



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

IoT eszközök fogyasztásának és adatátvitelének vizsgálata NB-IoT és Cat-M1 hálózaton

Készítette

Ficzere Dániel

Konzulens

dr. Varga Pál, Soós Gábor

2018. október 29.

Tartalomjegyzék

Kivonat	3
Abstract	5
1. Bevezetés	6
2. Jelenlegi rádiós hozzáférésű IoT technológiák	10
2.1. Technológiák áttekintése	10
2.1.1. NB-IoT	11
2.1.2. LTE Cat-M1	14
2.1.3. A LoRa	17
2.1.4. Sigfox	17
2.1.5. IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow)	17
2.1.6. EC-GSM	18
2.2. NB-IoT és Cat-M1 előnyei más technológiákkal szemben	18
2.3. LPWA technológiák biztonsági kérdései	20
3. Felhasználási területek	22
3.1. IoT piaci előrejelzések	22
3.2. Jellemző IoT felhasználások és csoportosításuk	24
3.2.1. Emberrel kapcsolatos felhasználások	25
3.2.2. Ipari és mezőgazdasági felhasználások	26
3.2.3. Speciális rádiós igényű felhasználások	26
3.2.4. Hálózati tápforrással rendelkező alkalmazások	27
4. IoT eszközök fogyasztása	30
4.1. Funkciók a fogyasztás csökkentéséhez	30
4.1.1. Power Saving Mode	30
4.1.2. Extended Discontinuous Reception	32
4.2. Fogyasztást befolyásoló tényezők	33
4.3. Akkumulátor választásának szempontjai	34

5. Mérések	38
5.1. Mérési összeállítás és eredmények	39
5.2. Várható üzemidő becslése	45
6. Mérési eredmények kiértékelése	48
7. Összefoglalás és jövőbeli tervek	51
Köszönetnyilvánítás	52

Kivonat

Az iparban a gyártástól a logisztikán át a kapcsolódó szolgáltatásokig az utóbbi évek egyik legnagyobb újítása az Internet of Things-hez kapcsolódó technológiák használata. Az IoT mindennapi és ipari készülékek, szenzorok és beavatkozók által létesített hálózat, amelynek elemei valamilyen beágyazott elektronikával rendelkeznek és adatfeldolgozó egységek felé is küldenek információt. A hálózathoz csatlakozó elemek jellemzően kis adatforgalmat generálva kommunikálnak egymással. Az IoT eszközök száma évről évre rohamosan nő, 2020-ra a jelenlegi becslések szerint a 30 milliárd működő eszköz is lehet világszerte.

Az IoT végpontok tipikusan rádiós közeghozzáféréssel rendelkeznek. Ezek közül jelenleg – az 5G hálózatok megjelenéséig – a mobilszolgáltatók garantált, felügyelt környezetet az NB-IoT (NarrowBand IoT) és a Cat-M1 technológiák segítségével tudnak nyújtani. Munkám során ezeket a 3GPP által szabványosított technológiákat vizsgálom. Ezek a technológiák a meglévő LTE hálózatot használják, kisebb átkonfigurálás mellett. Számos kedvező tulajdonsággal rendelkeznek, ami részben a licenszelt frekvenciákból ered, valamint abból, hogy az LTE hálózat meglévő elemeit tudják használni.

Annak érdekében, hogy a végfelhasználók számára garantálni lehessen a szolgáltatások megfelelő minőségét, alapos mérésekre, vizsgálatokra van szükség az NB-IoT és Cat-M1 képes eszközökön és hálózaton. Ezekből viszont egyelőre kevés az ismert és bevált eljárás, és nincs egységesen elfogadott metódus, hogy adott paramétert hogyan kell mérni, milyen főbb KPI (Key Parameter Indicator)-ok teljesülése esetén fogadható el az adott hálózat minősége. Az IoT eszközök egyik legnagyobb technológiai igénye az alacsony energia fogyasztás és az így elérhető hosszú, akár több éves beavatkozás-mentes üzemidő.

Dolgozatomban megvizsgálom a jelenlegi IoT use-case-ek adatigényeit és jellegzetességeit, kiemelve azt, hogy milyen gyakran és mekkora adatátvitelre van szüksége az adott felhasználásnak. Az ezekből kialakított néhány jellegzetes felhasználásra méréseket végzek, majd ezeknek az adatforgalmaknak a függvényében vizsgálom az eszközök fogyasztását. Megállapítom, hogy az adott felhasználáshoz milyen beál-

lítások (PSM, eDRX, stb.) az optimálisak. Az elvégzett mérések alapján becslést készítek arról, hogy mennyi lesz az adott berendezés várható élettartama egy akkumulátor tápforrásról üzemeltetve.

Abstract

In the industry from production, logistics through several kinds of services, Internet of Things based technologies are one of the biggest inventions in the last couple years. IoT are the network of industry- and common devices, sensors, actuators and almost any kind of device which has embedded electronics. Devices which are connected to the network generate typically just a few bytes of data during the communication. The number of IoT devices are increasing rapidly year by year, based on current estimations by 2020, there will be 30 billion connected devices all around the world.

Typically, IoT end devices have radio network access, currently – before the 5G – mobile network operators provide guaranteed and controlled environment with the help of NB-IoT (NarrowBand IoT) and Cat-M1 technologies. During my research I am going to examine these two technologies standardized by 3GPP. They can use the existing LTE network with some changes, for this reason they have several favorable features because they can use already existing functions of the the LTE network. Furthermore, NB-IoT or Cat-M1 based devices can operate on licensed spectrum which is a huge advantage against other rival technologies such as LoRa, Sigfox, etc.

In order to provide adequate service quality for the IoT devices, there is a need for extensive measurements and examinations on the NB-IoT and Cat-M1 capable devices and networks. For the present, there are just a few known methods, there are not uniformly accepted procedures how to measure a specific parameter or what are the most relevant KPI's (Key Parameter Indicator) for the proper operating of these networks. Low power consumption is one of the most important demand of the IoT devices, so long battery life time can be achieved without any intervention.

In my essay I am going to examine the data traffic characteristics of the current IoT use-cases, how often and which amount of data is needed in different applications. I will plan and execute measurements about some of the use-cases, after that, examine the power consumption of the devices for the different data characteristics and define configurations (PSM, eDRX, etc.) to minimize this requirement. In conclusion, I estimate the battery life time of the IoT devices with specific configurations based on prior measurements.

1. fejezet

Bevezetés

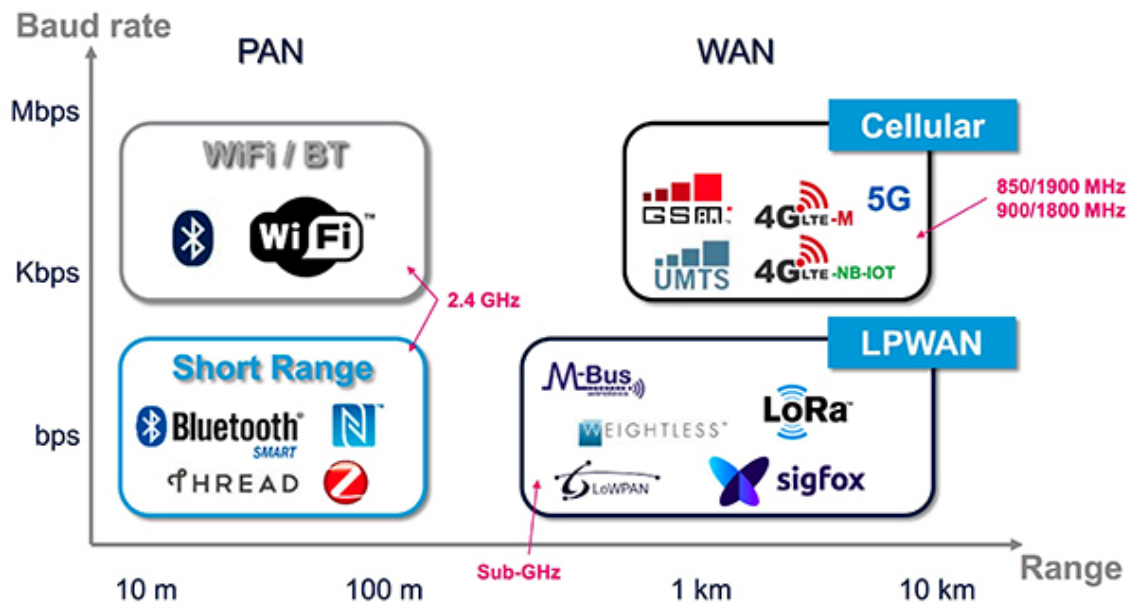
Az Internet of Things lesz várhatóan a következő technológiai forradalom a kommunikációban. Ahhoz, hogy teljesen érthető legyen, milyen tulajdonságokkal kell rendelkeznie az IoT-t kiszolgáló technológiáknak egy kicsit általánosabban szeretném megközelíteni a témát és elmondom mit is értünk Low Power Wide Area technológiákon, valamint mi jellemzi ezeket. Az LPWA [14] megnevezés olyan vezeték nélküli kommunikációs technológiát takar, amit úgy terveztek, hogy támogassa és kielégítse az IoT felhasználások igényeit. Ezek az igények a következők:

- Nagy területek lefedése, beleértve olyan helyszíneket is, amik föld alatt vagy épületek mélyén helyezkednek el. A bekötendő szenzorok sokszor, olyan helyszínekre vannak elhelyezve – vidéki területek, épületek alagsora, stb. –, ahol a rádiós útba kerülő tárgyak, épületek miatt nagy a szakaszcsillapítás.
- Alacsony energiafogyasztás, ezáltal az eszközök akkumulátorról működve hosszú éveken át, akár 10 éven keresztül beavatkozás nélkül tudnak működni, lehetőleg az eszköz élettartamának végéig.
- Masszív skálázhatóság, akár több millió eszköz csatlakoztatása a hálózathoz. Tűz- vagy füstjelzők, okos szemetesek esetén szükség van több ezer eszköz együttes kezelésére alacsony üzemeltetési és fenntartási költség mellett, ennek érdekében a hálózatnak támogatnia kell a nagy számú eszköz kapcsolatot, miközben valamilyen szintű QoS-t is biztosít.
- Alacsony eszköz költség, kevesebb mint 10 dollárba kerülő eszközök biztosítása.
- Alacsony sávszélesség, hiszen a legtöbb felhasználás IoT területen csak néhány bájtnyi adatot szeretne küldeni naponta. Ezen alkalmazások számára nem szükséges, hogy a hálózat támogassa a hang átvitelét vagy egyáltalán a duplex átvitelt.

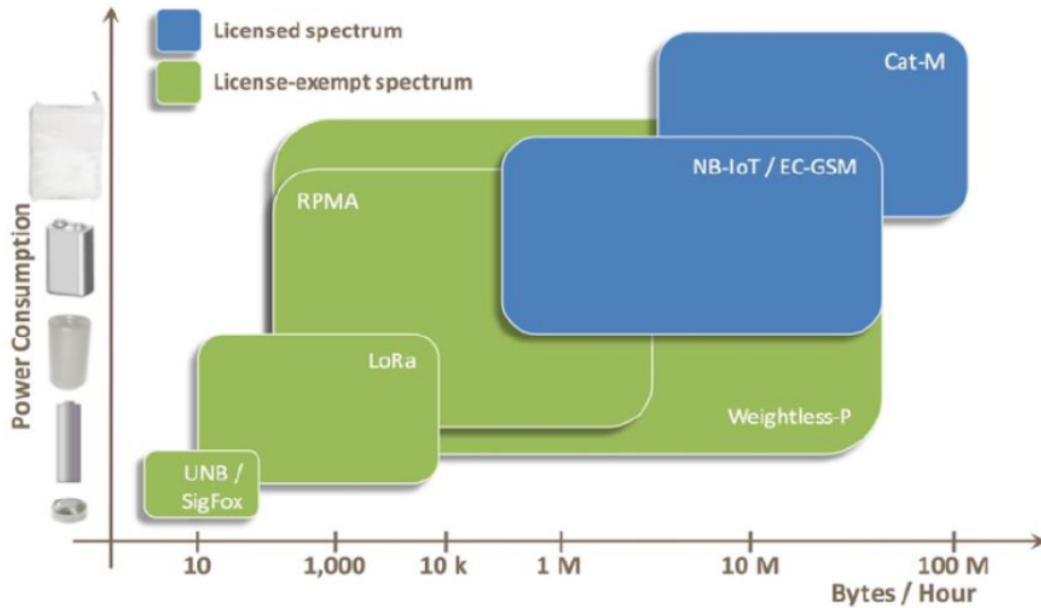
Megnézve a legbiztatóbb IoT alkalmazásokat észrevehető, hogy az előbb felsorolt igények szinte mindegyiknél fellépnek, legyen szó okos mérőórákról, okos mezőgazdaságról, okos városról vagy bármilyen más IoT alkalmazásról.

A 2016-ig használt és telepített hálózati szabványok többsége nem elégíti ki ezen feltételek mindegyikét. Vezetékes kapcsolatok ideálisak IoT felhasználások számára épületekben vagy irodákban, azonban sok esetben ilyen eszközöket a szabadban szeretnénk telepíteni, olyan helyen, ahol nincs semmiféle kábelezés. Ilyen esetekben valamilyen vezeték nélküli technológiát kell alkalmazni, mint mondjuk a Wi-Fi [2], Bluetooth[37] vagy Zigbee [6], ezeknek viszont nincs meg a megfelelő hatótávolságuk és skálázhatóságuk, ami kielégítené ezen felhasználások igényeit. Mások – 3G, 4G – már ilyen szempontból jobbak, hiszen több kilométeres átvitelt és lefedettséget biztosítanak, azonban ezek nagy sebességű átvitelre lettek tervezve, ez drágává és teljesítmény igényessé teszi őket. Egy tipikus 4G IoT modul ára 40\$ körül van és az akkumulátor egy évig sem bírja. Ekkor lépnek a képbe az LPWA technológiák. Számos különböző technológiát terveztek, hogy kielégítse az LPWA követelményeit, azonban saját véleményem és sok nagy mobil operátor szerint az NB-IoT és Cat-M1 lesznek az iparági trendek alapján azok a technológiák, amik a legpraktikusabb választást jelentik az operátorok, az eszközgyártók és a felhasználók számára egyaránt.

Az 1.1 ábra az IoT területén potenciálisan versengő rádiós hozzáférési technológiák összehasonlítását szemlélteti, az elérni tervezett átviteli sebesség, és a távolság tekintetében. Az 1.2 ábra a fogyasztás és az átvitt adatmennyiség kapcsolatát szemlélteti.



1.1. ábra. Vezeték nélküli technológiák átviteli sebessége a távolság függvényében [13]



1.2. ábra. LPWA technológiák fogyasztása a küldött adat függvényében [15]

Dolgozatom során az NB-IoT és Cat-M1 képes eszközök fogyasztásának kérdését járom körbe, bemutatom azokat a funkciókat, amelyek hatással vannak erre hálózati oldalról és az eszköz oldaláról. Megvizsgálom, hogyan befolyásolja az adott felhasználás adatforgalmi igénye a fogyasztást, valamint milyen típusú akkumulátort érdemes IoT felhasználásokhoz használni és miért.

Először röviden ismertetem a jelenlegi LPWA technológiákat, részletesen bemutatom az általam vizsgált két technológiát az NB-IoT-t és a Cat-M1-et, ismertetem mik az előnyeik a többi versenytársukkal szemben. Felsorolás jelleggel a jelenlegi alkalmazási területeket és rájuk jellemző adatigényeket is bemutatom. Méréseimben elemi események során vizsgálom az NB-IoT és Cat-M1 képes eszközeim fogyasztását, majd a kialakított use-case csoportok és mérések alapján becslöm meg adott akkumulátor mellett egy eszköz várható üzemidejét, továbbá milyen paraméterek és hogyan lehetnek hatással az üzemidőre.

Kérdések, amiket szeretnék megválaszolni dolgozatom során:

- Mik az IoT eszközök fogyasztását legjobban befolyásoló hatások?
- Milyen szempontokat kell figyelembe venni az akkumulátor megválasztásakor?
- A különböző IoT felhasználásoknak mik a jellegzetességeik, hogyan csoportosíthatóak?
- A különböző alkalmazások igényeit melyik technológia elégíti ki és miért?

- Mekkora üzemidőt képesek elérni az alkalmazások különböző igények mellett, ez hogyan becsülhető?

2. fejezet

Jelenlegi rádiós hozzáférésű IoT technológiák

2.1. Technológiák áttekintése

Sok különböző technológiát dolgoztak ki, amelyek a már korábban említett kritériumokat próbálják kielégíteni a legkülönbözőbb megközelítésekkel. Van amelyiket magánvállalatok szponzorálnak, vagy különböző csoportok, szervezetek. LoRa, Sigfox, NB-IoT, eMTC (LTE-M), ezek és még sok más technológia verseng a piacon, van amelyik nyílt, publikusan hozzáférhető szabványon alapul, míg mások tartalmába csak partnerségi-ipari egyezmények útján lehet betekinteni.

Felmerül a kérdés: mely tényezők befolyásolják, hogy mi a legmegfelelőbb technológia egy adott alkalmazáshoz? Fontos kérdés emellett, hogy melyik a legbiztonságosabb választás egy nagyvállalat számára hosszú távra, hiszen ezen alkalmazások esetében az eszközök működési idejét 10 éves nagyságrendre tervezzük? A következőkben bemutatom röviden néhány jelentős LPWA technológiát, milyen jellegzetességekkel bírnak (2.1. ábra), mik az előnyeik, hátrányaik. Az NB-IoT és Cat-M1 technológiákról, pedig részletesebb áttekintést nyújtok, végül a különböző IoT technológiák rádiós jellemzőit táblázatos formában foglalom össze a fejezet végén.

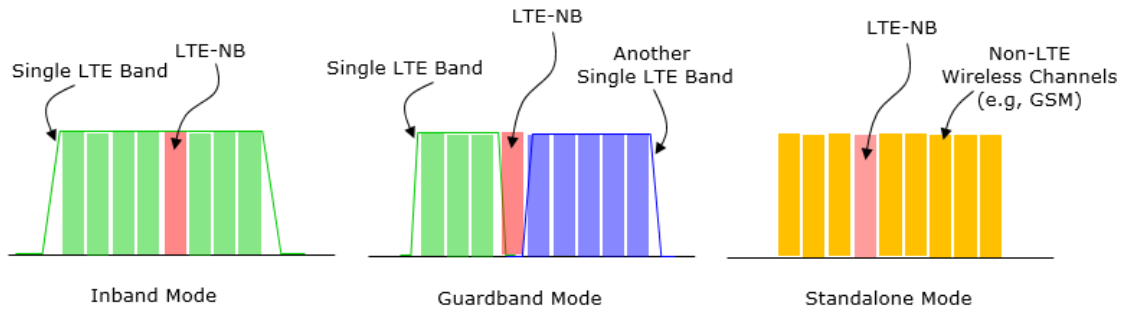
Technológia	Cat-M1	Nb-IoT	EC-GSM	HaLow(11ah)	LoRa	Sigfox	Wi-Fi(11n/ac)	Bluetooth	Zigbee/Thread
Frekvencia	Meglévő mobil hálózati frekvenciák			900 MHz (ISM)	900 MHz (ISM)	900 MHz (ISM)	5 GHz (ISM)	2.4 GHz (ISM)	2.4 GHz (ISM)
Átviteli sebesség	1 Mbps	100 kbps	10 kbps	7.2 Mbps	50 kbps	1kbps	6.9 Gbps	24 Mbps	250 kbps
Hatótávolság	10 km	20 km	20 km	1 km	15 km	50 km	50 m	100 m	100 m
Fogyasztás	Közepes	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony	Alacsony	Magas	Alacsony	Alacsony

2.1. ábra. Rádiós technológiák összehasonlítása

2.1.1. NB-IoT

Az NB-IoT egy új, keskeny sáv szélességű rádiós technológia, amit 3GPP szabványosított. Tulajdonságai lehetővé teszik, hogy IoT alkalmazások széles köre igénybe vegye [7].

Az NB-IoT három fajta telepítési lehetőséget kínál rádiós szempontból: guard band, in-band és standalone (2.2. ábra). A legtöbb mobilszolgáltató célja, hogy 2020-ra elérhetővé tegye az összes LTE site-on az NB-IoT-t, ehhez a hálózati operátorok az előbb említett három lehetőség közül választhatnak a technológiák telepítése során, annak függvényében, hogy melyik illeszkedik legjobban a hálózat adottságaihoz. Az NB-IoT-t úgy tervezték, hogy beleférjen a 180 kHz spektrumba, ezáltal akár 1 PRB-t (Physical Resource Block) kihasználva tud futni a normál LTE vivőkön belül (in-band). Ahol nem megvalósítható, hogy bármekkora kapacitást is elvonjanak az LTE-től, ott az NB-IoT telepíthető, mint guard band, tehát az LTE vivők szélén. Ez az a rész az LTE frekvenciák között, amik az interferencia megelőzése érdekében vannak fenntartva, azonban az NB-IoT kisebb elvárásai számára tökéletes megoldást kínál. Ezen kívül telepíthető még, mint standalone frekvencia egyedüli GSM vivőként, ez olyan helyeken kivitelezhető, ahol a teljes 4G rollout még nincs definiálva. Bármelyik módon is lesz telepítve az NB-IoT, nem kell más rendszer jelzési erőforrásaitól függenie.



2.2. ábra. NB-IoT frekvenciák telepítési módjai [17]

Az NB-IoT kiváló lefedettségi tulajdonságokkal rendelkezik, amit a maximum link budget-el lehet kifejezni Ez egy módja, hogy meghatározzuk egy hálózati kapcsolat minőségét, figyelembe véve a jel csillapodását és egyéb veszteségeket. Ez egy egyszerű mérőszám különböző rádiós technológiák összehasonlítására. Az NB-IoT jobb lefedettséget és jel behatolást biztosít, mint az egyéb alternatív LPWA technológiák, a GSM/GPRS megoldásokhoz képest pedig 20 dB-el jobban teljesít. Ez az NB-IoT esetében azt jelenti, hogy a jel képes gond nélkül áthatolni több réteg vastag téglafalon, megbízható átvitelt biztosítva eszközök számára, például földalatti parkolószenzorok

vagy alagsori okos mérőórák számára. Az NB-IoT két jelentős fogyasztást csökkentő funkciót használ az Extended Discontinuous Reception-t (eDRX) és a Power Saving Mode-ot (PSM). Ezek külön-külön is alkalmazhatók, azonban együttes használatuk jelentheti a legkedvezőbb fogyasztást az eszköz számára.

Amikor egy eszköz csatlakozik a hálózathoz, a hálózat periodikusan paging üzeneteket küld, ha adatot szeretne küldeni kontroll csatornákon, amiket az eszközök hallgatnak és ha tudnak reagálni rájuk. Tipikusan ezek az üzenetek legalább másodpercenként kerülnek kiküldésre, hozzájárulva pontos információk fenntartásához az eszközökről a hálózat számára, azonban ez a fogyasztásra egyáltalán nincsen kedvező hatással, ugyanis ekkor az eszköznek ébren kell lennie. A nagyobb hatékonyság érdekében, PSM mód biztosítja az eszköz számára, hogy akár több száz órára is mély alvás állapotba kerüljön és csak rövid időre kelljen felébrednie mielőtt újra energiatakarékos módba térne vissza. Ebben az állapotban az eszköz a hálózat oldaláról nem elérhető, természetesen ilyenkor a paging üzenetekre sem tud reagálni, ami a szabvány szerint teljesen természetes állapot. Az eDRX lehetőséget ad arra, hogy a paging periódust, akár 3 órára is meghosszabbítsuk, csökkentve a szükségtelen vevő aktivitást, azonban továbbra is biztosítja a hálózatnak, hogy elérje a kliens eszközt, amikor szeretné.

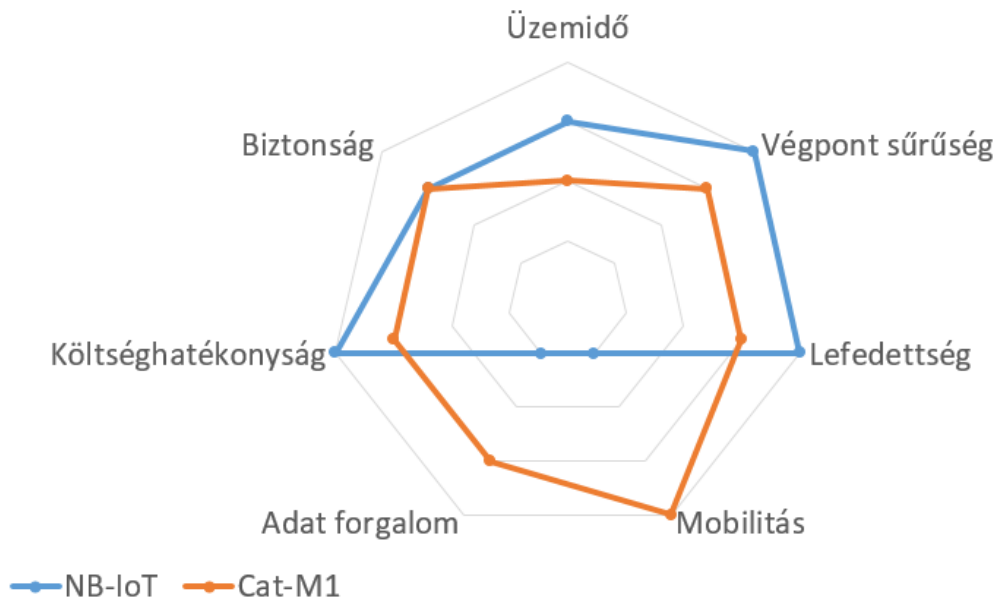
Az NB-IoT úgy lett tervezve, hogy minimalizálja a tipikusan magas hardver árakat, amik a LTE kliens eszközöket jellemzik. NB-IoT hardver modulok számára például nem szükséges sok memória, elegendő 1 antenna és nincs szükségük full-duplex működésre, így elkerülve a drága RF duplexer használatát. Következésképpen, az NB-IoT eszközök beleértve az alapsávi és RF chipset-eket, körülbelül 2\$-ba fognak kerülni 2020-ra, ami összehasonlítva a 40\$-os a napjainkban elérhető LTE eszközökhöz képest nagyon kedvezőnek tűnik.

Amikor egy LPWA technológia mellett dönt valamelyik nagyvállalat biztosnak kell lennie benne, hogy a választott technológiának stabil jövője lesz. Az NB-IoT egy nyílt, a 3GPP által szabványosított technológia, ezáltal a vállalatok, akik az NB-IoT mellett döntenek, kis kockázatot vállalnak a hosszútávú elkötelezettség során. Az NB-IoT-nek már széleskörű támogatottsága van a legnagyobb hálózati operátoroktól, köztük az AT&T, O2 Telefonica, China Unicom, China Mobile, Deutsche Telekom, Verizon, Telstra és a Vodafone is támogatja az NB-IoT-t. Még olyan operátorok is, mint az Orange, akik foglalkoznak LoRa-val és Sigfox-al is fektetnek NB-IoT-be. Összességében a világ 30 legnagyobb operátora támogatja az NB-IoT-t, ami területileg az IoT piac több, mint 90%-át lefedi. Ez a népszerűség könnyen eredményezheti, hogy az NB-IoT szinte egyeduralmódóvá váljon a jövőben világszerte. Ezek a trendek az eszközgyártókra is hatással vannak. A vezető nagyvállalatok –

Ericsson, Huawei, Nokia, Qualcomm, Intel – elkötelezték magukat az NB-IoT mellett. Így eszközök terén is nagy választék áll rendelkezésre a felhasználók számára, valamint ez a versenyhelyzet az eszköz árakat is csökkenti [19].

Az alacsony frekvenciák egyik tulajdonsága, hogy kiváló jelterjedési és behatolási tulajdonságokkal rendelkeznek, ezáltal nagyon jó választás lehet LPWA technológiák számára. A legtöbb mobil operátor a 900 MHz körüli frekvenciákat használja többségben hangátvitelre, pontosan az előbb felsorolt okok miatt. Az NB-IoT számára a 700 MHz, 800 MHz és a 900 MHz remek választásnak tűnik, mert egy hatalmas és már kiépített környezetet biztosít, amit már sok operátor választott. Néhány példát említek az előbb már felsorolt mobil operátorok közül, 800 MHz-en működik a Magyar Telekom, Vodafone Germany, Telia Finland, Beeline Russia, Orange Belgium és még sok más hálózat is. Mivel nagyon sok operátor használ LTE 800 MHz-et, nekik nyitott az út, egy egyszerű upgrade-re ezeken a frekvenciákon, hogy biztosítsák az NB-IoT hálózatot a felhasználók számára. Az 1800 MHz ugyancsak jó választásnak tűnik telepítés szempontjából, mert a világon a legtöbb LTE hálózat 1800 MHz-en fut így azoknak az operátorok számára, akiknek az alacsonyabb GHz alatti frekvenciák hiányában vannak, itt is indíthatnak egy szoftver RAN (Radio Access Network) upgrade-el NB-IoT és Cat-M1 hálózatot.

A meglévő kommunikációs technológiáknak a továbbiakban is jól kell majd működniük a különböző új IoT technológiák mellett is. Az NB-IoT viselkedése nagyon hasonlít a tradicionális cellás kommunikációs technológiákra, előre megjósolható forgalommal, biztonsági funkciókkal rendelkezik. Más LPWA technológiáknak lehetnek olyan korlátozásai, amiket a felhasználóknak el kell fogadniuk és számolni velük. Például a LoRa forgalom kezelése nagymértékben korlátozott, csúcsidőszakban a csomagvesztés akár 60%-ot is elérhet. A LoRa támogat egy nem túl hatékony flag-alapú módszert, amellyel jelezni lehet, ha egy üzenet megérkezett, azonban ez további forgalmat generál, ami meglehetősen sok gondot okozhat időkritikus felhasználásokban.



2.3. ábra. NB-IoT és Cat-M1 technológiák jellegzetességei

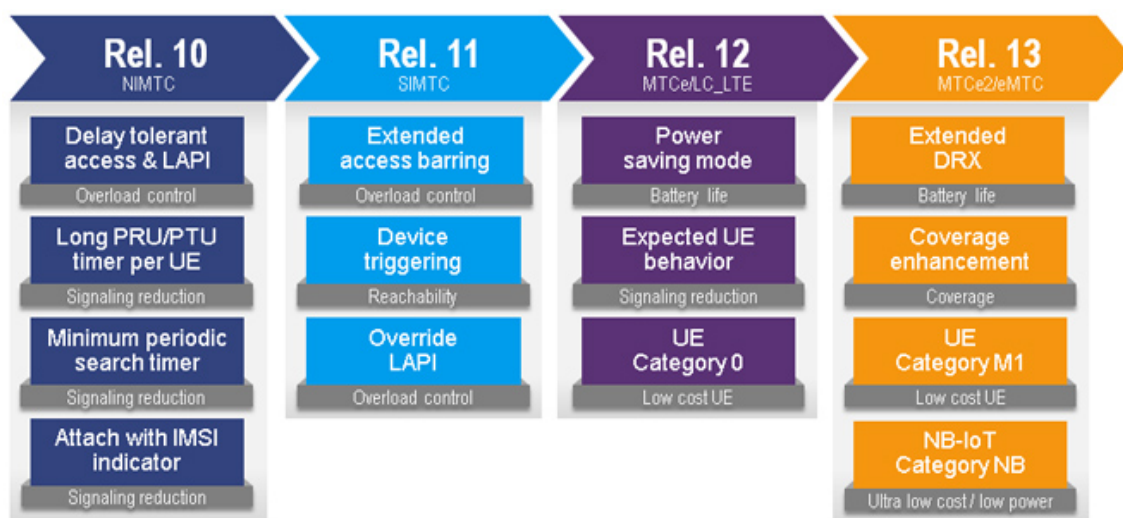
2.1.2. LTE Cat-M1

Az NB-IoT és a Cat-M1 [39] nagyon sok tulajdonsága megegyezik így ezeket itt már csak felsorolás jelleggel említem meg, viszont a különbségeket a két technológia között részletesebben kifejtem. Bemutatom mi az, amiben többet vagy éppen mást kínál a Cat-M1 az NB-IoT-hoz és más IoT technológiákhoz képest. A Cat-M1 és az NB-IoT tulajdonságainak viszonya egymáshoz képest a 2.3. ábrán látható, ahol hét szempont szerint – adatforgalom, költséghatékonyság, biztonság, üzemidő, végpont sűrűség, lefedettség, mobilitás – vizsgáltam őket.

3GPP Rel-12-ben definiáltak egy új, alacsony költségű M2M eszközkategóriát (Cat-0), majd a Rel-13-ban ezt a szabványosítási irányt folytatva vezettek be további újításokat a lefedettség, fogyasztás és eszköz komplexitás terén [40]. Ez az új LTE duplex módjaiban üzemelő eszközkategória a következő jellemzőket támogatta:

- Egy csökkentett 1,4 MHz-es (6 PRB) sávszélességen uplink és downlink irányban is;
- Köszönhetően a sávszélesség csökkentésnek új kontroll csatorna és frekvencia ugrás mechanizmus bevezetése;
- Az adási jelerősséget is csökkentése 20 dBm-re az ezelőtti 23 dBm-ről ezzel is csökkentve az eszköz fogyasztását;
- LTE lefedettséget növelték a fentebb említett eszközkategóriának;

- Bevezették a kiterjesztett DRX ciklust (eDRX) hosszabb inaktivitást biztosítva az eszközöknek, ezáltal növelve az akkumulátor élettartamát.



2.4. ábra. 3GPP Release-ek során bevezetett jelentős funkciók [21]

A 2.4. ábrán néhány 3GPP release és azokon szabványosított néhány fontos eljárás látható. Jelen dolgozat számára főleg a Release 12 és 13 fontos, ezekben szabványosították új eszközkategóriákat (UE Category M1, NB-IoT Category NB), új mechanizmusokat (PSM, eDRX) vezettek be fejlesztéseket a lefedettség javítása érdekében.

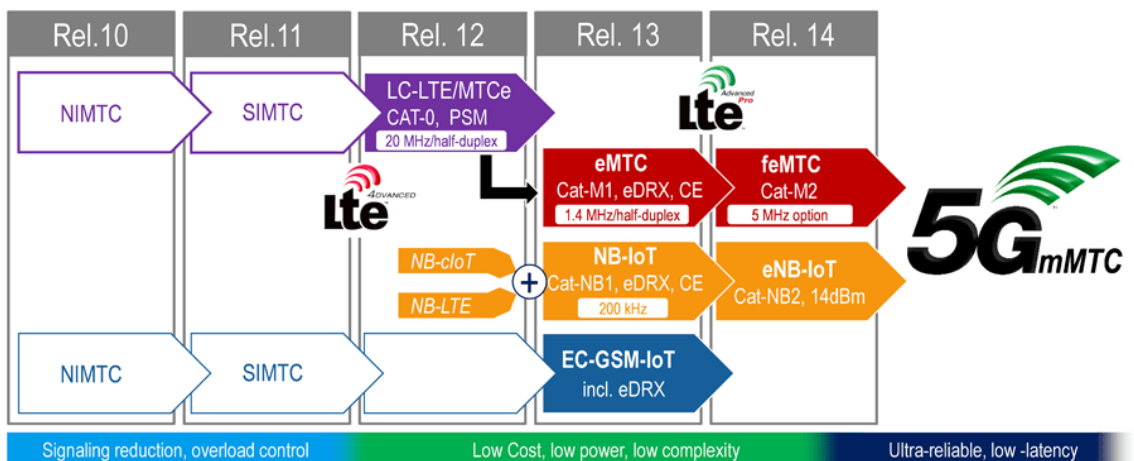
A leglényegesebb különbség az NB-IoT és a Cat-M1 között a sávszélesség, ezáltal az uplink és downlink átviteli sebesség. A Cat-M1 jóval nagyobb adatforgalmat bír el, mint az NB-IoT, képes 1 Mbps átvitelre szimmetrikusan uplink és downlink irányban is, míg az NB-IoT-t 100 kbps-ra tervezték. Az, hogy egy adott IoT alkalmazást melyik technológiát használva szeretne egy cég kiépíteni sokszor az adatforgalom igények alapján dől el. A Cat-M1 képes az egészen nagy adatforgalmat generáló alkalmazásokat kielégíteni IoT viszonylatban, ahol már nem elég, hogy az adott felhasználás működjön, hanem rendszeres állapotmonitorozást is végezzen a rendszer, megkönnyítve annak karbantartását. A komplexitás csökkentések ellenére a CAT-M1 berendezések továbbra is sok hasonlóságot mutatnak a korábbi LTE UE (User Equipment) berendezésekkel a funkcióikat tekintve, melyek a csatlakozás közbeni hívásátadáshoz kapcsolódnak (CMM, SHO, ES, SPS, alacsony késleltetésű csomag továbbítás). Mindezen funkciók eredményeképp nyitva áll a lehetőség, hogy a CatM1-UE-k integrált hang szolgáltatást biztosítsanak jó lefedettségű (mode A) területeken. Itt is megtalálható a PSM és eDRX mód, valamint ugyancsak a meglévő LTE frekvenciákat használja az NB-IoT-hez hasonlóan. LTE-M-et támogatja az összes nagyobb mobil eszköz, chipset és hálózati gyártó. Képes párhuzamosan

működni a 2G, 3G és 4G mobil hálózatokkal és felhasználni azok meglévő funkcióit, biztonsági opciókat, a felhasználó autentikációt, adat integritást, és mobil eszköz identifikációt.

Fontos megjegyezni, hogy az eMTC (enhanced Machine Type Communication) egy altípusa a LTE-M hálózatnak, gyakran a két kifejezést felcserélve használják, de ez nem minden esetben helyes. Egy eMTC Cat-M1 hálózat sávszélességben 1 MHz körül van és ezért a maximum adatsebesség 1 Mbps, azonban más LTE-M eszközök elérhetik a 10 Mbps átviteli sebességet is (LTE-Cat 1).

A Cat-M1 telepítéséhez is már a legnagyobb telekommunikációs nagyvállalatok csatlakoztak, az NB-IoT-hez képest kevesebb helyen van telepítve egyelőre, azonban így is már sok országban van aktívan működő vagy tesztelés alatt lévő Cat-M1 hálózat. Aktívan üzemelő hálózatok: Telstra (Ausztrália), Orange (Belgium), Telenor (Dánia), Spark (Új-Zéland), SK Telecom (Dél-Korea), Etisalat UAE (Egyesült Arab Emirátusok). Teszt üzemben pedig Claro (Brazília), Telia (Finnország), Orange (Franciaország), O2 Telefonica (Németország), Magyar Telekom (Magyarország), stb [19].

A 3GPP kezdeményezte az ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) felé, hogy az LTE-M az NB-IoT mellett integrálják őket az 5G specifikációjába, mivel mindkét technológia kielégíti az 5G LPWA elvárásait. Az 5G New Radio-t úgy tervezték, hogy változatos telepítési modelleket támogasson, spektrum használatot és eszköz képességeket. Az egyik eset, amit már kezdetektől fogva támogat az 5G NR, az LTE-M és NB-IoT átvitel legyen elhelyezve az 5G NR frekvencia sávok közé. Ennek a folyamatnak az időbeli lefolyása a 2.5. ábrán látható, ahol különböző MTC (Machine Type Communication) szabványok megjelenése figyelhető meg egészen az 5G mMTC-ig (massive MTC).



2.5. ábra. 3GPP Release-k során szabványosított MTC technológiák [20]

2.1.3. A LoRa

LoRa egy fizikai rétegbeli rádiós technológia, ami CSS (chirp spread spectrum) modulációt használ. Célja nagy távolságokra kis mennyiségű adat továbbítása, alacsony energiafelhasználás mellett. Az NB-IoT-val ellentétben nem licencelt frekvenciákat használ, hanem GHz alatti ISM sávban kommunikál 200 kHz-es sávszélesség mellett. Ezáltal csökken a költség, hiszen nem kell fizetni frekvencia licenc díjat, viszont nem képes olyan jellegű QoS-t, és biztonságot garantálni, mint egy licencelt cellákat használó technológia. IoT felhasználási területei hasonlóak az NB-IoT-hoz, jellegzetesen, valamilyen szenzor adatának küldése, M2M kommunikáció, vagy valamilyen okos város alkalmazás [11], [12].

2.1.4. Sigfox

A Sigfox-ot 2009-ben szabványosították, ez a technológia is, kis adatmennyiséget képes továbbítani alacsony sávszélesség és energiafelhasználás mellett. Ehhez BPSK-t (Binary Phase Shift Keying) és UNB-t (Ultra Narrow Band) használ, amivel körülbelül 100 bps sebességet ér el. Az UNB a megfelelő sávszélesség kihasználás mellett, magas vevőérzékenységet és alacsonyabb költségű antennát biztosít. A technológia képes akár 1 millió csatlakozott eszközt is kiszolgálni egy hálózatban, 30-50 km-es terjedést biztosít vidéken, városokban pedig 3 km-t hozzáférési pontonként. A Sigfox nem egy nyílt forráskódú protokoll, hasonlóan a LoRa-hoz nem licencelt ISM frekvenciákat használ, így a rádiófrekvenciás interferencia viszonylag magas. Azokra a felhasználásokra, ahol a downlink kommunikáció és a biztonság fontos szempont nem alkalmas, emiatt főleg okos mérőórák, okos város felhasználások, időkritikus alkalmazásokhoz nem ajánlott [16].

2.1.5. IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow)

A legtöbb WiFi szabvány- beleértve az a, b, g, n és ac-t- 2.4 vagy 5 GHz-n üzemel. Ez a terjedési viszonyoknak egyáltalán nem kedvez, tegyük fel egy termosztátot csatlakoztatunk WiFi-re, ami a 2. emeleten van, a router pedig a földszinten, ebben az esetben a termosztát erősen küszködhet a csatlakozással, ha egy hagyományos 802.11n-t használunk. A rövid terjedési viszonyok javításnak érdekében szabadalmaztatták 2016-ban a 802.11ah-t, ami 900 MHz-en üzemel így alkalmas lehet IoT felhasználások számára. Az alacsony energiaigény érdekében hasonló eljárást használ, mint az Cat-M1 és Nb-IoT esetén az eDRX-et. Azáltal, hogy GHz alatti frekvencián üzemel, alkalmas falakon vagy egyéb akadályokon való adat továbbításra. Ideális kicsi borsztös adatátvitelre, főleg okos világítás, okos épület vagy okos biztonsági rendszerekben való felhasználások számára lehet kedvező [42].

2.1.6. EC-GSM

Az EC-GSM-IoT a Extended Coverage GSM for Internet of Things rövidítése, amit a 3GPP szabványosított, mint LPWA technológia. A licencelt frekvenciákon működik, hasonlóan a GSM-hez. Az EC-GSM-IoT kompatibilis GSM-el és a meglévő GSM architektúrát használja, szoftver frissítések viszont szükségesek a hálózatban ehhez. Modulációtól függően elérhető vele a 200-300 kbps, ami alkalmassá teszi hang, adat, SMS, M2M és IoT alkalmazások adatátvitelére. Az EC-GSM-IoT eszközök képesek elérni a 10 éves üzemidőt, olcsóbbak, mint a meglévő GSM/GPRS eszközök. A technológia nagy számú eszközt támogat egy cellában, valamint biztonságosabb átvitelt biztosít a GSM/EDGE-hez képest. Ezek a tulajdonságok potenciálisan választható technológiává teszik a legtöbb IoT felhasználás számára, különösen az elhagyatott vagy föld alatti helyeken lévő szenzorokkal való adatátvitel számára, a GSM hálózat jó lefedettsége miatt. Nagy hátránya a technológiának, hogy a GSM hálózatok világszerte nem, vagy alig fejlesztik már évek óta, lekapcsolásuk pedig néhány éven belül szükségessé válik [16].

Technológia	Cat-M1	Nb-IoT	EC-GSM	LoRa	Sigfox
Sávszélesség	1.4 MHz	200 kHz	200 kHz	125 kHz	200 Hz
Használt frekvenciák	LTE	GSM és LTE	GSM	900 MHz (ISM)	900 MHz (ISM)
Frekvencia típus	Licencelt	Licencelt	Licencelt	Nem licencelt	Nem licencelt
MCL	155.7 dB	164 dB	154/164 dB	157 dB	160 dB
Adási teljesítmény	20/23 dBm	20/23 dBm	23/33 dBm	14 dBm	14 dBm

2.6. ábra. A legjelentősebb LPWA technológiák rádiós jellemzőinek összehasonlítása

2.2. NB-IoT és Cat-M1 előnyei más technológiákkal szemben

Egy technológia esetén az, hogy jobb lefedettséget biztosít, mint versenytársai nem csak azt jelenti, hogy ezt a technológiát használó eszközök nagyobb valószínűséggel csatlakoznak a hálózathoz, hanem nagyobb valószínűséggel képes a maximális átviteli sebesség közelében kommunikálni az eszköz, továbbá a hálózat esetlegesen kevesebb bázisállomással, gateway-el, jelismétlővel képes lefedni egy adott területet. Emiatt fontos jellemző az MCL (Maximum Coupling Loss), ez a maximális jelvéstesség a csatornán a végeszköz és a bázisállomás között, amikor a küldött adat még értelmezhető és feldolgozható.

$$MCL = \max\{Tx_{power}\} - Rx_{sensitivity} \quad (2.1)$$

A 2.6. ábrán látható, hogy az NB-IoT jobb MCL-t biztosít, mint a konkurens technológiák, 4 dB-el (2,5-ször) a Sigfox-nál és 7 dB-el (5-ször) jobb a LoRa-nál [41].

Sok LPWA felhasználás csak minimális sáv szélességet igényel és helyette a lefedettséget és fogyasztást helyezik előtérbe. Azonban néha a nagyobb sáv szélesség előnyös tud lenni, az operátor számára több lehetőséget biztosítva a fejlődésre az évek során, továbbá jobb teljesítőképességet biztosít limitált körülmények között. Az NB-IoT elméleti sáv szélessége nagyobb, mint a közvetlen riválisoké (LoRa, Sigfox). Ez a tulajdonsága az NB-IoT-nek, hatalmas előny alacsony jel/zaj viszony esetén. -12,6 dB SNR-nél még képes 3 kbps-el működni ellentétben a LoRa/Sigfox-al, amik átviteli sebessége ekkor közel 0-ra esik [41].

A legjelentősebb korlátozás a sáv szélességben az olyan technológiák számára, mint a LoRa és a Sigfox az, hogy nem licencelt spektrumot használnak, ezáltal jogi szabályozások miatt tipikusan a "Duty cycle" 1 százalékában működhetnek csak, míg az NB-IoT és a Cat-M1 tetszőlegesen határozhatja ezt meg. Ez lehet nem jelent problémát normál körülmények között, azonban egy eszköz nem csak *daily status update*-et és néhány bájtot küld minden esetben. Ez problémát jelenthet firmware frissítés vagy magasabb interferencia esetén, amikor a csomagok nagy százalékát szükséges újra küldeni.

Amikor egy LPWA technológiát választunk, biztosnak kell lenni abban, hogy azokon a helyeken, ahova az eszközöket telepíteni szeretnénk, lesz megfelelő hálózati lefedettség. Az NB-IoT és a Cat-M1 telepíthető a meglévő LTE bázisállomásokra és képes párhuzamosan működni a "legacy" technológiákkal. Az a rugalmasság és képesség, hogy az NB-IoT és a Cat-M1 igénybe vehet meglévő hálózati elemeket hatalmas előnyt jelent a többi versenytárral szemben (LoRa, Sigfox), ahol egy új hálózati infrastruktúrát (gateway-ek, bázis állomások, ismétlők, stb.) is építeni kell. Az ilyen telepítések nem csak drágák és lassúak, de tervezési nehézségekkel is járnak, különböző jogi engedély kérések szükségesek és számos egyéb kellemetlen probléma is felléphet, főleg a sűrűn lakott nagyvárosi területeken.

2.3. LPWA technológiák biztonsági kérdései

A legfontosabb elvárás az LPWA alkalmazások többségénél a hosszú beavatkozás nélküli üzemidő, ami megszorításokat eredményez a küldhető adatmennyiség és a számítási kapacitás által generált energia felhasználással szemben. Néhány alkalmazást olyan helyre telepítenek, ahol egyszerűen nem kivitelezhető, hogy megközelítsék rendszeresen az eszközöket. Emiatt olyan biztonsági funkciókkal kell ellátni ezeket az eszközöket, amik hosszú távra, akár több mint 10 évre alkalmassá teszik feladatuk ellátására, valamint célszerű megoldani, hogy a biztonsági frissítések végrehajtását távolról vezérelve is el lehessen végezni. LPWA felhasználásoknál az eszközöknek minimalizálni kell a biztonsági okokból kialakuló úgynevezett energia overhead-et. Ez két tényezőtől tevődik össze, kriptográfiai számításokból és abból, hogy az eszközöknek plusz biztonsági célokat szolgáló bájtokat is küldenie kell, ami ugyancsak fogyasztástöbbletet eredményez.

Mivel sok eszköz távoli helyeken van elhelyezve, esetlegesen felügyelet nélkül könnyű célpont lehet bárki számára, aki manipulálni szeretné ezeket az eszközöket. A szolgáltatóknak ezért a fizikai és elektronikai behatások ellen is védelmet kell biztosítani a készülékek számára, esetleg valamilyen módon kivitelezni, hogy az eszköz tudja jelezni, ha külső behatás érte. Egy kézenfekvő kritikus alkalmazás az okos mérőórák esete, ahol gyakran előfordulhat fizikai manipuláció.

Köszönhetően a fogyasztás, sávszélesség, számítási kapacitás és memóriabeli megszorításoknak LPWA eszközök esetén, án lehetséges hagyományos *internet security protocol*-t – mondjuk TLS – használni, és szinte lehetetlen egy több rétegű biztonsági protokollt implementálni. Azonban mégis valahogyan muszáj biztosítani ezeket a funkciókat, erre az egyik lehetőség, hogy a szállítási réteg nyújt biztonságos eszköz regisztrációt és hozzáférést a kommunikációs csatornához. Ha ez nem realizálható vagy több egymásra épülő réteg szükséges hozzá, abban az esetben jobb megoldást kínálhat, ha az alkalmazási réteg biztosítja az adatok titkosítását.

Összegezve a minimális biztonsági követelmények az LPWA alkalmazások számára:

- Erős kölcsönös autentikáció az eszköz és a hálózat között;
- Erős és hatékony kriptográfiai megoldások a biztonságos kommunikációs csatornához;
- Eszközök fizikai védelme;
- Megbízható eszközazonosítás.

LTE MTC (Cat 1, Cat 0 és Cat-M1) és az NB-IoT támogatja az alábbi elengedhetetlen biztonsági opciókat:

- Felhasználó azonosítás megbízhatósága;
- Entitás autentikáció;
- Adat integritás;
- Eszköz azonosítás.

Az eddig felsoroltakon kívül további LPWA technológiákhoz köthető biztonsági mechanizmust támogatnak, köztük biztonsági intézkedéseket, aminek keretében az adat küldés az MME-n (Mobility Management Entity) keresztül történik (részleges titkosítási mechanizmus a felhasználói adatok számára), valamint biztonsági intézkedések az RRC (Radio Resource Control) felfüggesztésére és folytatására [40].

A közvetlen konkurensok a Sigfox semmi fajta autentikációt vagy titkosítást nem használ a kommunikációs csatornán. A javaslat ilyenkor az, hogy az alkalmazás rétegben kell végrehajtani. A LoRa-nál ennél jobb a helyzet, ott titkosítják a küldött adatot egy alkalmazás rétegbeli session kulcsot használva. Továbbá, mivel sok LPWA technológia ISM frekvenciákon üzemel, ahol nem szükséges semmilyen licenc, hogy valaki kommunikálhasson. Minden körülmény adott, hogy valaki a LoRa specifikációnak megfelelően küldjön adatot, amivel zavarhatja (jamming) a normál LoRa átvitelt, ezáltal akadályozva a LoRa által nyújtott szolgáltatásokat [41].

Az extra számítási műveleteket (integritás biztosítása, titkosítás) és biztonsági eredetű forgalmat is számításba kell venni az akkumulátor élettartamának becslésénél. Ezek a műveletek durván 10% többlet forgalmat jelentenek a napi küldött adatmennyiségen túl.

3. fejezet

Felhasználási területek

IoT technológiák a legkülönbébb alkalmazások számára nyújthatnak kapcsolatot, olyan esetekben, amikor a meglévő mobilhálózati technológiák már nem elégítenek ki minden velük szemben támasztott elvárást. Egy 2015-ös GSMA tanulmány hét LPWA kategóriát fogalmaztak meg: mezőgazdasági és környezeti, általános felhasználói és orvosi cikkek, ipari, logisztikai, okos épületek, okos város és közüzemi szolgáltatások [43].

Az összes előbbi alkalmazás legalább kettőt az alábbi tulajdonságok közül igényel:

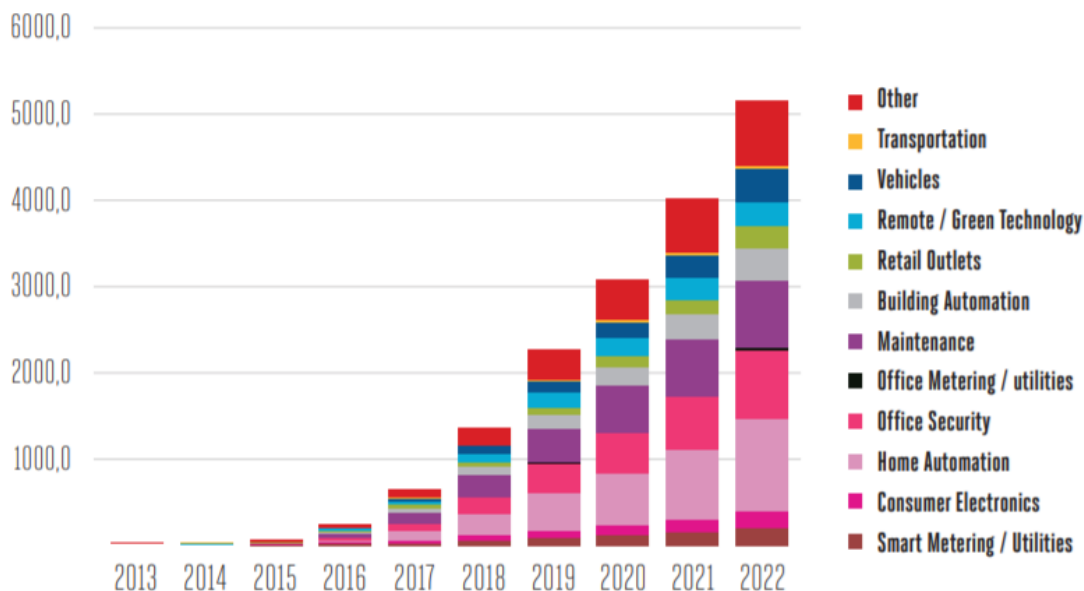
- Nagy területű lefedettség;
- Kedvező terjedés igénye (például mély beltéri helyek esetén);
- Alacsony költség;
- Korlátozott energiaellátás.

3.1. IoT piaci előrejelzések

Jelenlegi elemzések szerint a LPWA kapcsolatok száma évről évre fokozatosan nőni fog. Egy érdekes statisztikát fogalmaz meg a Strategy Analytics, állításuk szerint 2019-re több mint 2 milliárd, 2022-re 5 milliárdnál is több LPWA kapcsolat lesz világszerte. Ezek az előrejelzések az összes LPWA technológiát tartalmazza, ami a Strategy Analytics szerint elérhető lesz a piacon: a 3GPP licencelt frekvenciákon működő szabványok, beleértve az EC-GSM-IoT-t, NB-IoT-t és a Cat-M1-t, továbbá a nem licencelt frekvenciákon működő megoldásokat is. A rövid hatótávolságú rádiós technológiákat (Bluetooth, Wi-Fi, stb) nem tartalmazza ez a becslés (3.1. ábra).

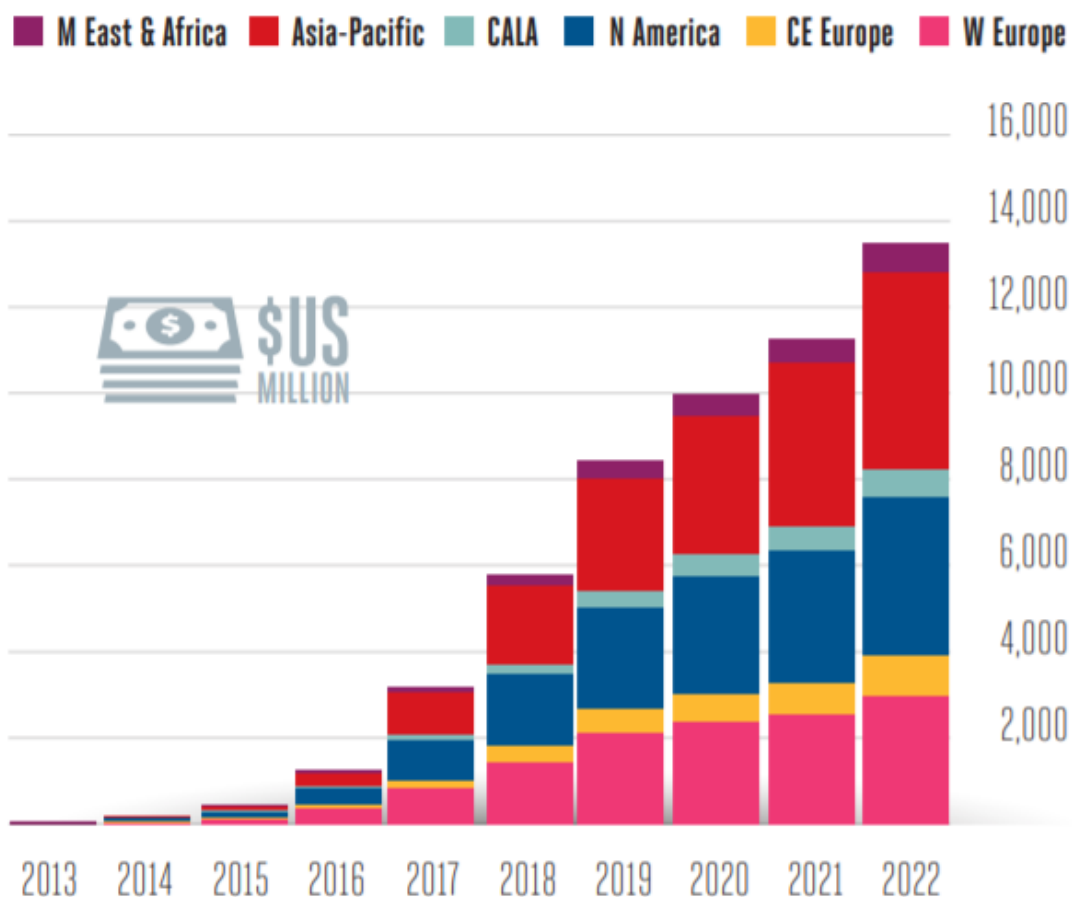
Az LPWA technológiák nem csak a fejlett, hanem a fejlődő piacokon is széles körben megjelennek majd. A későbbiekben nagy szerepet tölthetnek be ezek az LPWA

technológiák a mezőgazdaság termelékenységének és a gazdaságos energia és vízfelhasználás elősegítésében. 2022-re a Strategy Analytics szerint az ázsiai régió lesz a legnagyobb IoT piac, mögöttük Észak-Amerika és Európa fog állni. Az előrejelzés szerint az LPWA felhasználásokból keletkező árbevétel elérheti a 14 milliárd dollárt 2022-re (3.2. ábra).



Source: Strategy Analytics

3.1. ábra. A legjelentősebb LPWA technológiák [22]



Source: Strategy Analytics, February 2016

3.2. ábra. A legjelentősebb LPWA technológiák [23]

3.2. Jellemző IoT felhasználások és csoportosításuk

További vizsgálatok érdekében az LPWA alkalmazásokat 4 kategóriába sorolom a következő szempontokat figyelembe véve:

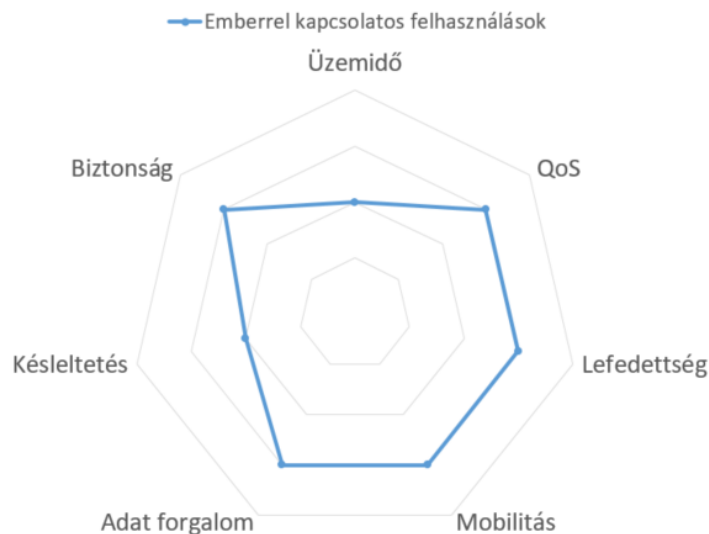
- Fogyasztás- akkumulátor élettartam;
- Lefedettségi szükséglet;
- Várható napi adatmennyiség;
- Késleltetés;
- Mobilitás.

A felhasználásokat a hasonlóságaik alapján sorolom be az adott csoportba. Nyilván több és kevesebb csoportot is lehetne alkotni, valamint sok felhasználásról nem feltétlen eldönthető melyikbe csoportba sorolandó.

3.2.1. Emberrel kapcsolatos felhasználások

Az első csoportba azokat az alkalmazásokat sorolom, amik valamilyen módon személy vagy tárgy követését, monitorozását valósítják meg – gyermek vagy háziállat helyzetének meghatározása –, különböző életjeleket figyelő egészségügyi felhasználások, biciklikövetés és wearables. A legtöbb üzenet ezekhez az alkalmazásokhoz valamilyen esemény bekövetkezésének hatására generálódnak nagyobb számban, például ha kutyánkat nem találjuk, szükség lehet gyakoribb üzenet küldésre, azonban általános esetben, ha az udvaron van erre nincs szükség és elegendő több óránként egy üzenet. Mindegyik alkalmazás 2 irányú kommunikációt igényel. A downlink iránynak a következő funkciókat kell támogatnia ezeknél az alkalmazásoknál:

- Biztonsági kulcs csere;
- Üzenet nyugtázása;
- Firmware frissítése vagy patchelés;
- Geofencing vagy paging.



3.3. ábra. Emberrel kapcsolatos felhasználások tulajdonságai

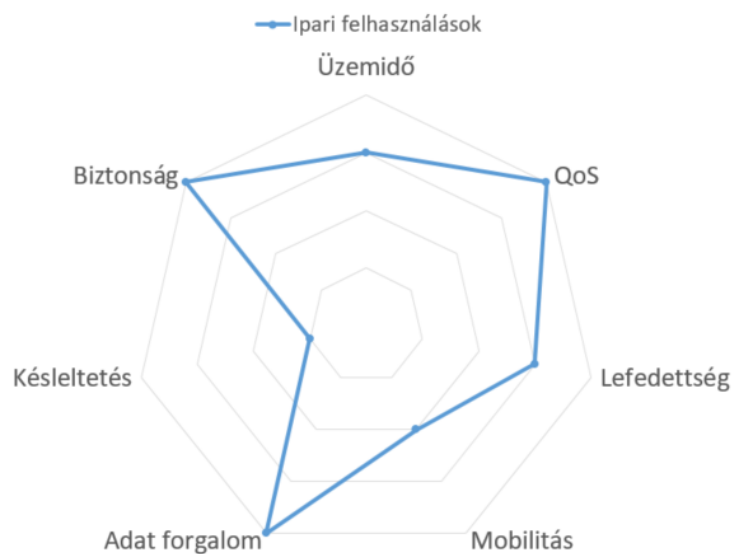
További szükséges jellemzők:

- Személy helyzetének követéséhez és wearables alkalmazásokhoz, magas mobilitás szükséges
- Biztonsági követelmények magasak lehetnek, mivel ezeknél az alkalmazásoknál személyes adatok is a forgalomba kerülnek
- Hang átvitel igénye fellép személy követés, wearables esetén

3.2.2. Ipari és mezőgazdasági felhasználások

A második csoportba ipari alkalmazások, mezőgazdasági felhasználások közül pedig azok kerültek, amelyek magas QoS-t és megbízhatóságot, valamint nagyobb downlink irányú forgalmat igényelnek. Ennél a csoportnál az üzenetek jelenős számú küldése ugyancsak valamilyen esemény hatására történhetnek, mondjuk, ha egy mért érték egy bizonyos szintet elér, naponta akár 100 üzenetváltást is eredményezhet. A két irányú kommunikáció itt is szükséges az összes alkalmazás esetében. A downlink iránynak támogatnia kell:

- Üzenetek nyugtázását;
- Biztonsági kulcs cserét;
- Távoli beavatkozás lehetőségét, mezőgazdasági, ipari alkalmazásoknál paraméterek módosítása;
- Firmware frissítése vagy patchelés.



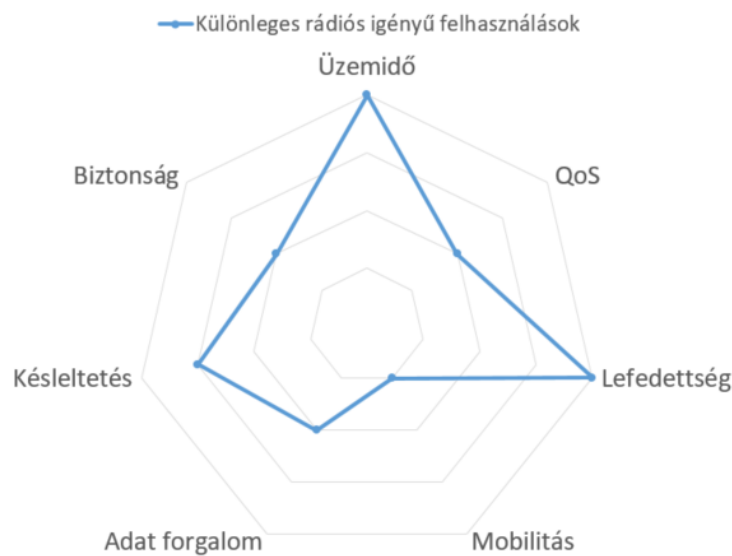
3.4. ábra. Ipari felhasználások tulajdonságai

3.2.3. Speciális rádiós igényű felhasználások

A harmadik csoport két részre bontható felhasználások szempontjából, azonban ehhez hasonló rádiós tulajdonságok szükségesek, így ezek az alkalmazások mégis egy csoportot alkotnak. Ide olyan felhasználások sorolhatók, melyek mély beltéri jelbehatolást igényelnek, ide tartozik például okos víz-, gáz-, villanyórák, okos parkolás, lakás automatizálás, okos áramhálózat. A másik alcsoportba olyan alkalmazások tartoznak, melyek a szabadban találhatóak és nagy területeket kell lefedni hozzá. Okos

város alkalmazások, olyan mezőgazdasági felhasználások, ahol a megfigyelt objektumok helye nem változik. Például a termőföld állapotának megfigyelése és környezeti szenzorok általi adatgyűjtés alkotja ezt az alcsoportot. Itt az üzenetek nem valamilyen esemény hatására keletkeznek, hanem meghatározott idő intervallumonként kerülnek kiküldésre. Két irányú kommunikáció azonban itt is több okból szükséges:

- Üzenetek, riasztások nyugtázása;
- Firmware frissítése vagy patchelés;
- Távoli konfiguráció céljából.



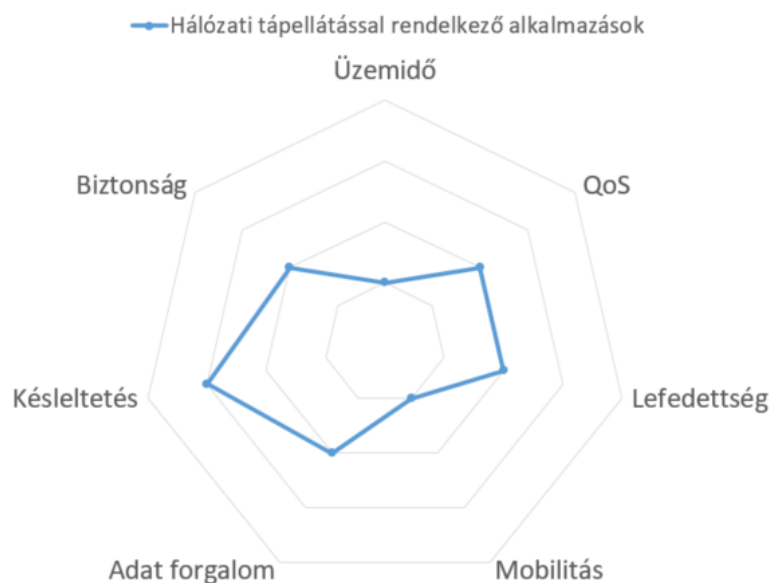
3.5. ábra. *Különleges rádiós igényű alkalmazások tulajdonságai*

3.2.4. Hálózati tápforrással rendelkező alkalmazások

A negyedik csoport sajátossága az, hogy nem szükséges ezen alkalmazások számára nagy kapacitású akkumulátor, csupán tartalék energiaellátás céljából, ugyanis ezen alkalmazások folyamatosan hálózati energiaellátással rendelkeznek. Ide tartoznak az okos városi világítások, különböző automaták, okos hűtő, mosogatógép, mosógép állapotának monitorozása stb. Ezeknél az alkalmazásoknál csupán napi néhány üzenet kerül kiküldésre meghatározott időnként. A downlink kapcsolatnak a következőket kell biztosítania:

- Üzenetek nyugtázása;
- Időszinkronizáció szükséges utcai lámpáknál;

- Távoli beavatkozás lehetőségét, például lámpa be és kikapcsolása, hűtő szabályozása stb.;
- Firmware frissítése vagy patchelés.



3.6. ábra. Hálózati tápellátással rendelkező alkalmazások tulajdonságai

Csoport	Emberrel kapcsolatos	Ipari felhasználás	Különleges rádiós igény	Hálózati tápellátás
Akkumulátor	5 év /ezek az eszközök gyakran tölthetők	5-10 év	10-15 év	akkumulátor csak tartalék
Lefedettség	beltéri lefedettség (mérsékelt)	belétéri és kültéri	kültéri és mély beltéri lefedettség (+20dB)	kültéri és beltéri
Mobilitás	szükséges - séta, futás	szükséges, de sok mozdulatlan alkalmazás	nem szükséges	nem szükséges
QoS	közepestől magas	Változó: közepes-magas, gyors visszajelzés szükséges lehet sürgős eseteknél	közepes	Változó: alacsony a háztartási gépekhez közepes a többihez
Késleltetés (felső korlát)	10 mp, szükség lehet 2-5 mp néha	1-2 mp	60 mp adatgyűjtéshez 10 mp beavatkozáshoz	30 mp
Egyéb tulajdonság	nagy sávszélesség hangátvitel	kis késleltetés nagy megbízhatóság	jobb lefedettség	hálózati tápellátás
Adatigény	2000-10000 bájt	5000-10000 bájt	100-3000b bájt	100-1000 bájt
Felhasználások	személy/állat helyzete életjelek monitorozása biciklikvetés wearables mezőgazdasági haszonállatok	ipari alkalmazások mezőgazdasági (beavatkozással)	okos mérőórák (víz, gáz, villany) okos parkolás épület automatizálás termőföldek, környezet monitorozása	okos város világítás okos háztartási gépek (hűtő, mosógép, gáztűzhely stb.)

3.7. ábra. Felhasználások jellemzőit összefoglaló táblázat

A 3.7. ábrán lévő táblázatban összefoglaltam a felsorolt alkalmazáscsoportokat, azok jellegzetességeit, mely alkalmazások tartoznak az adott csoportba, valamint a adatforgalmi igényekre is adtam egy becslést. Az adatforgalmak több csoportnál tág intervallumot fednek le, ennek oka hogy több szempontot vettem figyelembe a csoportok meghatározásánál, nem csak az adatigényt, továbbá az egyéni igények egy

adott felhasználásnál felül is írhatják ezeket a becsléseket. Azonban így is figyelhetőek meg jellegzetességek egy adott csoportok adatforgalmaiban.

4. fejezet

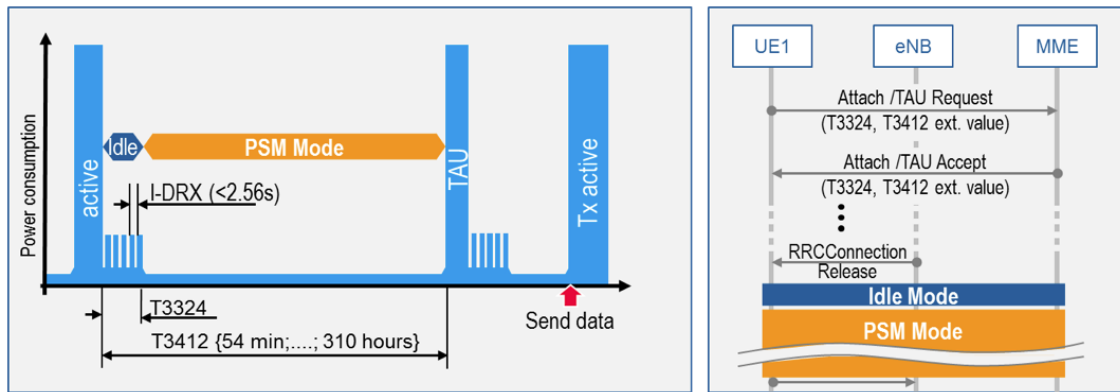
IoT eszközök fogyasztása

4.1. Funkciók a fogyasztás csökkentéséhez

4.1.1. Power Saving Mode

A Power Saving Mode a 3GPP Release 12-ben lett publikálva, az IoT eszközök fogyasztásának csökkentése céljából. Az előnye ebből a mechanizmusból az eszköznek, hogy nagyobb mértékben tudja befolyásolni az energiafogyasztását. Sok IoT alkalmazásnál szükséges, hogy meg legyen ez a rugalmassága az energiafogyasztás terén, továbbá a megfelelő implementálása a PSM-nek megelőzheti vagy csökkentheti a hálózati torlódásokat is. Az eszközök időzítői állíthatók úgy, hogy valamekkora eltolással legyenek beállítva egymáshoz képest az egyes eszközök felébredési periódusai. Ezzel a módszerrel elkerülhető, hogy egyszerre ébredjenek fel és próbáljanak kommunikálni a hálózaton. A PSM mód hasonló a kikapcsoláshoz, azonban ekkor az eszköz regisztrálva marad a hálózati berendezésekben [44].

Amikor az eszköz aktiválja a PSM-et 2 időzítő értéket küld az Attach vagy a Tracking Area Update-ben (TAU). Az első időzítő a T3324, ami definiálja, hogy az eszköz mennyi ideig maradjon aktív TAU vagy Attach után. A második időzítő, pedig a T3412, ami meghatározza, hogy mennyi időnként kell az eszköznek felébrednie és TAU-t küldenie (4.1. ábra).



4.1. ábra. PSM szemléltetése ábrán [24]

T3324 aktív időzítő

Az eszköz Attach vagy TAU alatt T3324 aktív időzítő értéket kér az MME-től. A T3324 aktív időzítő meghatározza azt az időtartamot, amíg az eszköz elérhető és az MME által pagin üzenetekkel elérhető. Az időzítő akkor indul, amikor az eszköz aktív módból IDLE-be lép, amikor az időzítő lejár PSM mód következik. Az MME az aktív időzítő értékének meghatározásakor számításba veszi az eszköz által kérvényezett értéket, azonban nem feltétlen fogja azt meg is kapni az eszköz. Az MME a T3324 időzítő IE-t (Information Element) az ATTACH ACCEPT vagy TAU ACCEPT üzenetben teszi, de csak akkor ha a T3324 időzítő IE-t tartalmazta az ATTACH REQUEST vagy a TAU REQUEST üzenet. Az eszközök, amelyek használják a PSM-et csak arra az időre elérhetőek a hálózat számára, amíg az aktív időzítő fut, ez lehet egy adat átvitel vagy TAU/RAU utáni időintervallum. Az MME megengedi a 0 értékű T3324 időzítőt is, ez azt jelenti, hogy az eszköz aktív mód után egyből PSM-be lép [45].

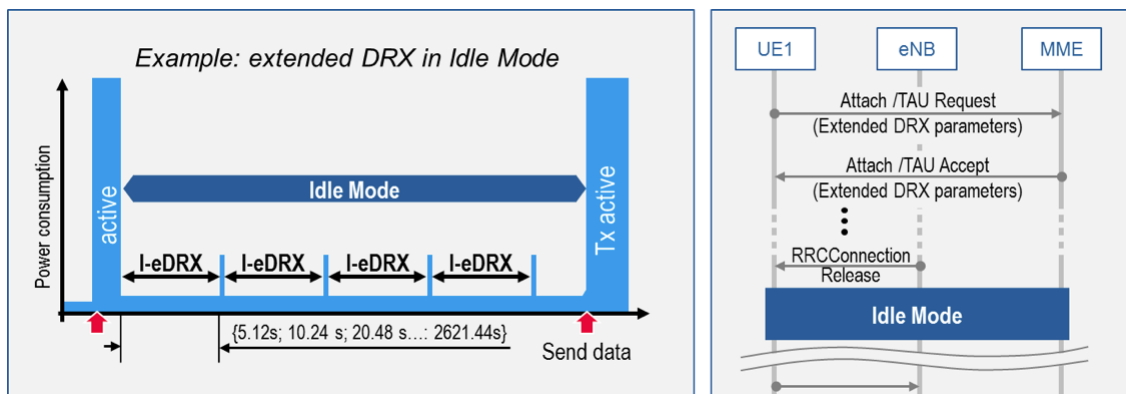
T3412 kiterjesztett időzítő

A T3412 időzítőre sokszor úgy is hivatkoznak, hogy Tracking Area Update időzítő. A TAU azt a célt szolgálja, hogy az eszköz meghatározott időnként jelentse az elérhetőségét a hálózat számára. A T3412 időzítő értéke a hálózat az ATTACH ACCEPT vagy a TAU ACCEPT üzenet részként küldi az eszköz számára. Az eszköznek ekkor alkalmaznia kell a kapott T3412 értéket mindaddig, amíg új érték nem érkezik a hálózattól. Egy hosszabb periodikus időzítő is lehetséges az eszközök számára, amit a T3412 kiterjesztett időzítő nyújt. Ha az eszköz támogatja a kiterjesztett T3412 időzítő értékeket, akkor a mobil állomástól kaphat vissza egy T3412 kiterjesztett időzítő IE értéket az ATTACH ACCEPT vagy a TAU ACCEPT üzenetben. Az MME itt is figyelembe veszi az eszköz által kért T3412 kiterjesztett időzítő értéket,

azonban nem feltétlen ezt küldi vissza az eszköz számára jóváhagyva [45].

4.1.2. Extended Discontinuous Reception

Az Extended Discontinuous Reception (eDRX) a kiterjesztése egy már létező LTE opciónak, amit fogyasztás csökkentés céljából használnak az eszközök számára. eDRX-et PSM nélkül is lehet használni azonban, használható a kettő együttesen is. Így még tovább növelhető az akkumulátor élettartama. Manapság már nagyon sok okostelefon használja a DRX-et, az akkumulátor üzemeidőjének növelése céljából, ilyenkor egy rövid időre az eszköz kikapcsolja a rádió moduljának vevő részét. Ekkor a telefon nem elérhető a hálózat számára, azonban ez megoldható úgy hogy a telefon használója ebből semmit se érzékeljen a megfelelő DRX beállításokkal (4.2. ábra).



4.2. ábra. eDRX szemléltetése ábrán [25]

Az eDRX lényegében ugyanazt nyújtja, mint a DRX, azonban az időtartam amíg nem elérhető az eszköz jóval hosszabb időre is konfigurálható. IoT alkalmazások számára teljesen elfogadható, ha egy eszköz nem elérhető percekre vagy akár sokkal tovább is. Ha nem is nyújt akkora energia takarékoságot, mint a PSM az eDRX egy remek kompromisszum lehet a fogyasztás csökkentése és az eszköz elérhetősége között. Az eszközök órákig, akár napokig is alvó módban tud maradni a paging-ek között, ezzel növelve az akkumulátor élettartamát. Annak érdekében, hogy az eszköz használni tudja az eDRX-et kérvényeznie kell eDRX paramétereket az ATTACH és TAU üzenetek során. Az előzetes konfigurációk alapján az MME elfogadja vagy elutasítja ezeket a kéréseket. Ha elfogadja, előre meghatározott, nem tetszőleges eDRX paramétereket fog kapni az eszköz, az operátor előírásaitól és az eszköz által kért értéktől függően [44], [46].

4.2. Fogyasztást befolyásoló tényezők

Az eszközök fogyasztása egyszerűen számolható, ha tudjuk az egyes módokban (aktív, IDLE, alvó) a különböző események során mennyit fogyaszt az eszköz és ismerjük, hogy ezek az események mennyi ideig tartanak. Ez a modell viszont csak ideális esetben igaz, a valóságban nagyon sok parazita hatást figyelembe kell venni egy eszköz élettartamának becslésekor. A következőkben ismertetem, mik azok a hatások amiket figyelembe kell venni, mit is jelentenek ezek pontosan, valamint milyen tulajdonságú akkumulátort érdemes választani egy IoT alkalmazáshoz, ahol a várható üzemidő 10 éves nagyságrendbe esik.

Amíg az eszköz aktív módban van, tehát ad vagy vesz éppen valamilyen adatot a rádiós interfészén, ekkor fogyaszt a legtöbbet, ezért is szeretnénk, hogy amikor csak lehet alvó állapotban legyen az eszköz. Aktív módban a fogyasztás függ a lefedettségi adottságoktól, tehát, hogy milyen teljesítménnyel kell adni, vagy venni az adott adatot, függ az adat nagyságától és az időtartam hosszától, amit ebben a módban tölt az eszköz. Az időtartamot viszont a másik két szempont, az adatforgalom és a lefedettség nagyban befolyásolja, hiszen nem mindegy, hogy mekkora adatot és milyen rádiós viszonyok között kell küldeni az eszköznek. Egy eszköznek, aminek jó lefedettségi viszonyai vannak, rugalmas modulációs képességekkel egy adott hosszúságú üzenetet sokkal rövidebb idő alatt ki tud küldeni, mint egy akár ugyanolyan tulajdonságokkal rendelkező eszköz gyengébb rádiós viszonyok között. Ennek a fogyasztás szempontjából is nagy jelentősége van, ahogy említettem ekkor fogyaszt a legtöbbet az eszköz, tehát a megfelelő hálózati lefedettség is segít a hosszú üzemidő elérésben.

Az IoT eszköz akkumulátorának optimális megválasztása az egyik legfontosabb feladat egy IoT szolgáltatás implementálása során [27]. Egyszerűen azért, mert hiába van konfigurálva minden más helyesen, ha egyszerűen nem működik az eszköz, mert lemerült az akkumulátor. Kiválasztani a megfelelő akkumulátort könnyebbnek hangzik, mint valójában, ekkor egyszerre nagyon sok tényező szerint kell döntést hozni és megtalálni a megfelelő egyensúlyt a technikai paraméterek és a költség között. A hangsúlyos technikai paraméterek a következők:

- A megfelelő energia forrás kiválasztása a legfontosabb tényező az akkumulátor viselkedésének szempontjából. A régebbi típusú akkumulátorok - Lead Acid, NiCd és NiMh, stb.- még mindig sok hagyományos alkalmazás használja, azonban az IoT eszközök igényeit nem elégítik ki. IoT eszközökhöz használnak elsődleges (egyszer használatos) vagy másodlagos (tölthető) Lítium alapú akkumulátorokat. A leggyakrabban használt Lítium alapú akkumulátorok:

- Lítium mangán-dioxid
- Lítium tionil-klorid
- Lítium kobalt-oxid
- Lítium vas-foszfát

Mindegyiknek megvan a saját előnye és korlátai. Részletesebben a Lítium tionil-kloridot ismertetem majd.

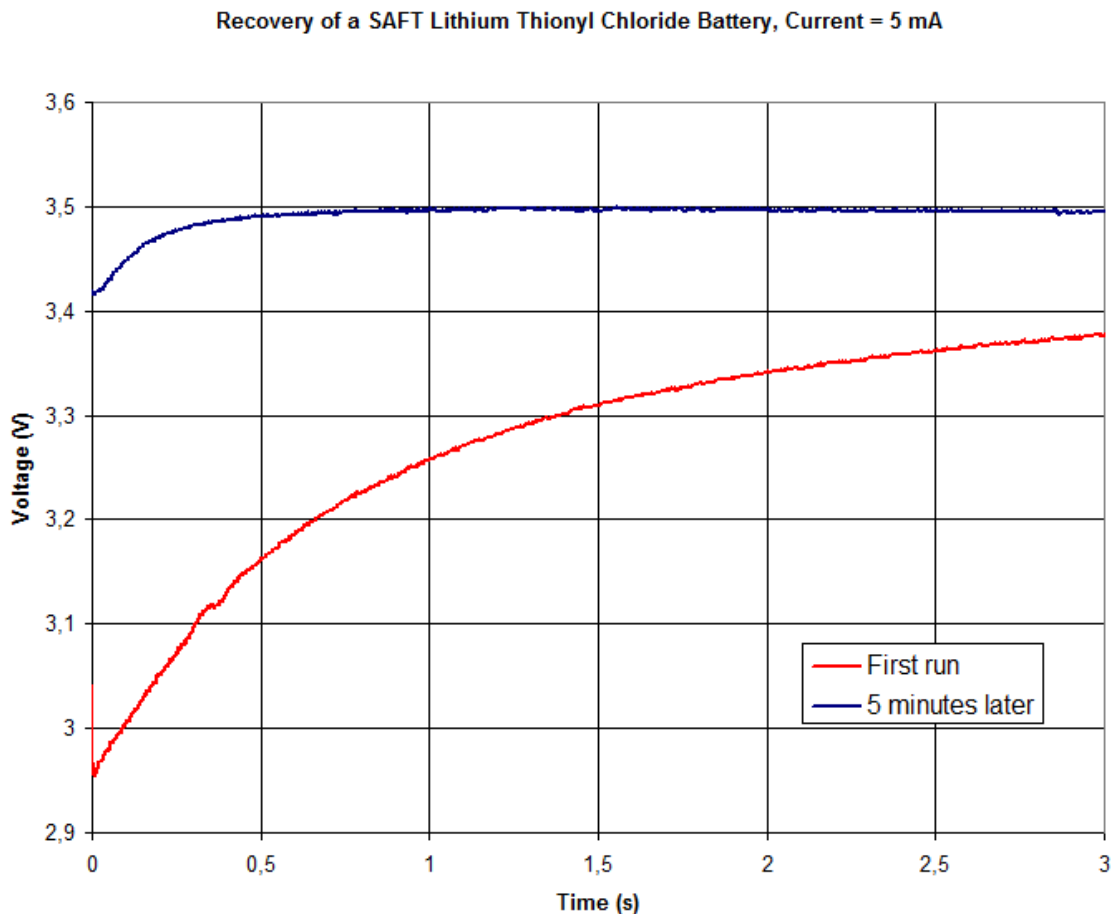
- Töltési ciklusok száma az a szám, ahányszor egy másodlagos akkumulátor feltölthető és lemeríthető. Különböző típusú akkumulátoroknál ez a szám nagyon változó lehet, akár a több ezret is elérheti.
- A cella feszültsége változó lehet az akkumulátor típusától függően. Az adott alkalmazáshoz választva a megfelelő akkumulátort a megfelelő cella feszültséggel nagyban befolyásolja a hatékonyságot, azt hogy mennyit is fogyaszt majd az eszköz
- A feszültség stabilitás a tárolt energia mennyiségére lehet hatással az akkumulátoron belül. A Lítium tionil-kloridnak van talán a piacon a legjobb feszültség stabilitása, évente kevesebb, mint 1%-át veszíti el a tárolt töltésnek, ezáltal hosszú idő után is szinte az egész akkumulátorban tárolt energiát fel tudja használni az eszköz, valamint a várható élettartam is növekszik, ezáltal pontosabban lehet becsülni.
- Maximális áramfelvétel. Figyelembe kell venni az akkumulátor választásakor az adott felhasználás áram fogyasztási jellegzetességeit, előfordulnak-e nagy értékű áramcsúcsok vagy csak kisebb ingadozások.
- Önkisülési áram, a belső kémiai folyamatok miatt, egy akkumulátor akkor is merül az idő múlásával, ha nincs használatban.

4.3. Akkumulátor választásának szempontjai

Attól függően, hogy mi a felhasználás választható felhasználó vagy ipari, elsődleges vagy másodlagos cella. Amíg a felhasználói cellák hagyományos felhasználásokhoz szűk, normál hőmérséklet tartományhoz alkalmasak, addig az ipari akkumulátorok akár $+125^{\circ}\text{C}$ -ig is megfelelőek lehetnek. Mobil telefonoknál gyakran előfordul jelenleg, hogy meleg nyári napokon az akkumulátor hamarabb lemerül, mint mondjuk télen. Ez azért van, mert a legtöbb akkumulátor nagyon érzékeny a hőmérsékletre, ehhez az akkumulátor adatlapján érdemes megnézni a hőmérsékleti profilt. Például

egy kültéri IoT eszköz esetén, ahol a hőmérséklet szerinti működési tartomány Magyarországon körülbelül -10°C és $+50^{\circ}\text{C}$ fok között van, azt szeretnénk, ha ebben a tartományban a lehető legkevesebb hatása lenne a hőmérsékletnek az akkumulátorban tárolt töltésre [26].

Passziváció egy jelenség, ami a lítium akkumulátorokat jellemzi. Egyik szempontból előnyös, mert ez eredményezi az alacsony önkisülési tulajdonságot a lítium akkumulátorok számára, ezáltal nagyon hosszú üzemidő érhető el. Azonban hátránya, ha az akkumulátort hosszú idő után akarjuk újra használni fellép az úgynevezett feszültség késleltetés jelensége. A feszültség ekkor kezdetben leesik, majd idővel áll be az elvárt értékre. A passzivációs réteg maga egy vékony nagy ellenállású réteg, ami az akkumulátor elektrolitja és lítium anód között keletkezik. Amikor tölteni kezdjük a cellát, a passzivációs réteg nagy ellenállása miatt leesik a feszültség, majd fokozatosan kezd beállni a működési értékre, ahogy 4.3. ábrán látható [29].



4.3. ábra. Feszültség késleltetés jelensége [28]

Egy IoT eszköz élettartamának becslésekor a következő szempontokat kell figyelembe venni:

- Az akkumulátor kapacitása, jellemzően Ah-ban, mAh-ban megadva

- A hőmérséklet szerinti működési tartomány, hőmérséklet-kapacitás karakterisztika
- Akkumulátor önkisülési rátája
- Időzítési kérdések- számítási és kommunikációs folyamatok hossza
- Az eszköz fogyasztása különböző kiszámítható vagy egyedi események során Ezen szempontok alapján már lehet egészen kielégítő becsléseket meghatározni adott eszköz működési idejére.

A tipikus IoT eszközhöz a következő paraméterekkel kell akkumulátort választani:

- Kapacitás nagyobb mint 3 Ah
- 400 mA folytonos áramfelvételt tudjon biztosítani az eszköz számára
- Hőmérsékleti tartomány:-20°C-tól +85°C-ig
- A hőmérséklet változásának a lehető legkisebb hatása legyen a tárolt töltésre, ez olyan felhasználásoknál fontos, ahol nagy a hőmérséklet ingadozás, jellemzően szabadtéren
- Feszültség viselkedése a hőmérséklet függvényében (alacsony hőmérsékleten csökken a feszültség is, ezáltal figyelni kell, hogy az előforduló hőmérséklet érték mellett is az eszköz elfogadható feszültség tartományában maradjon az akkumulátor feszültsége)
- Feszültség viselkedése hosszú impulzus alatt: ezt az információt a gyártók gyakran nem közlik az adatlapokon, azonban gyakori, hogy egy hosszú impulzus során az akkumulátor feszültsége leesik. Emiatt érdemes teszteket végezni, hogy ekkor is a működési tartományban marad-e a feszültség)
- Spirál kialakítású akkumulátorok jobban preferáltak az orsó alakú kialakítással szemben, mert nem szükséges egy nagy kapacitású kondenzátor használata magas áram impulzusok esetén.

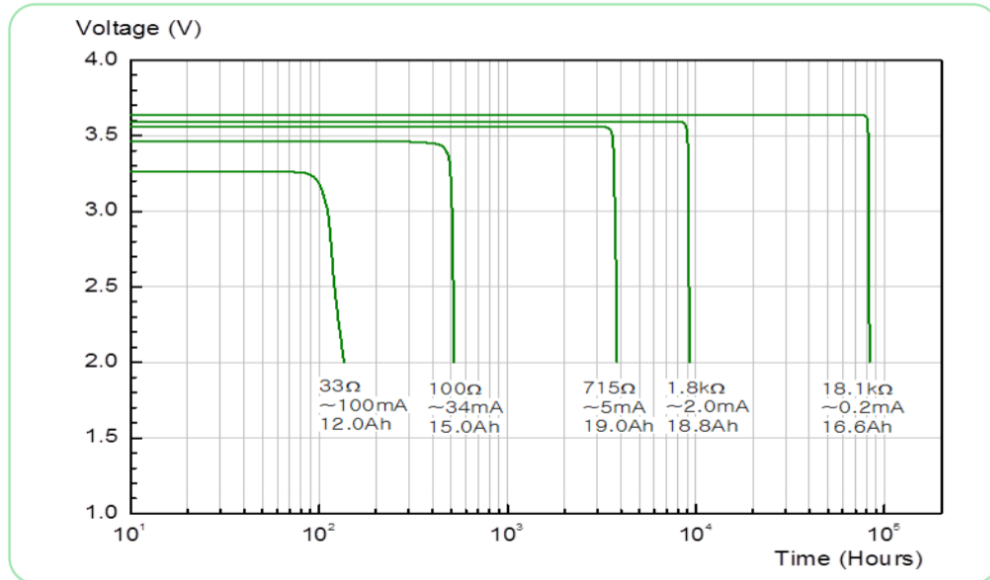
Lítium tionil-klorid akkumulátorok

A LiSOCl₂ (Lítium tionil-klorid) jelenleg az egyik legjobb akkumulátor IoT alkalmazások számára, a következő okok miatt:

- Nagyon alacsony önkisülési ráta
- Magas energia / egység tömeg

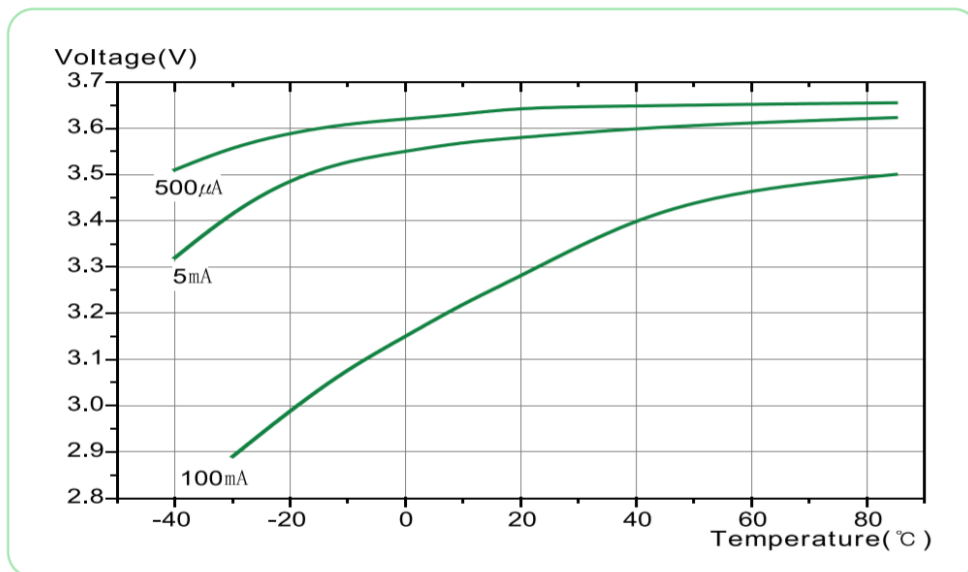
- Széles hőmérsékleti működési tartomány
- Széles tartományban lapos hőmérséklet-töltési kapacitás karakterisztika (a hőmérséklet ingadozására nem érzékeny)

Discharge Characteristics at +20 °C



4.4. ábra. *Lítium tionil-klorid önkisülési karakterisztikája +20 °C-on [30]*

Operating Voltage



4.5. ábra. *Lítium tionil-klorid működési feszültsége a hőmérséklet függvényében [30]*

5. fejezet

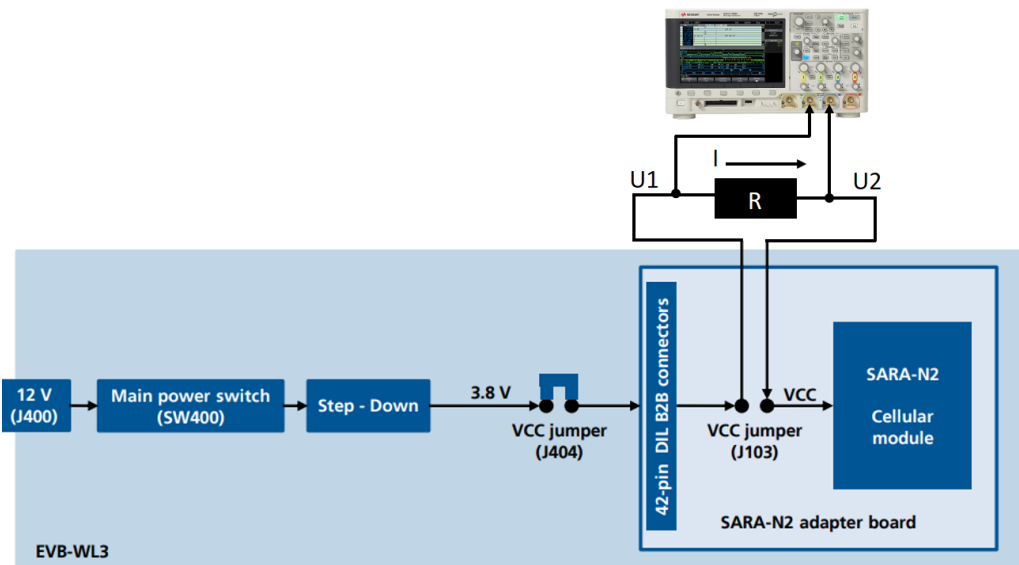
Mérések

Dolgozatom során szeretném megbecsülni a különböző IoT alkalmazásokban használt eszközök várható üzemidjét. Ehhez mérések során lényegében két módszer lehetséges: az egyik, hogy megmérjem a tényleges fogyasztását a chipsetnek; vagy az akkumulátor töltöttségi szintjének csökkenése alapján határozom meg az eszközöm fogyasztását. Mindkét módszer kivetelezhetőnek tűnik, azonban egyáltalán nem olyan egyszerűek, mint amilyennek hangzanak.

Az akkumulátor töltöttségének mérését pontosan végrehajtani bonyolult folyamat. A legegyszerűbb módszer az akkumulátor feszültségének mérése alapján következtetni a töltöttségi állapotra. Javasolt nem zárt áramkörben végezni a mérést, valamint több órát pihenni hagyni az akkumulátort mérés előtt – akkumulátor gyártók szerint 1 napot is a minél pontosabb mérés érdekében. Megmérjük az akkumulátor feszültségét, majd az adott akkumulátor adatlapja szerinti a feszültség karakterisztika alapján próbálunk következtetést levonni, milyen töltöttségi szinttel rendelkezik az akkumulátor. Következtetésünk pontossága függ a karakterisztika alakjától, meredekségétől: minél meredekebb a feszültség-üzemidő karakterisztika, annál pontosabban tudjuk meghatározni a jelenlegi töltöttségi szintjét az akkumulátornak. Azonban a meredek feszültség karakterisztika éppen egy negatív tulajdonság működés szempontjából, különösen IoT alkalmazásoknál, ahol sok év után is szeretnénk, hogy az akkumulátor képes legyen az eszköz működési tartományába eső feszültséget szolgáltatni és jó feszültség stabilitással rendelkezzen. A töltöttségi szintet 10%-nál pontosabban még egy meredekebb ólom-sav akkumulátor esetében sem igazán lehet megállapítani. A 4.4. ábrán látható Lítium tionil-klorid-ét, pedig szinte lehetetlen ilyen módszerrel meghatározni. Létezik még több mérési módszer is: Coulomb-számlálás, impedancia spektroszkópia, stb., azonban mindegyiknek megvannak hátrányai és korlátai.

5.1. Mérési összeállítás és eredmények

A korábban felsorolt okokból közvetlenül az eszköz áramfelvételét mértem ohmos ellenálláson keresztül. A mérés során a nehézséget az jelentette, hogy egyszerre hét nagyságrendet kell átfogni, hiszen aktív módban 100 mA körüli az áramfelvétel, alvó módban pedig pár μA jellemző az adatlapok szerint. NB-IoT méréseim során a uBlox Sara N-210 [47] chipsetet használtam, valamint az ehhez tartozó EVB-WL3 [49] fejlesztő boardot. Egy 2 Ohm nagyságú ellenállást kötöttem sorosan a chipset és tápellátás közé, majd az ohmos ellenálláson eső feszültségből határoztam meg a chipset áramfelvételét. Az ellenállás adatlapja szerint 1%-os szórással rendelkezik, multiméres mérés során 2.002 Ohm-nak mértem. A feszültség mérésére egy Agilent DSO-X 3054A [50] oszcilloszkópot használtam, a képernyőn rögzített értékeket későbbi feldolgozás céljából egy 16000 mintából álló csv fájlba mentettem ki, majd ezeket az értékeket Matlab-ban dolgoztam fel. A mérési elrendezés a 5.1. ábrán látható.



5.1. ábra. Mérési elrendezésem [31]

Cat-M1 mérésemet a dolgozat beadási határidejéig nem tudtam elvégezni. Sajnos az ígért Cat-M1 cellák, külső tényezők miatt még nem indultak el, így a mérés egyelőre meghiúsult ¹. Mivel a uBlox Sara N-210 csak NB-IoT képes, ezért Cat-M1 mérést már egy másik fejlesztő eszközzel végzem, egy Quectel BG 96 [48] chipsettel és az ahhoz tartozó fejlesztő board-al. Mérési elrendezés, valamint az adatok feldolgozása Cat-M1 hálózat esetén is azonos az NB-IoT hálózaton használttal, csupán az adatforgalmi értékek változnak, valamint várhatóan a fogyasztás is magasabb lesz,

¹Ha lesz lehetőség a november 14-i prezentáció ideje előtt elvégezni és kiértékelni, abban az esetben előadásomban szerepelni fog a Cat-M1 hálózati átvitel közben mért fogyasztás is.

de az eljárás megegyezik.

Az üzemidő becsléséhez elemi események fogyasztását mértem, majd pedig ezek összegéből végeztem számításokat. Az elemi események a következők:

- Eszköz újraindítása;
- Konfigurációs parancsok (frekvencia kiválasztása, debugoláshoz hasznos parancsok, adási teljesítmény beállítása, stb.);
- Antenna aktiválása;
- Csatlakozás a hálózathoz;
- PSM mód;
- IDLE mód, paging üzenetek;
- Különböző méretű adatok küldése (külön Power Class 3 és Power Class 5 adási teljesítmény mellett).

A fejlesztő boardnak a megfelelő AT parancsot kiadva mértem a chipset fogyasztását. A pontosabb esemény beazonosításhoz az oszcilloszkópon külső triggerként a boardon található UART Rx pin-re triggereltem, ezáltal a kiadott AT parancsok után könnyen megtaláltam az esemény elejét.

A fogyasztás számításához képeztem az U_1 és U_2 feszültség különbségét, majd pedig Matlab segítségével meghatároztam az adott esemény során az ohmos ellenálláson eső feszültség effektív értéket, majd ezt leosztva a 2,002 Ohm-mal kaptam az ellenálláson átfolyó áram effektív értékét.

$$I_{RMS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |U_{1n} - U_{2n}|^2}}{R} \quad (5.1)$$

Megmérve az adott események időtartamát, már könnyen meghatározható a chipset fogyasztása, amit mAh-ban adtam meg. Az egyes eseményekre számolt fogyasztás értékek az 5.2. ábrán látható táblázatban láthatóak.

Esemény	Áram [mA] (RMS)	Időtartam [s]
Újraindítás	67	8.76
Antenna aktiválás	37.7	1.36
Kapcsolódás a hálózathoz	106.7	16.02
Konfig parancsok	35.5	0.01
12 bájt (23 dBm, uplink)	125.1	1.56
50 bájt (23 dBm, uplink)	120.7	2.58
100 bájt (23 dBm, uplink)	111.9	3.03
200 bájt (23 dBm, uplink)	112.6	3.67
12 bájt (20 dBm, uplink)	65	2.21
50 bájt (20 dBm, uplink)	82.1	2.61
100 bájt (20 dBm)	84.8	2.31
200 bájt (20 dBm, uplink)	88.2	2.65
IDLE mód	3.5	60
PSM	1.38	-
8 bájt (20 dBm, uplink)	54	17.25
50 bájt (20 dBm, uplink)	54.5	16.25
firmware részlet 200 bájt (downlink)	50.1	23.5

5.2. ábra. A chipset áramfelvétele és ezek időtartama az események során – a kék színű sorok fejlesztő eszközön mért, a szürke színű sorok egy ipari eszközön mért értékek

Mode	Band	Condition	Tx power	Min	Typ ³	Max	Unit
Deep-sleep mode	-	Averaged current over a 10-second period			3		μA
Active mode	-	Averaged current over a 10-second period			6		mA
Rx-mode	All	Averaged current over a 10-second period			46		mA
Tx-mode	All	Averaged current over a 2-second period	-40 dBm		74		mA
			-7 dBm		75		mA
			3 dBm		78		mA
			13 dBm		100		mA
			23 dBm		220		mA

5.3. ábra. uBlox Sara N-210 adatlapja [33]

Méréseim során adatküldés esetén megmértem Power Class 3 (23 dBm) és Power Class 5 (20 dBm) adási teljesítmény mellett is a modul fogyasztását [40]. Minden eszköz a lehető legalacsonyabb teljesítménnyel szeretnének, hogy adjon fogyasztási megfontolások miatt. Az adási teljesítmény, ami mellett még feldolgozható a kibocsátott jele az eszköznek nagyban függ a lefedettségi viszonyoktól. Négy különböző méretű hasznos adat (12, 50, 100, 200 bájt) kiküldését mértem UDP üzenetként. Valójában ezek 40, 78, 128 és 228 bájtnyi (20 bájt IP, 8 bájt UDP fejléc) adat küldését jelentették. Emellett látható a táblázatban, hogy az alvó módban felvett

áram nagyon magas, ez a mérési kialakításom pontatlanságából ered, ugyanis μV nagyságrendű feszültség különbséget kellene pontosan mérnem, ami ilyen módszerrel nem kivitelezhető. Emiatt számításaim során az chipset adatlapi értékével (5.3. ábra) fogok számolni alvó mód esetén. A többi mért értékem az adatlapi forrásokban feltüntetett tipikus áramfelvétellel nagyságrendileg egyezik.

Az utolsó három sor a táblázatban egy parkolószenzoron mért értékeket takarnak. Ez az eszköz is NB-IoT hálózatot használ az átvitel során. Különösen az adatátvitelhez szükséges időtartamban mutatkozik eltérés a vizsgált esetekben, a fejlesztőeszköz és az iparban használt készülék között, ennek több oka lehet. Itt az átvitel során nem egyszerűen UDP üzeneteket használnak, hanem még egy CoAP alkalmazásrétegbeli protokoll fejléc is kiküldésre kerül az átvitel során tovább növelve az overheadet. Továbbá az eszköz küldés közbeni számítási folyamatai és szenzor tevékenységei is hozzájárulhatnak a hosszabb küldési időtartamhoz. Ezen viselkedés okának pontos meghatározásához, valamint egyéb módokban – PSM, IDLE – való fogyasztás méréséhez további vizsgálatok szükségesek a jövőben.

Az eszköz felkonfigurálása során a következő beállításokat kellett végezniem – a távközlésben megszokott AT parancsokkal [32] – az UDP adatküldéshez:

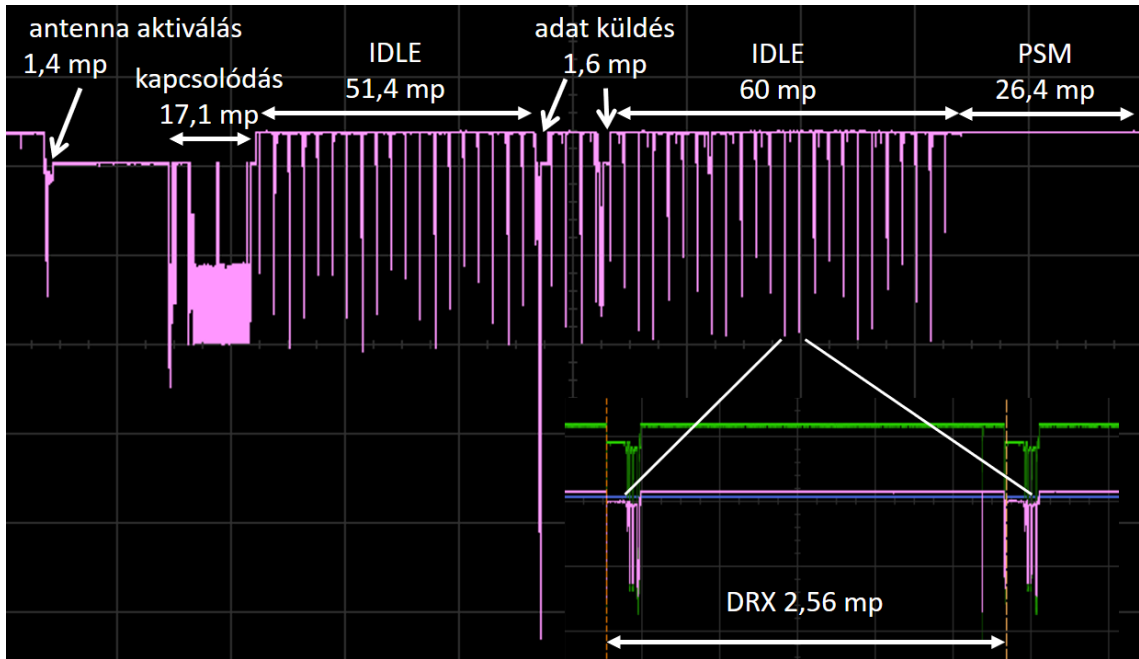
- AT+NRB – eszköz újraindítása;
- AT+CSCON=1 – debugoláshoz hasznos, visszaadja mikor kommunikál az eszköz a bázis állomással;
- AT+CEREG=5 – debugoláshoz hasznos, megadja a hálózati regisztrációs státuszt, valamint kijelzi mikor kapja meg az eszköz a PSM időzítőket;
- AT+CPSMS=1,,,"00000001","00000001" – ezekkel a paraméterekkel kérem a hálózattól a T3324 és T3412 időzítőnek, jelen esetben lényegtelen milyen paraméterekkel kértem a hálózat a meghatározott T3324 és T3412 időzítő értékeket küldte vissza;
- AT+CGDCONT=1,"IP","u.iot.mt.gr.hu" – itt határozom meg a PDP (Packet Data Protocol) értékeit, IP átvitelt szeretnék, valamint megadom, hogy melyik hozzáférési ponthoz csatlakozzon az eszköz;
- AT+CFUN=1 – aktiválom az antennát;
- AT+NBAND=20 - meghatározom a frekvenciát, amin kommunikálni szeretnék, ez a Magyar Telekom esetében 800 MHz;

- AT+COPS=1,2,"21630" – csatlakozás a hálózathoz, ahol a 216 Magyarországot, a 30 pedig a Magyar Telekomot takarja;
- AT+NPOWERCLASS=20,(3,5) – adási teljesítmény beállítása (Power Class 3 – 23 dBm, Power Class 5 – 20 dBm);
- AT+NSOCR="DGRAM",17,5500,0 – az 5500-as porton nyitok UDP socketet;
- AT+NSOSTF=0,"172.27.131.100",500,0x200,12,"48656c6c6f20576f726c6421" – egy 12 bájt nagyságú adatot küld a 172.27.131.100 IP címre, az 5500-as portra.

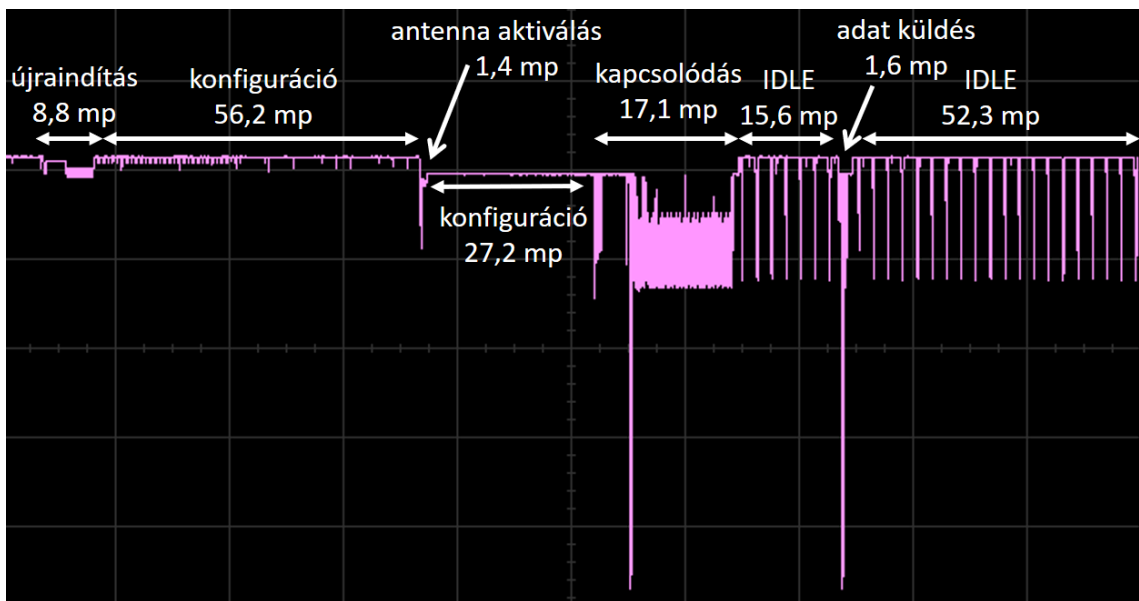
A legutolsó hálózati hangolás szerint T3412_E=0xc3, a T3324=0x1eA lett, ami a T3412 esetén 3*320 órát (40 nap) a T3324 időzítő esetén pedig 60 másodpercet jelent. Ez azt takarja, hogy aktív mód után 60 másodperc elteltével lép át mély alvás módba, valamint 40 naponként ébred fel az eszköz TAU küldésre. Ezt sajnos nem sikerült egyelőre lemérni, de körülbelül egy 200 bájtos adat küldésnek felel meg. eDRX-et jelenleg nem használ a hálózat csak DRX-et, aminek értéke 2,56 másodpercre volt állítva (5.4. ábra). Méréseimet végig ezen értékek mellett végeztem.

Az 5.4. és 5.5. ábrán különböző események egymás utánja látható. Ezek az ábrák hosszú mérés-sorozatok végzésének hatására álltak elő. Miután a mérési módszertan letisztult, ezekhez hasonló, világosan értelmezhető ábrákhoz jutottam.

Először az eszközt újraindítottam, majd aktiváltam az antennát, csatlakoztam a hálózathoz, ekkor egyből IDLE módba léptem. Itt látható a 2,56 másodpercenkénti DRX, forgalmaztam 50 bájt adatot utána pedig újra IDLE mód következett (5.5. ábra). Az események időtartama és fogyasztása az ábrán látható. Még egy hasonló ábrát mutatnék (5.4. ábra), itt aktiválom az antennát, csatlakozom a hálózathoz, ekkor egyből IDLE módba lépek, forgalmazok, majd újra IDLE mód és végül PSM következik a 60 másodperc letelte után.

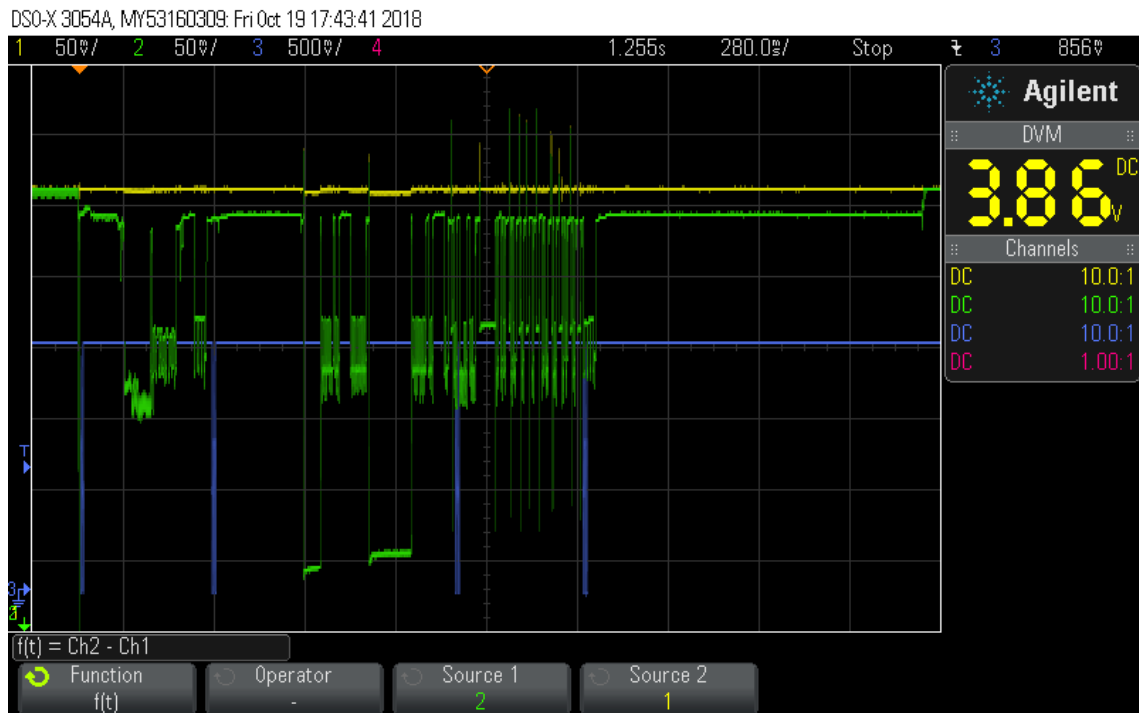


5.4. ábra. Különböző események során a chipset áramfelvétele és ezek időtartama (DRX és PSM-el)



5.5. ábra. Különböző események során a chipset áramfelvétele és ezek időtartama

A tipikus adatküldés jelalakja a 5.6. ábrán látható. A sárga színű jel az ellenállás előtti, táplálás oldali feszültséget mutatja, a zöld az ellenállás utáni feszültség, a kék pedig az UART Rx forgalma. Látható, hogy a kiadott AT parancs után egyből megjelenik az adatküldésre jellemző jelalak.



5.6. ábra. 50 bájt adatküldés jelalakja

5.2. Várható üzemidő becslése

Négy különböző esetben becsültem meg adott akkumulátor mellett a várható üzemidőt, ami több alkalmazás adatforgalmi igényét lefedi:

- Napi egyszer 200 bájt forgalmazása, ami valamilyen okos mérőóra alkalmazásnak, mezőgazdasági termőföld monitorozásnak vagy bármilyen olyan alkalmazás adatigényének felel meg, amely nem igényel beavatkozást, csak állapotmonitorozást;
- Naponta 8-szor 100 bájtot forgalmazok, ez megfelelő adat modell lehet életjelek, mezőgazdasági haszonállatok, ipari alkalmazások monitorozására. A gyakran generált adatok miatt a beavatkozás igénye is fellép, például különböző paraméterek állítása ipari alkalmazásoknál, mezőgazdasági folyamatoknál;
- Átlagosan óránként 4-szer 50 bájt kerül kiküldésre, ami alkalmas lehet ipari alkalmazásokhoz, mezőgazdasági folyamatokhoz, *wearables* (okos óra, fitness pánt, stb.), helymeghatározó eszközök adatforgalmához, mivel ez eredményezi az esetek közül a legnagyobb fogyasztást. Olyan eszközökhöz lehet alkalmas, amik tölthetőek így kisebb akkumulátor kapacitással is használhatóak;
- Napi 100-szor 12 bájtot forgalmazok. Ez alkalmas lehet közel valós idejű megfigyeléshez adott feltétel teljesülése esetén, helymeghatározáshoz, életjelek mo-

monitorozásához. Sokszor az intenzívebb adatforgalom egy esemény hatására generálódik, nem pedig periodikusan, azonos időközönként kerül küldésre a 100-szor 12 bájt.

Az újraindítás, konfigurációs parancsok, az antenna bekapcsolása és a csatlakozás a hálózathoz műveletek csak egyszer elvégzendők. Becslésemben figyelembe vettem ezen események fogyasztását is. Ezek azonban az eredményt nem befolyásolják, ha eltekintünk tőlük és csak az aktív, IDLE és alvó módokat veszem figyelembe, ugyanezt az eredményt kapom.

Meghatároztam, hogy az adott esetekben napi hány üzenet kerül kiküldésre, ezzel egyenlő számú 60 másodperces IDLE időszak van. Az általam számolt becslések a legrosszabb esetekre vonatkoznak. Azzal az esettel, amikor még az IDLE időszakban küld újra az eszköz adatot nem foglalkozom és nem is igazán lehet általános felhasználási esetek becslésénél számolni vele. Azonban, ha egy konkrét alkalmazásnál meg vannak adva milyen esetek fordulnak elő, milyen gyakran van szükség adat küldésre könnyen figyelembe vehető. Ilyenkor a T3324-es időzítő minden küldéskor újra indul, tehát a küldések között és az utolsó küldés utáni 60 másodperces időszakot tölti az eszköz IDLE módban. A nap maradék részét a modul az aktív és IDLE módon kívül mély alvás módban tölti, tehát $t_{PSM} = 24 - t_{active} - t_{IDLE}$, amit a jellemző mAh akkumulátor kapacitás mértékegység miatt órában fejezek ki.

Az 5.7. ábra táblázatában láthatók a mérések alapján végzett számításaim eredményei. Ezek tételesen tehát az adott mennyiségű különböző esetekhez a napi aktív, IDLE és PSM módban töltött idők, ebből egy szorzással adódnak a napi fogyasztások mAh-ban.

Esetek	Áramfelvétel [mA]	Napi idő [óra]	IDLE napi idő [óra]	PSM napi idő [óra]	Napi fogyasztás [mAh]
100*12 Bájt naponta (23dBm)	125.1	0.04340	1.67	22.29	11.30
4*50 Bájt óránként (23dBm)	120.7	0.08606	2.00	22.00	17.42
8*100 Bájt naponta (23dBm)	111.9	0.00673	0.13	23.87	1.29
200 Bájt naponta (23dBm)	112.6	0.00102	0.02	23.98	0.24
100*12 Bájt naponta (20dBm)	65	0.06140	1.67	22.27	9.86
4*50 Bájt óránként (20dBm)	82.1	0.08686	2.00	22.00	14.17
8*100 Bájt naponta (20dBm)	84.8	0.00514	0.13	23.86	0.97
200 Bájt naponta (20dBm)	88.2	0.00074	0.02	23.98	0.19

5.7. ábra. *Különböző esetek napi fogyasztása – a bemutatott mérési eredmények alapján végzett számításokból*

Már itt is látható, hogy fogyasztás szempontjából fontosabb, hogy hányszor kell felébredni és küldeni az eszköznek, mint a küldendő adat mérete. Ezek után meghatározom az egyes adatforgalmi esetekhez nagyságrendileg mekkora akkumulátor szükséges, majd ebből várható üzemidőt számolok ideális esetre, valamint végzek becslést olyan esetre is, ahol figyelembe veszem az akkumulátor önkisülését. A táblázat utolsó két oszlopában meghatározom, hogy mely alkalmazásokhoz és technológiához – Cat-M1 vagy NB-IoT – alkalmas az adott adatforgalmi modell.

Esetek	Akkumulátor kapacitás [mAh]	Várható üzemidő ideális eset 23 dBm / 20 dBm	Várható üzemidő 23 dBm / 20 dBm	Alkalmazások	Ajánlott technológia
100*12 Bájtnaponta	500	44.2 nap / 50.7 nap	-	helyzet meghatározás, életjelek monitorozása	NB-IoT/Cat-M1
4*50 Bájtnaponta	500	28.7 nap / 35.3 nap	-	wearables, ipari alkalmazások	Cat-M1
8*100 Bájtnaponta	5000	10.63 év / 14.09 év	9.65 év / 12.43 év	okos mérőórák, ház automatizálás, smart grid	NB-IoT/Cat-M1
200 Bájtnaponta	1000	11.19 év / 14.05 év	10.11 év / 12.4 év	mezőgazdasági termőföld monitorozás	NB-IoT

5.8. ábra. Várható üzemidők

A táblázat elkészítéséhez meghatároztam a várható üzemidőt erre a négy alkalmazásra ideális esetben 23 és 20 dBm adó teljesítmény mellett. Az önkisülés és az újratöltés általi parazita hatásokat figyelembe véve is végeztem becslést a várható üzemidőre. Lítium tionil-klorid esetén az évente 1%-os töltés csökkenés jó becslése az önkisülési rátának, ezáltal a várható üzemidő: $t_{ideal} * 0.99^t = t$, ahol t_{ideal} a várható üzemidő ideális esetben, t pedig pedig a várható üzemidő, ahol már az akkumulátor önkisülését számításba veszem. Ezt az egyenletet numerikus módszerrel oldottam meg a *Wolframalpha* [35] segítségével, az eredményből pedig könnyen meghatározható a konstans, amivel megszorozva az ideális üzemidőt adódik a várható élettartam önkisülés jelensége esetén. A kapott értékek 5.8. ábra a táblázatában láthatóak.

A négy csoport akkumulátor igényei szerint kettő – 8*100 bájtnaponta és 200 bájtnaponta – nagyobb elsődleges akkumulátorról való működtetése esetén elérhető a 10 éves üzemidő beavatkozás nélkül. A másik kettő alkalmazás – 100*12 bájtnaponta és 4*50 bájtnaponta –, melyek tölthetőek és másodlagos akkumulátorról működnek vagy pedig állandó hálózati tápforrás áll rendelkezésükre, ahol a fogyasztás nem annyira kritikus. A másodlagos akkumulátort használó két 500 mAh-s esetben a várható üzemidő oszlopát üresen hagytam (5.8. ábra). Ennek oka, hogy nem adható meg egy konkrét szám olyan formában, mint az elsődleges akkumulátor önkisülés jelenségének figyelembevételkor. Itt a folyamatos újratöltések miatt romlik az akkumulátorok kapacitása, minél többször töltik újra az adott akkumulátort, annál kisebb lesz ez az érték. Jellemzően pár száz alkalommal szokás újratölteni egy másodlagos akkumulátort, de ez a szám akkumulátor típusonként nagyon változó lehet.

6. fejezet

Mérési eredmények kiértékelése

Dolgozatomban a következő kérdésekre kerestem a válaszokat:

- Mik az IoT eszközök fogyasztását legjobban befolyásoló hatások?

Meghatároztam az egyes módokban jellemzően mennyit fogyaszt egy NB-IoT modul, megmértem különböző adatforgalmak esetén hogy alakul a hálózati modem fogyasztása. Méréseimből kiderült, az adatküldések száma jobban befolyásolja a fogyasztást, mint a küldött adat mérete. Ismertettem a két legfontosabb 3GPP által szabványosított funkciót a PSM-et és az eDRX-et. Az eredmények alapján a PSM-et emelem ki, amely hatalmas mértékben növeli egy IoT eszköz akkumulátorának élettartamát, miközben a hálózati operátor saját preferenciái szerint szabhatja meg milyen időzítő értékeket használjanak a hálózathoz csatlakozott eszközök

- Milyen szempontokat kell figyelembe venni az akkumulátor megválasztásakor?

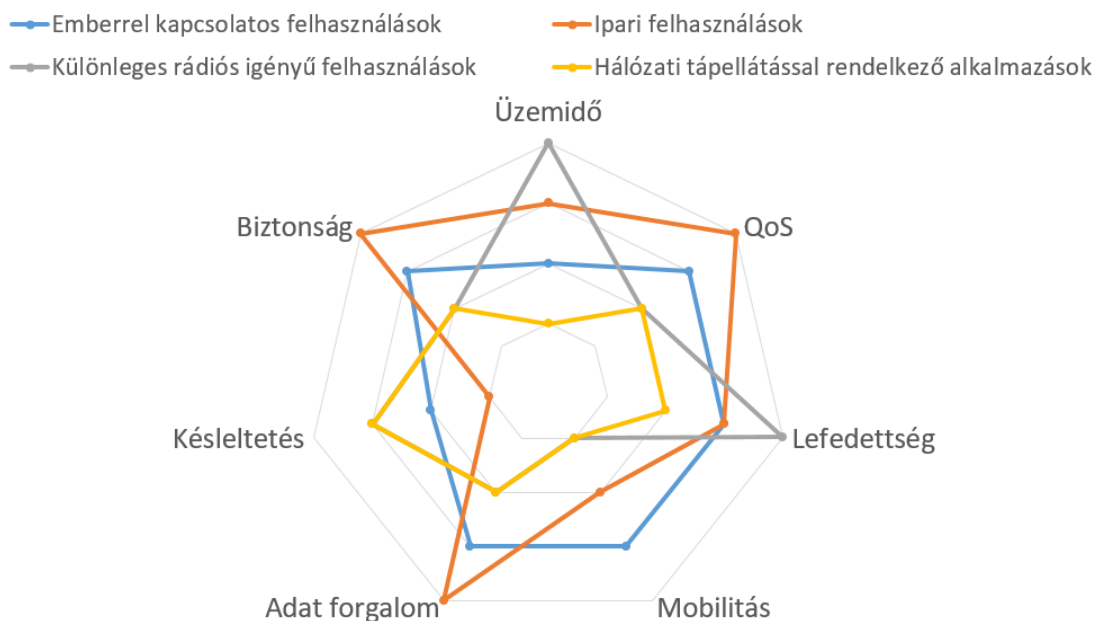
Akkumulátor megválasztásakor a legfontosabb tényező az akkumulátor energiaforrásának fajtája, ám emellett a feszültség stabilitás és önkisülési ráta is fontos jellemzők. IoT alkalmazások tervezésekor számolni kell az akkumulátor nem-ideális jellegével, parazita jelenségeivel, mint például a feszültségkésleltetés, vagy az önkisülés jelenségével, valamint a hőmérséklet viszonyokkal. Részletesen ismertettem a Lítium tionil-klorid akkumulátor tulajdonságait, amit előszeretettel használnak IoT alkalmazásokban jó feszültség stabilitási és önkisülési tulajdonságai miatt.

- A különböző IoT felhasználásoknak mik a jellegzetességeik, hogyan csoportosíthatóak?

Az LPWA alkalmazásokat csoportokba osztottam 5 tulajdonságot figyelembe véve:

- Fogyasztás- akkumulátor élettartam;
- Lefedettség szükséglet;
- Várható napi adatmennyiség;
- Késleltetés;
- Mobilitás.

Ezek alapján négy csoport alakult ki: az ember-közeli felhasználásoké, az ipari és mezőgazdasági felhasználásoké, a különleges rádiós igényekkel rendelkező alkalmazásoké, valamint a hálózati tápforrásról működő felhasználásoké. Mind-egyik csoporthoz meghatároztam a tipikusan rájuk jellemző tulajdonságokat (6.1. ábra). Az egyes alkalmazás-csoportokhoz meghatároztam, milyen igényeik lehetnek – mint az emberi felhasználásoknál a magasabb biztonsági intézkedések és hangátvitel, vagy az ipari mezőgazdasági alkalmazásoknál esetlegesen kis késleltetés, beavatkozás, paraméter állítás lehetősége.



6.1. ábra. Alkalmazások csoportok jellemzői

- Mekkora üzemidőt képesek elérni az alkalmazások különböző igények mellett, ez hogyan becsülhető?

Néhány jellegzetes adatforgalmi modellre megbecsültem, hogy az adott kapacitású akkumulátorokkal mennyi a maximális várható élettartamuk ideális esetben, valamint úgy, ha figyelembe vettem az akkumulátor önkisülési tulajdonságát. Az elvártanak megfelelően több évvel növelheti az alacsonyabb adási teljesítmény az üzemidőt. Ezen mérések és számítások összegzett eredményei az 5.8. ábrán láthatók.

- A különböző alkalmazások igényeit melyik technológia elégíti ki és miért?

Meghatároztam, hogy milyen alkalmazások illenek az NB-IoT és a Cat-M1 technológiákhoz. Az NB-IoT kisebb sáv szélességet, de jobb lefedettséget biztosít, a kis adatmennyiségek miatt, alacsonyabb fogyasztás jellemző ezen alkalmazásokra. A Cat-M1, olyan alkalmazások számára ajánlott, melyeknek nagyobb adatigényeik vannak, szükség van esetleg hangátvitelre, valamint mobilitásra az eszközöknek. Nyilván sok alkalmazás van, amelyeknél általánosan nem eldönthető melyik technológia lenne alkalmasabb a számára, ilyenkor pontosan specifikált igények döntenek, de az is lehetséges, hogy mind a két technológia ki tudja szolgálni az alkalmazás igényeit.

7. fejezet

Összefoglalás és jövőbeli tervek

Eredményeim összefoglalását az 5. fejezet ábrái szemléltetik a leginkább. Ezek több mérés-sorozat részeredményeiből adódtak; a dolgozatban ezeket már letisztult, összegzett formában tettem közzé. Az eredmények összegzésével a 6. fejezetben igyekeztem támpontot nyújtani mind az IoT alkalmazás-fejlesztőknek, mint a távközlési operátoroknak ahhoz, hogy a különféle (négy csoportba osztott) alkalmazás-típusoknak milyen jellemzői szerint – és hogyan – érdemes kiválasztani a hálózati technológiát.

Nem feltétlenül az adatforgalmi szám adatok, az abból számolt fogyasztás és az üzemidő konkrét értéke a lényeges véleményem szerint a dolgozatban, nyilván a nagyságrendjük fontos a kapott eredményeknek, azonban az elv, ahogy ezek meghatározhatóak valamint hatások és szempontok, amiket figyelembe kell venni egy ilyen IoT alkalmazás tervezésénél – ezek képezik a lényegi értékét munkámnak. Ha egy más adat igényű alkalmazás számára, másik eszközön, más fajta akkumulátorral kell meghatározni fogyasztást, üzemidőt, abban az esetben is használhatóak az általam ismertetett alapelvek. A munkámat ki szeretném bővíteni, egyszerű mérésekkel, mint egyirányú downlink adat forgalom vizsgálata vagy a hőmérséklet ingadozás figyelembe vétele és a mérési elrendezés finomítása nagyon kis áramerősség esetén. Továbbá komplexebb mérésekkel, ahol összehasonlítom különböző IP feletti protokollok hatékonyságát energia felhasználás szempontjából és egy teljes körű méréssel, ahol egy már kész IoT berendezésnek az energiafogyasztását vizsgálom hosszú távon.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani a Hollósi Gergelynek, aki mérési eljárás kidolgozásában, a szükséges eszközök biztosításában és többszöri konzultációval segítette munkámat.

Irodalomjegyzék

- [1] G. Soos, D. Kozma, F. N. Janky, P. Varga, "IoT Device Lifecycle a Generic Model and a use case for Cellular Mobile Networks" IEEE 6th International Conference on Future Internet of Things and Cloud, Barcelona, Spain, Aug, 2018
- [2] Wi-Fi device shipments to surpass 15 billion by end of 2016. Wi-Fi Alliance, 2016. [Online]. Available: <http://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-device-shipments-to-surpass-15-billion-by-end-of-2016>.
- [3] IEEE 802.11ac, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz," IEEE Standard, 2013.
- [4] J. Nieminen, T. Savolainen, M. Isomaki, B. Patil, Z. Shelby, C. Gomez, "Transmission of IPv6 packets over Bluetooth low energy," IETF RFC 7668, Oct. 2015.
- [5] C. T. Hager, S. F. Midkiff, "Demonstrating Vulnerabilities in Bluetooth Security," IEEE GLOBECOM'03, San Francisco, CA, USA, Dec. 2003.
- [6] Zigbee Alliance, "Zigbee-IP specification," Mar. 2013.
- [7] 3GPP, "Standardization of NB-IOT completed," 3GPP News and Events, June 2016. [Online]. Available: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb_iot_complete
- [8] M.Olsson, S. Sultana, S.Rommer, L.Frid, C. Mulligan, "EPC and 4G Packet Networks," Second Edition, Elsevier, Oct. 2012.
- [9] P. Varga, S. Plosz, G. Soos, Cs. Hegedus, "Security Threats and Issues in Automation IoT," 13th International Workshop on Factory Communication Systems - a Conference (WFCS), IEEE, Trondheim, Norway, May, 2017.

- [10] D. Kozma, G. Soos, P. Varga, "Supporting LTE Network and Service Management through Session Data Record Analysis," *Infocommunications Journal*, Vol. VIII, no. 2., pp. 11-16., June 2016.
- [11] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, O.Hersent, "WAN Specification," LoRa Alliance, 2016.
- [12] The Things Network, "LoRaWAN Limitations," 2017. [Online], Available: <https://www.thethingsnetwork.org/wiki/LoRaWAN/Limitations>
- [13] Stephen Evanczuk, Contributed By Digi-Key's North American Editors, "Speed Development of Secure Cellular Connected IoT Applications", June 2018. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2018/jun/speed-development-secure-cellular-connected-iot-applications>
- [14] Gus Vos, "What is LPWA for the Internet of Things? Part 1: The Four C's of IoT", 2017. [Online]. Available: https://www.sierrawireless.com/iot-blog/iot-blog/2016/07/what_is_lpwa_for_the_internet_of_things_part-1_the_thre_cs_of_iot/
- [15] 10 years battery life calculation for Cellular IoT, May 2017. [Online]. Available: <https://blog.3g4g.co.uk/2017/05/10-years-battery-life-calculation-for.html>
- [16] N. Poursafar, M. E. E. Alahi and S. Mukhopadhyay, "Long-range wireless technologies for IoT applications: A review," 2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST), Sydney, NSW, 2017.
- [17] LTE Quick Reference: NB-IoT, June 2016. [Online]. Available: http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_NB_LTE.html
- [18] eMTC (LTE Cat-M1), Dec. 2017. [Online]. Available:: <https://halberdbastion.com/technology/iot/iot-protocols/emtc-lte-cat-m1>
- [19] NB-IoT (LTE Cat-NB1), May 2017. [Online]. Available: <https://halberdbastion.com/technology/iot/iot-protocols/nb-iot-lte-cat-nb1>
- [20] Rohde & Schwarz, "NB-IoT: Overview of Internet of Things with a focus on NB-IoT (part 1 of 6)", 2018. [Online]. Available: <https://blog.mobile-network-testing.com/market-technology-trends/evolving-technologies/overview-internet-of-things-technologies/>

- [21] Rohde & Schwarz, "eMTC and NB-IoT pave the way to 5G/IoT", 2018. [Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/fi/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/wireless-5g-and-cellular/lte-lte-advanced/in-focus/emtc-and-nb-iot-pave-the-way-to-5g-iot_230416.html
- [22] Sigfox Singapore pte ltd: "Spectrum, roaming and qos related requirements in machinte-to-machine ("M2M") communications" Oct. 2016. [Online]. Available: https://www.trai.gov.in/sites/default/files/SIGFOX_CP_18102016.pdf
- [23] GSMA, "NB-IoT Forum Update", Nov. 2016. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/11/Presentation-02.-Global-MIoT-Summit-Tokyo-Nov-2016-Chairs-slides-v0.2.pdf>
- [24] Rohde & Schwarz, "NB-IoT/eMTC power saving features: eDRX vs. PSM", 2018.[Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/ca/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/iot-m2m/iot-m2m-webinars-videos/nb-iot-emtc-power-saving-features-edrx-vs.-psm_234108.html
- [25] Joerg Koepp, Rohde & Schwarz, "LTE Advanced Pro: the mobile future of the Internet of Things", [Online]. Available: <https://www.electronic.nu/2016/09/18/lte-advanced-pro-the-mobile-future-of-the-internet-of-things/>
- [26] IOT ARCHITECT, "IoT Use Case - Battery Powered Device", [Online]. Available: <https://www.iot-architect.de/iot-use-case-battery-powered-device>
- [27] Deepak Gupta, "IoT Device Battery Selection", Aug. 2018.[Online]. Available: <http://www.ensembletech.in/iot-device-battery/>
- [28] Axotron Blog, "More On Voltage Delay in Lithium Thionyl Chloride Batteries", Jul. 2015.[Online]. Available: <http://axotron.se/blog/more-on-voltage-delay-in-lithium-thionyl-chloride-batteries/>
- [29] What is Passivation of Lithium Battery?, 2016.[Online]. Available: <http://www.minamoto.com/9-what-is-passivation-of-lithium-battery/>
- [30] XENO XL-205F: <http://www.xenoenergy.com/eng/prod/genaral06.asp>
- [31] uBlox, "EVK-N2 SARA-N2 series Cellular Evaluation Kits", [Online]. Available: https://www.u-blox.com/sites/default/files/EVK-N2_UserGuide_
- [32] uBlox, "SARA-N2 AT Commands Manual", [Online]. Available: https://www.u-blox.com/sites/default/files/SARA-N2_ATCommands_

- [33] uBlox, "SARA-N2 Data Sheet", [Online]. Available":
https://www.u-blox.com/sites/default/files/SARA-N2_DataSheet_
- [34] uBlox, "SARA-N2 System Integration Manual", [Online]. Available":
https://www.u-blox.com/sites/default/files/SARA-N2_SysIntegrManual_
- [35] Wolframalpha, [Online]. Available: <https://www.wolframalpha.com>
- [36] 3GPP TS 24.008 V3.20.0, "Mobile radio interface layer 3 specification; Core Network Protocols; Stage 3," Release 3, 2005.
- [37] Bluetooth SIG, "Core Specification", Dec. 2016.[Online]. Available:
<https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>
- [38] "Coverage Analysis of LTE-M Category-M1", Jan. 2017.[Online]. Available:
<https://altair-semi.com/wp-content/uploads/2017/02/Coverage-Analysis-of-LTE-CAT-M1-White-Paper.pdf>
- [39] Nokia, "LTE-M – Optimizing LTE for the Internet of Things", Sep. 2015.[Online]. Available:: <https://www.slideshare.net/wiless/nokia-lte-m-optimizingltefortheinternetofthingswhitepaper>
- [40] 3rd Generation Partnership Project," Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network; Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT), Dec. 2015.[Online]. Available: (Release 13)"
http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/45_series/45.820/
- [41] Vodafone, "Narrowband-IoT: pushing the boundaries of IoT" Jan. 2017.[Online]. Available: <https://www.vodafone.com/business/news-and-insights/white-paper/narrowband-iot-pushing-the-boundaries-of-iot>
- [42] N. S. Knyazev, V. A. Chechetkin and D. A. Letavin, "Comparative analysis of standards for Low-power Wide-area Network," 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications
- [43] 3GPP, "Low Power Wide Area Technologies" Oct. 2016.[Online]. Available::
<https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf>
- [44] GSMA, "NB-IoT DEPLOYMENT GUIDE to Basic Feature set Requirements" Apr. 2018.[Online]. Available:
<https://www.gsma.com/iot/nbiot-deployment-guide-v2/>

- [45] Cisco, "Power Saving Mode (PSM) in UEs", Apr. 2016.[Online]. Available:
https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/asr_5000/21/MME/b_21_MME_Admin/b_21_MME_Admin_chapter_0111010.pdf
- [46] Cisco, "eDRX Support on the MME", Aug. 2016.[Online]. Available:
https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/asr_5000/21/MME/b_21_MME_Admin/b_21_MME_Admin_chapter_01111.pdf
- [47] uBlox, "SARA-N2 series", [Online]. Available::
<https://www.u-blox.com/en/product/sara-n2-series>
- [48] Quectel, "LTE BG96 Cat.M1/NB1", [Online]. Available: & EGPRS Module:
<https://www.quectel.com/product/bg96.htm>
- [49] uBlox, "EVK-N2", [Online]. Available:
<https://www.u-blox.com/en/product/evk-n2>
- [50] Agilent, "DSOX3054A Oscilloscope", [Online]. Available:
<https://www.keysight.com/en/pdx-x201851-pn-DSOX3054A/oscilloscope-500-mhz-4-channels?cc=HU&lc=eng>