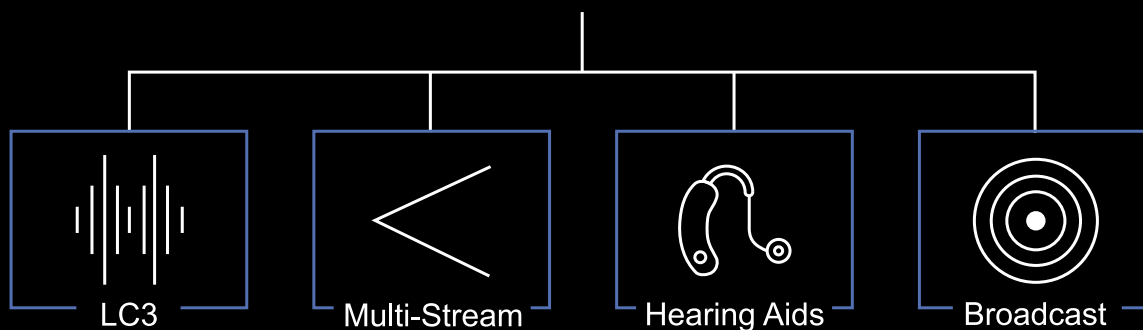


# Bluetooth LE Audio



## Systemy dla Internetu Rzeczy (48)

### Bluetooth LE Audio



W zeszłym roku Bluetooth SIG zaprezentował najnowszą wersję protokołu Bluetooth 5.2 z nową generacją transmisji dźwięku o nazwie LE Audio. Główną wprowadzoną zmianą jest nowa funkcja o nazwie kanały izochroniczne. Stanowią one podstawę implementacji LE Audio w urządzeniach BLE, obsługujących Bluetooth 5.2 lub nowszy. Nowy standard nie tylko poprawia jakość transmisji audio, ale również umożliwia obsługę aparatów słuchowych, a także udostępnia funkcję Audio Sharing. Umożliwia ona nadawanie jednego lub więcej strumieni audio przez urządzenie Bluetooth do nieograniczonej liczby odbiorników (broadcast). Już w najbliższej przyszłości Bluetooth audio będzie obsługiwać dwa tryby: LE Audio pracujące w standardzie Bluetooth Low Energy oraz Classic Audio pracujące w klasycznym standardzie Bluetooth (BR/EDR).

Dotychczasowy rozwój aplikacji audio wyższej klasy z komunikacją Bluetooth utknął w martwym punkcie, ponieważ maksymalna przepustowość surowych danych technologii Bluetooth 1 Mb/s (która w praktyce zmniejsza się do około 721 kb/s ze względu na celowe opóźnienia transmisji podczas pracy, wbudowane w protokół) okazała się niewystarczająca do przesyłania strumieni audio. Sytuacja zmieniła się, gdy technologia Bluetooth szybko trafiła do praktycznie każdego smartfona na świecie, a konsumpcja muzyki przeszła równoległą rewolucję wraz z wynalezieniem i rozwojem formatu kompresji MPEG Audio Layer 3 („MP3”) [9]. W odpowiedzi na zapotrzebowanie konsumentów, Bluetooth SIG wprowadził *Advanced Audio Distribution Profile* (A2DP), któremu towarzyszył kodek obsługujący strumieniowe przesyłanie dźwięku stereo. Wkrótce potem kilka komercyjnych kodeków przyniosło dalsze ulepszenia dźwięku.

Wczesne odtwarzacze MP3 były wyposażone w słuchawki przewodowe, ale nawet wtedy konsumenci pragnęli wygody połączenia bezprzewodowego. Później, gdy konsumenci przenosili swoje biblioteki MP3 na smartfony wyposażone w Bluetooth, grupa Bluetooth

SIG dostrzegła tę okazję i rozszerzyła A2DP. Profil określa, jak jednokierunkowo przesyłać dwukanałowy strumień audio, do lub z hosta Bluetooth. Ten profil z kolei opiera się na ogólnym profilu dystrybucji audio/wideo (GAVDP).

Jednak nawet przy kompresji MP3 i A2DP przesyłanie strumieniowe dźwięku przez łącze Bluetooth jest zawodne. Wymagana jest dodatkowa kompresja danych przez kodek, aby można je było dostosować do ograniczonej przepustowości łącza. Kodek następnie dekompresuje dane po drugiej stronie łącza, aby pobrać informacje audio zapisane w oryginalnym pliku MP3. W tym celu Bluetooth SIG włączył w ramach A2DP obowiązkową obsługę dla kodeka podpasmowego o niskiej złożoności (SBC) zaprojektowanego w celu zapewnienia rozsądnej jakości dźwięku przy niskich i średnich szybkościach transmisji przy niewielkiej mocy przetwarzania. Podczas gdy A2DP teoretycznie może obsługiwać do maksymalnej szybkości Bluetooth Classic 721 kb/s, SBC jest ograniczone do nominalnego maksimum 345 kb/s. W praktyce szybkości transmisji przy użyciu kodeka wynoszą zwykle około 256 kb/s, co ogranicza jakość dźwięku.

Profil A2DP obejmuje opcjonalną obsługę kodeków, w tym *Advanced Audio Coding* (AAC), *High-Efficiency AAC* (HEAAC) i *Adaptive Transform Acoustic Coding* (ATRAC). Profil można również rozszerzyć, aby obsługiwał kodeki zdefiniowane przez producenta, takie jak aptX i aptX-HD firmy Qualcomm, które są dostępne dla producentów słuchawek bezprzewodowych na podstawie licencji i oferują szybkości transmisji odpowiednio 384 kb/s (16-bitów/48 kHz) i 576 kb/s (24-bity/48 kHz). Jednak występuje konieczność obsługi aptX/aptX HD zarówno przez nadajnik, jak i odbiornik sygnału. Niedawno wprowadzony kodek LDAC firmy Sony oferuje szybkość 990 kb/s, ale wymaga (opcjonalnego i stosunkowo rzadkiego) radia Bluetooth *Enhanced Data Rate* (EDR) na obu końcach łącza.

Jakość dźwięku słuchawek bezprzewodowych korzystających z komercyjnych kodeków o wyższej przepływności jest lepsza w porównaniu z SBC, ale zdaniem audiofilów nadal brakuje zakresu dynamicznego, głębi, barwy i realistycznej jakości słuchawek przewodowych.

Wprowadzenie teraz przez Bluetooth SIG „LE Audio” ma zaradzić tym słabościom. Przetwarzając się z radia Bluetooth Classic na wersję Bluetooth LE, wprowadzając nowy zoptymalizowany kodek i dodając nowe funkcje do stosu protokołów Bluetooth, SIG obiecuje „następną generację dźwięku Bluetooth”. Czy ten optymizm jest uzasadniony?

## Bluetooth 5.2

Konsorcjum Bluetooth SIG opublikowało specyfikację nowej wersji protokołu Bluetooth 5.2 [1]. Wprowadza ona trzy główne zmiany: rozszerzony protokół atrybutów EATT (*Enhanced Attribute Protocol*) – jest to ulepszona wersja oryginalnego ATT (*Attribute Protocol*), nowe zarządzanie mocą LEPC (*LE Power Control*) oraz kanały izochroniczne (*LE Isochronous Channels*) [2]. Ta ostatnia nowość jest przeznaczona głównie dla nowej generacji transmisji audio, o nazwie LE Audio.

Transmisja izochroniczna to sposób komunikacji zapewniający stałą szybkość transmisji, niezależnie od wielkości ruchu generowanego w otaczającym go środowisku. Dostarcza mechanizm, który powoduje, że wiele urządzeń odbierających dane z tego samego źródła odtwarza je jednocześnie. Bluetooth Low Energy (BLE) używa do rozgłaszania dwóch zbiorów kanałów: trzy kanały podstawowe (*primary*) oraz 37 kanałów dodatkowych (*secondary*). Specjalny tryb rozgłaszania *Periodic Advertising* umożliwia rozgłaszanie z deterministycznym odstępem czasu, co pozwala odbiorcom na synchronizację odbioru z nadawcą.

W klasycznym protokole Bluetooth (BR/EDR) do transmisji audio używany jest profil *Advanced Audio Distribution Profile* (A2DP). Służy on do przesyłania strumienia pomiędzy pojedynczym nadawcą i odbiorcą. Komunikacja izochroniczna udostępnia dwa rodzaje kanałów: zorientowany na połączenie (*connection-oriented*) oraz bezpołączeniowy (*connectionless*) – używany do rozgłaszania (broadcast). Oba rodzaje wykorzystują izochroniczne kanały fizyczne (*LE Isochronous Physical Channel*). Termin „kanał fizyczny” nie jest kanałem RF, ale raczej zestawem reguł, według których dwa urządzenia są w połączeniu. Obejmują warstwę PHY, mapę kanału, sekwencję przeskoków, interwał połączenia, adres dostępu, oraz specyfikują parametry

czasowe dla pierwszego pakietu transmisji, który określa sposób takowania następnych pakietów. Dzięki zastosowaniu techniki slotów: częstotliwości – *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) oraz czasu – *Time Division Multiple Access* (TDMA) możliwa jest jednoczesna obsługa dużej liczby urządzeń.

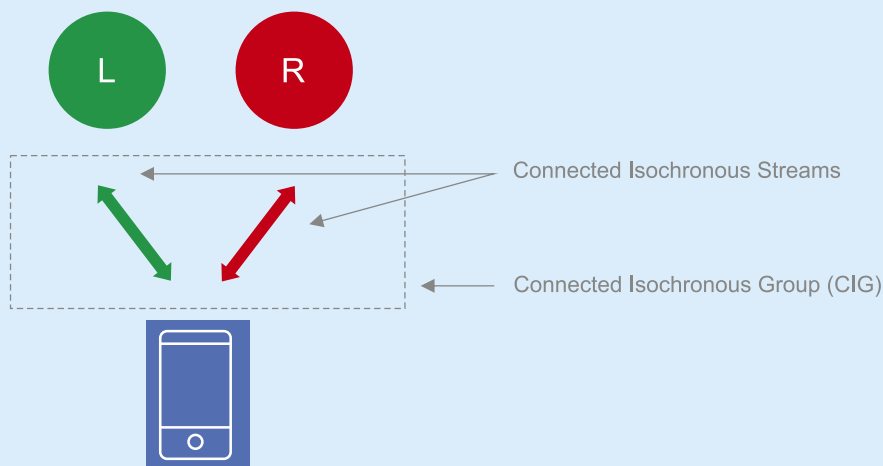
Strumienie CIS (*Connected Isochronous Stream*) obsługują transmisję dwukierunkową (rysunek 1). Są członkami grup nazywanych CIG (*Connected Isochronous Groups*). Maksymalna liczba CIS w CIG wynosi 31.

CIS ma zdefiniowany jest okres odrzucania (*flushing period*) – jeśli pakiet nie zostanie przetransmitowany w tym czasie to zostanie odrzucony. CIS może być podzielony na co najmniej jedno lub więcej zdarzeń podrzędnych, a te zdarzenia podrzędne są szczeliną czasową dla urządzenia nadrzędnego i podrzędnego do wymiany pakietów danych.

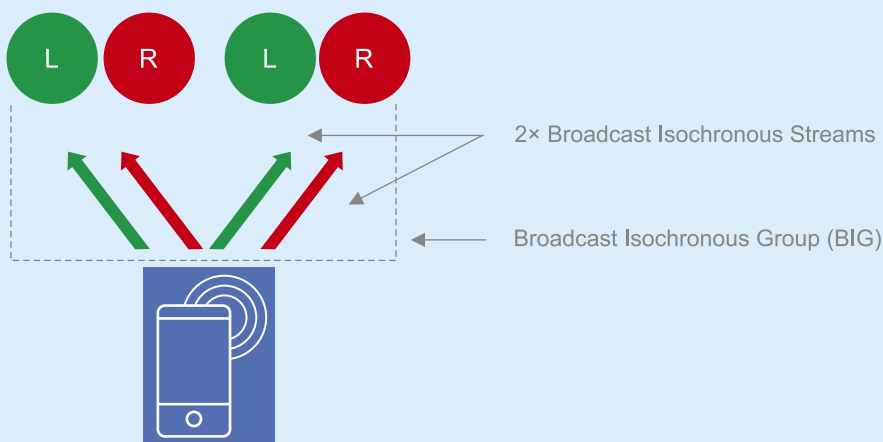
Strumienie BIS (*Broadcast Isochronous Streams*) obsługują tylko transmisję jednokierunkową (rysunek 2). Są członkami grup nazywanych BIG (*Broadcast Isochronous Group*). Urządzenie, które zostało zsynchronizowane z BIG, nazywa się zsynchronizowanym odbiornikiem. Gdy to urządzenie rozpocznie synchronizację BIG, należy skonfigurować parametr limitu czasu synchronizacji BIG, który określa maksymalny dozwolony czas pomiędzy udanymi transmisjami. Każdy BIS przesyła identyczną kopię danych (lub sterowań) do urządzeń odbiorczych. W ramach grupy kanały CIS (lub BIS) mają takie same parametry czasowe użyte do synchronizacji izochronicznego przetwarzania danych (typowo dźwięku) przez wszystkie odbiorniki w grupie. Urządzenie centralne (master) może tworzyć wiele grup CIG (lub BIG).

## LE Audio

Jest to kolejna generacja dźwięku Bluetooth i działa z użyciem standardu Bluetooth Low Energy (LE) w porównaniu z Classic Audio,



Rysunek 1. Strumienie CIS obsługujące, w ramach grupy CIG, kanał lewy i prawy słuchawek stereo [2]



Rysunek 2. Strumienie BIS w ramach grupy BIG [2]

## Bluetooth Codec Comparison

### Standard Stereo Listening Test



Source: Bluetooth SIG study based on ITU-R BS.1116-3

Rysunek 3. Testy odsłuchu dźwięku z kodowaniem SBC oraz LC3 [3]

które działa na radiu Bluetooth Classic, znanym również jako radio Bluetooth BR/EDR [3]. Kanały izochroniczne LE są jedną z kluczowych funkcji wprowadzonych w specyfikacji Bluetooth Core 5.2. Kanały izochroniczne LE, wraz z profilami Bluetooth, które są obecnie opracowywane, pomogą włączyć dźwięk wielostrumieniowy i transmisję audio do udostępniania dźwięku. Są cztery sposoby w jaki LE Audio zmieni bezprzewodowe audio: nowy kodek LC3, dźwięk wielostrumieniowy, obsługa aparatów słuchowych oraz udostępnianie dźwięku.

### LE Audio to LC3

Standard LE Audio będzie zawierał nowy, wysokiej jakości kodek audio, o niskim poborze mocy LC3 (*Low Complexity Communications Codec*). Zapewni wysoką jakość nawet przy niskich szybkościach transmisji danych, LC3 przyniesie ogromną elastyczność programistom, umożliwiając im lepsze kompromisy projektowe między kluczowymi atrybutami produktu, takimi jak jakość dźwięku i zużycie energii. LC3 może kodować mowę i muzykę z różnymi szybkościami transmisji bitów, obsługując częstotliwości próbkowania 8, 16, 24, 32, 44,1 i 48 kHz oraz rozdzielczości próbkowania 16, 24 i 32-bitowe. Elastyczność szybkości transmisji pozwala programistom na dokonanie kompromisu między jakością dźwięku a zużyciem energii, co z kolei pozwala wydłużyć żywotność baterii lub zmniejszyć jej rozmiar.

Obsługa LC3 poprawia jakość dźwięku, zapewniając jednocześnie lepszą obsługę odsłuchu w środowiskach o niskiej przepustowości. Rozległe testy odsłuchowe wykazały, że ogólna jakość odsłuchu przy użyciu LC3 jest lepsza niż istniejącego kodeka SBC (Classic Audio) – nawet przy przepustowości pasma niższej o 50% niż obsługiwana przez Classic Audio (rysunek 3). W skali gdzie 5 to najlepsza jakość, LE Audio wypada dobrze nawet dla małej przepustowości.

### LE Audio – dźwięk wielostrumieniowy

Dźwięk wielostrumieniowy to jedna z głównych nowych funkcji LE Audio. Umożliwia transmisję wielu niezależnych, zsynchronizowanych strumieni audio między urządzeniem źródłowym dźwięku, takim jak smartfon, a jednym lub kilkoma urządzeniami odbierającymi dźwięk, takimi jak wkładki douszne lub słuchawki.

Udostępnianie dźwięku to ważny przypadek użycia LE Audio. Umożliwia urządzeniu źródłowemu audio nadawanie jednego lub więcej strumieni audio do nieograniczonej liczby urządzeń

odbiorczych audio. Aby wspierać współdzielenie dźwięku, wprowadzono BIS i BIG. Istnieją dwa typy urządzeń: *Isochronous Broadcaster* i *Synchronized Receiver*. BIG jest tworzony przez *Isochronous Broadcaster* i może zawierać jeden lub więcej BIS. BIS to strumień przesyłania danych typu jeden do wielu. Realizuje mechanizm przesyłania pakietów rozgłoszeniowych bez potwierdzenia. Ponadto BIS można również podzielić na jedno lub więcej wydarzeń podrzędnych. Te zdarzenia to szczeliny do nadawania określonych izochronicznych transmisji, które mogą być odbierane i przetwarzane przez nieograniczoną liczbę zsynchronizowanych odbiorników.



### Aparaty słuchowe Bluetooth

LE Audio dodaje obsługę aparatów słuchowych zapewniając małą moc, wysoką jakość i przesyłanie wielostrumieniowe. Przesyłanie dźwięku przez Bluetooth przyniosło znaczące korzyści wielu ludziom. Bezprzewodowe rozmowy i słuchanie np. muzyki, sprawia, że ludzie są bezpieczniejsi, wydajniejsi i „bardziej rozrywkowi”. LE Audio umożliwi rozwój aparatów słuchowych Bluetooth, które zapewnią wszystkie zalety dźwięku Bluetooth rosnącej liczbie osób z ubytkiem słuchu. LE Audio będzie jednym z najważniejszych osiągnięć dla użytkowników aparatów słuchowych i implantów słuchowych. W rezultacie za kilka lat większość nowych telefonów i telewizorów będzie równie dostępna dla użytkowników z ubytkiem słuchu.

Wielu producentów zaprojektowało aparaty słuchowe tak, aby były niewidoczne, pasowały za uchem, a nie były idealnym miejscem na mikrofon. LE Audio nie tylko zapewnia większą elastyczność w projektowaniu, ale także aparat słuchowy może uzyskać dostęp do mikrofonu w smartfonie, aby odebrać dźwięk i przesłać go do ucha, dzięki czemu będzie działał bardziej niezawodnie.

Aparaty słuchowe są jednym z przykładów, w których LC3 przyniesie duże korzyści. Wyobraź sobie, że używasz aparatu słuchowego do słuchania dźwięku z telewizora. Bez wydajnego kodeka możesz doświadczyć znacznego opóźnienia dźwięku przez łącze bezprzewodowe, które może wytworzyć zauważalne echo między tym, co słyszysz z aparatu słuchowego, a dźwiękami otoczenia z telewizora. Dzięki zastosowaniu nowych kodeków LC3 przeszłe aparaty słuchowe będą transmitować dźwięk, który dociera w tym samym czasie, co dźwięk wydobywający się z głośnika telewizora, co jest szczególnie ważne podczas oglądania telewizji z innymi osobami.



### Transmisja to udostępnianie dźwięku

Udostępnianie dźwięku (*Audio Sharing*) jest nową kluczową funkcją LE Audio. Udostępnianie przez Bluetooth może być osobiste lub oparte na lokalizacji.

Osobiste udostępnianie dźwięku pozwoli udostępnić swoje wrażenia dźwiękowe Bluetooth innym osobom w pobliżu; na przykład udostępnianie muzyki ze smartfona rodzinie i znajomym.

Udostępnianie dźwięku w oparciu o lokalizację może zmienić sposób, w jaki doświadczamy otaczającego nas świata. Na przykład ludzie będą mogli wybierać dźwięk nadawany przez ciche telewizory w miejscach publicznych, a miejsca takie jak teatry i sale wykładowe będą mogły udostępniać dźwięk, aby pomóc odwiedzającym z ubytkiem słuchu, a także zapewnić dźwięk w wielu językach. Miejsca publiczne, takie jak lotniska, bary, siłownie, kina i centra konferencyjne, będą mogły udostępniać dźwięk Bluetooth. Udostępnianie dźwięku w oparciu o lokalizację pozwoli na udostępnianie dźwięku poprzez Bluetooth grupom odwiedzających w takich jak muzea czy galerie sztuki, aby poprawić ich wspólne wrażenia. Centrum konferencyjne może też zapewnić uczestnikom konferencji dźwięk w wielu językach [10]. W innym przykładzie kina mogłyby udostępniać dźwięk z filmu w języku ojczystym gości niedosłyszących (poprzez przesłanie filmowego dźwięku bezpośrednio do aparatu słuchowego), a także udostępniać dźwięk w wielu językach innym osobom. Korzystając z LE Audio, nawet przystanki autobusowe mogą nadawać dźwięk informujący o przyjeździe autobusów dla osób z ograniczonym słuchem lub wzrokiem. Będą to przełomowe zmiany przekształcające wiele obiektów na przyjazne osobom niepełnosprawnym. LE Audio umożliwi wiele nowych doświadczeń związanych z udostępnianiem, pomagając konsumentom korzystać z ich urządzeń w nowy sposób.

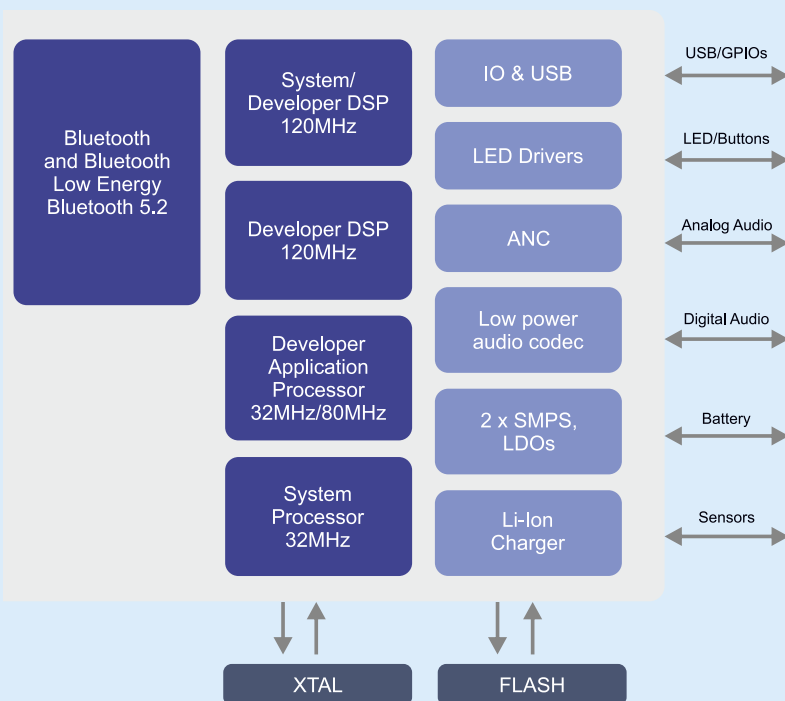
### Stos programowy Bluetooth dla LE Audio

Firma Packetcraft Inc. ogłosiła 10 marca 2020 r., że jej oprogramowanie stosu hostów i warstwy łącza uzyskało od konsorcjum Bluetooth SIG kwalifikację Bluetooth Core Specification w wersji 5.2 [5]. Jest to pierwsza kwalifikacja stosu hostów i warstwy łącza wdrażająca nowe funkcje wykorzystywane przez LE Audio: kanały izochroniczne LE, ulepszony protokół atrybutów i sterowanie zasilaniem LE. Specjalne rozwiązanie firmy Packetcraft z kwalifikowanym stosem hostów i warstwą łącza obsługującą LE Audio jest już dostępna dla klientów korporacyjnych. Packetcraft planuje również kontynuować opracowywanie i wydawanie oprogramowania obsługującego nowe specyfikacje Bluetooth definiujące LE Audio.

Packetcraft 13 maja 2020 r. ogłosił wydanie w wersji open source swoich stosów protokołów Bluetooth 5.2: Packetcraft Host i Packetcraft Controller. Produkty te, pierwszy kwalifikowany stos hostów i warstwa łącza, są teraz publicznie dostępne w postaci kodu źródłowego na stronie github [6]. Oprogramowanie protokołu Packetcraft to zbiór wbudowanych stosów wdrażających specyfikację warstwy łącza Bluetooth Low Energy, hosta, profilu i siatki. Repozytorium zawiera wersję open source oprogramowania Packetcraft. Jest to wersja kwalifikowana i może być używana w produktach. Oprogramowanie zostało przetestowane zastosowaniem płytek rozwojowych firmy Nordic Semiconductor (dla procesorów nRF52840 oraz nRF52832).

### Pierwsze SoC gotowe na standard Bluetooth 5.2 LE Audio

Seria QCC5100 firmy Qualcomm została zaprojektowana, aby pomóc producentom w opracowaniu nowej generacji kompaktowych, bogatych w funkcje bezprzewodowych słuchawek dousznych, zestawów słuchawkowych i głośników. Aby sprostać wymaganiom konsumentów dotyczącym jakości dźwięku, a także wydłużonej żywotności baterii i czasu odtwarzania w bezprzewodowych urządzeniach audio, przełomowa seria została zaprojektowana tak, aby zmniejszyć



Rysunek 4. Schemat blokowy QCC514x [8]

zużycie energii nawet o 65 procent w przypadku połączeń głosowych i strumieniowego przesyłania muzyki w porównaniu z poprzednią jednoukładową technologią audio.

Architektura SoC obsługuje bardzo niskie zużycie energii i obejmuje podwójny tryb radiowy Bluetooth 5, energooszczędny dźwięk i podsystemy aplikacji. Zaprojektowana do obsługi różnych zastosowań konsumenckich „w ruchu” wymagających solidnych, prawdziwie bezprzewodowych doświadczeń o wysokiej jakości, platforma obsługuje takie funkcje, jak *Qualcomm TrueWireless Stereo*, dźwięk *Qualcomm aptX HD*, *Integrated Hybrid Active Noise Cancellation* (ANC), głosowe sterowanie interfejsem użytkownika i obsługa asystenta głosowego za pośrednictwem usług w chmurze [7].

Podstawowe układy serii QCC5100 (rysunek 4) mają dwa rdzenie procesorowe aplikacyjne 32-bitowe (do 80 MHz) oraz dwa rdzenie DSP (2...120 MHz).

### Układ QCC5141

Jest to niezwykle energooszczędny układ Bluetooth Audio SoC, zaprojektowany do użytku w kompaktowych, prawdziwie bezprzewodowych słuchawkach dousznych z obsługą głosu. Układ QCC5141, oprócz czterech rdzeni podstawowych, posiada dodatkowo konfigurowalny procesor DSP [8]. Obsługuje transmisję Bluetooth 5.2 (BR, EDR, Bluetooth Low Energy, Bluetooth Dual-mode) z prędkością 2 Mb/s oraz 3 Mb/s. Jest określany przez producenta jako gotowy do obsługi standardu LE Audio [8]. Ponieważ zapotrzebowanie konsumentów na mniejsze urządzenia nadal rośnie, układ został zaprojektowany w obudowie WLCS94 (4x4 mm), aby pomóc producentom w opracowaniu bardzo małych wkładek dousznych, które będą wystarczająco wygodne, aby można je było nosić przez cały dzień.

Pobór mocy został zredukowany do 73% w porównaniu do wcześniejszych układów firmy (5 mA dla pracy A2DP). Wkładka douszna może działać podczas odsłuchu muzyki (A2DP) do 10 godzin z baterią 65 mAh [8].

Układ posiada niezwykle bogate firmowe wsparcie programowe. Wersja QCC5151 dodatkowo obsługuje adaptacyjne usuwanie szumu [7].

### Układ QCC3056

Jest jednoukładowym rozwiązaniem firmy Qualcomm o bardzo niskim poborze mocy, zoptymalizowanym do użytku



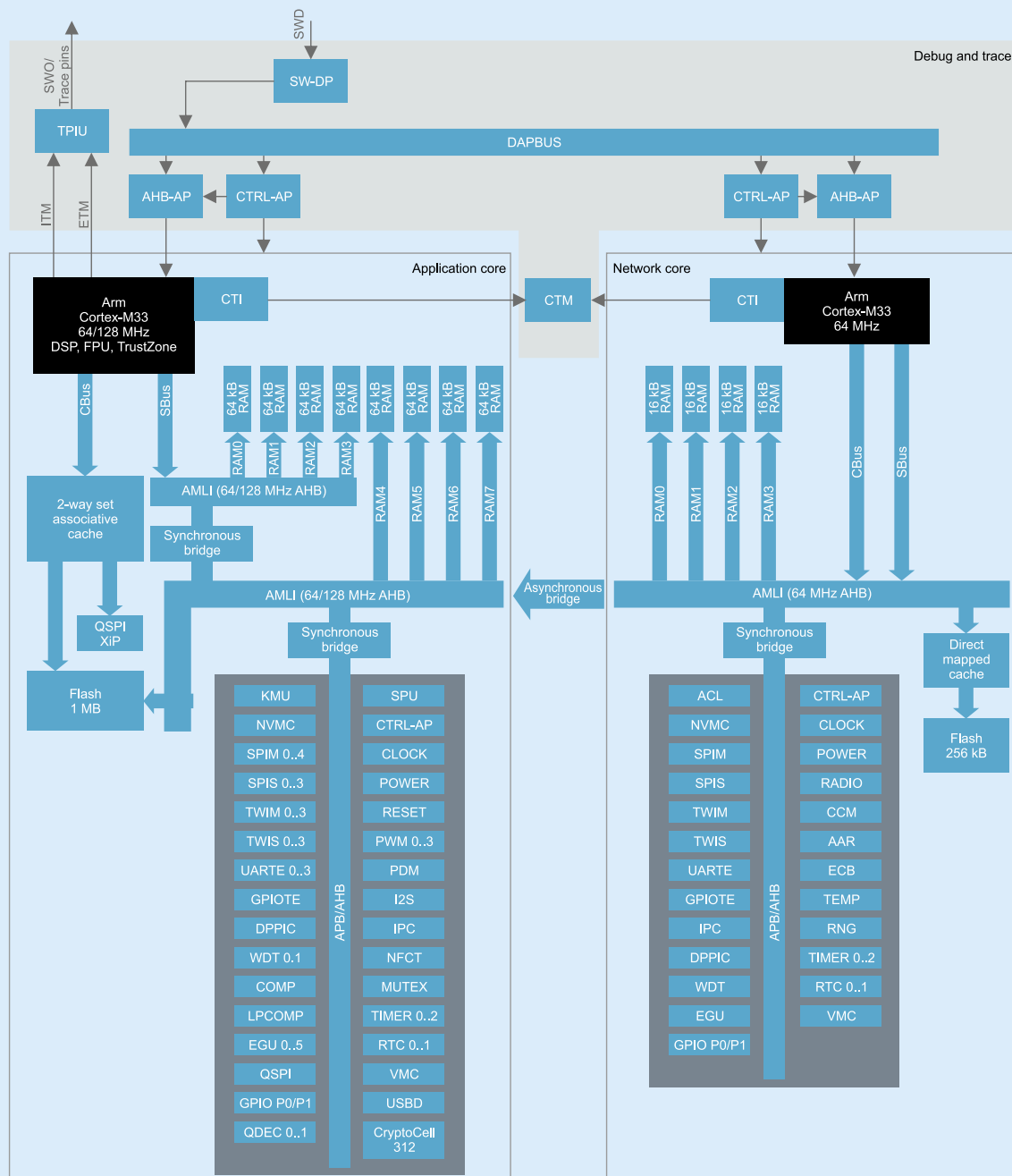
**Fotografia 5. LE Audio Evaluation Platform firmy Nordic Semiconductor [4]**

w bezprzewodowych słuchawkach dousznych i słuchawkach [14]. QCC3056 ma organizację podobną jak QCC5141 z ograniczoną funkcjonalnością. Dostępna jest wersja QCC3046 z jednym rdzeniem DSP. Układy są określane przez producenta jako gotowe do obsługi standardu LE Audio.

### Platforma oceny dźwięku LE Audio

Urządzenia Bluetooth LE Audio nie są jeszcze powszechnie dostępne, ale chipsety i narzędzia programistyczne zaczynają być dostępne już teraz. Bluetooth SIG ogłosił nowy standard, jednak profile nadal wymagają ratyfikacji, co jest spodziewane jeszcze w tym roku [12]. Czy to oznacza, że musimy czekać przez rok? Niekoniecznie!

Nordic Semiconductor we współpracy z firmą Packetcraft, deweloperem stosu Bluetooth Low Energy, uruchomił platformę oceny dźwięku LE Audio [4] (**fotografia 5**). Rozwiązanie Nordic LE Audio składa się z referencyjnego projektu sprzętowego opartego na firmowym układzie nRF52832 (kwalifikacja Bluetooth 5.2), układzie scalonym inteligentnym kodeku CS47L35 firmy Cirrus Logic



**Rysunek 6. Schemat blokowy procesora nRF5340 [11]**

ze zintegrowanym procesorem DSP audio o niskim poborze mocy, stosem Packetcraft Bluetooth LE i obsługą warstwy łącza LE Audio oraz LE Audio Software Development Kit (SDK). Platforma umożliwiła programistom rozpoczęcie oceny technologii dla takich produktów Bluetooth LE Audio, jak głośniki bezprzewodowe, słuchawki nauszne i prawdziwie bezprzewodowe „wkładki douszne”.

Platforma ewaluacyjna zawiera złącze akustyczne, do którego można dołączyć do sześciu mikrofonów lub dwa głośniki, gniazdo słuchawkowe 3,5 mm, gniazdo źródła 3,5 mm oraz złącze USB do ładowania i debugowania (przy użyciu narzędzi programistycznych firmy Nordic Semiconductor) a także strojenia akustycznego (za pomocą platformy Cirrus Logic WISCE). Platforma ewaluacyjna pozwala na wydłużenie czasu pracy baterii o 40% w porównaniu do rozwiązania z klasyczną transmisją Bluetooth.

Platforma ewaluacyjna jest tylko rozwiązaniem typu „proof of concept”. Firma Nordic Semiconductor przygotowuje zestaw Audio oparty na nRF5340, który będzie zgodny z LE Audio.

## Pierwszy procesor komunikacyjny SOC z dwoma rdzeniami Arm Cortex-M33

Unikalną cechą układu nRF5340 jest zastosowanie jako rdzenia aplikacyjnego i komunikacyjnego dwóch rdzeni Arm Cortex-M33 [11]. Architektura układu nRF5340 oraz wydajność energooszczędnego rdzenia aplikacyjnego dają dobre podstawy do realizacji komunikacji ze standardem LE Audio [S34]. Dzięki stosowi oprogramowania obsługującemu LE Audio, radio nRF5340 obsługuje kanały izochroniczne LE, a LC3 działa wydajnie na układzie SoC. nRF5340 ma również wbudowany układ audio PLL do synchronizacji dźwięku w celu zapewnienia prawdziwego bezprzewodowego odtwarzania stereo.

Schemat blokowy procesora nRF5340 został pokazany na **rysunku 6**. Rdzeń aplikacyjny ARM Cortex-M33 zapewnia energooszczędną arytmetykę (DSP), obliczenia zmiennoprzecinkowe (FPU), kontroler przerw (NVIC) oraz moduł ochrony pamięci (MPU). Może pracować z obniżoną częstotliwością zegara ze 128 MHz do 64 MHz (przy użyciu skalowania napięcia i częstotliwości) co pozwala na zmniejszenie mocy zasilania (510/255 CoreMark, 65/76 CoreMark/mA). Ma dołączoną pamięć Flash (1 MB), RAM (512 kB) oraz 8 kB 2-drożnej asocjacyjnej pamięci podręcznej.

### Wybrane pozostałe artykuły kursu Systemy dla Internetu Rzeczy

[S34] nRF5340 – pierwszy procesor komunikacyjny SOC z dwoma rdzeniami Arm Cortex-M33, EP 2/2020

### Literatura

- [1] Core Specifications, Core Specification 5.2, 3 April 2021, Bluetooth SIG, <https://bit.ly/3apNbKy>
- [2] Bluetooth Core Specification Version 5.2 Feature Overview, S Bluetooth IG, Martin Woolley, Version: 1.0.1, 9 December 2020, <https://bit.ly/2P0jRme>
- [3] LE Audio, Bluetooth SIG, <https://bit.ly/3an2OIS>
- [4] Nordic Semiconductor launches a Bluetooth LE Audio Evaluation Platform ahead of Bluetooth SIG LE Audio specification release during H1 2020, 06 Jan 2020, Oslo, Nordic Semiconductor, <https://bit.ly/3aoSuK5>
- [5] Bluetooth Solutions, Open Sourced, Packetcraft, <https://bit.ly/32oMTiu>
- [6] Packetcraft Protocol Software, 11 Nov 2020, Packetcraft, <https://bit.ly/3x4ZANv>
- [7] QCC5100 Series, Ultra-low power, premium-tier SoCs, Qualcomm, <https://bit.ly/3gl8bG3>
- [8] QCC5141, Qualcomm, <https://bit.ly/3150BH9>
- [9] Unwired for Sound, 08.2020, Nordic Semiconductor, <https://bit.ly/3dxgH2Z>
- [10] LE Audio: A new age of Bluetooth audio sharing, JAN 27, 2020, Qualcomm, <https://bit.ly/3gh7NBa>
- [11] nRF5340, System on Chip, Product Page, Nordic Semiconductor, <http://bit.ly/2v3VMAI>
- [12] SPECIFICATIONS Specifications List, SIG, <https://bit.ly/3uZodcl>
- [13] BL5340 Series, Multi-Core / Protocol – Bluetooth® + 802.15.4 + NFC Modules, Laird, <https://bit.ly/32fZhh>
- [14] QCC3056, Qualcomm, <https://bit.ly/3gqjBU>

Rdzeń aplikacyjny na zastosowaną technologię Arm TrustZone oraz Arm CryptoCell 312. Technologia Arm TrustZone oznacza, że moduł posiada obszary zabezpieczone oraz nie zabezpieczone. Aspekty krytyczne, jak obsługa kryptograficzna i klucze, mogą być umieszczone w obszarze zabezpieczonym, do którego nie ma bezpośredniego dostępu. Zapewnia to najwyższy poziom szyfrowania i zabezpieczeń aplikacyjnych na rynku. Obie technologie zapewniają również bardzo energooszczędną pracę.

**Rdzeń komunikacyjny (network) ARM Cortex-M33** jest przeznaczony do obsługi komunikacji radiowej. Jest taktowany z częstotliwością 64 MHz i jest zoptymalizowany pod kątem niskiej mocy i wydajności (238 CoreMark, 101 CoreMark/mA) Układ ma 256 kB pamięci Flash oraz 64 kB pamięci RAM i jest w pełni programowalny. Rdzeń komunikacyjny ma dołączony koprocesor kryptograficzny do wykonywania w locie operacji zgodnych z 128-bit AES/ECB/CCM/AAR.

Każdy rdzeń posiada własny układ *Inter-processor communication* (IPC) służący do wysyłania i odbioru zdarzeń pomiędzy nimi. Komunikacja zachodzi poprzez wiele kanałów. Pamięć dołączona do rdzenia aplikacyjnego jest mapowana w przestrzeni adresowej rdzenia komunikacyjnego. Oznacza to, że rdzeń komunikacyjny może ją wykorzystywać jako pamięć współdzieloną do komunikacji. Procesor nRF5340 posiada też układ *Mutually exclusive peripheral* (MUTEX), dostępny z obu rdzeni, służący do zablokowania zasobu współdzielonego przez oba rdzenie. Dzielony zasób może być użyty tylko przez jeden rdzeń i przez ten czas jest zablokowany. Do blokowania i odblokowania służą bity w specjalnych rejestrach Mutex.

Każdy rdzeń procesora posiada zestaw własnych modułów peryferyjnych. Dodatkowo rdzeń komunikacyjny ma dostęp do układów peryferyjnych dołączonych do rdzenia aplikacyjnego. Układ udostępnia 48 wyprowadzeń GPIO (w obudowie 7×7 mm aQFN94), cztery zegary RTC (24-bitowe), 6 timerów (32-bitowe), przetwornik ADC (12-bitowy, 200 kps), interfejs mikrofonu cyfrowego (PDM), cztery wyjścia PWM, port I<sup>2</sup>S, cztery porty UART, trzy porty I<sup>2</sup>C oraz cztery porty SPI. Port QSPI (96 MHz) umożliwia wykonywanie kodu z dołączonej zewnętrznej pamięci Flash.

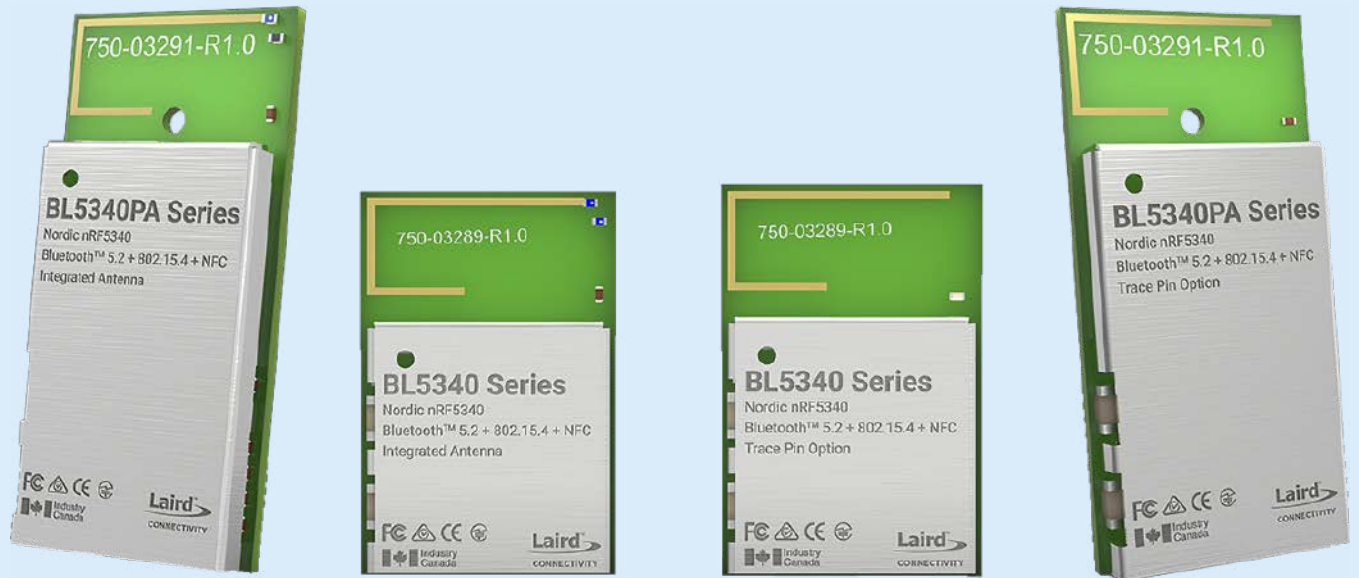
Układ umożliwia jednoczesną (*concurrent*) pracę w jednej sieci z protokołem Bluetooth LE oraz w drugiej sieci typu Mesh z protokołem Bluetooth Mesh, Thread lub Zigbee. Oprogramowanie układu scalonego nRF5340 jest wspierane przez pakiet programowy nRF Connect SDK.

## Moduły serii BL5340 firmy Laird Connectivity

Najnowsza seria modułów BL5340 firmy Laird Connectivity (w opracowaniu) wyposażona w układ scalony nRF5340 firmy Nordic Semiconductor jest ukierunkowana na najwyższą wydajność przy najniższym budżecie mocy [13]. Moduł BL5340 charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami poboru mocy: 5,3 mA (+3 dBm TX), 4,1 mA (0 dBm TX), 1,3 μA (system włączony) oraz 0,9 μA (system wyłączony).

Jest to bardzo dobry przykład jakie możliwości szybkiego rozpoczęcia rozwoju technologii Bluetooth LE daje zastosowanie gotowego bloku radiowego z całym bogactwem firmowych pakietów programowych. Dostarczane oprogramowanie obejmuje system operacyjny czasu rzeczywistego Zephyr RTOS oraz pakiet programowy Nordic nRF Connect SDK. Umożliwia to natychmiastowe użycie wielu możliwości komunikacji standardu Bluetooth LE 5.2: urządzenie peryferyjne/centralne, 2 Mb/s (wysoka przepustowość), kodowane LE (daleki zasięg), lokalizacja w czasie rzeczywistym AoA/AoD, LE Audio/kanały izochroniczne, sieć BLE Mesh oraz bezprzewodowa aktualizacja oprogramowania Firmware Over the Air (FOTA).

Płytką drukowaną o bardzo małych wymiarach 15×10×2,2 mm jest wstępnie certyfikowana. Dostępne są wersje modułów z anteną



Fotografia 7. Moduły Bluetooth 5.2 serii BL5340 firmy Laird Connectivity [13]

wbudowaną lub dołączeniem zewnętrznej oraz warianty ze zintegrowanym wzmacniaczem nRF21540 PA/LNA (fotografia 7) do zastosowań o wyższej mocy TX (+10 dBm).

### Podsumowanie

LE Audio rozszerza możliwości klasycznego dźwięku Bluetooth. Będzie obsługiwał zarówno połączenia głosowe, jak i aplikacje do strumieniowego przesyłania muzyki. Dźwięk Bluetooth umożliwia konsumentom słuchanie muzyki i rozrywkę bez kabli. Wprowadzenie LE Audio pomoże jeszcze bardziej przyspieszyć wzrost rynku dzięki prawie 2 miliardom urządzeń audio i rozrywkowych, które mają być dostarczone do 2024 r. Wsteczna kompatybilność z istniejącymi produktami Bluetooth będzie nadal niezbędna, a urządzenia działające w dwóch trybach obsługujące funkcje LE Audio i klasyczny dźwięk Bluetooth będą miały fundamentalne

znaczenie dla użytkownika. LE Audio to technologia uzupełniająca, a nie zastępcza.

Wprowadzona ostatnio dla telefonów komórkowych platforma Snapdragon 888 firmy Qualcomm zawiera system łączności Qualcomm FastConnect 6900 ze zintegrowanymi funkcjami audio Bluetooth 5.2 i Qualcomm aptX, a także obsługę urządzeń mobilnych LE Audio. Umożliwia to obsługę udostępniania dźwięku wielu odbiorcom (*Audio Sharing*). Już teraz platforma została zastosowana w 86 telefonach różnych producentów.

Pomimo spowolnienia ratyfikacji profili LE Audio spowodowanego epidemią COVID-19 standard LE Audio i tak zaczyna się szybko upowszechniać.

**Henryk A. Kowalski**  
Instytut Informatyki  
Politechnika Warszawska

REKLAMA



**KITY AVT na wideo: [HTTP://BIT.LY/2SCLZTY](http://bit.ly/2SCLZTY)**

**O KIT-ach AVT przeczytasz również na Facebooku: [HTTP://BIT.LY/2BJVMN7](http://bit.ly/2BJVMN7)**

 AVT3144 - Kłaskacz - przełącznik akustyczny 0:26	 AVT3250 - Bombka LED dla każdego - montaż 2:06	 AVT3165 - Odstraszacz kretów 0:28	 AVT5599 - Zdalnie sterowany włącznik 4-kanałowy 0:37	 AVT1484 - Wskaźnik temperatury silnika 0:26	 AVT5596 - Mieszacz kolorów RGB 0:40
 AVT1960 - Termometr z termoparą i alarmem 0:34	 AVT777 - Sterownik miniwiertarki modelarskiej 0:34	 AVT0001 - Uniwersalny regulator impulsowy 5A 0:42	 AVT5554 - Gra elektroniczna SNAKE 0:30	 AVT478 - Regulator obrotów wentylatorów 12V 0:30	 AVT720 - Błękitno-biały mrygacz 0:32
 AVT1853 - Iluminofonia LED RGB 1:28	 AVT2942 - Kogut dyskotekowy 1:06	 AVT3125 - Włącznik sterowany dowolnym pilotem 0:32	 AVT788 - Lampka LED reagująca na klaśnięcie ... 0:38	 AVT1900 - Animowany bałwanek LED 0:54	 AVT1651 - Gra - Kto pierwszy ten lepszy 0:34