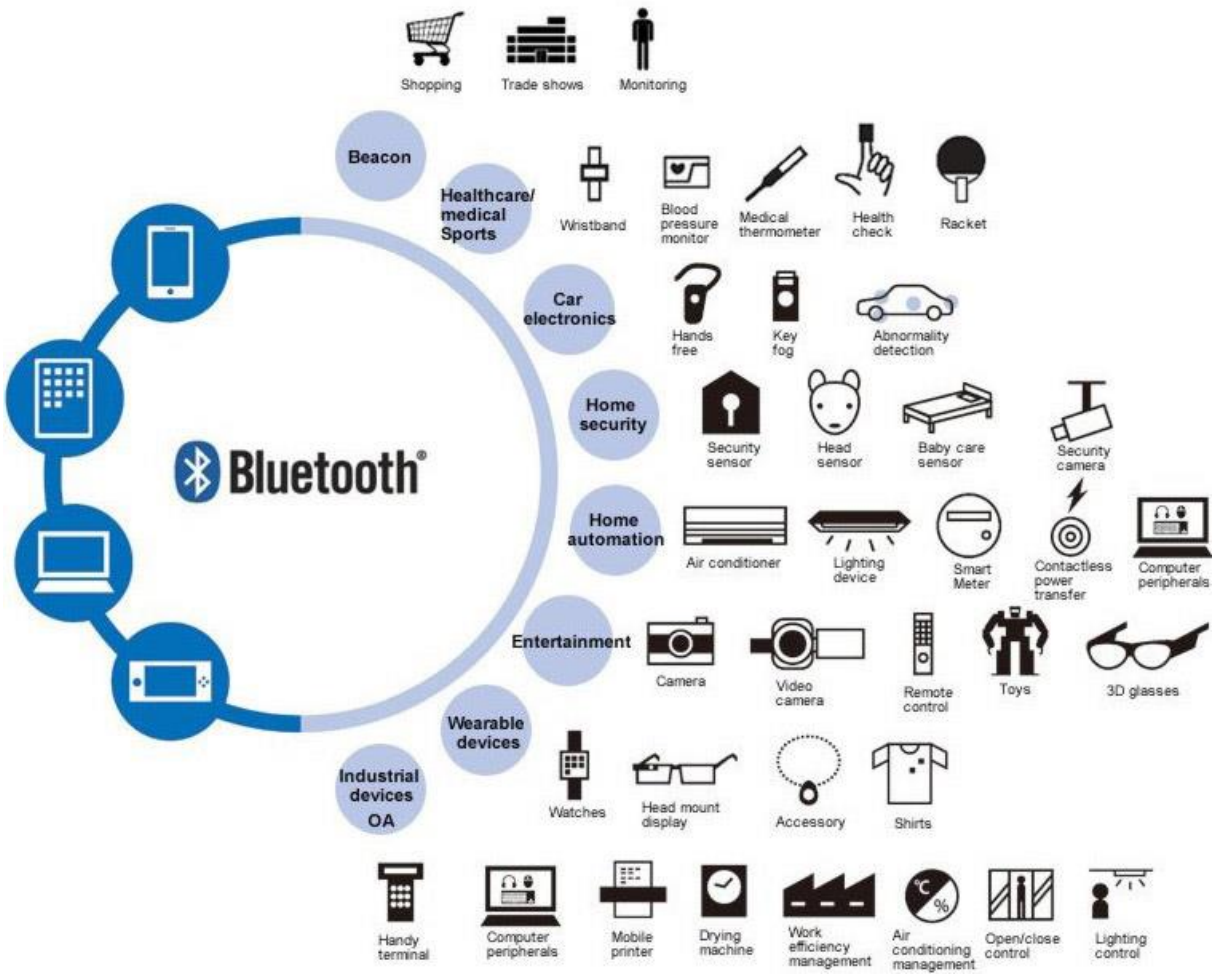
Bluetooth Low Energy

– BLE –

Bluetooth

- WPAN standard za bežičnu komunikaciju kratkog dometa u ISM frekventnom opsegu ($2.4 - 2.48\ GHz$)



Bluetooth
- istorija -

- **1989-1994**: Razvoj prvobitnog koncepta u okviru kompanije *Ericsson* sa idejom zamene žičane komunikacije na malom rastojanju radio-komunikacijom kratkog dometa
- **1998**: Formiran konzorcijum *Bluetooth SIG* (*Special Interest Group*), čija je misija razvoj otvorene specifikacije za bežičnu komunikaciju kratkog dometa
- **1999**: Prva verzije Bluetooth specifikacije, Bluetooth 1.0. Brzina prenosa 1 Mbps i domet 10 m.
- **2004**: Bluetooth 2.0 + EDR (*Enhanced Data Rate*) - 3 MBps.
- **2009**: Bluetooth 3.0 + HS (*High Speed*) - do 24 Mbps (uz pomoć WiFi)
- **2010**: Bluetooth 4.0: Obuhvata *Bluetooth Low Energy* (BLE) – fokus na maloj potrošnji
- **2013 – 2016**: Bluetooth 4.1 (2013), 4.2 (2014) i 5 (2016) – povećanje brzine prenosa, dometa i sigurnosti uz očuvanje male potrošnje.
- **2017**: *Bluetooth Mesh Networking* u okviru Bluetooth 5
- **2019** - Bluetooth 5.1 (2019), 5.2 (2020), 5.3 (2021) i 5.4 (2023)

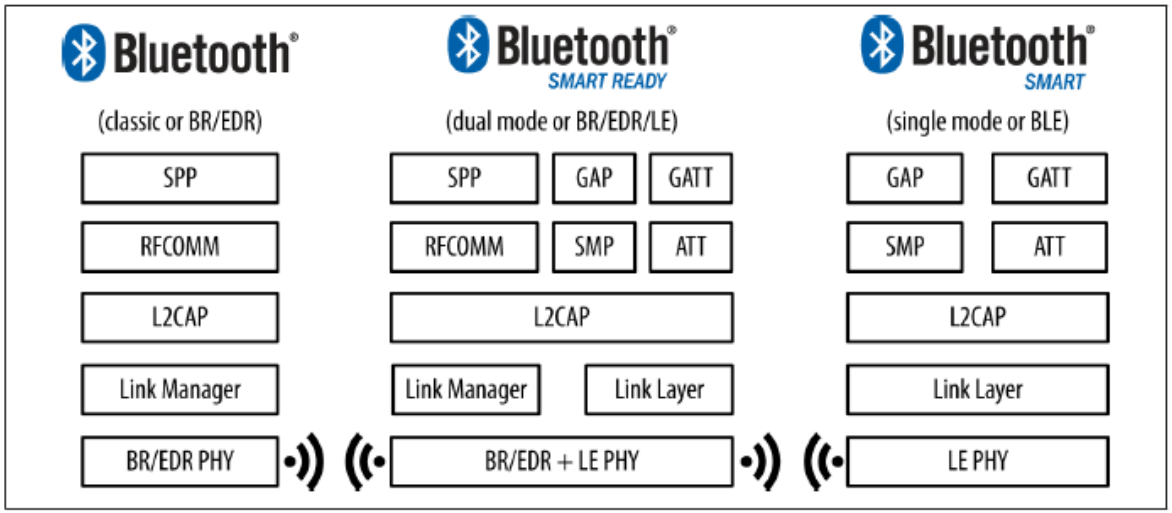
BR/EDR i BLE

- Počev od verzije 4.0, Bluetooth specifikacija obuhvata dve međusobno nekompatibilne bežične tehnologije:
- ***Bluetooth Classic*** **(BR/EDR)**
  - Kompatabilnost sa starijim verzijama
  - Maksimalno $3\ Mbps$
  - Za primene koje zahtevaju veliki protok podataka (*streaming* aplikacije)
- ***Bluetooth Low Energy*** **(BLE)**
  - Malom potrošnom energije, ali zato manja brzine prenosa podataka (max. $2\ Mbps$)
  - Primena kod baterijski napajanih uređaja kod sporadično komuniciraju radi prenosa male količine podataka

U našem fokusu je BLE

Bluetooth uređaji

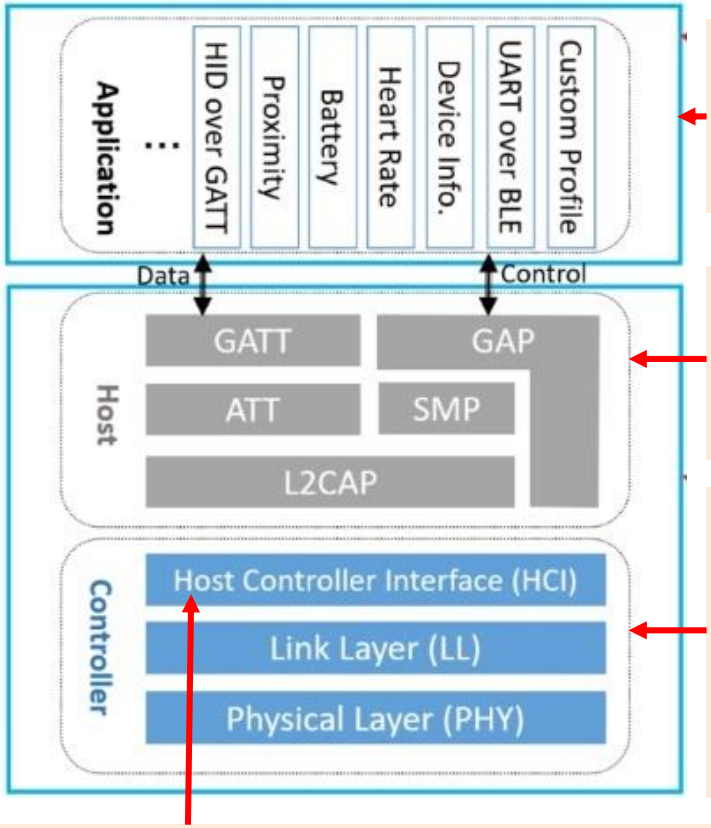
- Tri tipa Bluetooth uređaja:
  - **BR/EDR uređaj** - klasični Bluetooth uređaj sa podrškom samo za BR/EDR.
  - ***Single-mode* (BLE) uređaj** – podrška samo za BLE. Može da komunicira sa drugim BLE i *dual-mode* uređajima, ali ne i sa BR/EDR uređajima.
  - ***Dual-mode* (*BR/EDR/LE* ili *Bluetooth Smart Ready*)** uređaj – podrška za BR/EDR i BLE. Može da komunicira sa Bluetooth uređajem bilo kog tipa.



Bluetooth uređaji

U nastavku isključivo BLE

BLE arhitektura



Aplikacija: korisnička aplikacija koja se, za potrebe komunikacije, oslanja na BLE protokol stek

Host: viši slojevi BLE protokol steka, koji se, po pravilu, realizuju u softveru

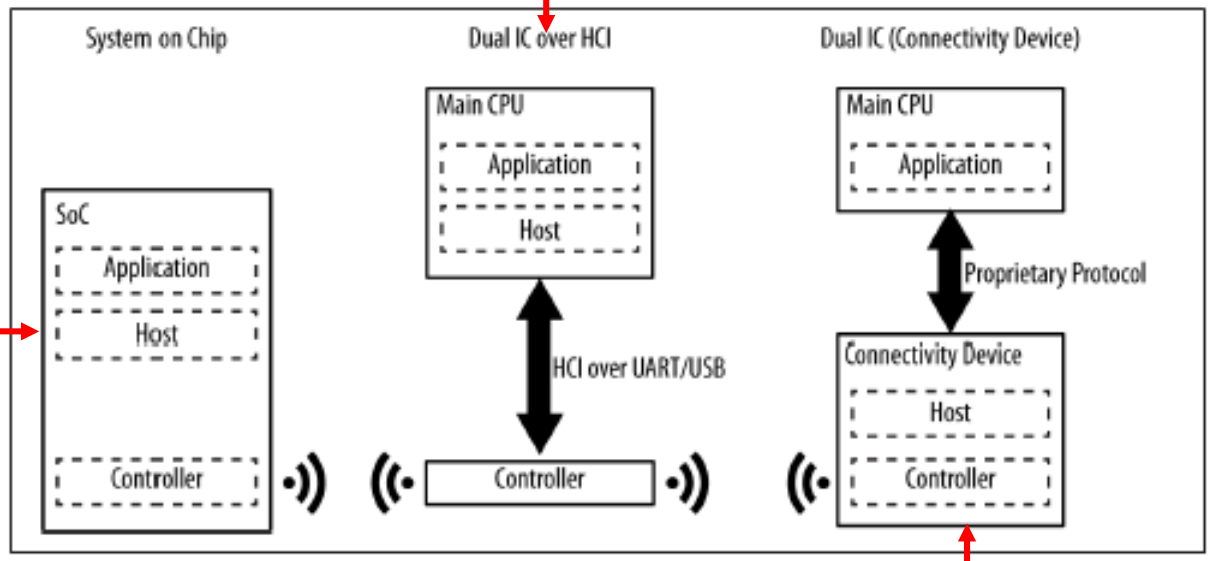
Kontroler (*Controller*): obuhvata najniže slojeve BLE protokol steka, uključujući i radio primopredajnik. Najvećim delom, realizuje se u hardveru.

Sloj *Host Controller Interface* (HCI) - standardni komunikacioni protokol između hosta i kontrolera.
Omogućava interoperabilnost hostova i kontrolera različitih proizvođača

Bluetooth konfiguracije

Dva IC sa HCI – korisnička aplikacija i Bluetooth host se izvršavaju na jednom, a Bluetooth kontroler na drugom IC. Dva IC komuniciraju putem HCI. (kod npr. mobilnih telefona)

SoC (*system on chip*) – aplikacija, host i kontroler su realizovani na jednom IC (kod jednostavnih senzorskih uređaja)

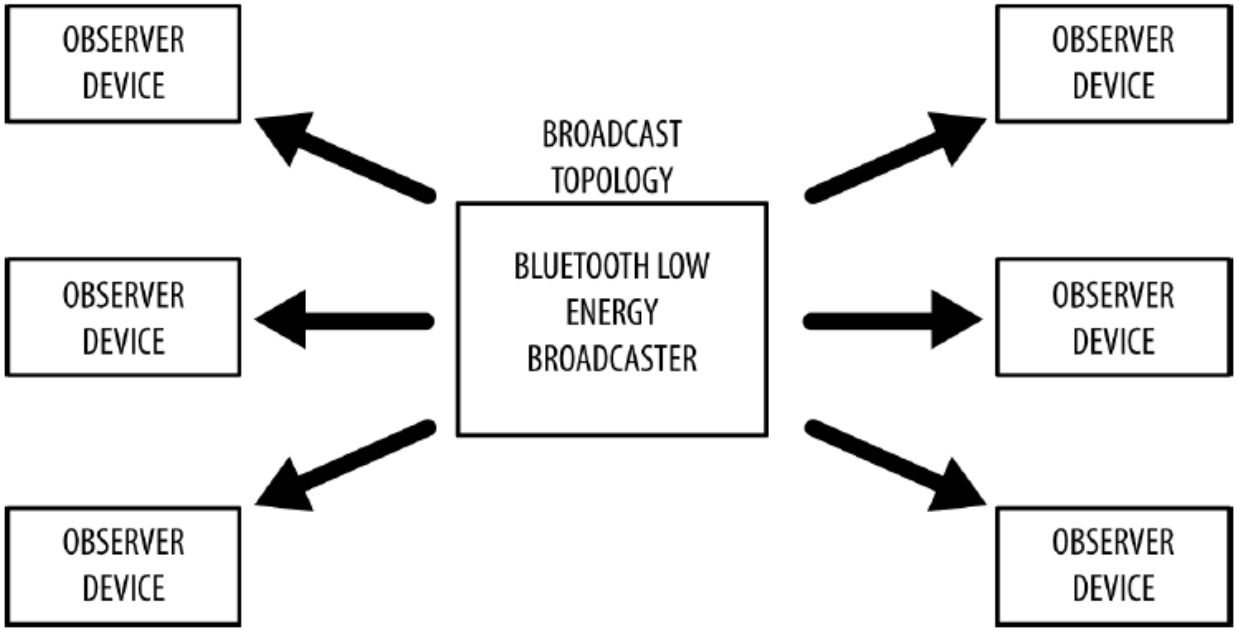


Dva IC sa nestandardnom komunikacijom – aplikacija se izvršava na jednom IC, a Bluetooth host i kontroler na drugom IC.
(Za laku nadogradnju postojećih uređaja)

BLE topologije

Emitovanje i osmatranje (*Broadcasting and Observing*)

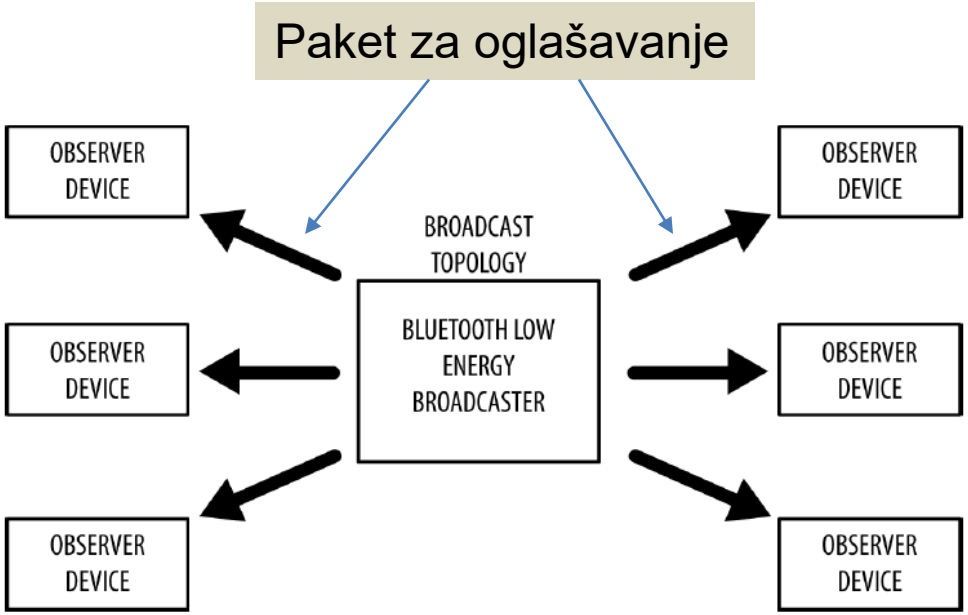
- ***Broadcaster***, ili ***emiter***: uređaj koji periodično šalje pakete za oglašavanje (*advertising packets*) svim okolnim uređajima koji su voljni da ih prime.
- ***Observer***, ili ***osmatrač***: uređaj koji periodično skenira radio kanale na predodređenim frekvencijama da bi primio pakete za oglašavanje koji se trenutno emituju.



BLE topologije

Emitovanje i osmatranje (*Broadcasting and Observing*)

- Paket za oglašavanje:
  - 31 bajt
  - Jedan deo ovog paketa sadrži identifikator emitera, dok preostali deo može da sadrži proizvoljnu informaciju
  - Uređaj-osmatrač, neposredno nakon prijema paketa za oglašavanje, može da zatraži od emitera sekundarne podatke o oglašavanju – tzv. *Scan Response* (max dužine 254 bajta).



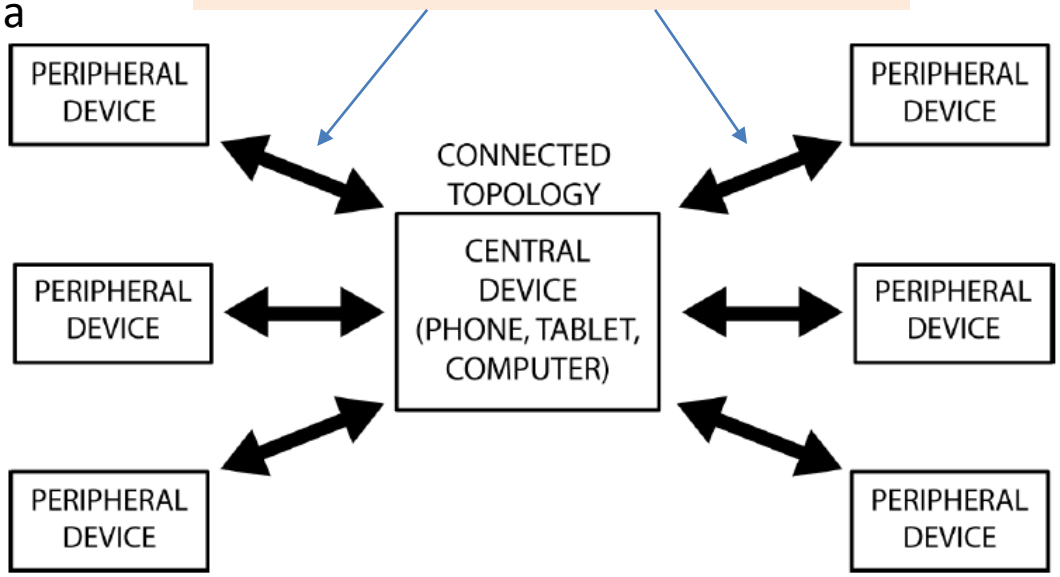
Brz i jednostavan način za periodičnu distribuciju male količine podataka ka jednom ili više uređaja. Ograničenje - nedostatak podrške za sigurnost podataka i privatnost

BLE topologije

Konekcija (*Connecton*)

- ***Central*, *centrala* ili *centralni uređaj***:
  - Skenira komunikacioni kanal i prima pakete za oglašavanje
  - Ako paket za oglašavanje nosi indikaciju da je pošiljalac paket dostupan za konektovanje, centrala može da inicira uspostavljanje konekcije.
  - Nakon što je konekcija uspostavljena, centralni uređaj reguliše tajming konekcije i inicira periodičnu razmenu podataka sa periferijskim uređajem.
- ***Peripheral*, *periferija* ili *periferni uređaj***:
  - Periodično šalje pakete za oglašavanje sa indikacijom o spremnosti za konektovanje.
  - Nakon što prihvati zahtev za konektovanje, periferni uređaj prati tajming centralnog uređaja i s njim razmenjuje podatke.

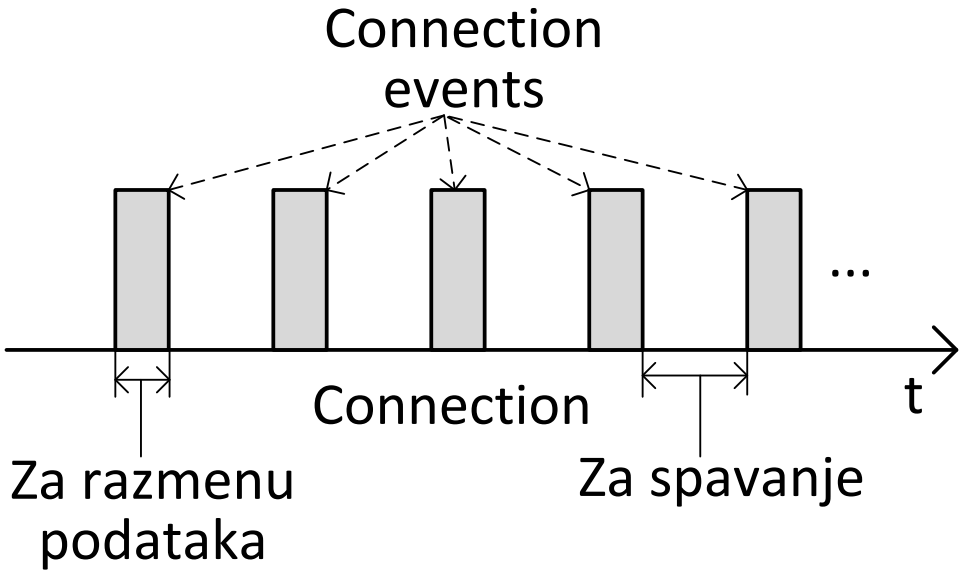
Konekcija – mogućnost dvosmernog prenosa podataka



BLE topologije

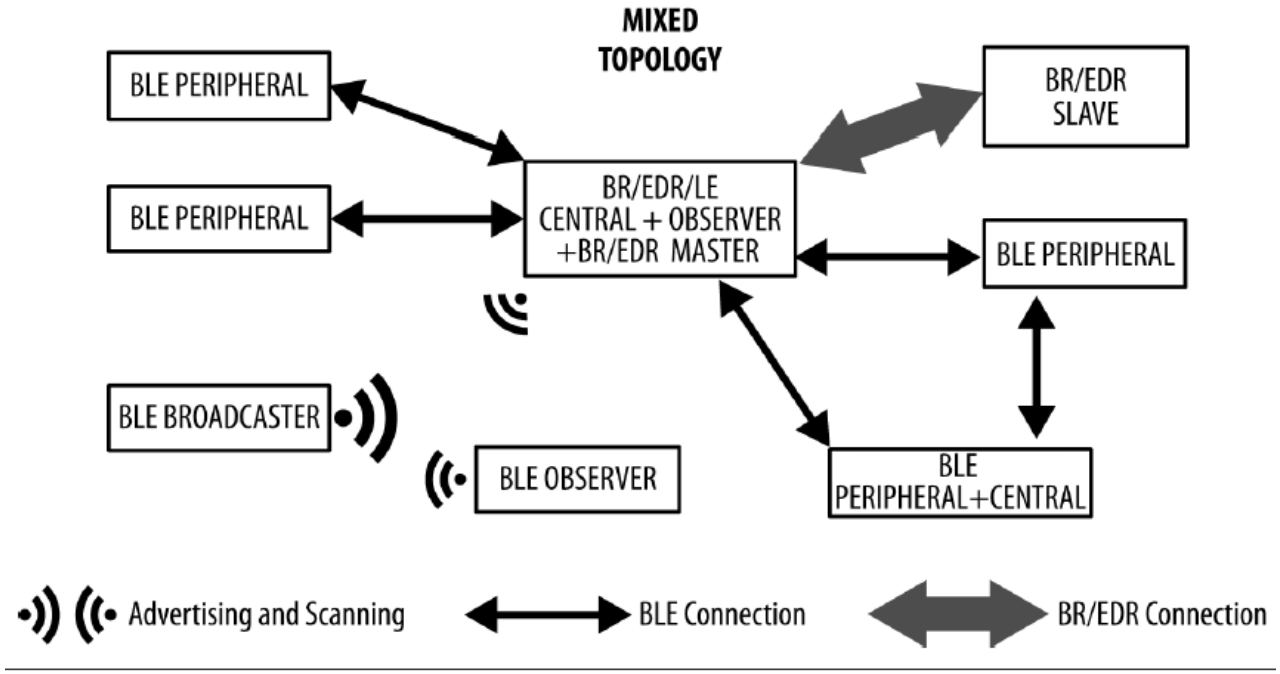
Konekcija (*Connecton*)

- Razmena podataka nije kontinualna, već je „sabijena“ u okviru kratkotrajnih, periodičnih vremenskih intervala, tzv. ***connection events***.
- Sinhronizacija doprinosi uštedi energije



BLE topologije
Kombinovana topologija

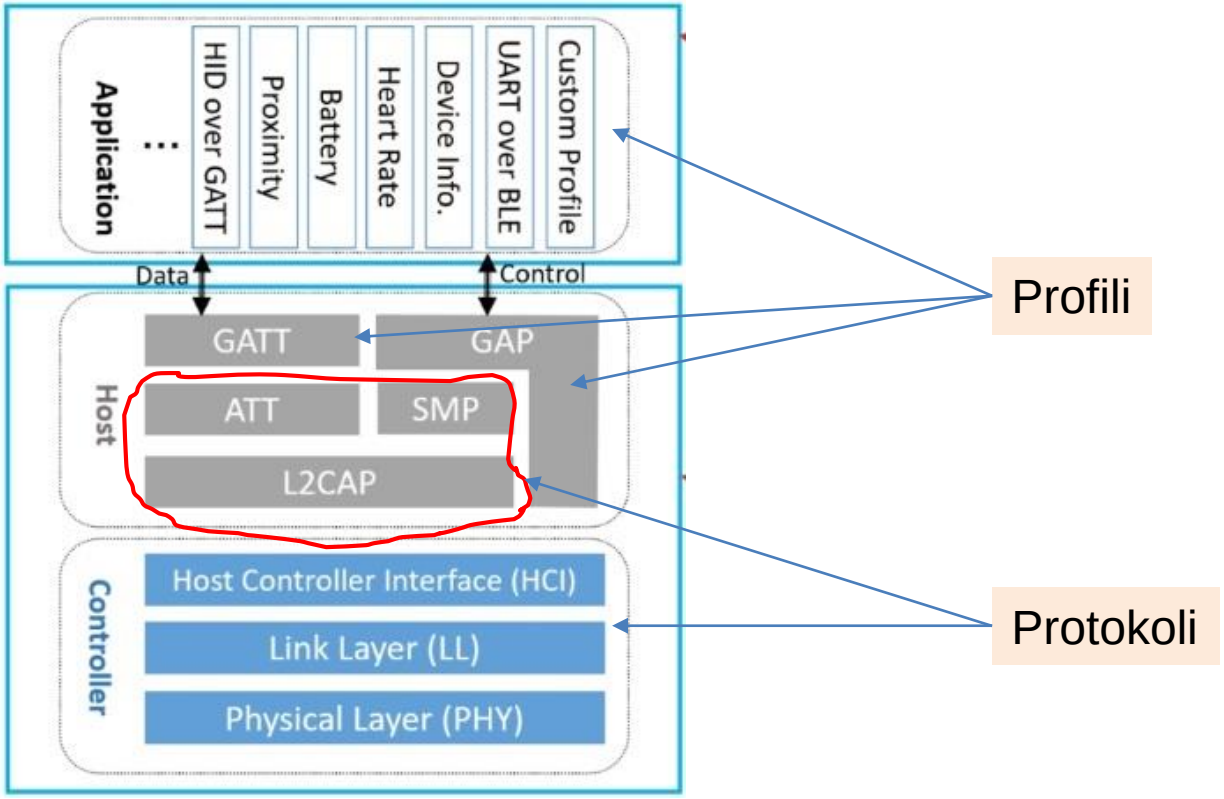
- Uređaj može istovremeno igrati ulogu centralnog i perifernog uređaja
- Centralni uređaj može uspostaviti konekciju sa više perifernih uređaja
- Periferni uređaj može biti konektovan sa više centralnih uređaja
- Konektovani uređaj može nastaviti sa emitovanjem paketa za oglašavanje



Protokoli i profili

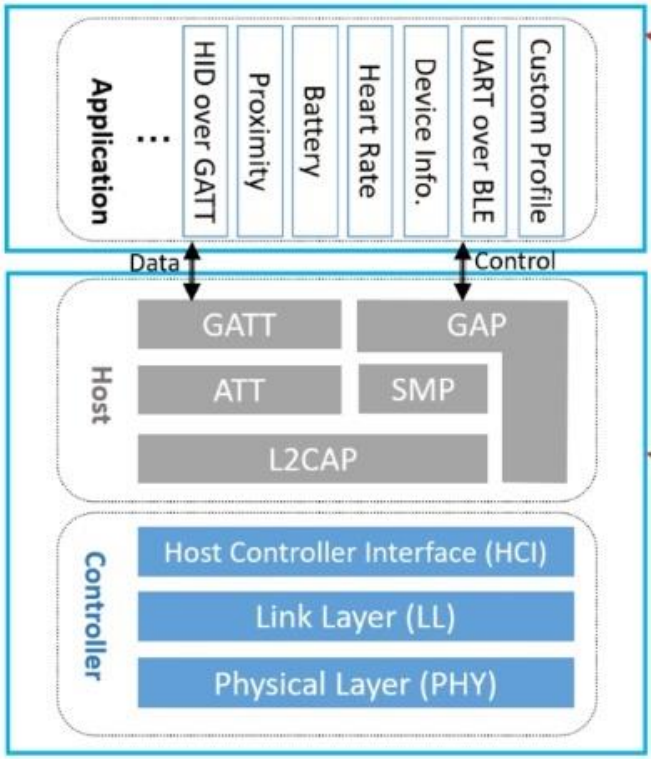
- Bluetooth specifikacija pravi razliku između koncepta protokola i profila:
- ***Protokol*** je skup pravila kojima se reguliše razmena podataka između uređaja, sistema ili, generalno, entiteta koji komuniciraju (pristup medijumu, formatiranja paketa, kodiranja i dekodiranja podatka...)
- ***Profili*** su na višem nivou od protokola - kako treba koristiti mogućnosti Bluetooth komunikacije i raspoložive protokole da bi se ostvarila konkretna funkcionalnost.
  - Generički profili su definisani u samoj Bluetooth specifikaciji i odnose se na načine rada koje moraju da implementiraju svi Bluetooth uređaji (npr. *Generic Access Profile, Generic Attribute Profile*).
  - Aplikaciono-specifični profili su prilagođeni specifičnim zahtevima različitih tipova uređaja i načinima njihovog korišćenja.

Protokoli i profili

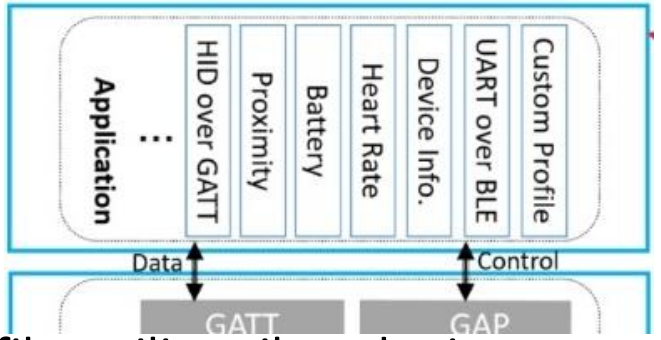


Protokoli i profili

- Generički profili – obezbeđuju interoperabilnost BLE uređaja različitih proizvođača (obavezni za sve uređaje):
- *Generic Access Profile* (*GAP*):
  - Vršni upravljački nivo BLE-a
  - Kako treba koristiti BLE protokole niskog nivoa da bi se realizovale različite uloge uređaja (npr. *central/peripheral*), procedure i načini rada koji će omogućiti uređajima da emituju podatke, otkrivaju prisustvo drugih uređaja, uspostavljaju konekcije i pregovaraju oko nivoa sigurnosti podataka.
- *Generic Attribute Profile* (*GATT*):
  - Vršni sloj podataka u BLE.
  - Definiše osnovne modele (formate) podataka i procedure koje omogućavaju uređajima da razmenjuju informacije o tome koje podatke poseduju, a onda i da razmenjuju, čitaju i upisuju elemente podataka.



Protokoli i profili



- Aplikaciono-specifični profili: proširenja GATT profila u cilju prilagođenja konkretnom slučaju upotrebe
- *SIG profili* - obuhvaćeni Bluetooth standardom.
  - *Find Me Profile* – (npr. koristimo pametni sat da bismo pronašli pametni telefon, ili obrnuto)
  - *Proximity Profile* - (zvučni signal na telefonu ako prilikom izlaska iz stana zaboravimo da ponesemo ključeve od automobila)
  - *HID* (*Human Interface Device*) *over* GATT – prenos HID podataka preko BLE (HID je uređaj poput tastature, miša, daljinskog upravljača,...).
  - *Health Thermometer Profile* – prenos očitavanja telesne temperature preko BLE
  - *Glucose Profile* - prenos nivoa glukoze preko BLE
  - *Cycling Speed and Cadence Profile* – omogućava prenos preko BLE očitavanja senzora za brzinu i broj obrtaja točka bicikle.
- *Korisnički profili*
  - Mogućnost da proizvođači elektronskih uređaja definišu svoje sopstvene profile za primene koje nisu obuhvaćene SIG profilima
  - Mogu ostati privatni, ili se mogu publikovati kako bi postali dostupni i drugim proizvođačima

BLE - nedostaci

- *Ograničena propusnost*:
  - Za verzije BLE 4.2 i niže, brzina prenosa podataka je fiksno $1\ Mbps$.
  - Za verzije BLE 5 i kasnije, brzina prenosa zavisi od izabranog načina rad i može biti $1\ Mbps$ ili $2\ Mbps$.
  - Za prenos na veća rastojanja, brzina prenosa se spušta na 500 ili $125\ Kbps$.
  - Propusnost na nivou aplikacije i krajnjeg korisnika mnogo je manja od brzine prenosa preko bežičnog medijuma.
  - Tipično, propusnost BLE sa brzinom prenosa podataka od $1\ Mbps$ je reda $125\ Kpbs$, tj. čak 8 puta manja od brzine protoka na fizičkom nivou.
  - Smanjena propusnost je posledica:
    - *Pauze između paketa*. BLE nameće obaveznu pauzi u trajanju od $150\ us$ između svaka dva uzastopna paketa.
    - *Režijski troškovi* (*packet overhead*). Zbog zaglavlja paketa i dodatnih podatka koji se umeću u paket na slojevima protokol steka između aplikacionog i fizičkog.
    - *Slejv paketi*. Nakon uspostavljene konekcije između dva BLE uređaja, periferija na svaki primljeni paket odgovori slanjem svog paketa, čak iako nema svoje podatke za slanje.
    - *Retransmisija paketa.* U slučaju gubitka ili greške u prenosu paketa, pošiljalac paketa je u obavezi da taj paket ponovo pošalje.

BLE - nedostaci

- *Mali domet* (pre osnovna odlika nego nedostatak)
  - Oko $10\ m$ u zatvorenom prostoru.
  - Zidovi, metalni objekti i voda (npr. u ljudskom telu) značajno utiču na prostiranje radio signala u $2.4\ GHz$ ISP frekventnom opsegu.
  - Do $100\ m$ na otvorenom prostoru, u uslovima optičke vidljivosti između uređaja
  - Na domet utiču performanse i dizajn antene BLE uređaja.
  - Dimenzije, oblik i tip materijala fizičkog kućišta uređaja utiču na performanse antene naročito ako se koristi interna antena (smeštena u kućištu uređaja).
  - Orijentacija uređaja, koja zapravo određuje međusobnu orijentaciju antena predajnog i prijemnog uređaja.
- *Neophodan je gateway* (mrežni prolaz).
  - Onda kad je podatke koje generiše BLE uređaj preneti na Internet, ili je potrebno BLE uređaju isporučiti podatke koji su mu poslati preko Interneta.

BLE - prednosti

- *Mala potrošnja energije*. Optimizovan za malu potrošnju:
  - Prenos male količina podataka
  - Relativno mala brzina prenosa
  - RF primopredajnik je u isključenom stanju najveći deo vremena
- *Otvorena specifikacija*
  - BLE specifikacija je besplatna i dostupna za slobodno korišćenje (na veb sajtu organizacije Bluetooth SIG).
- *Niska cena BLE modula i IC-ova*
- *Rasprostranjenost*
  - Većina savremenih pametnih telefona poseduje BLE. Ovo je možda i najveća prednost BLE u poređenju sa konkurentskim radio tehnologijama, kao što su *ZigBee*, *Z-Wave* i *Thread*.

BLE - primene

- *U primenama koje zahtevaju mali protok podataka*.
  - Npr. očitavanja senzora ili jednostavna kontrola aktuatora.
- *Konfiguracija uređaja*
  - Kao sekundarni interfejs za konfiguraciju uređaja, pre nego što se uspostavi glavna bežična konekcija.
  - Npr., BLE, za podešavanje parametara WiFi konekcije (mreža i šifra). Nakon toga, BLE se isključuje i celokupan saobraćaj se usmerava na WiFi.
- *Pametni telefon kao grafički korisnički interfejs*.
  - Korisnički grafički interfejs malog uređaja se realizuje na pametnom telefonu, pri čemu se BLE koristi za komunikaciju između uređaja i telefona.
  - Dodatno, pametni telefona kao *gateway*.
- *Lični i nosivi uređaji*.
  - Portabilni uređaji poput pametnog sata ili fitnes-trakera.
  - Za komunikaciju uređaj – pametni telefon.
- *Uređaji samo za emitovanje* (*broadcast only devices*), ili *Beacon*-uređaji
  - Jednostavni baterijski napajani uređaji koji periodično emituju svoje podatke, tako da drugi uređaji mogu da otkriju njihovo prisustvo i preuzmu poslate podatke.
  - Podaci: lokacija uređaja ili senzorska očitavanja.
  - Poput RFID, ali uz mogućnost prijema podataka mobilnim telefonom.

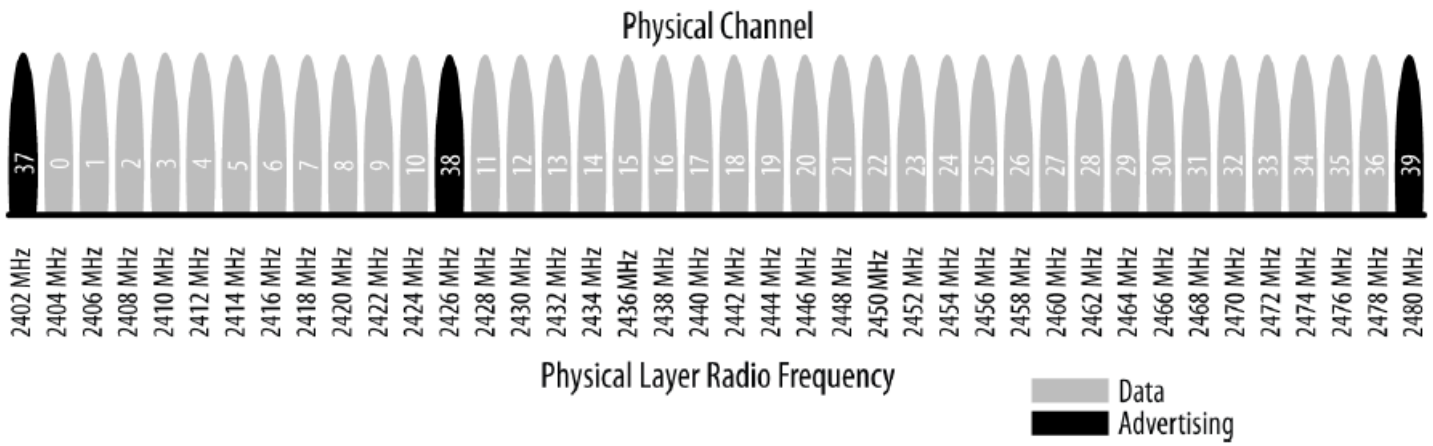
BLE - primene

- Gde BLE nije dobar izbor:
  - Video striming
  - Audio striming visokog kvaliteta
  - Prenos velike količine podataka u dužem vremenskom periodu (zbog povećanog utroška energije, pa time i brzog pražnjenja baterije).

Fizički sloj (*Physical Layer - PHY*)

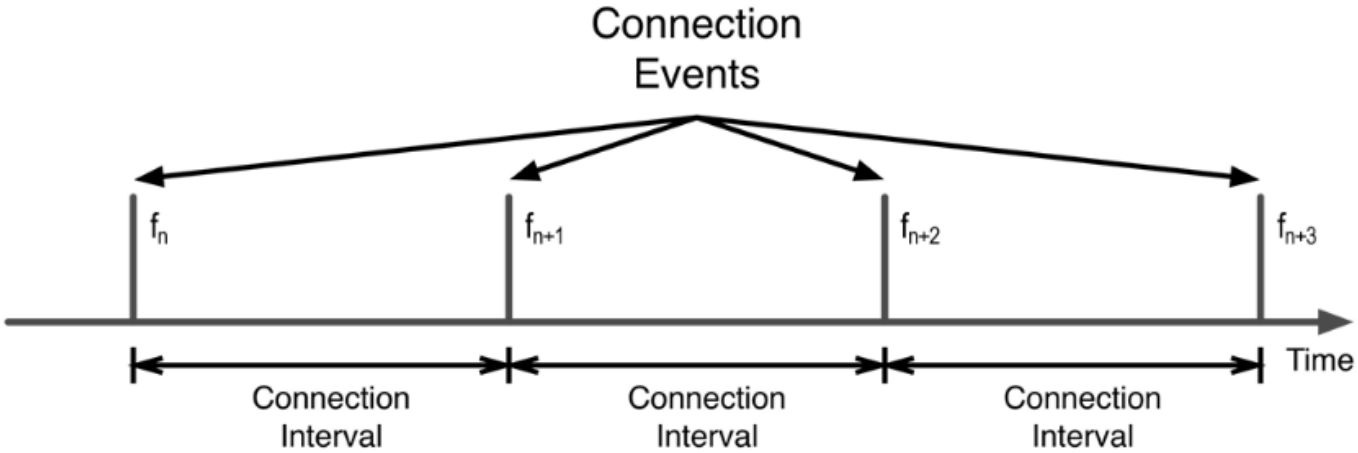
- Opseg frekvencija: $2400\ MHz$ do $2483.5\ MHz$.
- Opseg se deli u 40 kanala širine $1\ MHz$ sa razmakom od $2\ MHz$ između susednih kanala.
- Kanali 37, 38 i 39 se koriste za oglašavanje (prenose se paketi za oglašavanje i paketi za uspostavljanje konekcije)
- Preostalih 37 kanala se koriste za prenos podataka

Kanali za oglašavanje su razmaknuti zbog interferencije sa WiFi.
Širina WiFi frekventnog kanala je 20 do $40\ MHz$ => emitovanje bliske WiFi stanice može da se preklopi sa najviše dva od tri BLE kanala za oglašavanje



Frekventno skakanje

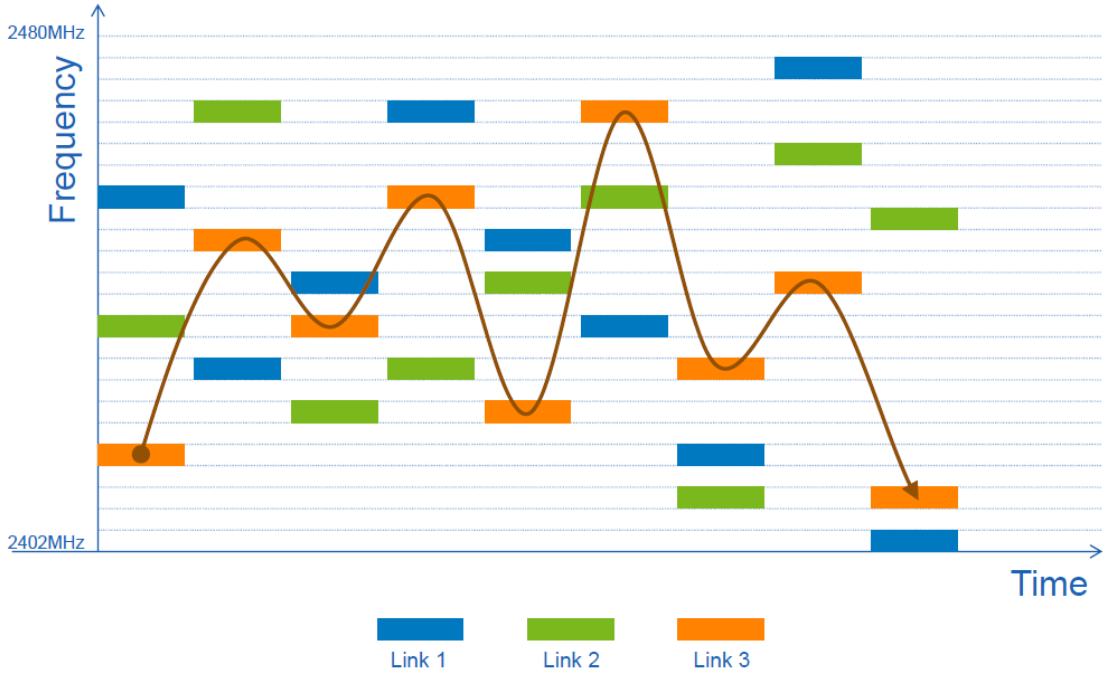
- Tokom trajanja konekcije, BLE koristi tehniku frekventnog skakanja (*frequency hopping*), gde se RF signal prebacuje sa jedne na drugu frekvenciju nakon svake transmisije – sporo skakanje
- Izbegava se trajna interferencija sa drugim uređajima
- Frekvencije se menja na početku svakog *connection event*-a, pri čemu se novi frekventni kanal bira iz skupa kanala za prenos podataka (0,1,...,36)
- Za sledeći *connection event* bira se kanal:
  - $f_{n+1} = (f_n + hop)\ mod\ 37,$
  - Parametra hop (ceo broj) je usaglašena između dva uređaja prilikom uspostavljana konekcije i ostaje konstanta tokom trajanja konekcije.



Frekventno skakanje

- Mala verovatnoća kolizije transmisija dva ili više BLE uređaja.
- Kolizija se dešava samo onda kada su *connection event*-i dve konekcije preklopljeni u vremenu i pri tom obe koriste isti frekventni kanal.
- Čak i kada se kolizija desi, već u sledećem *connection event*-u, dve konekcije će preći na različite kanale (zbor različitog *hop*), što će omogućiti nastavak komunikacije.

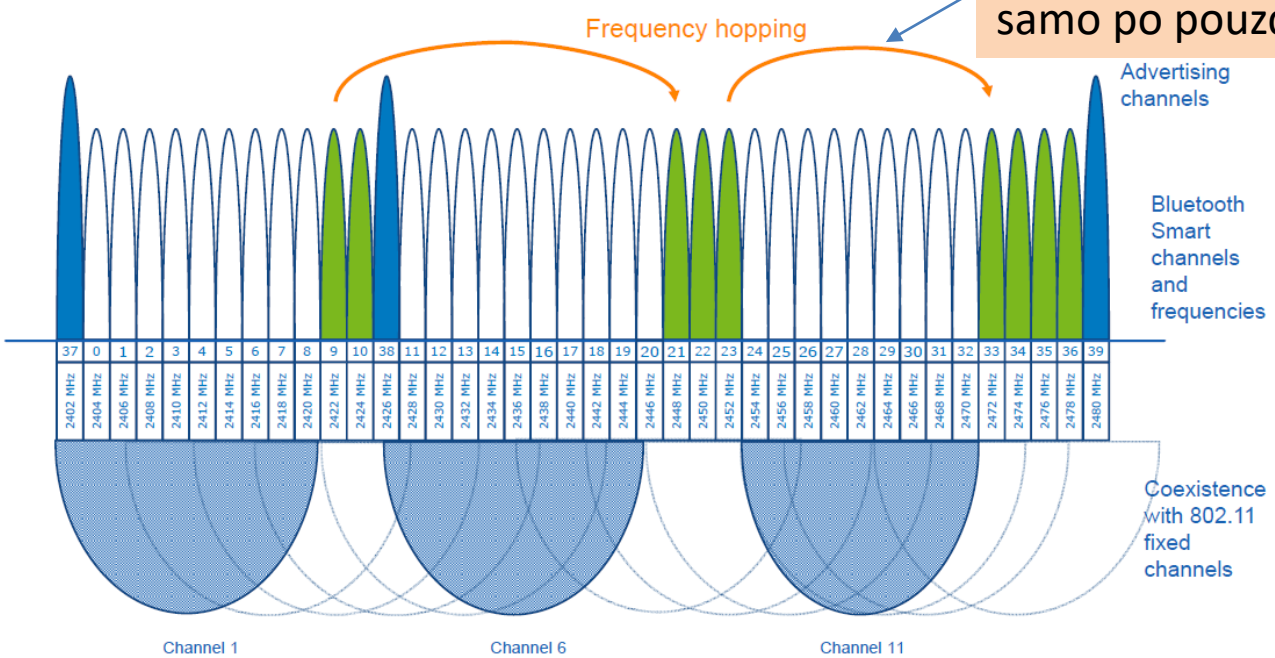
Tri istovremeno aktivne BLE konekcije (Link 1, 2 i 3)



Adaptivno frekventno skakanje
(*Adaptive Frequency Hopping*)

- Način za sprečavanje (ublažavanje) interferencije sa drugim mrežama u okruženju koje koriste isti frekventni opseg (WiFi)
- Tipično, nisu svi BLE frekventni kanali podjednako pogođeni interferencijom.
- Zbog toga neki kanali su pouzdani, a neki nepouzdani.
- Lista pouzdanih i nepouzdanih kanala se vremenom menja
- Adaptivno frekventno skakanje pokušava da identifikuje pouzdane kanale i ograniči skakanje frekvencije samo na te kanale.

Adaptivno frekventno skakanje – skakanje samo po pouzdanim kanalima

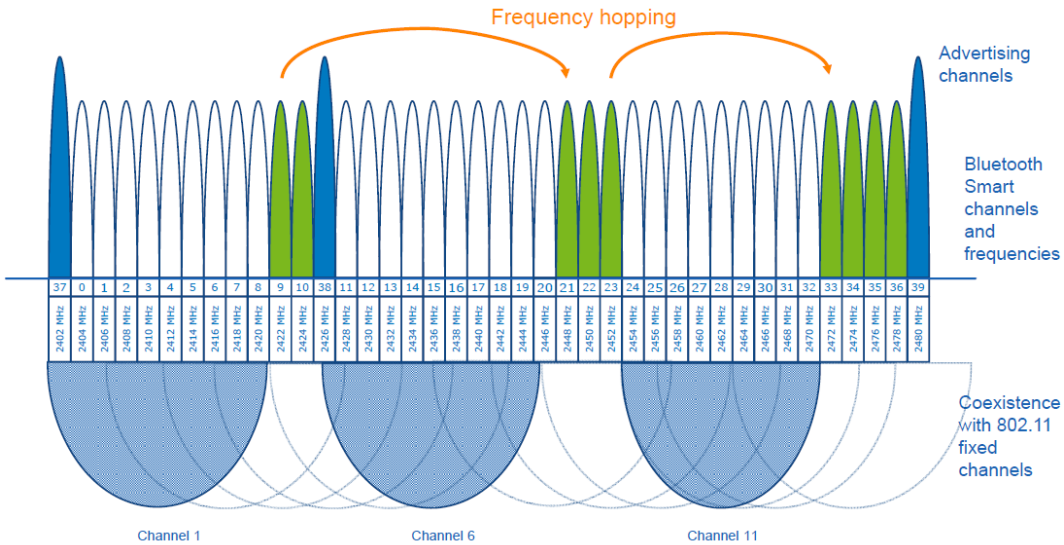


Plavi – kanali za oglašavanje
Beli – „loši“ kanali
Zeleni – „dobri“ kanali

Interferencija

Adaptivno frekventno skakanje

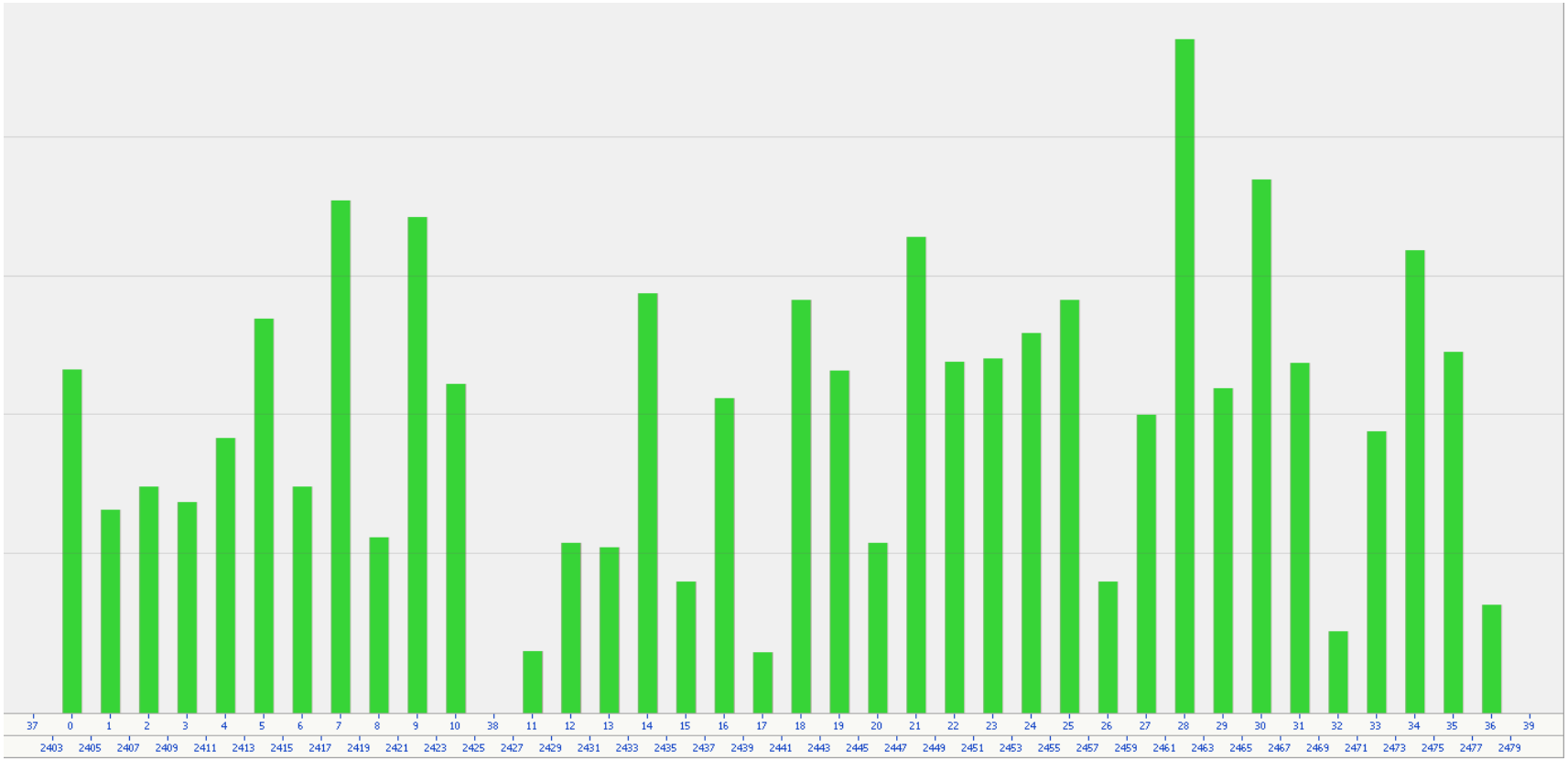
- BLE uređaj održava mapu kanala u kojoj je svaki kanal označen kao „dobar“ ili „loš“ (na osnovu statistike komunikacije na tom kanalu – procenat uspešno prenetih paketa)
- Prilikom uspostavljanja konekcije, centralni BLE uređaj šalje svoju mapu kanala perifernom uređaju kako bi oba imala istu informaciju o tome koje kanale koristiti, a koje ne
- Tokom konekcije, promena u mapi kanala bilo kog uređaja se saopštava drugom uređaju.



Ako se isključi WiFi na WiFi kanalu 6, svi „beli“ BLE kanali iz opsega 11 – 20 postaće „dobri“

Adaptivno frekventno skakanje

- Tipična statistika korišćenja BLE kanala u nekom realnom okruženju
- (Da nema interferencije, i da se ne koristi adaptivno frekventno skakanje, svi „barovi“ bi bili iste visine)



Fizički sloj – modulacija

- BLE koristi varijantu frekventne modulacije poznatu pod skraćenicom GFSK (*Gaussian Frequency Shift*).
- Neka je f_0 frekvencija nosećeg signala, tj. centralna frekvencija jednog od 40 kanala na koji je predajnik podešen.
- **1M PHY** (bit-interval traje $1us$ ($1\ Mbps$) – podrazumevana brzina, podržana u svim BLE verzijama (BLE 4x i 5x)):
  - ’0’: $f_0 - 185\ kHz$
  - ’1’: $f_0 + 185\ kHz$
- **2M PHY** (kod BLE 5.x, postoji mogućnost izbora između 1 i $2\ Mbps$.):
  - ’0’: $f_0 - 370\ kHz$
  - ’1’: $f_0 + 370\ kHz$
- Takođe, u BLE 5 uveden je još jedan način modulacije, ***Coded PHY***, koja omogućava veći domet komunikacije.

Fizički sloj – modulacija

- 1M PHY vs 2M PHY
  - Za oglašavanje se uvek koristi brzina prenosa $1\ Mbps$
  - Prelazak na $2\ Mbps$ se dešava kao rezultat pregovaranja između uređaja tokom uspostavljanja konekcije
  - 2M PHY – dva puta veća brzina prenosa => duplo kraće trajanje transmisija => manji utrošak energije i mogućnost istovremenog rada više uređaja
  - Međutim, domet 2M PHY je manji (oko 0.8 dometa 1M PHY)

	1M PHY	2M PHY	Coded PHY S=2	Coded PHY S=8
Symbol rate	$1\ Msps$	$2\ Msps$	$1\ Msps$	$1\ Msps$
Data rate	$1\ Mbps$	$2\ Mbps$	$500\ kbps$	$125\ kbps$
Error Correction	None	None	FEC	FEC
Range Multiplier	1	~ 0.8	~ 2	~ 4

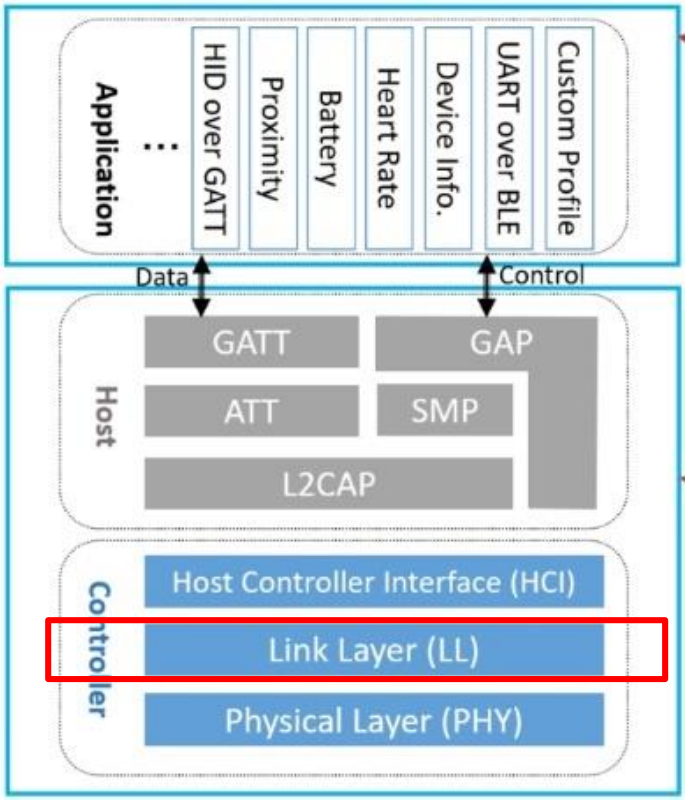
Fizički sloj – modulacija

- *Coded PHY*
  - Samo u BLE 5.0 i novijim verzijama.
  - Radio domet veći i do četiri puta u odnosu na 1M PHY.
  - Veći domet se postiže primenom tehnike *Forward Error Correction* (FEC) - ne samo detekcija nego i korekcija grešaka na prijemu.
  - FEC zahteva značajnu redundansa u podacima koji se šalju.
  - 1 bit informacije se kodira sa dva simbola (šema kodiranja $S = 2$), tj. dve promene frekvencije nosećeg signala, ili sa osam simbola ($S = 8$).
  - Međutim, brzina prenosa podataka je manja i iznosi $500\ kpbs$ (S=2), ili $125\ kbps$ (S=8).
  - Manja brzina prenosa => veći utrošak energije za predaju/prijem.

	1M PHY	2M PHY	Coded PHY S=2	Coded PHY S=8
Symbol rate	$1\ Msps$	$2\ Msps$	$1\ Msps$	$1\ Msps$
Data rate	$1\ Mbps$	$2\ Mbps$	$500\ kbps$	$125\ kbps$
Error Correction	None	None	FEC	FEC
Range Multiplier	1	~ 0.8	~ 2	~ 4

Sloj veze (*Link Layer - LL*)

- Neposredno upravlja RF transiverom
- Adresiranje uređaja
- Pakovanje i raspakovanje paketa
- Reguliše uloge uređaja i stanja linka
- Sprovodi procedure skeniranja i oglašavanja
- Uspostavljanje i održavanje konekcije

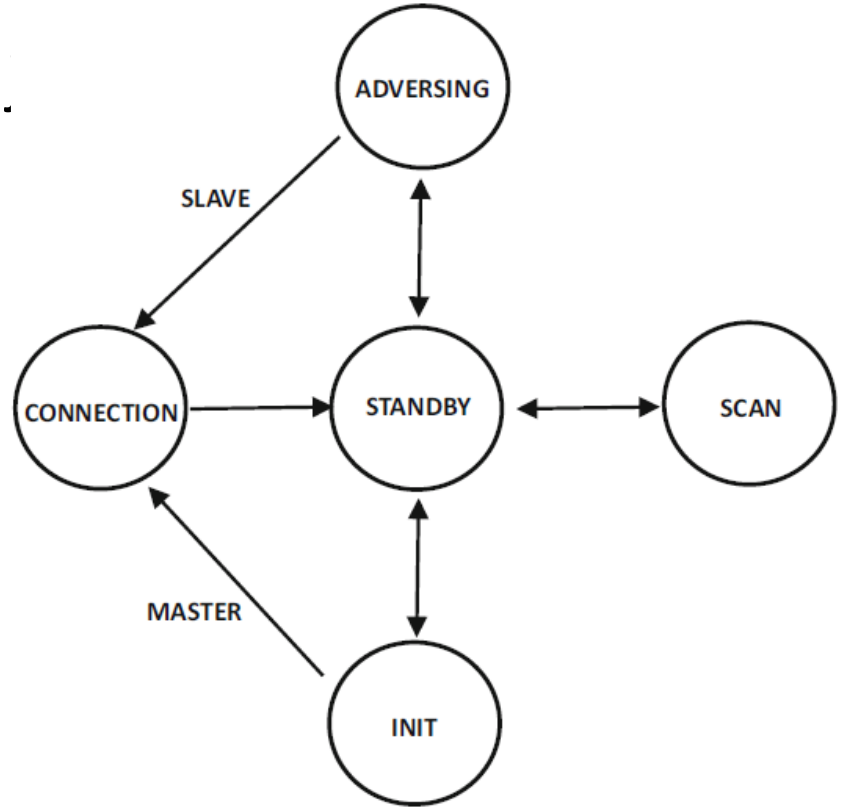


Sloj veze (*Link Layer - LL*) - Uloge uređaja -

- Nivo sloja veze (LL) uvodi sledeće uloge uređaja
  - *Oglašivač* (*Advertiser*) – uređaj koji emituje pakete za oglašavanje
  - *Skener* (*Scanner*) – uređaj koji osluškuje kanale za oglašavanje u očekivanju paketa za oglašavanje
  - *Master* (*Master*) – uređaj koji inicira uspostavljanje konekcije sa slejvom i upravlja uspostavljenom konekcijom
  - *Slejv* (*Slave*) – uređaj koji prihvata zahtev za uspostavljanje konekcije sa masterom i sledi tajming uspostavljene konekciju.
- Izbor LL uloge uređaja je pod kontrolom viših slojeva protokol steka.

Sloj veze (*Link Layer - LL*)
- Stanja uređaja -

- *Standby* - pripravno stanje: podrazumevano stanje u kome RF primopredajnik isključen
- *Advertising:* uređaj je u ulozi oglašivača
- *Scanning*: uređaj je u ulozi skenera
- *Initiating:* uspostavljanje konekcije sa izabranim oglašivačem
- *Connected* (povezano stanje): stanje uspostavljene konekcije



Sloj veze (*Link Layer - LL*)
- Formati paketa -

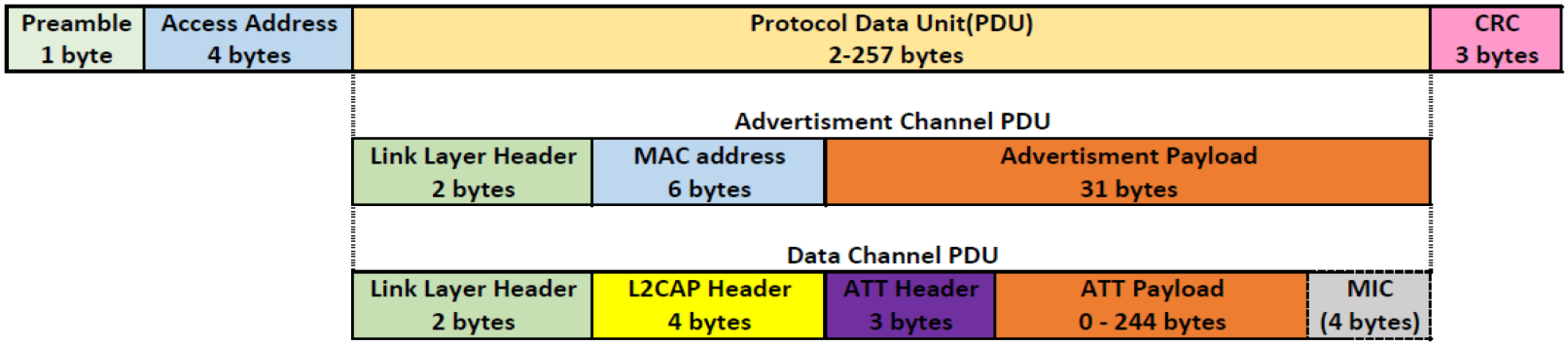
- ***Preamble*** (Preambula):
  - Dužine 1 bajta (za 1M PHY) ili 2 bajta (2M PHY).
  - Niz naizmeničnih 0 i 1 (npr. 01010101, ili 10101010_10101010)
  - Prvi bit u preambuli mora biti podudaran sa prvim bitom polja *Access_Address*.
  - Koristi se za „treniranje“ prijemnika (frekventna i fazna sinhronizacija sa prijemnim signalom i podešava pojačanje ulaznog pojačavača - radi pouzdanog dekodiranja sadržaj preostalog dela paketa)
- ***Access_Address*** (Adresa pristupa):
  - 4-bajtno polje
  - Ovo nije adresa uređaja, već identifikuje oglašavanje ili konkretnu konekciju.
  - Adresa pristupa svih paketa za oglašavanje je fiksna, oblika $0x8E89BED6$.
  - Svaka konekcija između bilo koja dva uređaja ima svoju posebnu adresu pristupa, koju generiše master prilikom uspostavljanja konekcije se slejvom, a zatim se koristi u svim paketima koji se razmenjuju tokom konekcije.
  - Generisana adresa je slučajna
  - Na strani prijema, adresa pristupa se koristi za filtriranje paketa - sloj veze odbacuje svaki primljeni paket sa adresom pristupa koju prijemnik trenutno ne očekuje.

Korisni podaci paketa

Preamble 1 byte	Access Address 4 bytes	Protocol Data Unit(PDU) 2-257 bytes	CRC 3 bytes

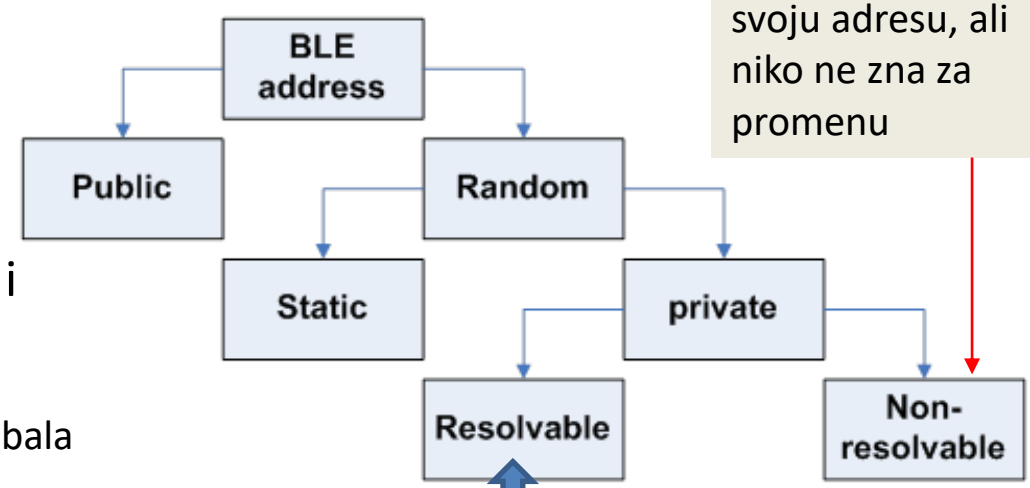
Sloj veze (*Link Layer - LL*)
- Formati paketa -

- ***PDU*** (korisni podaci paketa):
  - Podaci koji potiči iz slojeva višeg nivoa,
  - Format zavisi od toga da li se paket prenosi na kanalu za oglašavanje ili na kanalu za prenos podatka
  - *Header*: 2-bajtno zaglavlje - ukazuje na tip podataka koji slede.
  - *Payload*:
    - Maksimalno 37 bajta, za slučaj paketa za oglašavanje,
    - Maksimalno 251 bajta u paketima za podatke.
  - 4-bajtno polje MIC (*Message Integrity Check*) je opciono i postoji samo onda kada su podaci u delu *Payload* šifrovani.
- **CRC**:
  - 3-bajta
  - $x^{10} + x^9 + x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$



Sloj veze (*Link Layer - LL*)
- BLE adrese uređaja -

- 48-bitni (6 bajta) identifikator BLE uređaja (slično MAC adresi kod Ethernet ili WiFi). Koristi se za jedinstvenu (jednoznačnu) identifikaciju uređaja u BLE mreži.
- Dva tipa BLE adresa uređaja: javne i slučajne
- **Javne adrese** (*Public*):
  - Registrovana kod organizacije IEEE (globala jedinstvenost).
  - Čuva se u permanentnoj memoriji uređaja i ne menja se tokom životnog veka uređaja.
- **Slučajne adrese** (*Random*):
  - Generiše je sam uređaj
  - *Statičke*: Jedanput se generiše i čuva u permanentnoj memoriji (zamena za javnu adresu).
  - *Privatne*: Generiše se pri svakom ponovnom uključenju uređaja, ili se menja, s vremena na vreme, tokom rada uređaja. Zaštita od neovlašćenog praćenja uređaja

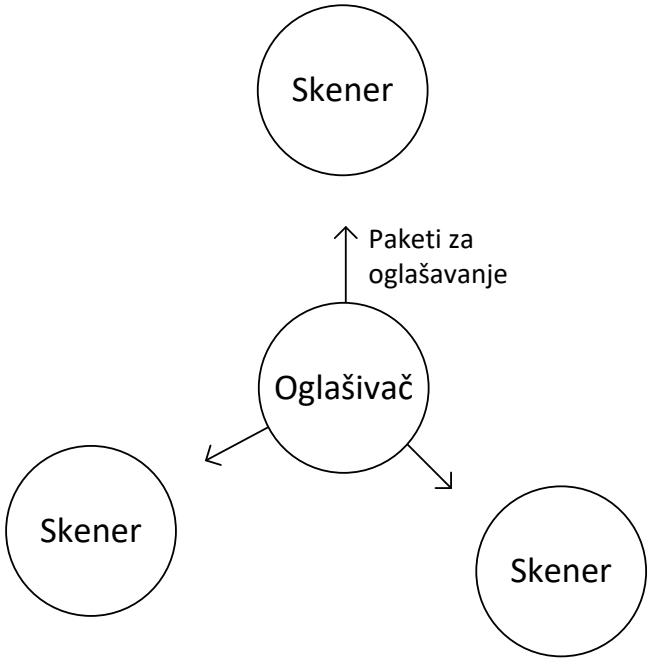


Uređaj promeni svoju adresu, ali niko ne zna za promenu

Uređaj X generiše svoju novu privatnu adresu na osnovu ključa (IRK - *Identity Resolving Key*) i slučajno generisanog broja.
Svaki drugi uređaj koji poseduje informaciju o IRK uređaja X može da transformiše svaku njegovu privatnu adresu u stvarnu i da na taj način bude siguran da komunicira sa uređajem X.
Za uređaje koji ne poseduju IRK uređaja X, efekat promene adrese je isti kao da uređaj X koristi nerazrešive privatne adrese.

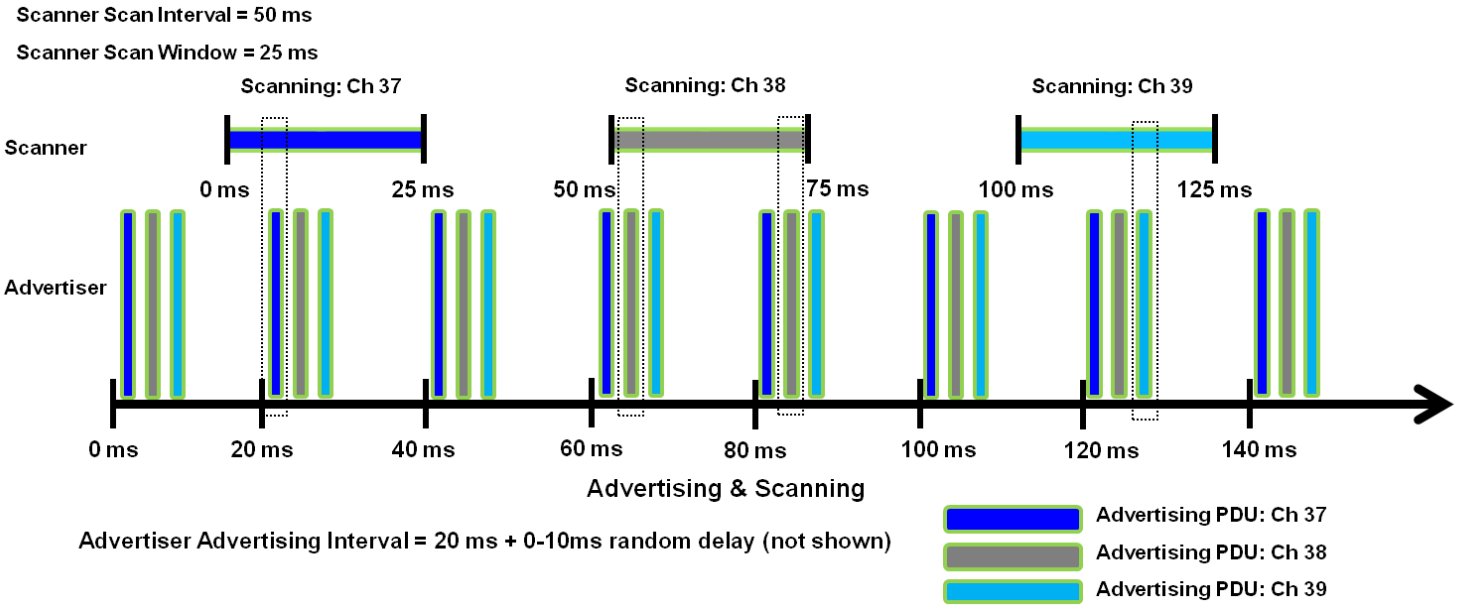
Sloj veze (*Link Layer - LL*) - Skeniranje i oglašavanje -

- BLE uređaj u ulozi oglašivača (u stanju *Advertising*), periodično šalje pakete za oglašavanje na kanalima za oglašavanje.
- Dve namena paketa za oglašavanje:
  - BLE uređaj može da koristi pakete za oglašavanje za distribuciju svojih podataka ka okolnim BLE uređajima bez potrebe za uspostavljanjem konekcije.
  - Slanjem paketa za oglašavanje, uređaj otkriva svoje prisustvo okolnim uređajima, koji, nakon toga mogu da iniciraju uspostavljanje konekcije.
- *Interval oglašavanja* (*Advertising Interval*): perioda slanja paketa za oglašavanje
  - Može se podešavati u opsegu od $20\ ms$ do $10.24\ s$.
  - Na svaki interval oglašavanja, oglašivač šalje uzastopno tri identična paketa za oglašavanje, po jedan na svakom od tri kanala za oglašavanje.



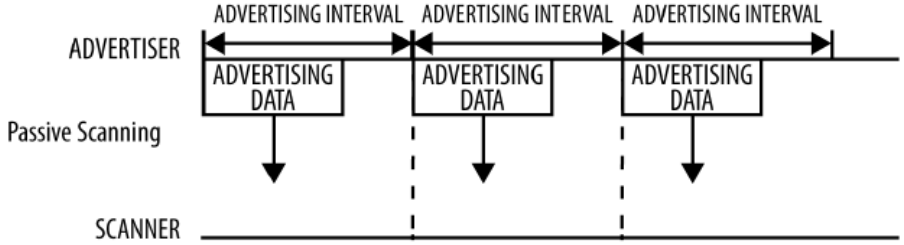
Sloj veze (*Link Layer - LL*)
- Skeniranje i oglašavanje -

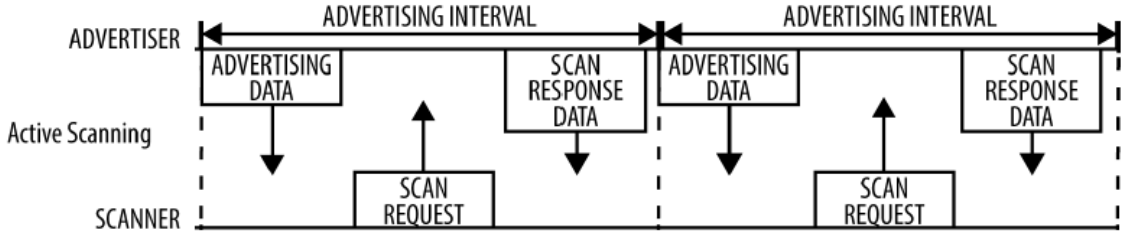
- Skener ne osluškuje neprekidno kanale za oglašavanje (radi uštede energije), što je regulisano parametrima:
  - *Prozor skeniranja* (*Scan Window*), koji definiše trajanje skeniranja i
  - *Interval skeniranja* (*Scan Interval*), koji definiše koliko često se skeniranje ponavlja.
- U svakom sledećem prozoru skeniranja, skener osluškuje različiti kanal za oglašavanje.
- Da bi se izbegao sinhronizam (oglašivač emituje paketa uvek kada skener nije na prijemu), oglašivač produžava svaki interval oglašavanja slučajnim dodatnim kašnjenjem (0- 10 ms)



Sloj veze (*Link Layer - LL*)
- Skeniranje i oglašavanje -

- Dva načina skeniranja: pasivno i aktivno
- *Pasivno skeniranja*:
  - Skener, jednostavno, osluškuje kanale za oglašavanje u očekivanju paketa za oglašavanje.
  - Oglašivač nema povratnu informaciju o tome da li je i kada neki skener primio emitovan paket za oglašavanje.
- *Aktivno skeniranje*:
  - Nakon prijema paketa za oglašavanje, skener šalje oglašivaču paket tipa *Scan Request*.
  - Kao odgovor na prijem *Scan Request* paketa, oglašivač šalje skeneru paket tipa *Scan Response* sa dodatnim podacima o oglašavanju (do 254 bajta)
  - Komunikacija je i dalje jednosmerna, jer ni u ovom slučaju skener nema mogućnost da u paketu *Scan Request* pošalje oglašivaču bilo kakve korisne podatke.





Sloj veze (*Link Layer - LL*)
- Skeniranje i oglašavanje -

- Tip paketa za oglašavanje odražava spremnost oglašivača da uspostavi specifičan način interakcije sa skenerom:
  - Da li je uređaj dostupan za konektovanje (ili nije)
  - Da li je uređaj dopušta konektovanje bilo kom ili tačno određenom skeneru
  - Da li uređaj podržava *scan request*

Advertising Channel PDU

Header	Payload
2 Bytes	0-37 Bytes

Advertising Packet Types

Oglašivač je spreman da prihvati konekciju od bilo kog skenera

Oglašivač je spreman da prihvati konekciju od tačno određenog skenera

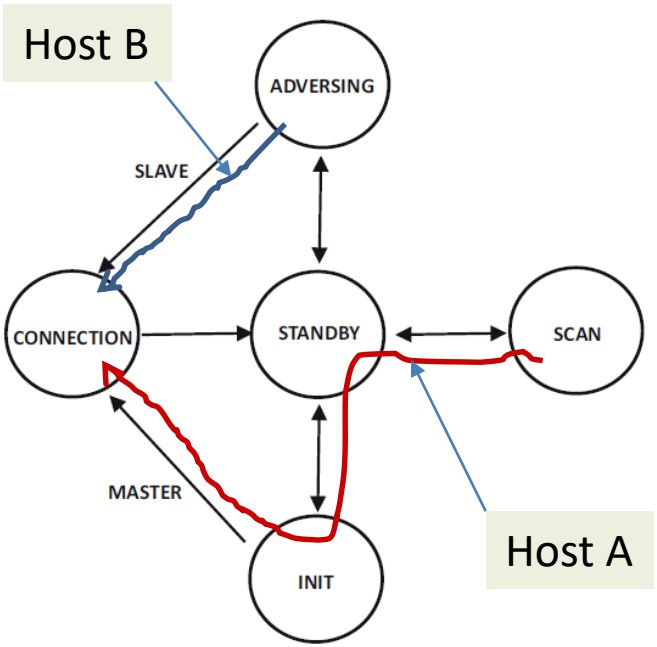
Oglašivač nije dostupan za konektovanje

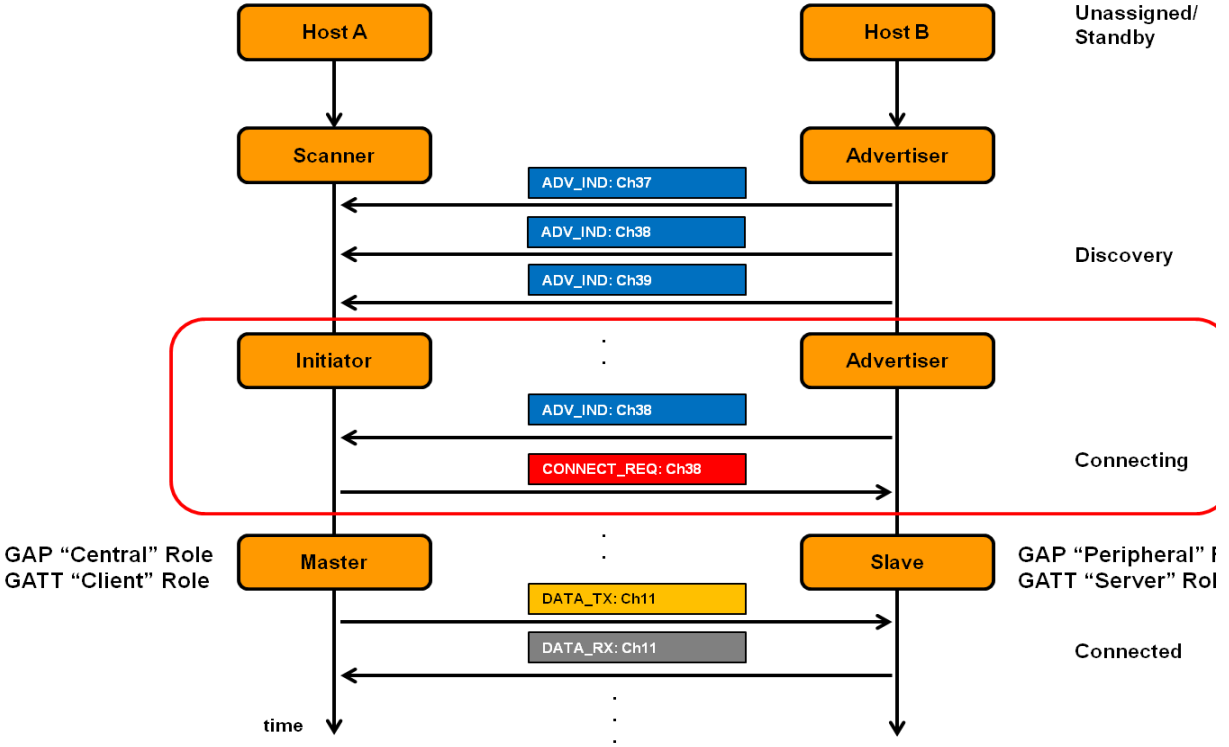
Advertising Packet Type	Description
ADV_IND	Connectable Undirected Advertising
ADV_DIRECT_IND	Connectable Directed Advertising
ADV_NONCONN_IND	Non-connectable Undirected Advertising
ADV_SCAN_IND	Scannable Undirected Advertising

Oglašivač je dostupan za konektovanje (sa bilo kojim skenerom) i odgovara na *scan request*

Sloj veze (*Link Layer - LL*)
- Konekcija -

- Procedura uspostavljanja konekcije





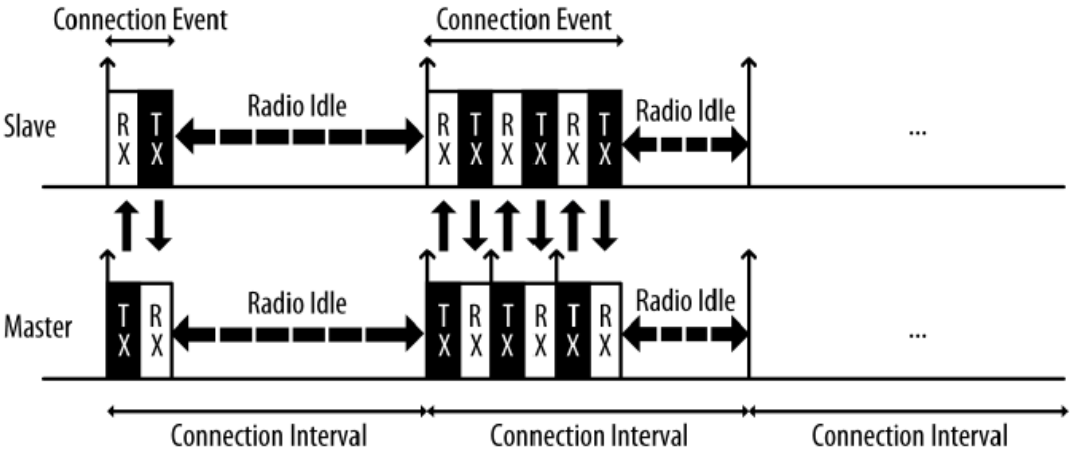
Sloj veze (*Link Layer - LL*) - Konekcija -

- BLE uređaj (*Host_A*) koji želi da uspostavi konekciju sa nekim drugim uređajem mora biti prvo postavljen u režim skeniranja, kako bi otkrio oglašivače koji su trenutno spremni za konektovanje.
- *Host A* može da filtrira primljene pakete za oglašavanje (prema BLE adresi oglašivača ili na osnovu drugih podataka sadržanih u ovim paketima).
- Kada detektuje i izabere odgovarajućeg oglašivača (*Host B*), *Host A* prelazi u stanje *Initiating*.
- U stanju *Initiating Host A* čeka da ponovo primi paket za oglašavanje od uređaja *Host B*
- Zatim *Host A* šalje ovom oglašivaču konekcioni zahtev (paket tipa *CONNECT_REQ*).
- *CONNECT_REQ* sadrži informaciju o hop-inkrementu koji će koristiti oba uređaja prilikom frekventnog skakanja, kao i informaciju o vrednostima nekoliko drugih parametara za regulisanje tajminga i toka konekcije.
- Konekcija između uređaja *Host A* i *Host B* je uspostavljena => *Host A* preuzima ulogu **mastera**, a *Host B* ulogu **slejva**.
- Pre prelaska u fazu prenosa podataka, dva uređaja razmenjuju informacije o BLE verziji koju podržavaju i drugim podržanim mogućnostima.

Sloj veze (*Link Layer - LL*) - Konekcija -

- Za komunikaciju tokom *connection event*-a važe sledeća pravila:
  - *Connection event*-i se dešavaju periodično i neprekidno sve dok se konekcija ne zatvori ili prekine.
  - Svaki *connection event* sadrži bar jedan paket, koji šalje master.
  - Slejv ima obavezu da na svaki primljeni paket odgovori slanjem svog paketa masteru, čak iako nema podataka za slanje (u tom slučaju, poslaće „prazan“ paket, tj. paket bez korisnih podataka).
  - Paket koji slejv šalje masteru je ujedno i potvrda prijema paketa koji je master prethodno poslao slejvu.
  - Ukoliko odgovor slejva izostane, master prekida slanje svojih paketa – slanje nastavlja u sledećem *connection event*-u.

Connection event i *connection interval*



Sloj veze (*Link Layer - LL*) - Konekcija -

Maser i slejv, tokom uspostavljanja konekcije, moraju usaglasiti nekoliko parametara:

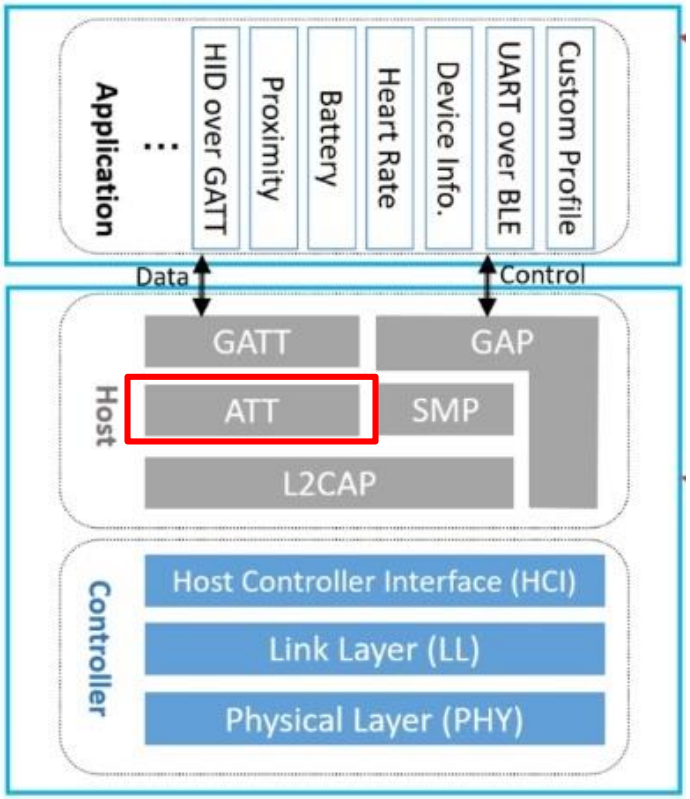
- *Connection Interval*
  - U opsegu između $7.5\ ms$ i $4\ s$ u inkrementima od $1.25\ ms$.
  - Trajanje *connection interval*-a podešava master i vrednost ovog parametra je sadržana u paketu *CONNECT_IND*.
- *Slave Latency*
  - Definiše broj *connection event*-a koje slave može da preskoči („prespava“), a da to ne izazove prekid konekcije (radi uštede energije)
  - Na primer, ako je vrednost ovog parametra 3, slejv može da preskoči tri uzastopna *connection event*-a, ali se onda mora „probuditi“ u četvrtom, kako bi primio i poslao paket. U suprotnom, master će prekinuti konekciju.
  - S druge strane, master se budi u svakom *connection event*-u i šalje svoj paket. Ako ne primi odziv (jer slejv preskače taj *connection event*), master će odustati od daljeg slanja i pokušaće ponovo u sledećem *connection event*-u.

Sloj veze (*Link Layer - LL*) - Konekcija -

- *Supervision Timeout*:
  - Koristi se za detekciju prekinute konekcije.
  - Uređaj (master ili slejv) detektuje prekid konekcije ukoliko po isteku vremena *supervision timeout* nakon prijema paketa ne primi sledeći paket.
  - U opsegu $100\ ms$ do $32\ s$ u inkrementima od $10\ ms$.
  - Mora biti usaglašen sa parametrima *slave latency* i *connection interval* i to na sledeći način:
    - $Supervision\ Timeout > (1 + Slave\ Latency) \times ConnectionInterval \times 2$
- *Data Length Extension*
  - Binarni parametar, koji se može uključiti ili isključiti.
  - Ukoliko je uključen, omogućava da se u paketu može preneti veća količina podataka, do maksimalno 251 bajt.
  - Kada je isključen, paketi podataka mogu prenositi najviše po 27 bajta.
  - Podrška za pakete podataka veće dužine uvedena u je BLE verziji 4.2. Verzije 4.0 i 4.1 podržavaju samo prenos kratkih paketa, do 27 bajta u delu za podatke.

ATT (*Attribute Protocol*)

- Klijent/server protokol za razmenu podataka između BLE uređaja.
- Kako server izlaže (predstavlja, čini dostupnim) svoje podatke klijentu i kako su ti podaci strukturirani (formatirani)



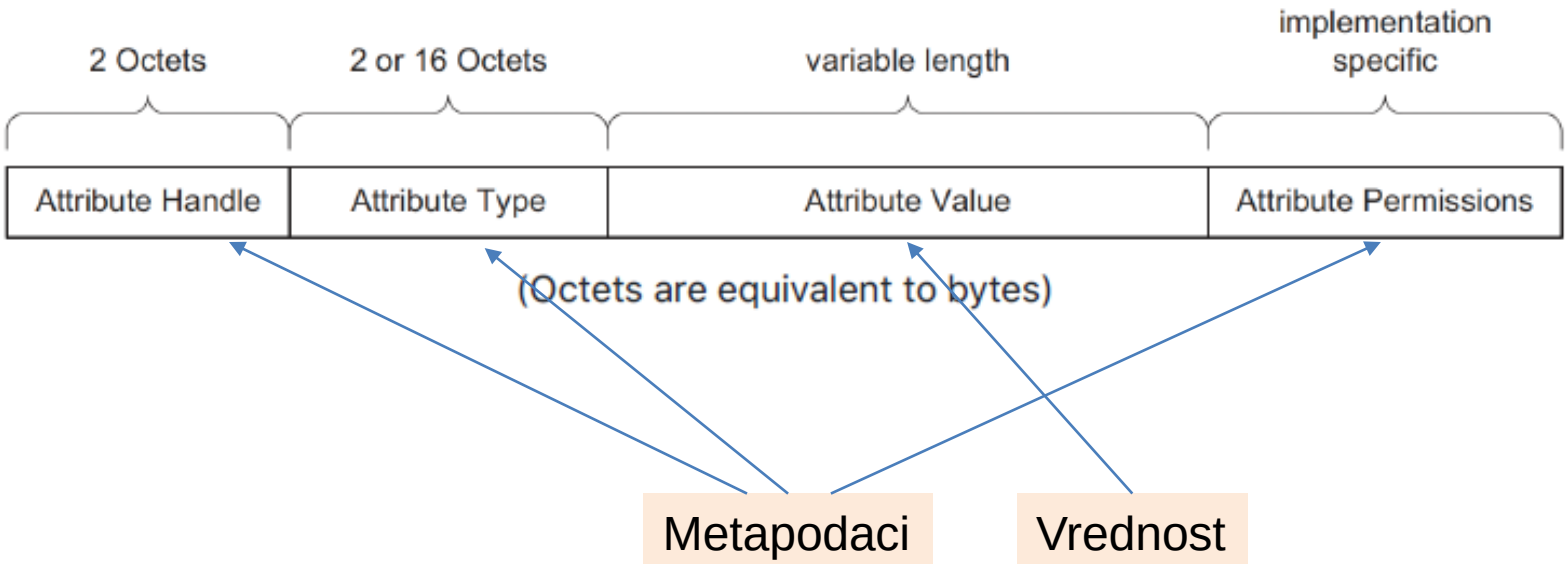
ATT (*Attribute Protocol*)

- U kontekstu protokola ATT, svaki BLE uređaj može biti klijent, server ili oba, bez obzira na to da li u tekućoj konekciji igra ulogu mastera ili slejva.
  - *Server:*
    - Uređaj koji *izlaže* (*exposes*) neke svoje podatka tako da su oni dostupni drugim uređajima (klijentima).
    - Prihvata zahteve za pristup izloženim podacima od klijenta i šalje klijentima odzive, notifikacije i indikacije.
    - Klijent može da pristupa podacima servera radi čitanja ili upisa.
    - Notifikacije i indikacije su obaveštenja o promeni vrednosti podataka koje server šalje klijentu.
  - *Klijent:*
    - Uređaj koji je u vezi sa serverom radi pristupa njegovim izloženim podacima.
    - Šalje zahteve za pristup podacima i prima odzive, notifikacije i indikacije.

ATT (*Attribute Protocol*)

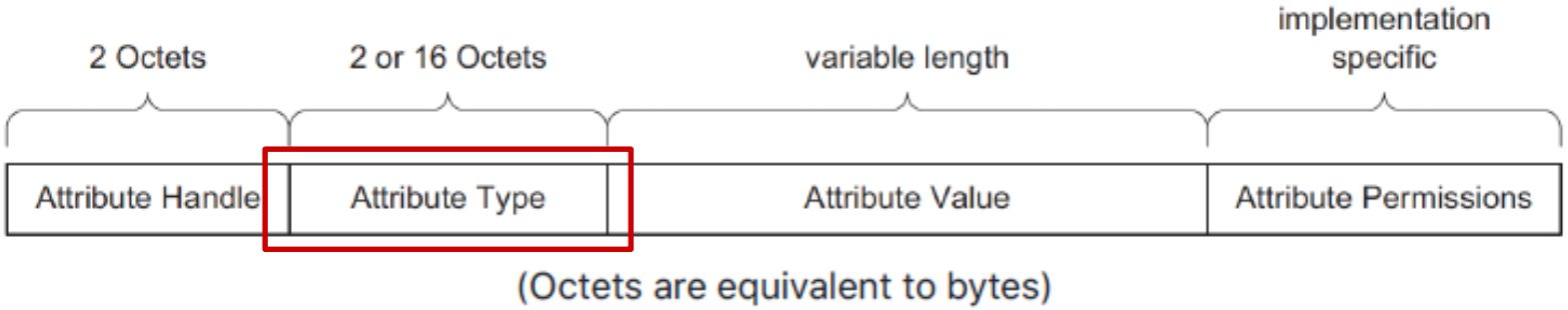
- Atribut je opšti pojam koji se odnosi na podatak bilo kog tipa koji je izložen od strane servera.
- Atribut nije samo vrednost konkretnog podatka, već obuhvata i dodatne informacije o tipu i načinu pristupa podatku (tzv. meta-podatke).

Logička reprezentacija atributa



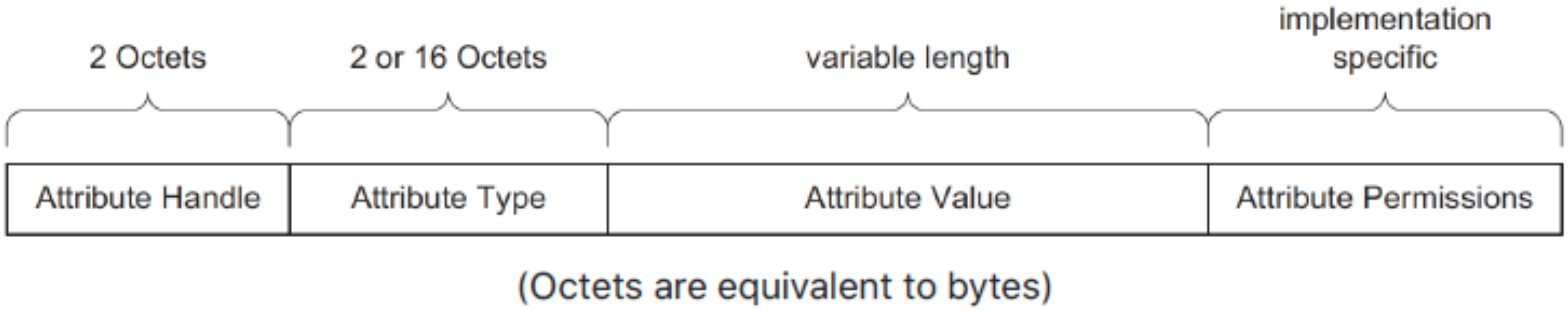
ATT (*Attribute Protocol*)

- *Attribute type* (*Universally Unique Identifier - UUID*):
  - 16-bitni ili 128-bitni univerzalno-jedinstveni identifikator koji specificira tip i prirodu podatka sadržanog u atributu.
  - Pojedini tipovi atributa su definisani u samom BLE standardu i njihova dužina je 16 bita.
  - Npr. u BLE standardu za tip podataka „temperatura“ koristi se UUID vrednosti $0x2A1C$ (u polju *Attribute Value* tog atributa sadržana izmerena temperatura).
  - Projektant može da uvodi i nove UUID-ove, za tipove podataka koji nisu obuhvaćeni standardom. Međutim, dužina takvih, tzv. korisničkih UUID-ova je 128 bita.



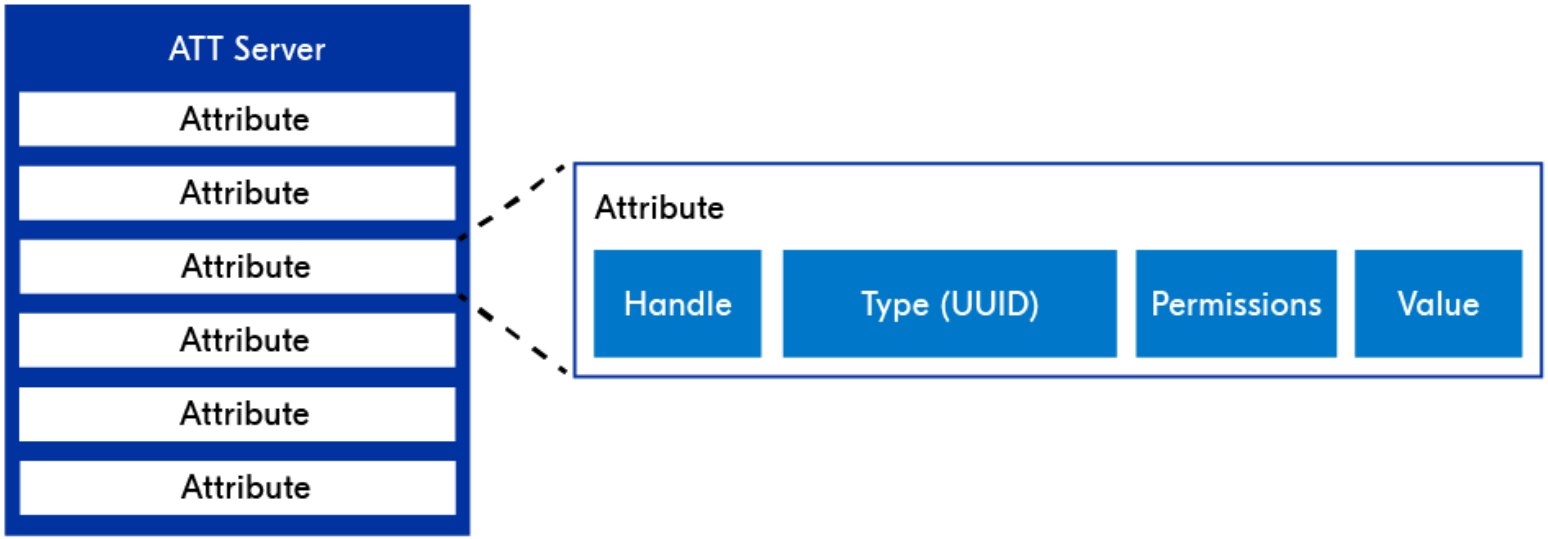
ATT (*Attribute Protocol*)

- *Attribute Handle:*
  - 16-bitna vrednost (u opsegu $0x0001 - 0xFFFF$), koju server pridružuje svakom svom atributu - poput adrese atributa u memoriji servera.
  - Svaki atribut u okviru servera mora imati svoj jedinstveni *handle*.
  - Klijent navodi *handle* u svojim zahtevima da bi zatražio pristup određenom atributa.
- *Attribute Permissions:*
  - Niz bita koji definišu pravo pristupa atributu
  - Da li je dozvoljeno atributu pristupati radi čitanja ili upisa
  - Da li su dopuštene notifikacije i indikacije,
  - Koji nivo sigurnosti se zahteva prilikom pristupa atributu.
- *Attribute Value:*
  - Oblast atributa u kojoj je sadržana vrednost podatka koji je izložen atributom.



ATT (*Attribute Protocol*)

- Svi atributi su obuhvaćeni tabelom atributa.



ATT (*Attribute Protocol*)

- *Čitanje atributa*:
  - Klijent koji želi da pročita vrednost nekog atributa na strani servera, šalje zahtev za čitanje serveru. Ovaj zahtev sadrži *handle* atributa.
  - Po prijemu zahteva, server proverava pravo pristupa atributu, a zatim, ukoliko je čitanje traženog atributa dozvoljeno, odgovara klijentu slanjem vrednosti atributa.
  - Klijentu parsira (tumači) dobijenu vrednost u skladu sa tipom podatka koji je sadržan u tom atributu.
- *Upis atributa*:
  - Klijent šalje serveru zahtev za upis koji sadrži *handle* i novu vrednost atributa.
  - Obaveza je klijenta da vrednost koju šalje uskladi sa tipom podataka konkretnog atributa. U suprotnom, server će odbiti takav zahtev.
- Klijent ne sme da pošalje sledeći zahtev sve dok ne primi odgovor na prethodno poslati zahtev.

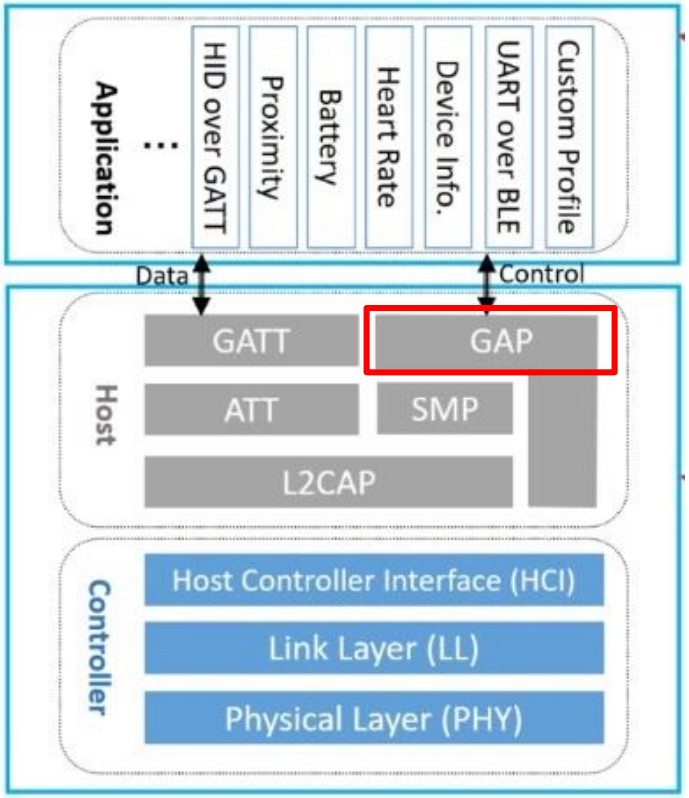
ATT (*Attribute Protocol*)

Dodatne operacije protokola ATT (skraćeni spisak):

- *Find Information*: Omogućava klijentu da dobije informacije o atributima servera (spisak svih atributa servera u određenom opsegu *handle* vrednosti, ili da dobije *handle* vrednosti atributa datog UUID-a.)
- *Read by Type Request/Response:* Čitanje vrednosti jednog ili više atributa na osnovu zadatog UUID.
- *Server Initiated*. U ovu kategoriju spadaju operacije koje (asinhrono) inicira sam server, tj. bez prethodno poslatog zahteva od strane klijenta.
- *Handle Value Indication/Conformation*. Omogućava da server obavesti klijenta da se vrednost određenog atributa promenila. Server šalje klijentu novu vrednost i *handle* promenjenog atributa. Od klijenta se očekuje da potvrdi prijem.
- *Handle Value Notification*. Isto kao prethodno ali bez potvrde klijenta..

GAP (*Advertising and Connections Profile*)

- Omogućava BLE uređajima da otkrivaju (pronalaze) jedni druge, razmenjuju podatke, uspostavljaju sigurnu konekciju i izvršavaju brojne druge operacije na standardni i univerzalni način.
- GAP se oslanja na sloj veze i dodatno, kroz nove uloge uređaja, režime rada i procedure, proširuje njegovu funkcionalnost.



GAP

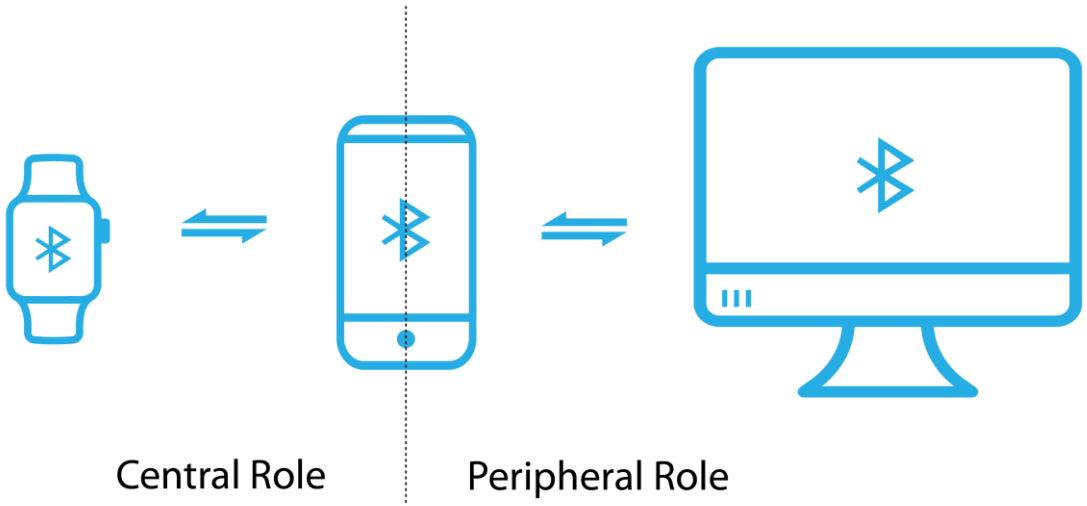
- Obuhvata sledeće aspekte interakcije između BLE uređaja:
  - *Roles* (*Uloge*).
    - Svaki uređaj može da radi u jednoj ili više uloga u isto vreme.
    - Uloga uređaja (*broadcaster, observer, central* i *peripheral*) po pravilu je određena njegovim tipom i namenom i ne menja se tokom životnog veka uređaja.
  - *Modes* (*Režimi, Načini rada*).
    - Stanje u koje uređaj prelazi na izvesno vreme kako bi ostvario određeni cilj ili omogućio drugom uređaju da obavi određenu aktivnost.
    - Promena načina rada može biti inicirana od strane korisnika, putem korisničkog interfejsa ili automatski, po potrebi.
  - *Procedures* (*Procedure*).
    - Niz akcija (obično sekvenca aktivnosti na nivou sloja veze koja omogućava uređaju da ostvari neki cilj.
    - Procedura je tipično pridružena određenom načinu rada uređaja na drugom kraju konekcije.
  - *Security* (*Sigurnost*).
    - GAP koristi usluge *Security Manager* sloja radi definisanja sigurnosnih načina rada i procedura koje omogućavaju povezanim uređajima da prvo uspostave željeni nivo sigurnosti, a zatim i da sprovede odgovarajuće sigurnosne procedure.

GAP
- Uloge -

- *Broadcaster* (*Emiter*):
  - Za primene gde postoji potreba samo za periodičnim emitovanjem podataka u formi paketa za oglašavanje.
  - Za implementaciju uloge emitera koristi se funkcija oglašavanja iz sloja veze.
- *Observer* (*Osmatrač*)
  - Za uređaje koje žele da prikupljaju podatke koje emituju emiteri.
  - Za implementaciju ove uloge koristi se funkcija skeniranja iz sloja veze.
- *Central* (*Centralni uređaj* ili *centrala*).
  - Odgovara masteru iz sloja veze.
  - Zadatak centralnog uređaja je da otkriva prisustvo drugih uređaja i uspostavlja konekcije s njima.
  - Ova ulogu obično imaju uređaji poput mobilnih telefona ili tablet računara, koji poseduju CPU visokih performansi i obilje memorijskih resursa, što omogućava uspostavljanje konekcija sa više BLE uređaja u isto vreme.
- *Peripheral* (*Periferni uređaj* ili *periferija*).
  - Odgovara slejvu iz sloja veze.
  - Uređaj u ulozi periferije koristi pakete za oglašavanje kako bi omogućio centrali da ga pronađe i nakon toga uspostavi konekciju s njim.
  - Uloga periferije je po pravilu dodeljena jednostavnim i jeftinim BLE uređajima, poput senzora.

GAP
- Uloge -

- BLE uređaj može raditi u više uloga u isto vreme:



GAP
- Načini rada i procedure -

Mode	Applicable Role(s)	Applicable Peer Procedure(s)
Broadcast	Broadcaster	Observation
Non-discoverable	Peripheral	N/A
Limited discoverable	Peripheral	Limited and General discovery
General discoverable	Peripheral	General discovery
Non-connectable	Peripheral, Broadcaster and Observer	N/A
Any connectable	Peripheral	Any connection establishment

Koje uloge su dopuštene u različitim načinima rada

Šta treba da radi povezani uređaj (koju proceduru da izvršava)

GAP
- Emitovanje i osmatranje -

- Režim rada **Broadcast** i proceduri **Observation**.
- Omogućava **jednosmerni prenos podataka** – od emitera ka jednom ili više osmatrača.
  - Emiter *nema povratnu informaciju* – ne zna da li je iko primio njegove podatke.
  - Osmatrač takođe *nema garanciju* da će uopšte primiti nešto – on samo osluškuje.
- Koriste se paketi za oglašavanje uz mogućnost proširenja *scan request/response* mehanizmom
- Emiter šalje podatke *otvoreno* – svi u okolini mogu da ih prime.
- Ovo se razlikuje od ponašanja **periferije**, koja se oglašava samo dok nije povezana. Kada konekcija bude uspostavljena – prestaje sa oglašavanjem i **postaje nevidljiva** za druge centrale.

GAP
- Otkrivanje uređaja (*Discovery*) -

- Kako periferija oglašava svoje prisustvo drugim uređajima i šta ti drugi uređaji (centrale) mogu ili treba da urade sa informacijom iz paketa za oglašavanje.
- Način otkrivanja je određen sadržajem 1-bajtnog polja u paketu za oglašavanje.
- Postoje tri režima otkrivanja:
  - *Non-discoverable mode*:
    - Periferija u ovom režimu ne može biti otkrivena od strane centralnih uređaja.
    - Periferija šalje pakete za oglašavanje, ali je centralnim uređajima onemogućeno da nakon prijema paketa za oglašavanje periferiju uvrste u spisak otkrivenih uređaja ili da na bilo koji način konstatuju njeno prisustvo.
    - Periferijski uređaj, po pravilu, prelazi u režim *Non-discoverable* nakon što je konektovan.

GAP
- Otkrivanje uređaja (*Discovery*) -

- *Limited discoverability mode*.
  - Ovaj način otkrivanja omogućava periferiji da bude:
    - Dostupna za otkrivanje samo u ograničenom periodu vremena (npr. $30\ s$, $1\ min$ i sl.),
    - Tretirana sa višim prioritetom u odnosu na druge periferije kad bude otkrivena od strane centralnog uređaja, koji sprovodi proceduru *limited discovery* .
  - Koristi se slučaju rekonekcije, odnosno pokušaja ponovnog uspostavljanja prekinute konekcije.
    - Kada detektuje gubitak konekcije, periferije prelazi u „*Limited discoverability mode*“ u trajanju od recimo $30\ s$ i pri tom emituje pakete za oglašavanje tipa ADV_DIRECT_IND (videti sloj veze) sa BLE adresom centrale s kojom je bila u vezi.
    - S druge strane, centrala, nakon uočenog gubitka konekcije, pokreće proceduru za *limited discovery*.

GAP
- Otkrivanje uređaja (*Discovery*) -

- *General discoverability mode*.
  - Omogućava uređaju da bude dostupan za otkrivanje za sve vreme dok je to potrebno.
  - U ovom režimu, periferni uređaj emituje pakete za oglašavanje tipa ADV_IND iskazujući pri tom svoju „želju“ da bude otkriven i konektovan.
  - Da bi otkrila periferije u režimu *General discoverability mode*, centrala mora da izvršava istoimenu proceduru.

- Procedure za otkrivanje (*Discovery Procedures*) – odnosni se na centralu
  - *Limited discovery procedure*: prihvata samo paket sa postavljenim flegom *Limited Discoverable*
  - *General discovery procedure*. Centrali uređaj analizira svaki primljeni paket za oglašavanje i ukoliko je u paketu postavljen jedan od flegova *Limited Discoverable* ili *General Discoverable*, prijavljuje aplikaciji novo-otkriveni uređaj.

Uspostavljanje konekcije (*Connection Establishment*)

Režimi uspostavljanja konekcije (na strani periferije)

- *Non-connectable mode*
  - Periferni uređaj nije raspoloživ za konektovanje
  - Uređaj ili ne šalje pakete za oglašavanje ili šalje pakete za oglašavanje tipa ADV_NONCONN_IND ili ADV_SCAN_IND.
- *Direct connectable mode*
  - Periferni uređaj je raspoloživ za konektovanje ali samo sa konkretnom centralom
  - Uređaj šalje pakete za oglašavanje tipa ADV_DIRECT_IND (direktno oglašavanje)
  - Koristi se za brzu rekonekciju
- *Undirected connectable mode*
  - Standardni režim uspostavljanja konekcije
  - Periferni uređaj je dostupan za konektovanje sa bilo kojom centralom
  - Uređaj šalje pakete za oglašavanje tipa ADV_IND

Uspostavljanje konekcije (*Connection Establishment*)

Procedure za uspostavljanje konekcije (na strani centrale)

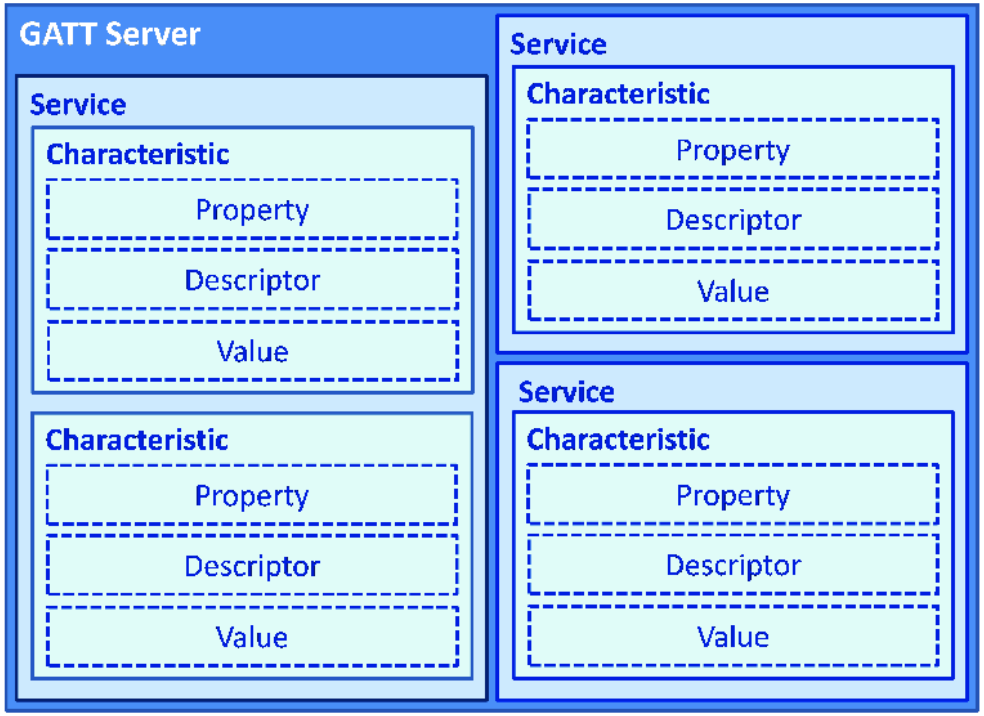
- *Auto connection establishment procedure*
  - Centrala otkriva periferne uređaje i automatski se konektuje sa prvo-otkrivenim uređajem (ne postoji kriterijum izbora periferije)
- *General connection establishment procedure*.
  - Za konektovanje sa novo-otkrivenom, do tog trenutka nepoznatom periferijom.
  - Centrala formira listu otkrivenih periferija (tzv. „bela lista“) i prepušta korisniku ili aplikaciji da izabere periferiju (ili periferije) za konektovanje.
  - Centrala konektuje izabranu periferiju korišćenjem *Direct connection establishment procedure.*
- *Selective connection establishment procedure*
  - Identično *General connection establishment procedure*, ali sa razlikom da host filtrira primljene pakete za oglašavanje koristeći belu listu od ranije poznatih periferija.
  - Koristi se u slučajevima kada korisnik treba da izabere za konektovanje jedan od ranije poznatih perifernih uređaja.
- *Direct connection establishment procedure*.
  - Uspostavljanje konekcije sa konkretnim perifernim uređajem.
  - Host izdaje komandu kontroleru da inicira konekciju sa periferijom zadate BLE adrese, čak i bez informacije o tome da li je ta periferija uopšte prisutna.

GATT

- GATT (*Generic Attribute Profile*) je profil koji specificira strukturu profilnih i korisničkih podataka, kako i procedure za razmenih tih podataka između konektovanih BLE uređaja.
- Nadogradnja ATT: definiše organizaciju tabele atributa i uvodi koncepte: servis i karakteristika.
- Uvodi uloge:
  - *GATT klijent*: šalje zahteve za pristup podacima (atributima) GATT servera i prima odgovore od servera.
  - *GATT server*: prima zahteve od GATT klijenta i šalje odgovore klijentu. Obezbeđuje pristup GATT klijentu svim svojim izloženim podacima koji su u vidu atributa organizovani u servise.

GATT

- Hijerarhija podataka:
  - Svi podaci (atributi) GATT servera su organizovani u:
  - Jedan ili više servisa
  - Svaki servis sadrži nula ili više karakteristika
  - Karakteristika se sastoji iz osobina, deskriptora i vrednosti

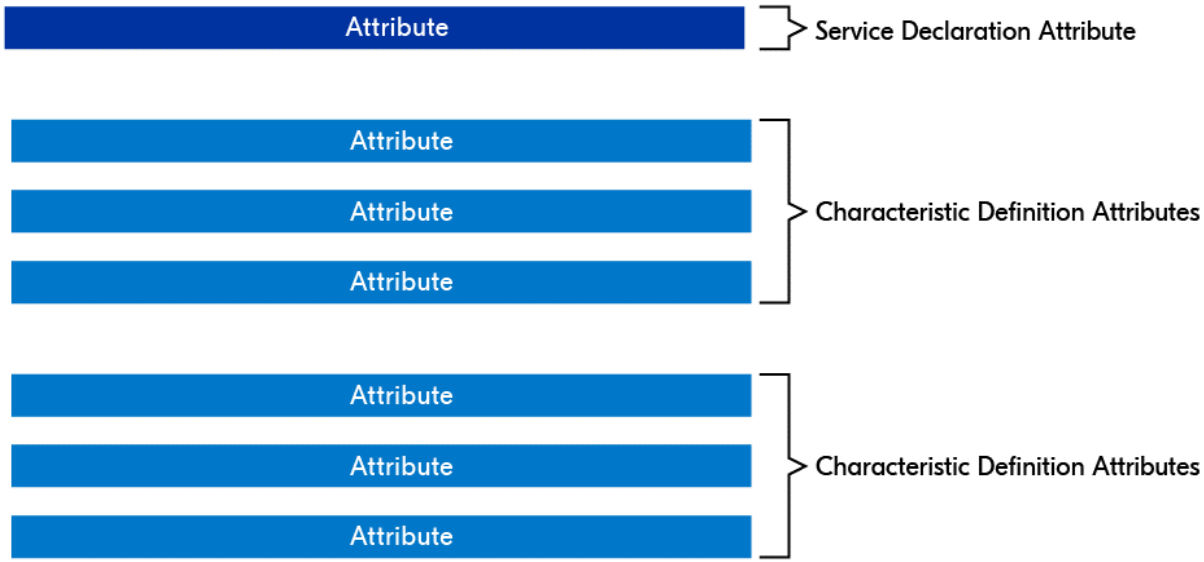


Servis (*Service*)

- GATT servis predstavlja logičku grupu karakteristika koje obavljaju srodne funkcije ili imaju zajednički cilj.
- Servis pruža neki specifični skup funkcionalnosti ili podataka koji se mogu čitati ili upisivati preko BLE konekcije.
- Primeri GATT servisa uključuju servise kao što su:
  - *Heart Rate Service* (servis za merenje otkucaja srca),
  - *Battery Service* (servis za stanje baterije), ili
  - *Custom Service* (prilagođeni servis koji zadovoljava specifične potrebe aplikacije).
  - ...
- Servis se identifikuje jedinstvenim UUID-om
- Servis može imati nula ili više karakteristika.

Servis (*Service*)

- Servis je zapravo niz uzastopnih atributa u tabeli atributa
- Prvi atribut servisa je atribut za deklaraciju servisa
- Zatim, slede karakteristike, gde svaka karakteristika sadrži najmanje dva atributa:



Servis (*Service*)

- Atribut za deklaraciju servisa:

Handle	Type	Permissions	Value	Value length
0xNNNN	$UUID_{primary_service}$ or $UUID_{secondary_service}$	Read Only	Service UUID	2, 4, or 16 bytes

Da li je reč o primarnom ili sekundarnom servisu:
$UUID_{primary_service} = 0x2800$
$UUID_{secondary_service} = 0x2801$

UUID servisa

Sekundarni servisi su uvek pridruženi nekom primarnom servisu.

Atribut za uključivanje (pridruživanje) sekundarnog servisa (ako postoji, onda je ovo drugi atribut servisa):

Handle	Type	Permissions	Value	Value length
0xNNNN	$UUID_{include}$	Read Only	Included service handle, end group handle, Included service UUID	6, 8, or 20 bytes

UUID servisa koji se uključuje

Karakteristika (*Characteristic*)

- *Karakteristika* se može razumeti kao kontejner za korisnički podatak. Sadrži bar dva atributa:
  - *Atribut za deklaraciju karakteristike* (*characteristic declaration*): sadrži meta-podatke o samoj karakteristici i korisničkom podatku sadržanom u karakteristici
  - *Atribut za* v*rednost karakteristike* (*characteristic value*). Atribut koji u svom polju za vrednost sadrži vrednost samo korisničkog podatka.
- Opciono, karakteristika može da sadrži jedan ili više *deskriptora*, koji dopunu meta-podataka iz deklaracije karakteristike.
- Atributi za deklaraciju i vrednost karakteristike, zajedno sa deskriptorima čine *definiciju karakteristike* (*characteristic definition*) – set atributa koji zajedno čine jednu karakteristiku.

Karakteristika (*Characteristic*)

$0x2803$ (fiksno)

Deklaraciju je dozvoljeno samo čitati

Value: tri nadovezana podatka:

- *Properties* (1 bajt)
- *Handle* atributa za vrednost
- UUID karakteristike

Atribut za deklaraciju karakteristike

Handle	Type	Permissions	Value	Value length
0xNNNN	UUID*characteristic*	Read Only	Properties, value handle (0xMMMM), characteristic UUID	5,7, or 19 bytes
0xMMMM	Characteristic UUID	Any	Actual value	Variable

Atribut za vrednost karakteristike

Isto

Property	Location	Description
Broadcast	Properties	If set, allows this characteristic value to be placed in advertising packets, using the Service Data AD Type (see "GATT Attribute Data in Advertising Packets")
Read	Properties	If set, allows clients to read this characteristic using any of the ATT read operations listed in "ATT operations"
Write without response	Properties	If set, allows clients to use the Write Command ATT operation on this characteristic (see "ATT operations")
Write	Properties	If set, allows clients to use the Write Request/Response ATT operation on this characteristic (see "ATT operations")
Notify	Properties	If set, allows the server to use the Handle Value Notification ATT operation on this characteristic (see "ATT operations")
Indicate	Properties	If set, allows the server to use the Handle Value Indication/Confirmation ATT operation on this characteristic (see "ATT operations")
Signed Write Command	Properties	If set, allows clients to use the Signed Write Command ATT operation on this characteristic (see "ATT operations")
Queued Write	Extended Properties	If set, allows clients to use the Queued Writes ATT operations on this characteristic (see "ATT operations")
Writable Auxiliaries	Extended Properties	If set, a client can write to the descriptor described in "Characteristic User Description Descriptor"

Karakteristika (*Characteristic*)

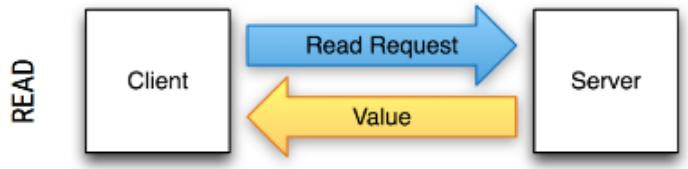
- Deskriptori karakteristike
  - Dodatne informacije (meta-podaci) o karakteristici i njenoj vrednosti
  - Opcioni – karakteristika može da sadrži 0, 1 ili više deskriptora
  - Svaki deskriptor zauzima tačno jedan atribut
  - Atributi deskriptora slede odmah nakon atributa za vrednost karakteristike
    - UUID ovog atributa je tip deskriptora;
    - Polje za vrednost atributa sadrži podatke koji su specifični za tip konkretnog deskriptora.
  - Postoje dva tipa deskriptora:
    - *Standardni, ili GATT-defined descriptors* – definisani u BLE standardu
    - *Profile or vendor-specific descriptors* – definiše ih korisnik

Karakteristika (*Characteristic*)

- Primeri standardnih deskriptora:
  - *Extended Properties Descriptor*.
    - Sadrži dva dodatna bita koji dopunjuju polje *Characteristic properties* u atributu za deklaraciju karakteristike.
  - *Characteristic User Description Descriptor.*
    - Sadrži tekstualni (čitljiv) opis karakteristike u okviru čije definicije je smešten.
  - *Characteristic presentation format descriptor*.
    - Sadrži format vrednosti karakteristike. Spisak podržanih formata uključuje: *boolean*, *string*, *integer*, *floating-point* itd.
  - *Client Characteristic Configuration Descriptor* (CCCD).
    - Najčešće korišćeni deskriptor
    - Deluje kao prekidač koji dozvoljava ili zabranjuje serverske notifikacije/indikacije (*server-initiated updates*).

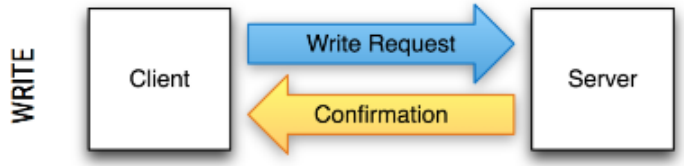
GATT
Operacije

Čitanje vrednosti ili deskriptora karakteristike



Kao identifikator karakteristike kojoj se pristupa koristi se njen UUID ili *handle*

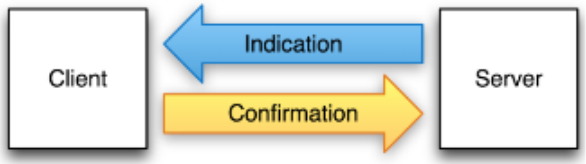
Pouzdani upis (sa potvrdom upisa)



Upis (bez potvrde)

Notifikacija

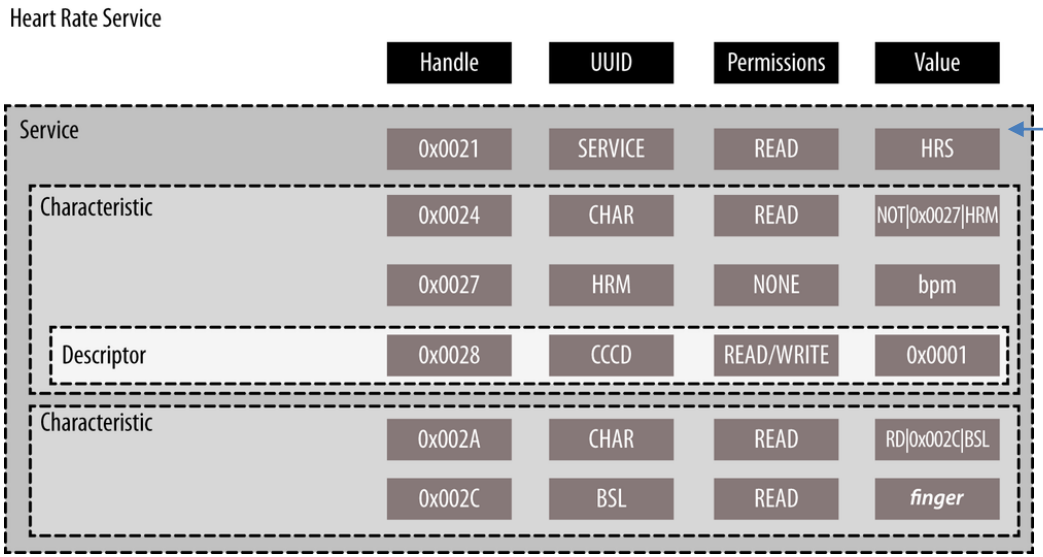
Indikacija (notifikacija sa potvrdom)



Notifikacija/indikacija: server šalje vrednost karakteristike bez zahteva za čitanje

Primer servisa
HRS (*Heart Rate Service*)

- Za senzor merenja pulsa



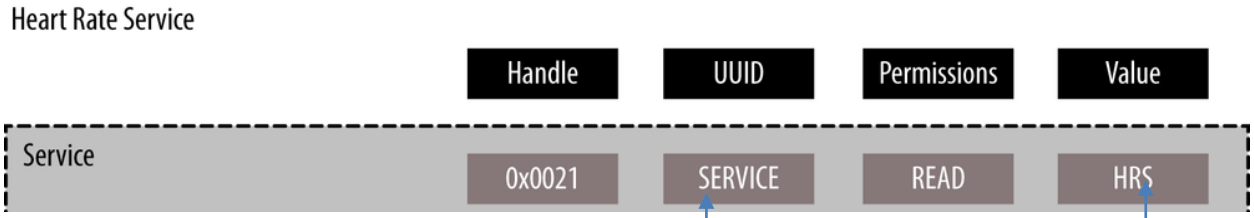
Atribut za deklaraciju servisa

Karakteristika *Heart Rate Measurement* - sadrži vrednost izmerenog pulsa

Karakteristika *Body Sensor Location* koja sadrži podatak o tome gde je na telu lociran senzor

Primer servisa
HRS (*Heart Rate Service*)

Atribut za deklaraciju servisa



Standardni UUID za atributa za deklaraciju servisa:

$$0x2800$$

UUID HRS servisa

$$0x180D$$

Ovaj servis je definisan BLE standardom i zato je njegov UUID kratak

Primer servisa
HRS (*Heart Rate Service*)

Atribut za deklaraciju karakteristike *Heart Rate Measurement*

	Handle	UUID	Permissions	Value
Characteristic	0x0024	CHAR	READ	NOT|0x0027|HRM

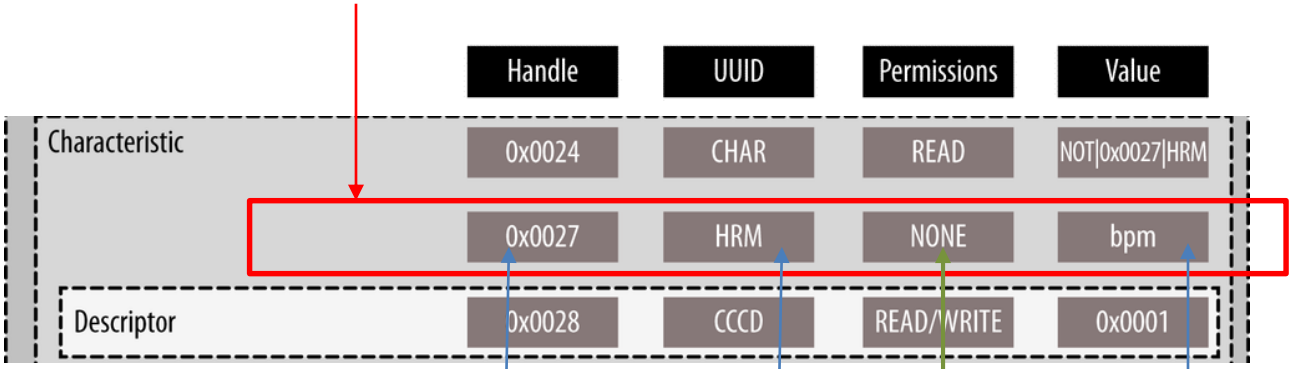
Standardni UUID za atributa za deklaraciju karakteristike: 0x2803

- Dozvoljene su samo notifikacije,
- *Handle* na atribut za vrednost
- UUID karakteristike. Konkretno: $0x2A37$

Atribut za deklaraciju karakteristike može samo da se čita

Primer servisa
HRS (*Heart Rate Service*)

Atribut za vrednost karakteristike *Heart Rate Measurement*



Handle atributa

UUID karakteristike

Izmerena vrednost pulsa

Isto kao u atributu za deklaraciju karakteristike

Nije dozvoljeno čitanje i upis (dozvoljene su samo notifikacije)

Primer servisa
HRS (*Heart Rate Service*)

Atribut za deskriptor karakteristike (CCCD)

	Handle	UUID	Permissions	Value
Characteristic	0x0024	CHAR	READ	NOT|0x0027|HRM
	0x0027	HRM	NONE	bpm
Descriptor	0x0028	CCCD	READ/WRITE	0x0001

UUID CCCD deskriptora $0x2902$

Dozvoljen upis i čitanje

Kod CCCD deskriptora postoje samo dva bita u polju za vrednost, po jedan za dozvolu/zabranu notifikacija i indikacija
0x0001 – dozvoljene su notifikacije

Primer servisa
HRS (*Heart Rate Service*)

Karakteristika *Body Sensor Location*

Handle	UUID	Permissions	Value
Characteristic			
0x002A	CHAR	READ	RD|0x002C|BSL
0x002C	BSL	READ	*finger*

- Dozvoljeno je samo čitanje,
- *Handle* na atribut za vrednost
- UUID ove karakteristike: BSL=$0x2A38$

Vrednost koja ukazuje gde je na telu postavljen senzor pulsa