

Bluetooth Low Energy (BLE)

Un studiu asupra tehnologiei de transmisie fără fir Bluetooth optimizată pentru un consum redus de energie

ing. Ovidiu Moldovan
UTCN, Automatică și Calculatoare,
IAISC
Cluj-Napoca, Cluj
ovi1602@gmail.com

Abstract—Tehnologia Bluetooth este prezentă într-un număr foarte mare de dispozitive, fiind o componentă cu costuri reduse ce facilitează transmisia datelor pe distanțe scurte. Standardul Bluetooth Low Energy adaptează tehnologia pentru o lume plină de obiecte interconectate (Internet of Things) în care majoritatea dispozitivelor funcționează cu baterii de capacități mici și își dorește să optimizeze cât mai mult consumul de energie. Această lucrare prezintă câteva dintre specificațiile cheie ale standardului și oferă o privire de ansamblu asupra modului de funcționare. În final sunt prezentate două moduri prin care putem implementa în aplicații această tehnologie.

Keywords—Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Bluetooth applications

I. INTRODUCERE

În zilele noastre, comunicația fără fir nu este nimic ieșit din comun. Ne conectăm la diferite rețele de acest tip zilnic, fie că sunt pe distanțe foarte mari cum ar fi conexiunea GPS, pe distanțe mai mici cum ar fi conexiunea celulară (GSM prin 3G, 4G, 5G), rețele locale (LAN) prezente în majoritatea locuințelor ce folosesc standardul Wi-Fi, rețele personale ce se întind pe numai câțiva metri prin Bluetooth sau ZigBee, sau chiar rețele de câmp apropiat (Near Field Communication – NFC) folosite de exemplu la așa-numitele plăți contactless. O mare parte din succesul acestor tehnologii este reprezentată de faptul că ele sunt accesibile, în special din punct de vedere financiar, omului de rând, astfel că majoritatea populației beneficiază de pe urma lor.

Tehnologia Bluetooth reprezintă un standard pentru comunicația fără fir pe distanțe scurte, având un consum relativ redus de energie, costuri mici, iar componentele hardware necesare implementării sunt de mici dimensiuni. Astfel, aceasta se regăsește într-un număr foarte mare de dispozitive cum ar fi: calculatoare, telefoane mobile, periferice (audio, tastaturi, mouse-uri).

BLE (Bluetooth Low Energy) este un standard ce vine în completarea obișnuitului Bluetooth și se axează, așa cum îi spune și numele, pe un consum mai redus de energie, astfel încât un senzor ar putea transmite date timp de 2 ani folosind o singură baterie de dimensiunea unei monede (de exemplu CR2032) [1]. Această tehnologie are aplicabilitate în Internet of Things (IoT), dispozitive medicale, echipament sportiv (ceasuri sau bratari interligente) etc.

Un avantaj major al BLE față de alte tehnologii cu consum redus de energie este că acesta se poate folosi de infrastructura Bluetooth deja existentă.

II. DESPRE BLUETOOTH

A. Bluetooth SIG

Bluetooth Special Interest Group (SIG) [2] este o grupare privată, non-profit, care se ocupă cu publicarea specificațiilor standardului și popularizarea lui. Gruparea nu se ocupă cu fabricarea sau comercializarea produselor Bluetooth. Orice producător poate aplica pentru a avea dreptul de a implementa tehnologia, iar Bluetooth SIG le poate oferi acest drept. Companiile devin astfel membri ai grupării.

Membrii pot fi de 2 feluri: *Adopter*, care nu plătesc nicio taxă și primesc licență pentru a implementa tehnologia, respectiv pentru a folosi numele/logo-ul; și *Associate*, companii care plătesc o taxă anuală, dar pot primi în schimb acces mai rapid la cele mai noi versiuni și pot contribui activ la dezvoltarea tehnologiei. De asemenea, conducerea grupării este asigurată de câte un reprezentant al companiilor de tip *Promoter*: Microsoft, Intel, Apple, Ericsson, Motorola (achiziționată de Lenovo), Nokia, Telink Semiconductor și Toshiba.

B. Specificații

La început, tehnologia suporta un data rate maxim de 721kbps, cunoscut acum ca Basic Rate (BR). Odată cu versiunea 2.0 s-a trecut la Enhanced Data Rate (EDR), iar viteza a crescut la 2.1Mbps. Versiunea 3.0 aduce viteza de până la 24Mbps și este cunoscută ca High Speed (HS).

Spectrul folosit pentru semnale este banda de 2.4Ghz pentru care nu este necesară o licență. Din acest motiv, spectrul poate fi folosit de mai multe standarde, de exemplu Wi-Fi. Pentru a evita interferențele se folosește tehnica *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) [3]. Această tehnică face ca semnalele să sară, în mod pseudo-aleator, pe un spectru al lungimii de bandă între 2.402Ghz și 2.480Ghz (pe 79 de frecvențe sau canale, un canal fiind separat de 1Mhz).

Frecvențele canalelor sunt obținute din formula:

$$f(k) = 2402 + k \text{ MHz}, k = 0, \dots, 78$$

Comunicația este de tip master-slave, iar fiecare dispozitiv Bluetooth are un ceas (clock) pe 28 de biți ce pornește odată cu pornirea dispozitivului și incrementează automat la fiecare 312.5μs. Master-ul va da timpul de bază din piconet. În comunicarea cu slave-ul se va calcula o valoare de offset (diferența între ceasurile fiecărui dispozitiv), realizându-se astfel sincronizarea.

Puterea semnalelor rezultate este între 1mW și 100mW. Distanța pe care acestea se propagă este, în general, între 10m și 100m.

III. BLUETOOTH 4.0+ (LOW ENERGY)

A. Descriere

[4]Majoritatea dispozitivelor Bluetooth funcționează pe baterii. Bluetooth 4.0 nu a introdus viteze mai mari, focusându-se pe un consum mai redus de energie, atât în ceea ce privește curentul consumat în medie cât și în ceea ce privește curentul maxim consumat, pentru a funcționa pe perioade mai lungi de timp, chiar și atunci când curentul maxim oferit de baterie este scăzut.

Astfel, standardul 4.0 a permis un data rate de 305kbps, deși în practică multe aplicații folosesc chiar mai puțin pentru a economisi baterie. Fiecare pachet de date avea o dimensiune de 27 de bytes. Totuși, s-au găsit situații în care a fost necesară o viteză mai mare, așa că Bluetooth 4.2 a crescut dimensiunea unui pachet de date la 251 de bytes, data rate-ul fiind de 800Kbps. Următoarele versiuni au crescut și mai mult dimensiunea unui pachet de date.

Bluetooth Low Energy a fost conceput pentru situațiile în care se crează o conexiune, se transmit câțiva kilobytes, apoi se închide conexiunea. Asta este posibil datorită timpului scăzut pentru a stabili o conexiune (3ms). În acest fel experiența utilizatorilor nu este afectată.

B. Clasificare

Odată cu lansarea acestui standard, dispozitivele intră în 3 categorii:

a) Dispozitivele BR/EDR

Sunt dispozitivele clasice Bluetooth cu suport pentru Basic Rate și Enhanced Data Rate. Acestea nu suportă comunicarea cu dispozitivele Low Energy.

b) LE Only sau Single Mode LE

Sunt dispozitive ce au doar funcționalitatea Low Energy. Acestea vor putea comunica doar cu alte dispozitive LE. Exemple de dispozitive LE Only: ceasuri smart, brățări fitness, senzori.

c) BR/EDR/LE sau Dual Mode

Sunt dispozitivele care suportă ambele tipuri de conexiuni. Exemple de dispozitive Dual Mode: smartphone-uri (deși voi reveni cu clarificări în Capitolul X) sau laptop-uri. Acestea au, în general, baterii mai puternice, iar constrângerile nu sunt așa mari.

Tabelul 1 reprezintă compatibilitatea între tehnologii.

	BR/EDR	Single Mode LE	Dual Mode
BR/EDR	Da	Nu	Da
Single Mode LE	Nu	Da	Da
Dual Mode	Da	Da	Da

Tabelul 1 – Compatibilitatea BR/EDR cu LE

C. Specificații

Privită sumar, arhitectura Bluetooth pe straturi este prezentată în Figura 1.

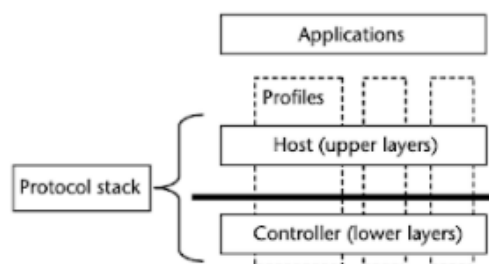


Figura 1 – Arhitectura Bluetooth pe scurt [4]

În ceea ce urmează voi prezenta straturile de jos ale BLE: Physical Layer respectiv Link Layer. Apoi voi prezenta stratul de bază din cele mai înalte: L2CAP.

1) Physical Layer

Similar cu modul BR/EDR, Bluetooth LE operează pe aceeași bandă de frecvențe de 2.4Ghz. Totuși, dacă până acum se foloseau 79 de canale pentru realizarea tehnicii de frequency hopping descrisă anterior, standardul LE folosește doar 40 de canale, despărțite de câte 2Mhz. Avem deci frecvențele din următoarea formulă:

$$f(k) = 2402 + 2 * k \text{ MHz}, k = 0, \dots, 39$$

Figura 2 arată canalele de frecvențe radio folosite de BLE.

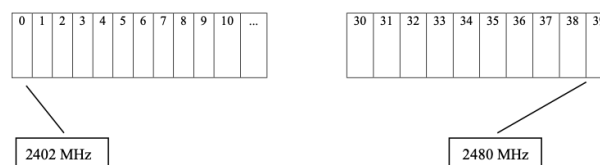


Figura 2 – Frecvențele BLE [4]

Dispozitivele LE pot fi setate doar să primească date, doar să trimită date sau să poată primi și trimite. De exemplu, o telecomandă are nevoie doar să trimită semnale, nu va primi niciodată răspuns de la televizor, iar astfel se poate simplifica proiectarea și se pot reduce costurile.

Semnalul rezultat are o putere între 0.01mW și 10mW, iar distanța pe care acesta este propagat poate fi între 30m și 100m. Modularea în frecvență se realizează prin mecanismul Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK), un exemplu fiind reprezentat în Figura 3, unde 1 este reprezentat cu o frecvență mai mare, iar 0 cu o frecvență mai mică.

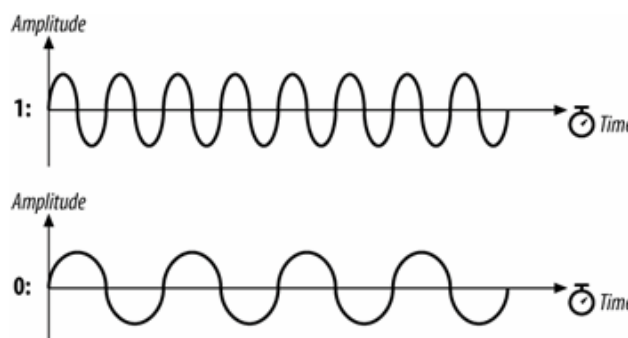


Figura 3 – GFSK cu 2 nivele [5]

2) Link Layer

La nivelul stratului Link există 5 stări (Figura 4) în care se poate afla dispozitivul:

a) *Standby* – starea implicită, în care nu se transmit și nu se primesc pachete de date.

b) *Advertising* – starea în care dispozitivul anunță că este gata să trimită date, astfel încât un alt dispozitiv ce este în starea de scanare (Scanning) să îl observe.

c) *Scanning* – starea în care dispozitivul așteaptă date de la alte dispozitive aflate în Advertising.

d) *Initiating* – starea în care se ascultă mesaje de la Advertiser și se răspunde acestora, inițiind o conexiune.

e) *Connection* – starea în care un dispozitiv este conectat la altul. Dacă s-a intrat în această stare din starea Initiating, atunci rolul dispozitivului este cel de Master. Dacă s-a intrat în această stare din starea Advertising, atunci rolul dispozitivului este cel de Slave.

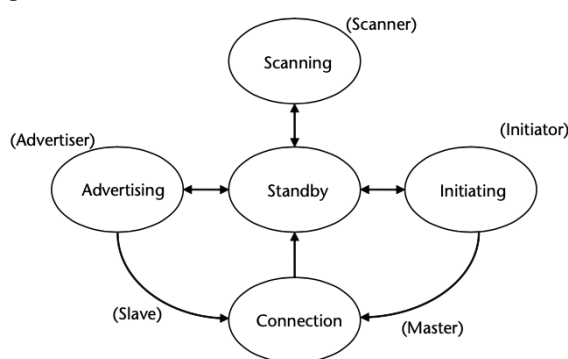


Figura 4 – Stările BLE [4]

Bluetooth Low Energy folosește 37 de canale pentru transmisia datelor și 3 dintre ele (0, 12 și 39) pentru activitățile ce țin de Advertising: transmiterea de mesaje scurte, primirea de mesaje scurte, descoperirea dispozitivelor sau inițierea unei conexiuni. Acestea au fost alese astfel încât să reducă interferențele în special cu dispozitivele Wi-Fi care funcționează pe aceeași bandă de 2.4Ghz. Mai mult, majoritatea dispozitivelor ce dispun de o conexiune Bluetooth vor dispune și de o conexiune Wi-Fi.

Asemănător ca în cazul standard, BLE folosește o tehnică de Adaptive Frequency Hopping (AFH) pentru a sări pe cele 37 de canale de date. Tehnica este simplificată și consumă mai puțină energie.

3) Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)

L2CAP este stratul care se ocupă cu transmiterea pachetelor de date. Deși prezent și în standardul Bluetooth, BLE simplifică foarte mult acest strat, renunțând la moduri precum cel de Streaming și lăsând doar modul Basic L2CAP (deși versiuni ulterioare vor reveni asupra acestor moduri cu o implementare Low Energy).

Un pachet de date în standardul LE este cunoscut ca un B-Frame și are formatul prezentat în Figura 5. Se specifică numărul total al octeților ce vor fi transmiși, apoi numărul de identificare al canalului, apoi informația (payload). Dimensiunea maximă a informației transmise poate fi, în funcție de versiune, până la 65535 bytes.

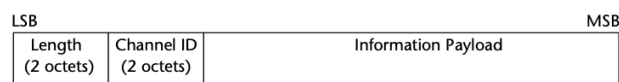


Figura 5 – Structura unui mesaj în BLE (B-Frame) [4]

IV. TEHNOLOGII CONCURRENTE

A. ZigBee

Un studiu prezintă diferențele între BLE și ZigBee/802.15.4 în ceea ce privește consumul de energie, ambele tehnologii având o utilitate foarte asemănătoare. [6] S-au folosit 2 module produse de Texas Instruments (BLE – CC2540, ZigBee-CC2530) în care doar modulul radio este diferit, pentru o comparație cât mai exactă. De asemenea, mediul de testare nu a inclus niciun alt modul pentru a nu influența rezultatele.

Diferențele, deși mici (5-6mW pe operație: pornire, transmisie, recepție), arată că BLE va consuma mai puțină energie în cele mai multe cazuri. Totuși realizatorii studiului au observat că modulul respectiv nu folosea tehnica de Adaptive Frequency Hopping (AFH), iar Advertising-ul s-a făcut pe un singur canal. Asta a rezultat în interferențe cu o rețea Wi-Fi ce a dus la pierderea pachetelor (doar 60% au fost trimise cu succes).

Studiul concluzionează că, deși BLE este un standard foarte bun în ceea ce privește eficiența energetică, implementarea Advertising-ului pe 3 canale și adoptarea tehnicii AFH este necesară pentru stabilitatea rețelei, dar acestea vor crește la rândul lor și consumul de energie.

B. Altele

Chiar dacă nu sunt aflate în concurență directă, merită menționate:

a) *Near Field Communication (NFC)* – un protocol folosit pentru crearea unei rețele între două dispozitive aflate la o distanță de câțiva centimetri, folosit în special pentru plățile contactless.

b) *ANT* – un protocol cu o funcționalitate similară Bluetooth, mai puțin cunoscut, cu aplicabilitate în special în automatizarea caselor sau automatizări industriale. Dispozitivele au o durată de viață a bateriei ce se măsoară în ani, iar un canal poate opera cu 65533 de noduri. [7]

V. IMPLEMENTAREA UNEI APLICAȚII

A. Programarea dispozitivelor embedded: Arduino, ESP32, Module Bluetooth

Încep prin a spune că, deși standardul permite, dispozitivele Apple ce folosesc standardul BLE (4.0+) nu vor putea comunica cu modulele Bluetooth mai vechi, cum ar fi modulul HC-05 (Figura 6), fără a primi o licență (MFi – Made for iPhone) direct de la Apple. Subiectul a fost discutat pe mai multe comunități de dezvoltatori [8] și a adus adesea nemulțumiri, având în vedere că dispozitivele cu Android nu au această limitare.



Figura 6 – Modulul Bluetooth HC-05 [9]

Am avut această problemă în timp ce lucram la un proiect personal de IoT și îmi doream să conectez o placă de dezvoltare Arduino la o aplicație pentru smartphone-uri folosind acest modul Bluetooth mai vechi. Din păcate, această soluție poate fi detectată doar de dispozitivele Android. Pentru aplicații compatibile cu cât mai multe dispozitive se recomandă totuși o versiune cât mai nouă a modulului Bluetooth.

De exemplu, placa de dezvoltare ESP32 vine cu suport Bluetooth Low Energy și oferă și biblioteci [10] ce vin în ajutorul dezvoltatorilor. Funcționalitatea de bază se poate realiza cu aproximativ 15 linii de cod în limbajul C, iar documentația oficială include exemple ce acoperă majoritatea cazurilor de utilizare.

B. Limbaje de programare de nivel înalt: conexiunea între un smartwatch și un smartphone folosind tehnologii Apple

Limbajele de programare de nivel înalt oferă acces mai limitat (sau chiar deloc, în funcție de platformă) la detalii privind modul de comunicare prin Bluetooth. Sunt încurajate folosirea unor modele de proiectare (design patterns) specifice platformei.

În cazul dezvoltării unui sistem ce poate transmite date prin Bluetooth între un smartwatch Apple Watch și un smartphone Apple iPhone se folosesc limbajul de programare Swift și mediul de programare Xcode. Se creează câte o aplicație pentru fiecare dispozitiv, iar în configurările fiecărei aplicații se stabilește o valoare de tip String pentru definirea unui grup (Figura 7). Astfel, compilatorul va ști ce dispozitive să asculte și către ce dispozitive să trimită date.

Key	Type	Value
Entitlements File	Dictionary	(3 items)
HealthKit	Boolean	YES
> HealthKit Capabilities	Array	(0 items)
> App Groups	Array	(1 item)
Item 0	String	group.watchConnectivitySample

Figura 7 – Definirea unui App Group

În cod se instanțiază un obiect de sesiune. Astfel, aplicațiile vor fi pregătite să inițializeze conexiuni. Pentru trimiterea unui mesaj se poate folosi metoda *sendMessage*. Figura 8 prezintă un exemplu de funcție ce trimite un obiect în sesiune.

```
func sendTokenToWatch(){
    let data: [String: Any] = ["Bearer ": self.token as Any]
    session.sendMessage(data, replyHandler: nil, errorHandler: nil)
}
```

Figura 8 – Trimiterea unui dicționar cu cheia de tip String și valoarea de tip Any

Pentru a primi astfel de mesaje este important să ascultăm Advertiser-ii din sesiune. În Figura 9 este prezentată o funcție ce va crea un eveniment când în sesiune sunt mesaje noi. Este necesar să știm ce fel de obiecte așteptăm să primim.

```
func session(_ session: WCSSession, didReceiveMessage message: [String : Any]) {
    print("received message: \(message)")
    DispatchQueue.main.async {
        if let value = message["Bearer "] as? String {
            print(value)
            self.token = value
        }
    }
}
```

Figura 9 – Recepționarea aceluiași tip de dicționar cu cheia de tip String și valoare de tip Any

Observăm că limbajele de programare de nivel înalt oferă puține spre deloc informații despre comunicarea în BLE. Nu cunoaștem stările în care se află dispozitivele, deși le putem intui, dar nu avem control asupra lor. Nu trebuie să menționăm în mesaje lungimea datelor ce urmează să le trimitem sau canalul pe care acestea se vor trimite. Compilatoarele moderne fac aceste lucruri singure.

VI. BLUETOOTH 5

Bluetooth 5.0 continuă avansul tehnologic al standardului LE, dar saltul nu este unul dramatic. Standardul permite acum ca pachetele de Advertising să fie de 255 de octeți (față de 31 în versiunea 4.0) și o lățime de bandă de 2Mbps (față de 1Mbps în versiunea 4.0). Bluetooth 5.1 introduce informații despre unghiul de la care s-a trimis mesajul (Angle of Departure) respectiv unghiul la care a ajuns mesajul (Angle of Arrival). [11] Informațiile despre unghiurile semnalelor fac posibile aplicații de urmărire a dispozitivelor din apropiere.

Bluetooth 5.2 introduce LE Audio – transmiterea semnalului audio cu un consum redus de energie – și LE Power Control – capacitatea dispozitivelor de a controla dinamic nivelul de putere al semnalului transmis. [12]

VII. CONCLUZII

Versiunea 4.0 a standardului Bluetooth a schimbat direcția în care se îndrepta tehnologia până la acel punct. Standardul Low Energy a însemnat renunțarea la o viteză mai mare în favoarea optimizării consumului de energie. Schimbarea s-a dovedit a fi una de succes, iar companiile au adoptat rapid tehnologia în produsele lor. Actualizările ce au venit după nu au adus schimbări la fel de mari, ci mai mult au construit peste ceea ce este BLE.

Tehnologia este accesibilă și dezvoltatorii o pot integra în produsele lor cu costuri mici. Timpul necesar pentru integrarea standardului în aplicațiile proprii este scăzut. Mai mult, datele despre standard sunt disponibile public, lucru ce a atras cu siguranță industria către Bluetooth. Așa se face că astăzi tehnologia este prezentă într-o mulțime de dispozitive: mașini, dispozitive mobile, periferice, electrocasnice și lista poate continua.

VIII. REFERENCES

- [1] C. Sorrel, "Casio Bluetooth Low Energy watch has a two-year battery life," March 2011. [Online]. Available: <https://www.wired.com/2011/03/casio-bluetooth-low-energy-watch-has-two-year-battery-life/>. [Accessed 02 05 2021].
- [2] "Bluetooth(R) Technology Website," [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/>. [Accessed May 2021].
- [3] L. Isaksson, M. Fiedler and A. A. Nilsson, "Validation of Simulations of Bluetooth's Frequency Hopping," *Proceedings of the 2004 Design, Analysis, and Simulation of Distributed Systems, Arlington, Virginia, USA*, pp. 156-165, 2004.
- [4] N. Gupta, Inside Bluetooth Low Energy, Artech House, 2016.
- [5] M. Gast, 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide, Second Edition, O'Reilly, 2003.
- [6] M. Siekkinen, M. Hienkari, J. K. Nurminen and J. Nieminen, "How Low Energy is Bluetooth Low Energy? Comparative Measurements with ZigBee/802.15.4," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pp. 232-237, 2012.
- [7] T. Aasebø, "Near Field Communication, Bluetooth, ZigBee & ANT+ lecture notes," Western Norway University Of Applied Sciences, Department of Computer science, Electrical engineering and Matematical sciences, 2018.
- [8] "Stack Overflow," [Online]. Available: <https://stackoverflow.com/questions/50443456/connecting-hc-05-with-iphone-se-iosv11-0>. [Accessed 02 05 2021].
- [9] "HC-05 Master Slave Bluetooth Module with Adapter (3.3 V and 5 V Compatible)," Optimus Digital Shop, [Online]. Available: <https://www.optimusdigital.ro/en/wireless-bluetooth/153-hc-05-master-slave-bluetooth-module-with-adapter-33v-and-5v-compatible.html>. [Accessed 09 05 2021].
- [10] A. Raj, "How to Use Classic Serial Bluetooth in ESP32," Circuit Digest, 16 Oct 2018. [Online]. Available: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/using-classic-bluetooth-in-esp32-and-toogle-an-led>. [Accessed 03 05 2021].
- [11] E. Au, "Bluetooth 5.0 and Beyond," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(2), p. 119–120, 2019.
- [12] M. Woolley, "Bluetooth Core Specification Version 5.2 Feature Overview," 2020 December 2020. [Online]. Available: https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2020/01/Bluetooth_5.2_Feature_Overview.pdf. [Accessed 08 05 2021].