach kolejowych i wykorzystywanym obecnie w większości krajów na świecie. GSM-R oraz ETCS stanowią integralną część systemu ERTMS, który zastępuje istniejącą do tej pory analogową technologię sygnalizacji na kolei. Istnieje niewiele publikacji i literatury podejmującej próby przeprowadzenia studium na temat rozwoju systemu GSM-R w Polsce. O ile istnieją badania przeprowadzane głównie w krajach skandynawskich i azjatyckich, o tyle w Polsce poza nielicznymi publikacjami zajmującymi się problematyką wpływu działania sieci komórkowych działających komercyjnie na system GSM-R, badania na temat przyszłości GSM-R są zaniedbane. W niniejszym artykule przedstawiony jest zarys koncepcji konwergencji sieci GSM-R i LTE poprzez możliwość zastosowania technologii CSFB (Circuit Switch Fall Back) w transmisji głosu np. pomiędzy maszynistami a personelem utrzymania tj. dyspozytorami. W tym celu, w pierwszej części tekstu przedstawiony jest ogólny schemat działania sieci GSM-R oraz LTE z wyróżnieniem technologii transferu głosu. W drugiej, opisane są wymagania mechanizmu QoS (Quality of Service) podczas zestawiania połączenia głosowego zgodnie z technologią GSM-R oraz LTE. Ostatnia część przedstawia założenia projektu badawczego, którego głównym celem jest zaprezentowanie perspektywy przeprowadzenia badań empirycznych na polskich odcinkach linii kolejowych już wykorzystujących technologię GSM-R.

Słowa kluczowe: GSM-R, LTE, CSFB, QoS, 3GPP

ABSTRACT

Global System for Mobile Communications-Railway – GSM-R is a telecommunications standard which is based on the transmission of voice and data in railway networks, and currently employed in most countries in the world. GSM-R and ETCS are an integral part of ERTMS, which supersedes analog signaling technology on the railway. There exists few publications and literature attempting to conduct a development study on the GSM-R system in Poland. Apart from a few publications dealing with the impact issue of the commercially operating networks on system GSM-R, the studies on the future of the GSM-R are neglected. This article presents an outline the concept of convergence GSM-R and LTE technology through its support for CSFB in voice transmission, e.g. between drivers and maintenance personnel, i.e. dispatchers. For this purpose, the first part of the text presents a general flow chart of GSM-R and LTE with distinction of technology transfer voice. In the second, the requirements of QoS during a call connection with the technology of the GSM-R and LTE are exhibited. The last part presents the assumptions of the research project,

whose main objective is to present the perspective of empirical research on the Polish sections of railway lines already using technology GSM-R.

Keywords: *GSM-R, LTE, CSFB, QoS, 3GPP*

1. WSTĘP

Obecnie można zaobserwować w literaturze trend świadczący o tym, że technologia LTE [1] może zastąpić istniejącą infrastrukturę GSM-R [2],[3],[4],[5]. W przeprowadzonych analizach widać, że takie uwarunkowania jak racjonalność wykorzystania zasobów sieciowych, ekonomiczny charakter obsługi i utrzymania sieci LTE w porównaniu ze starzejącą się już technologią GSM-R stanowią silny argument w rozważaniach nad alternatywą dla istniejących systemów wdrożonych w transporcie kolejowym. Znajduje się wtedy przestrzeń, którą można uzupełnić przeprowadzając wstępne analizy możliwości rozbudowy sieci z wykorzystaniem najnowocześniejszej technologii LTE. W Polsce usługi sieci LTE świadczone są przez wszystkich operatorów i zakładają dostępność dla większości populacji w kraju. Założeniem artykułu jest sprawdzenie możliwości zastosowania metody transmisji głosu w oparciu o zasoby sieci LTE oraz GSM-R. Jednocześnie w oparciu o wymagania QoS, zaprezentowanie rozwiązania, które może stanowić ciekawą alternatywę podczas podejmowania decyzji o rozbudowie istniejących sieci GSM-R. W rezultacie zaproponowanie modelu badawczego, którego celem będzie wykonanie kolejnych analiz QoS. W związku z powyższym, pierwsza część opracowania zawiera zarys systemu GSM-R i jego wymagań QoS. W drugiej części, zgodnie z wymogami 3GPP znajduje się schemat wymiany wiadomości sygnalizacyjnych podczas zestawiania połączenia głosowego w procedurze CSFB oraz VoLTE, jako alternatywy realizacji połączeń głosowych w sieciach LTE. Natomiast w trzeciej części zaprezentowane są i opisane przykładowe reprezentacje wymiany wiadomości sygnalizacyjnych z wykorzystaniem dwóch różnych chipsetów, a w ostatniej części, poza wnioskami, znajdują się własności modelu badawczego do dalszych analiz.

2. GSM-R

W 1992 roku UIC (International Union of Railways) rozpoczęło projekt integracji systemów komunikacji na kolei. Głównym celem był stworzenie funkcjonalności i wymagań technicznych, które poprzez sieć mobilną wypełniałyby potrzeby operacyjności wykraczające poza granice jednego operatora. W rezultacie prac nad projektem powstały dwie grupy robocze, które opracowały podstawy działania nowego systemu opisane w dokumentach SRS (System Requirement Specification) oraz FRS (Functional Requirement Specification) [6],[7],[8]. Przemysł związany z komunikacją kolejową używa bezprzewodowych systemów komunikacji od wielu lat, a większość operatorów linii kolejowych rozwinęło sieć GSM-R zarówno w celu komunikacji głosowej oraz jako platforma sygnalizacji pomiędzy maszynistami a kontrolerami ruchu, jako element systemu ETCS level 2 (European Train Control System) [9]. Kluczowe dla opisywanego podejścia staje się uwzględnienie systemu sygnalizacji ETCS, które zapewnia spełnienie wszystkich wymagań dotyczących sterowania ruchem pociągów oraz komunikacji pomiędzy nimi oraz dyspozytorem. ETCS obok GSM-R jest centralną częścią systemu ERTMS(Rail Traffic Management System) i dostarczając w czasie rzeczywistym informacje dla kontrolerów ruchu oraz maszynistów zwiększa elastyczność zarządzania ruchem w porównaniu do sieci analogowych. GSM-R jest oparta na drugiej generacji (2G) technologii telekomunikacyjnej GSM oraz na dwóch projektach zwanych EIRENE (European Integrated Radio Enhanced Network) oraz MORANE (Mobile

Oriented Radio Network). Funkcjonalność systemu GSM-R jest taka sama jak sieć GSM oraz posiada podobną infrastrukturę sieciową, choć bogatszą o dedykowane usługi takie na przykład jak adresowanie funkcyjne, czy wywołania grupowe przy połączeniach głosowych [10]. Najważniejszą różnicą pomiędzy systemami GSM i GSM-R są przedziały częstotliwości, na których działają urządzenia. GSM-R jest obsługiwane w dedykowanym kanale o szerokości 4MHz (876-880 MHz „w górę” oraz 921-925 MHz „w dół”) [7]. Częstotliwości te zarezerwowane są dla linii kolejowych w całej Unii Europejskiej, co efektywnie wpływa na interoperacyjność sieci [11]. Architektura całego systemu GSM-R składa się z trzech podsystemów, pierwszy z nich: BSS (Base Station Subsystem), w którego skład wchodzi takie elementy jak sterowniki stacji bazowych BSC (Base Station Controller) oraz stacje bazowe BTS (Base Transceiver Station), drugi system to CN (Core Network), w którym znajdują się centrale MSC (Mobile Switching Center), VLR (Visitor Location Register), baza usług i rejestry użytkowników HLR (Home Location Register), trzeci podsystem to strefa użytkownika sieci, czyli terminal mobilny oraz urządzenia sterujące w przypadku ETCS. Sieć GSM-R różni się od komercyjnej sieci GSM tym tylko, że w tej pierwszej można odnaleźć dodatkowy moduł zintegrowany z MSC i odpowiedzialny za wywołania i połączenia głosowe w obrębie grup użytkowników GCR (Group Call Register) [10], [11]. Zastosowanie dodatkowych funkcjonalności, które odróżniają sieć dedykowaną na potrzeby transportu kolejowego GSM-R od GSM oraz szczególne wymagania związane z bezpieczeństwem i niezawodnością sieci telekomunikacyjnej spowodowało potrzebę specyfikacji parametrów QoS (Quality of Service). Wymagania QoS dla połączeń głosowych w GSM-R opisane w procedurze [12] przedstawia Tabela 1.

Tabela1. Parametry QoS dla GSM-R

Parametry QoS	Wartość
Opóźnienie podczas zestawiania połączeń wychodzących	< 8.5s (95%), ≤ 10s (100%)
Współczynnik błędów w zestawianiu połączeń	< 0,01
Maksymalne opóźnienie w transferze danych w blokach 30B	≤ 0.5s (99%)
Współczynnik zerwanych połączeń	≤ 0,01/h
Okres interferencji w transmisji	< 0.8s (95%), < 1s (99%)
Okres transmisji bez błędów	> 20s (95%), > 7s(99%)
Opóźnienie rejestracji do sieci	≤ 30s (95%), ≤ 35s (99%), ≤ 40s (100%)

Na potrzeby tego opracowania oraz ograniczenia w dostępności danych empirycznych wybrane zostały trzy parametry: opóźnienie połączeń, współczynnik błędów w zestawianiu połączeń oraz współczynnik zerwanych połączeń. Wyniki przeprowadzonych testów wykorzystujących rozwiązanie CSFB opisane poniżej, przedstawione są w dalszej części.

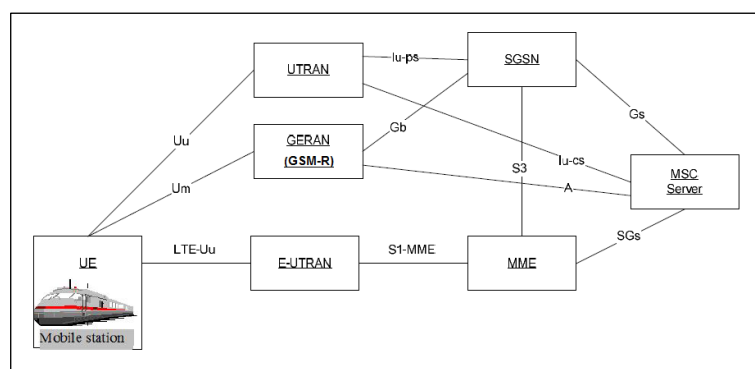
3. CSFB – METODA LTE

3.1. Technologia LTE

LTE jest czwartą generacją (4G) sieci telekomunikacyjnej opartej na protokole internetowym (IP) [13]. Głównymi elementami sieci są E-UTRAN, w którym zawarte są stacje bazowe eNodeB (BTS w systemie GSM) oraz sieć szkieletowa EPC (Evolved Packet Core) składająca się z modułów - między innymi z MME, S-GW (odpowiednio: MSC i BSC w GSM) oraz HSS (odpowiednik HLR w GSM), a całość tworzy system EPS (Evolved Packet System) [14]. W celu ograniczenia kosztów oraz zwiększenia efektywności wykorzystania łącz sygnalizacji, w tym opóźnień w sygnałach, sieć LTE posiada mniejszą ilość węzłów logicznych w porównaniu z GSM. Szczególnym przypadkiem usług wykorzystywanych w sieciach LTE jest transmisja głosu. W sieciach GSM połączenia głosowe przenoszone są poprzez technologię komutacji łącz (CS - Circuit Switch), czyli węzły MSC, natomiast w LTE transmisja odbywa się po łączach IP, jako usługa VoLTE (Voice over LTE). Dlatego też, kiedy połączenia są wykonywane z sieci LTE do technologii 2G i 3G (i w odwrotnym kierunku) mogą występować problemy z ich komutacją. Analogicznie rzecz może mieć miejsce dla technologii GSM-R. W celu rozwiązania problemów na interfejsie różnych technologii wprowadzono metodę CSFB.

3.2. Połączenia głosowe z wykorzystaniem procedury CSFB

CSFB (Circuit Switch Fall Back) umożliwia przydzielenie usługi głosu poprzez ponowne wykorzystanie infrastruktury CS, gdy urządzenie mobilne jest obsługiwane przez sieć LTE (E-UTRAN). Metoda sprawia, że podczas inicjowania albo odbierania połączenia głosowego terminal połączony do sieci LTE jest automatycznie przełączany do sieci 2G lub 3G pod warunkiem, że zasięg sieci E-UTRAN pokrywa się z zasięgiem sieci 2G/3G [15]. W tym przypadku brana pod uwagę jest sieć 2G, czyli GSM (GSM-R). Na Rys.1 przedstawiono przykładową architekturę sieci LTE, w której przykładowo urządzenie mobilne jest scharakteryzowane i umieszczone w pojeździe kolejowym i poprzez interfejsy radiowe Uu, Um oraz LTE-Uu połączone z siecią LTE, GSM-R lub UTRAN (3G).



Rys.1. Architektura sieci LTE dla CSFB [16]

Procedura zestawiania połączenia z wykorzystaniem metody CSFB zawiera w sobie zastosowanie się do reguł przedstawionych w specyfikacji 3GPP [15], w których uwzględnia

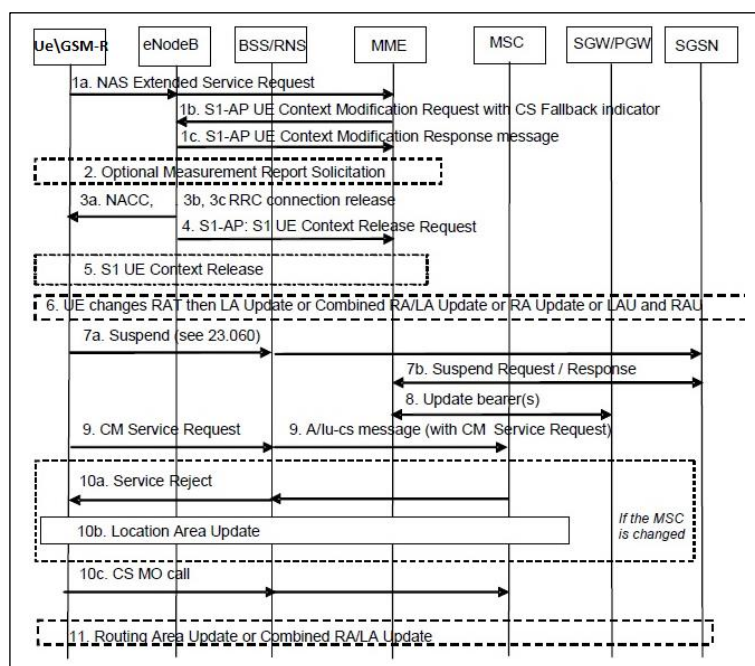
się parametry transmisji zawierającej protokoły sygnalizacyjne pomiędzy wszystkimi elementami schematu sieci przedstawionym powyżej. Wymiana wiadomości sygnalizacyjnych w procedurze CSFB jest zobrazowana na schemacie (Rys.2.). Brakuje w polskiej literaturze odpowiedników terminologii użytej na tym rysunku, dlatego tworzenie nowych pojęć oraz opisywanie wszystkich procesów wybiega poza cel niniejszego artykułu. Wobec powyższego skupiona będzie uwaga na kluczowych wiadomościach, takich jak:

1a-1b. Urządzenie mobilne (w sieci LTE) wysyła do sieci poprzez interfejs S1 wiadomość Extended Service Request, która zawiera znacznik CSFB – na jego podstawie MME zleca wykonanie procedury CSFB.

2. Stacja eNodeB może (w przypadku CSFB do 2G) zlecić wykonanie lub pobrać pomiary przez urządzenie mobilne w celu wyboru (przez eNodeB) najlepszego pod względem poziomu sygnału BTS.

3a.-3b.-4. Po wybraniu najlepszego BTS, do którego skierowane zostanie urządzenie mobilne sieć wysyła wiadomość *RRC Connection Release* z informacją (*release with redirection*), na jaką częstotliwość/BTS (z przedziału zarezerwowanego dla GSM-R) ma zostać przeprowadzone przekierowanie.

[...] **10.** Z chwilą, kiedy urządzenie mobilne jest już zarejestrowane do sieci 2G/3G (po udanej procedurze *Location Area Update*) wykonuje inicjację połączenia wychodzącego MO (Mobile Originating) zgodnie z procedurą w sieci 2G/3G [17].



Rys.2.Schemat wymiany wiadomości podczas zestawiania połączenia CSFB [15]

3.3. Połączenia głosowe z wykorzystaniem procedury VoLTE

Alternatywą dla CSFB dla połączeń głosowych z wykorzystaniem sieci LTE jest metoda VoLTE. Voice over LTE będąca standardem, który został wprowadzony w celu realizacji usług połączeń głosowych przy wykorzystaniu zasobów sieci IP, których nośnikiem jest sieć LTE. W oparciu o standard IMS (IP Multimedia Subsystem), który jest dedykowany do sieci IP wprowadzono specyfikację usługi VoLTE [18], [19]. W porównaniu z sieciami 2G i 3G, w VoLTE efektywność wykorzystania zasobów sieciowych (szersze pasmo częstotliwości nośnej) [20] oraz jakości transmisji głosu (kodowanie AMR-WB) [21] jest nieporównywalnie wydajne i racjonalne pod kątem kosztów infrastruktury sieciowej. W przypadku zastosowania usługi VoLTE dla sieci kolejowych, twierdzi się, że pod względem rozwiązań funkcjonalnych oraz procedur spełniających wymagania QoS rozwiązanie VoLTE może być silnym kandydatem, jako następcą systemu połączeń głosowych w GSM-R [5]. Dla potrzeb niniejszego artykułu metoda ta nie będzie opisywana, ponieważ założeniem jest wykorzystanie istniejących zasobów sieciowych GSM-R, które podczas wykonywania procedury VoLTE nie są zastosowane.

4. ROZWIĄZANIE CSFB dla GSM-R

4.1. Przykładowy scenariusz protokołowy

Każdy obecnie produkowany telefon komórkowy posiada procesor zwany SoC (System-on-a-Chip) dalej zwany chipsetem, który posiada dwa odrębne systemy komunikacji oparte na dwóch systemach procesorowych: AP (Application Processor) – odpowiadający za wykonywanie obliczeń oraz obsługę aplikacji zainstalowanych na telefonie i pozostających wyłącznie na użytek procesów wewnętrznych w telefonie, natomiast CP (Communication Processor) [22] odpowiada za protokoły sygnalizacyjne w komunikacji z sieciami bezprzewodowymi (2G/3G/LTE/Wifi/Bluetooth itp.) oraz obsługę procesów w bezpośrednich interfejsach z AP, tak jak chipset *Snapdragon* [23] produkowany przez koncern Qualcomm, stosowany np. w telefonach Iphone5, albo chipset *Exynos* [24] produkowany przez Samsung, np. w telefonach Galaxy S6. Oprogramowanie modułu CP jest ściśle związane i oparte na wymaganiach specyfikacji technicznych takich jak 3GPP dla sieci komórkowych, dlatego dla potrzeb analiz będzie wykorzystywana wiedza teoretyczna pochodząca z publikowanych dokumentów 3GPP oraz doświadczenia w analizach protokołów sygnalizacyjnych.

Podczas procedury CSFB sieć przekazuje informacje do Ue z komendą *release with redirection*, w wiadomości sygnalizacyjnej obsługującej ten proces zawarte są dane na temat częstotliwości, na którą urządzenie zostanie przekierowane. Informacje, jaka dokładnie częstotliwość powinna być wybrana, są zapisane w rejestrach eNodeB w procesie planowania sieci. Procedura CSFB zarówno dla sieci UTRAN oraz GSM jest taka sama. Urządzenie korzystające z zasobów sieci LTE zostaje przekierowane do sieci GSM poprzez procedurę zawartą w wiadomości *RRC Connection Release*. LTE podaje informacje na temat częstotliwości, jaką ma wybrać urządzenie, następnie używając tych zasobów poszukuje właściwą (pod względem parametrów jakościowych sygnału) stację bazową, aby po jej znalezieniu rozpocząć (na podstawie informacji zawartych w SIB – System Information Block) procedurę przejścia ze stanu jałowego (IDLE) do stanu połączonego (CONNECTED).

Na podstawie wieloletnich doświadczeń w analizie błędów w protokołach sygnalizacyjnych w różnych interfejsach sieciowych do opisu procedury CSFB, właściwe

wydaje się podejście, w którym poddane analizie będą chipsety dwóch różnych producentów. Forma prezentacji wymiany wiadomości jest bardzo podobna i odpowiada kryterium przyjętem w specyfikacji 3GPP [15] oraz na Rys.2. Istotnym zastrzeżeniem jest to, że prezentowana procedura CSFB odnosi się do przekierowania połączenia z systemu LTE do 3G, zamiast do 2G (GSM). Jest to spowodowane tym, że w obecnie działających sieciach (w komercyjnych lokalizacjach) rzadko spotykana jest konfiguracja, w której urządzenie mobilne znajduje się w lokalizacji, gdzie występuje zasięg LTE i 2G (bez 3G). Uwarunkowanie to jest zaznaczone w ostatniej części opracowania.

4.2. Opóźnienie zestawiania połączeń wychodzących – wyniki dwóch testów

„Opóźnienie zestawiania połączenia” to czas, który jest zdefiniowany pomiędzy wysłaniem żądania (komenda ATD – AT command Dial), a identyfikacją tego zdarzenia poprzez wiadomość *CONNECT* dla połączeń głosowych albo zmianę wartości DCD (Data Carrier Detect) na „włączone” - dla transmisji danych [12]. W specyfikacji dotyczącej, jakości transmisji połączeń głosowych i multimedialnych zawarta jest definicja stosowana obecnie w świecie telekomunikacji bezprzewodowej i określa ona, że czas zestawiania połączenia jest okresem czasu pomiędzy wysłaniem wiadomości adresowanej, a odbiorem notyfikacji o połączeniu przychodzącym [25]. Jest to równoznaczne z wysłaniem wiadomości **Extended Service Request** (komenda ATD) oraz otrzymaniem wiadomości **Alerting**. Wiadomość *CONNECT* pojawia się w momencie odbioru połączenia przez użytkownika (naciśnięcie „zielonej słuchawki”), czyli może nastąpić w dowolnej chwili. Z tego względu przyjmuje się, że rzeczywisty czas (opóźnienia) zestawiania połączenia liczy się od momentu pojawiania się wiadomości *Alerting* zgodnie z założeniami wspomnianej specyfikacji. Na Rys. 3 oraz Rys. 4 czas opóźnienia dla obu chipsetów wynosi odpowiednio $t_1=5,86s$ i $t_2=6,97s$.

14:29:26.192	EXTENDED SERVICE REQUEST
14:29:26.192	rrcConnectionRequest
14:29:26.289	rrcConnectionSetup
14:29:26.289	rrcConnectionSetupComplete
14:29:26.292	securityModeCommand
14:29:26.292	securityModeComplete
14:29:26.293	ueCapabilityEnquiry
14:29:26.293	ueCapabilityInformation
14:29:26.703	rrcConnectionRelease
redirectedCarrierInfo: ultra-FDD	
ultra-FDD: 10688	
14:29:26.850	CM SERVICE REQUEST
14:29:27.041	rrcConnectionRequest
14:29:27.141	rrcConnectionSetup
14:29:27.346	rrcConnectionSetupComplete
14:29:27.648	securityModeCommand
14:29:27.650	securityModeComplete
14:29:27.650	ROUTING AREA UPDATE REQUEST
14:29:27.747	SETUP
14:29:28.142	CALL PROCEEDING
14:29:32.053	ROUTING AREA UPDATE ACCEPT
14:29:32.053	ROUTING AREA UPDATE COMPLETE
14:29:32.053	ALERTING
14:29:33.876	CONNECT
14:29:33.876	CONNECT ACKNOWLEDGE
14:29:36.982	DISCONNECT
LTE, 3G RAT	

Rys.3. Procedura CSFB (t1), warstwa L3, Exynos

04:35:43.874	Extended service request Msg
service_type = 0 (0x0) (mobile originating CS fallback)	
04:35:45.358	CCCH UL/RRC Connection Request
04:35:45.575	CCCH DL/RRC Connection Setup
04:35:45.698	DCCH UL/RRC Connection Setup Complete
04:35:45.700	MM/Location Updating Request
04:35:45.700	GMM/Routing Area Update Request
04:35:46.010	MM/Identity Request
04:35:46.011	MM/Identity Response
04:35:46.120	GMM/Authentication And Ciphering Request
04:35:46.365	GMM/Authentication And Ciphering Response
04:35:46.651	MM/Authentication Request
04:35:46.741	GMM/Routing Area Update Accept
04:35:46.908	MM/Authentication Response
04:35:47.171	MM/Identity Request
04:35:47.171	MM/Identity Response
04:35:48.271	MM/Location Updating Accept
04:35:48.272	MM/TMSI Reallocation Complete
04:35:48.273	MM/CM Service Request
04:35:48.390	MM/CM Service Accept
04:35:48.391	CC/Setup
04:35:48.701	CC/Call Proceeding
04:35:48.721	CC/Facility
04:35:50.845	CC/Alerting
04:35:50.886	CC/Connect
04:35:50.888	CC/Connect Acknowledge
04:35:58.330	CC/Disconnect
LTE, 3G RAT	

Rys.4. Procedura CSFB (t2), warstwa L3, Snapdragon

Szczegółowe wyniki podane są w Tabeli 2. Zdefiniowany czas zestawiania połączenia jest równoznaczny z pojęciem “opóźnienia zastawiania połączenia wychodzącego” stanowiącego element QoS z rozdziału 2 oraz opisany również w [26].

Istniejąca literatura w niewielkim stopniu wyposaża inżynierów w wiedzę dotyczącą czasów zestawiania połączeń CSFB na podstawie przeprowadzonych testów. Z tego

powodu dane empiryczne oparte są na specyfikacjach pochodzących od producenta chipsetu *Snapdragon* firmy Qualcomm [27] oraz na podstawie [28]. Średnie czasy ze specyfikacji przedstawione są w Tabela 2.

Tabela 2. Średnie czasy zestawiania połączeń CSFB

Rozwiązanie	CSFB do 2G (GSM-R)	CSFB do 3G (UMTS)
Qualcomm <i>Snapdragon</i> [6]	~5,9s	~5,1s
Samsung Galaxy SIII LTE [7]	~5,3s	~4,7s

Na podstawie przyjętych założeń przeprowadzono testy połączeń głosowych w Instytucie R&D Samsung Polska z wykorzystaniem chipsetu *Exynos* oraz chipsetu *Snapdragon*. W przeprowadzonych testach połączeń, w warunkach przemieszczania się (2h jazdy samochodem w otoczeniu miejskim i wykonanie 100 prób połączeń wychodzących, operator T-Mobile Polska) z wykorzystaniem dwóch modeli telefonów, z chipsetami opisanymi powyżej uzyskano następujące rezultaty:

- średni czas opóźnienia zestawiania połączenia CSFB do 3G wyniósł odpowiednio $t_1=6,67s$ dla *Exynos* i $t_2=7,01s$ dla *Snapdragon*;
- ilość połączeń nieudanych (współczynnik błędów w zestawianiu połączeń $< 0,01$) wyniósł 0;
- ilość połączeń zestawionych i niezerwanych (współczynnik zerwanych połączeń $\leq 0,01/h$) wyniósł 0.

5. MODEL BADAWCZY

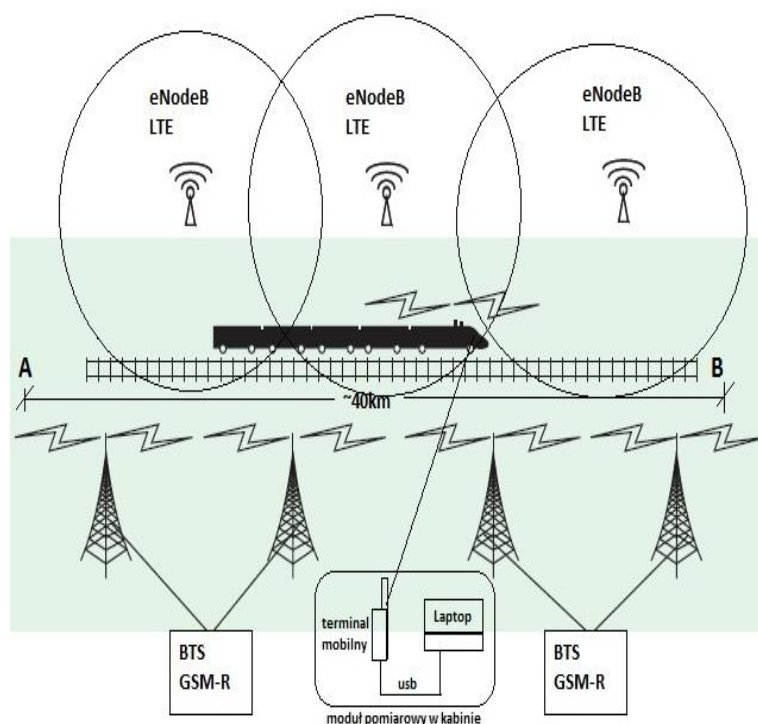
Obecnie sieć GSM-R w Polsce jest częściowo zbudowana i w pełni funkcjonuje na przykład na odcinku E65 (Warszawa – Gdynia) oraz E20 (Kunowice – Terespol) [29]. W celu przeprowadzenia analiz i odpowiedzenia na pytanie, w jaki sposób sieć LTE może zastąpić GSM-R, należy wybrać takie lokalizacje, w których zasięg LTE na odcinkach linii kolejowych zapewnia pełne pokrycie. Takich miejsc w kraju jest niewiele, dlatego dane empiryczne z tych lokalizacji będą stanowić uzupełnienie tych przeprowadzonych w krajach skandynawskich [5],[30],[31]. Na podstawie przeprowadzonych wyżej analiz można zbudować model badawczy, który będzie stanowić podstawę do rozstrzygnięcia następującej hipotezy: Metoda CSFB spełnia wymagania QoS dotyczące połączeń w GSM-R. W tym celu wykorzystany powinien zostać plan badawczy zawierający następujące założenia:

- wykonanie testów połączeń głosowych oraz transmisji danych w warunkach terenowych, w których przewiduje się realizację 100 prób połączeń wychodzących w trybie przemieszczania się,
- lokalizacje powinny być dobrane w taki sposób, aby umożliwić spełnienie warunków dostępności, na całym badanym odcinku zasięgu zarówno sieci LTE, jak i GSM-R,
- do testów powinny być użyte komercyjne telefony komórkowe, których moduły komunikacyjne CP są, co najmniej tej samej klasy jak te użyte w próbach opisanych powyżej,

- testy połączeń powinny być wykonywane w warunkach, gdzie urządzenie mobilne znajduje się w lokalizacji, w której występuje zasięg tylko dwóch sieci: LTE i GSM,
- sieć komercyjna powinna mieć zaimplementowaną konfigurację eNodeB uwzględniającą zasoby częstotliwościowe GSM-R, czyli zakres przedziałów i ich wartości powinien zostać zapisany do rejestrów eNodeB, MME.

5.1. Poglądowy schemat pomiarowy

Na Rys. 5 przedstawiony został przykładowy model strukturalny zawierający schemat sieci oraz umiejscowienie elementów pomiarowych. Składa się z podzespołów istniejącej infrastruktury sieci kolejowej GSM-R operatora PKP PLK oraz elementów sieci dostępowej LTE operatora T-Mobile Polska. Odcinek pomiarowy, to ok. 40km fragment trasy E65 zaczynający się w okolicach Pruszcza Gdańskiego (A), a kończący się na stacji w Gdyni (B). Spełnia dwa przedstawione wcześniej warunki, czyli zapewnia zasięg sieci LTE – dane zebrane na podstawie wewnętrznych systemów pomiarowych operatora T-Mobile oraz zasięgu sieci GSM-R.



Rys.5. Schemat pomiarowy modelu badawczego [33],[34]

W celu przeprowadzenia testów połączeń głosowych, terminal mobilny oraz urządzenia tworzące „moduł pomiarowy w kabinie” mogą znajdować się wewnątrz składu, który jest używany do regularnych połączeń pasażerskich PKP. Optymalnym rozwiązaniem jest wyniesienie końcowej części systemu radiowego (terminal mobilny) na zewnątrz składu w celu uzyskania najlepszych warunków radiowych (najlepszy sygnał liczony w dBm). W opisanych testach, w punkcie 4.2. terminal mobilny był na stałe zamontowany na szybach okiennych przemieszczającego się samochodu testowego, dlatego to rozwiązanie również

może być brane pod uwagę. Wymiana wiadomości sygnalizacyjnych, czyli pomiar czasu opóźnienia zestawiania połączenia wykonać można poprzez analizę danych protokołowych zebranych podczas wykonywania prób połączeń na odcinku linii kolejowej.

7. WNIOSKI

Przedstawione rozwiązanie może stanowić interesującą alternatywę w przypadku rozważań na temat rozwoju sieci GSM-R w kierunku LTE. Teoretycznie można przyjąć, że podczas wymiany infrastruktury sieciowej, z GSM na LTE, w tzw. okresie przejściowym (w przypadku sieci komercyjnych okres przejścia z sieci 2G do LTE to okres kilku lat) można wykorzystywać dotychczasowe zasoby sieciowe GSM-R równocześnie z istniejącą siecią komercyjną lub nową siecią zbudowaną i dedykowaną tylko do celów komunikacji kolejowej.

Ponadto, systemy protokołowe oparte na specyfikacji 3GPP dają możliwości projektowania sieci zgodnie z ich wymaganiami, ale również pozwalają na wprowadzanie usprawnień i dodatkowych funkcjonalności w sygnalizacji 3GPP. Z tego przywileju często korzystają producenci terminali mobilnych (np. Samsung, Apple), sprzętu do infrastruktury sieciowej (np. Ericsson, Nokia) oraz operatorzy telekomunikacyjni (np. T-Mobile, Orange), którzy na podstawie patentów oraz alternatywnych sposobów wykorzystania tych samych zasobów sieci sygnalizacyjnej optymalizują procedury. Charakterystyka sieci GSM-R, w której nie istnieją złożone algorytmy planowania zasobów (np. mniejsza ilość relacji sąsiedzkich na stacjach BTS) może przyczynić się do zastosowania bardziej „sztywnego” definiowania procedur wymiany wiadomości sygnalizacyjnych, w tym przypadku czas wykonania procedury CSFB może być skrócony na przykład drogą wyeliminowania operacji w trybie LAU/RAU albo realizacji uproszczonej komendy *Release with Redirection*, gdzie częstotliwości mogą być trwale zdefiniowane. Dzięki takim rozwiązaniom można uzyskać cenne sekundy np. w operacji „opóźnienia połączenia” i oddalić się od progów przyjętych w wymogach QoS.

Technologia GSM starzeje się, szczególnie w obszarze rynku telekomunikacyjnego, czego pierwsze symptomy można dostrzec w USA, gdzie operator AT&T z końcem 2016 roku wyłącza całkowicie sieć GSM [32], natomiast w sektorze kolejowym cykl życia produktu, jakim jest GSM-R będzie według innych uwarunkowań. Przyjmuje się, że do roku 2025 sieć GSM-R będzie wspierana i utrzymywana przez operatorów [9],[30], a w niektórych krajach, na przykład w Polsce jest wciąż na etapie rozbudowywania, dlatego istnieje przestrzeń czasowa oraz zasobowa, aby przeprowadzać więcej badań nad wykorzystaniem sieci LTE w transporcie kolejowym.

LITERATURA

- [1] ETSI, ETSI TR 125 913 V8.0.0, Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (EUTRAN), 2009.
- [2] K. Guan, Z. Zhong, B. Ai, Assessment of LTE-R Using High Speed Railway Channel Model,” w: Communications and Mobile Computing (CMC), 2011 Third International Conference.
- [3] F.J. Martin-Vega, I.M. Delgado-Luque, F. Blaquez-Casado i in., LTE performance over high speed railway channel, 2013, IEEE.
- [4] A. D. Zayas, C. A. G. Perez P. M. Gomez, Third-generation partnership project standards: For delivery of critical communications for railways, IEEE, 2014.
- [5] A. Sniady, M. Sonderskov, J. Soler, VoLTE Performance in Railway Scenarios, 2015, IEEE.
- [6] L. Pushparatnam, T. Taylor., GSM-R Implementation and Procurement Guide V 1.0, 2009, UIC ISBN: 978-2.
- [7] EIRENE, GSM-R Operators Group, System Requirements Specification ver. 15, 2014, str. 36.
- [8] EIRENE, GSM-R Operators Group, Functional Requirements Specification ver. 7.4.0, 2014.
- [9] A. Bertout, E. Bernard, Next Generation of Railways and Metros Wireless Communication Systems, 2012, ASPECT, Institution of Railways Signal Engineers.
- [10] I. Ljubic, D. Simunic, Advanced Speech Call Items for GSM-Railway, 2009, IEEE.
- [11] A. Sniady, J. Soler, An overview of GSM-R technology and its shortcomings, 2012, IEEE, str. 627.
- [12] ERTMS, “SUBSET-093: GSM-R Interfaces; Class 1 requirements”, 2005, str. 14.
- [13] S.Sesia, I.Toufik, M.Baker, LTE. The UMTS Long Term Evolution, 2009, Wiley.
- [14] C.Cox, An Introduction to LTE, 2012, Wiley.
- [15] 3GPP, 3GPP TS 23.272 V10.3.1, Circuit Switched (CS) fallback in Evolved Packet System (EPS), 2011, str. 25.
- [16] C. Gessner, O. Gerlach, Voice and SMS in LTE, 2011, Rohde&Schwarz, str. 5.
- [17] 3GPP, 3GPP TS 32.407 V10.0.0, Core Network (CN) Circuit Switched (CS) domain, 2010, str. 15.
- [18] GSMA, IMS Profile for Voice and SMS ver. 7.0, 2013.
- [19] M.Poikselka, H. Holma, J.Hondistoi in., Voice Over LTE, 2012, Wiley.
- [20] P.Mogensen, W.Na, I.Z. Kovacs i in. LTE capacity compared to the Shannon bound, 2007, IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2007-Spring.
- [21] 3GPP, 3GPP TS 26.190 V1.0.0, AMR Wideband speech codec, 2000, str. 14.
- [22] W. Badawy, G.A. Julien, System-on-Chip for Real-Time Applications, 2002, Springer
- [23] <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon> - dostęp 11.2016.
- [24] <http://www.samsung.com/semiconductor/minisite/Exynos/w/> - dostęp 11.2016.
- [25] ETSI TS 102 250-2 V2.2.1, Speech and multimedia Transmission Quality (STQ), 2011.
- [26] Systemics-PAB, Raport z badania porównawczego wartości wskaźników jakości usług w sieciach ruchomych przedsiębiorców telekomunikacyjnych w Polsce, Załącznik 3, 2015, UKE, str.12.
- [27] Global Mobile Suppliers Association – Qualcomm & Ericsson, Circuit-switch fallback, 2013, <https://www.qualcomm.com/documents/circuit-switched-fallback-first-phase-voice-evolution-mobile-lte-devices>.

- [28] A. Tekovic, I.Pesut, Z.Moric, Voice Service in an LTE Network-CSFB, 2013, ELMAR, 2013 55th International Symposium, IEEE.
- [29] <http://radiotech.pl/aktualnosci/z-kraju/1392-dalsza-ekspnasje-gsm-r-w-polsce.html> - dostę 11.2016.
- [30] S. Amundsen, Future Rail Communication – Implementation Scenarios for LTE, 2013, Norwegian University of Science and Technology.
- [31] G. Lindstrom, Is GSM-R the limiting factor for the ERTMS system capacity, 2012, KTH Railway Group.
- [32] <https://www.att.com/esupport/article.html#!/wireless/KM1084805> - dostę 11.2016.
- [33] S. Ruesche, J. Steuer, K.Jobmann, The European Switch. A Packet-Switched Approach to a Train Control System, 2008, IEEE, str. 39.
- [34] M. Sauter, From GSM To LTE. An Introduction to mobile networks and mobile broadband, Wiley, str. 208